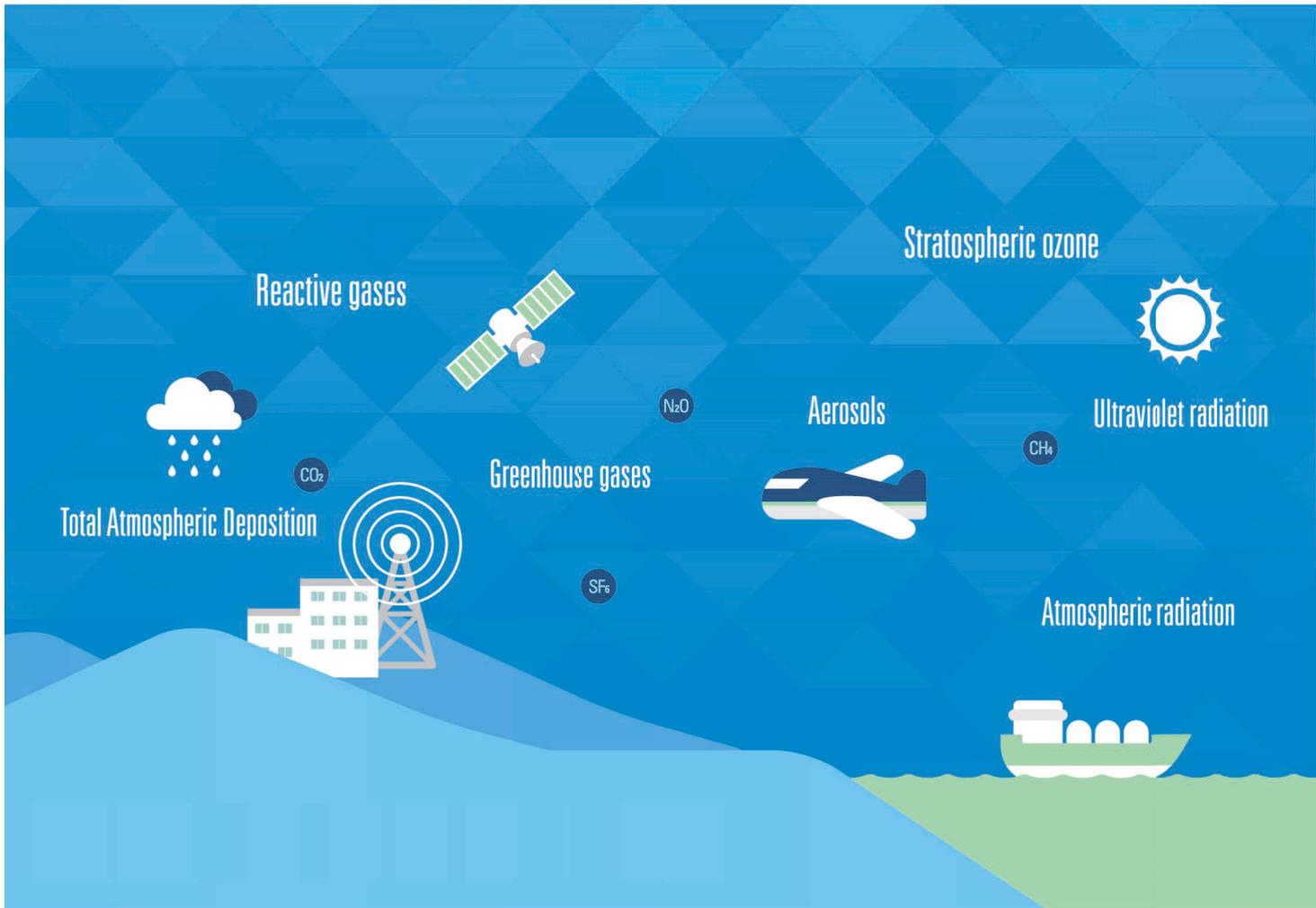




2020

지구대기감시 보고서

Report of Global Atmosphere Watch 2020



책임운영기관

국립기상과학원 책임·혁신·상생 전문



지구대기감시요소	viii
요 약	xii
제1장 머리말	1
제2장 한반도 지구대기감시업무 현황	7
2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램	8
2.2 한반도 지구대기감시소 현황	11
2.3 세계기상기구 육불화황 세계표준센터	14
제3장 기상특성	23
3.1 2020년 기상특성	24
3.2 기후변화감시소 기상 특성	53

제4장 온실가스	67
4.1 온실가스 감시의 목적	70
4.2 이산화탄소(CO ₂)	72
4.3 메탄(CH ₄)	99
4.4 아산화질소(N ₂ O)	102
4.5 육불화황(SF ₆)	104
4.6 염화불화탄소(CFCs)	106
4.7 2020년 온실가스 특성 분석	109
제5장 반응가스	113
5.1 반응가스의 감시 목적	114
5.2 반응가스 특성	116
5.3 지표오존(O ₃)	117
5.4 일산화탄소(CO)	120
5.5 질소화합물(NO _x)	123
5.6 이산화황(SO ₂)	126
5.7 2020년 반응가스 특성 분석	129
제6장 에어로졸	133
6.1 에어로졸 감시의 목적	134
6.2 에어로졸 물리 특성	138
6.3 에어로졸 광학 특성	144
6.4 에어로졸 화학 특성	162
6.5 2020년 에어로졸 특성 분석	178

제7장 대기복사	187
7.1 대기복사 감시의 목적	188
7.2 직달일사, 산란일사	189
7.3 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)	191
7.4 지구상향복사, 지구하향복사	193
7.5 순복사	194
7.6 2020년 대기복사 특성 분석	195
제8장 성층권오존	201
8.1 성층권오존 감시의 목적	202
8.2 오존전량	203
8.3 오존연직분포	220
8.4 남극오존홀	236
8.5 2020년 성층권오존 특성 분석	243
제9장 자외선	251
9.1 자외선 감시의 목적	252
9.2 자외선A	253
9.3 자외선B	254
9.4 서울 자외선 복사량	255
9.5 2020년 자외선 특성 분석	259

제10장 총대기침적 **263**

10.1 총대기침적 감시의 목적	264
10.2 2020년 강수채취율	266
10.3 pH(산성도)	269
10.4 전기전도도	272
10.5 강수이온성분	274
10.6 총대기침적량	285
10.7 2020년 강수성분 발생원 분석	290

제11장 기 타 **297**

11.1 수증기 농도 연직분포 및 특성분석	298
11.2 라돈 농도 및 특성 분석	302

부 록 **317**

1. 관측자료품질보증체계	318
2. 지구대기감시 관측자료	346
3. 기후변화감시 기술노트 목록	389
4. 지구대기감시 매뉴얼 목록	390
5. 기후변화감시 관측자료 활용	391
6. 기후변화감시기술 특허 보유 현황	398
7. 지구대기감시 보고서 작성자	400

참고문헌 **402**

온실가스

- 지구 대기의 장파복사 성질을 변화시켜 지구온난화를 유발하는 대표적인 기체
- 한번 배출되면 대기 중 오래 체류하며, 직·간접적 복사강제력에 영향

이산화탄소 CO ₂	온실가스 중 가장 많은 양을 차지하며 온실효과에 첫 번째로 기여 대기 중 체류시간 200~300년
메탄 CH ₄	두 번째로 영향력이 큰 온실가스로 100년을 기준으로 CO ₂ 와 같은 농도로 가정할 시 CO ₂ 보다 약 28배 강한 온실효과, 대기 중 체류시간 약 9년
아산화질소 N ₂ O	온실가스 중 온실효과에 세 번째로 기여하며, 100년을 기준으로 CO ₂ 와 같은 농도로 가정할 시 CO ₂ 보다 약 265배 강한 온실효과, 대기 중 체류시간 약 114년
육불화황 SF ₆	대기 중 존재하는 양이 1조분의 1로 적으나, 100년을 기준으로 CO ₂ 와 같은 농도로 가정할 시 CO ₂ 보다 약 22500배 높음, 대기 중 체류시간 약 580~1400년
염화불화탄소 CFCs	몬트리올 의정서에 의해 대기 중 농도가 차츰 줄어들고 있으나 100년을 기준으로 CO ₂ 와 같은 농도로 가정할 시 CO ₂ 보다 약 4660~13900배 높은 온실효과 대기 중 체류시간 약 40~100년

반응가스

- 인위적 활동 혹은 자연적으로 대기 중에 배출
- 화학반응으로 대기 중 체류 시간이 짧지만 사람, 생물에 해로운 영향
- 대기화학반응을 통해 CO₂를 생성하고, CH₄의 소멸을 늦추거나(온실효과), 에어로졸 형성에 관여(냉각효과)

지표오존 O ₃	광화학 오염물질, 온실가스, OH 라디칼의 주요 생성원 성층권 오존의 유입 혹은 광화학 반응을 통한 생성 대기 중 체류시간 1주일~1개월
일산화탄소 CO	대기화학반응으로 온실가스(CO ₂ , CH ₄)의 대기수명에 영향 줌 탄소화합물(예: 화석연료), 불완전연소, 산불 등으로 생성 대기 중 체류시간 10일~1년
질소산화물 NO _x	질산 에어로졸의 전구체, 대기화학반응으로 O ₃ , CO ₂ , CH ₄ 농도 변화에 영향 줌 자동차 배기가스, 생체소각, 산불, 번개, 토양 등에서 발생 대기 중 체류시간 수 시간~1주일
이산화황 SO ₂	아황산가스, 황산 에어로졸의 전구체, 화석연료 연소, 산불, 화산 등에서 발생 OH 라디칼과 반응 혹은 액상 표면에 침적으로 소멸 대기 중 체류시간 1주일 이내

에어로졸

- 인위적 활동 및 자연적으로 대기 중에 배출되어 수 일 동안 체류
- 태양복사를 산란(냉각효과)·흡수(온실효과)하고 구름형성과정에 영향을 주며, 전 지구 평균적으로 음(-)의 복사강제력을 가짐

물리특성	PM10 질량농도, 크기별 수농도, 응결핵 수농도(총수농도) (에어로졸의 크기와 수농도 등 기본정보)
광학특성	광산란계수, 광흡수계수, 광학깊이 (에어로졸 복사강제력 이해를 위한 기본 관측 요소)
화학특성	수용성 이온성분 및 원소성분* (에어로졸 발생원 추적을 위한 기초 정보 제공)
연직분포	고도별 후방산란계수 및 비편광도 (에어로졸 유형(황사, 미세먼지 등), 구름 등의 고도별 정보 제공)

* 수용성 이온 성분: 9종(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})

원소 성분: 20종(Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti, Mn, Zn, Cu, V, Cr, Co, Ni, Sr, Ba, Pb, Mo)

대기복사

- 지구 복사 평형을 유지하고 온난화에 대응하기 위해 필수적인 감시요소

태양상향복사	지표로부터 반사되거나 구름 및 에어로졸에 의해 산란되어 방출되는 일사
태양하향복사 (전천일사)	태양으로부터 지표에 도달하는 모든 일사
직달일사	태양으로부터 직접 지표에 도달하는 일사
산란일사	공기입자 및 구름 등에 의해 산란되어 지표에 도달하는 일사
지구상향복사	지표에서 대기로 방출되는 적외복사
지구하향복사	구름이나 대기에서 지표로 방출되는 적외복사
순복사	태양 및 지구복사의 입사량과 방출량의 차이

지구대기감시요소

성층권오존

- 태양으로부터 입사되는 유해자외선으로부터 생태계를 보호
- 태양에너지를 흡수하여 전지구 기후변화에 영향(성층권오존은 냉각효과/대류권오존은 온실효과)

오존전량 단위면적 상공 대기층 전체에 분포하는 오존의 누적 총량
오존전량의 90% 가량이 성층권에 분포되어 성층권오존 변화감시의 지표

연직오존 오존농도의 연직적인 분포

자외선

- 태양광 중 가시광선보다 짧은 파장 영역의 복사광
- 인체에 유해할 뿐만 아니라 가축, 농작물의 생육에도 악영향

자외선A 피부 노화와 같은 장기적인 피부손상을 일으키며 노출 지속시간에 따라 손상이 커지기 때문에 일 누적값으로 분석
(320~400 nm)

자외선B 피부암, 백내장 등을 유발하며 높은 자외선 값일수록 발병확률이 높아지기 때문에 일 최대값으로 분석
(280~320 nm)

총대기침적

- 대기 중 인위적 및 자연적 발생된 가스와 입자들이 대기로부터 제거되는 중요한 과정

건성침적 대기 중 가스상·입자상 물질이 중력에 의해 지면에 도달하는 과정
* 분석성분: pH(산성도), 전기전도도, 수용성 이온 성분: 9종 (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})

습성침적 대기 중 가스상·입자상 물질이 강수(비, 눈, 우박 등)에 의해 제거되는 과정
* 건성침적과 동일한 요소를 분석함

1. 온실가스

- 코로나19 기간에도 이산화탄소(CO₂) 농도 지속 증가
 - 안면도: 420.4 ppm (2020년 증가율: 2.7 ppm/year, 최근 10년 증가율: 2.7 ppm/year)
 - ※ 전지구: 412.5 ppm (2020년 증가율: 2.4 ppm/year, 최근 10년: 2.4 ppm/year)
- 2020년 CO₂ 배출량 전지구 -7%, 한반도 -6% 감소하였으나, 대기 중 농도에 즉각적으로 반영되기 어려운 수준으로 최근 10년과 같은 증가율로 지속 증가
- 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆) 등 배경농도 증가 지속
 - ※ 몬트리올 의정서로 제한하고 있는 염화불화탄소류(CFCs) 배경농도 감소 지속

▮ 요약표 1.1 2020년 온실가스 배경농도평균, 2020년 증가율과 최근 증가율 비교 ▮

감 시 소 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2020년 평균	최근 10년 증가율* (2020년 증가율**)	2020년 평균	최근 5년 증가율*** (2020년 증가율)	2020년 평균	2020년 증가율
CO ₂ (ppm)	420.4	2.7 (2.7)	418.9	2.7 (2.4)	417.6	2.3
CH ₄ (ppb)	1998	9 (7)	1973	7 (6)	1976	16
N ₂ O (ppb)	335	1 (1)	334.7	1 (1)	334.5	1.5
SF ₆ (ppt)	10.5	0.3 (0.2)	10.5	0.3 (0.2)	10.5	0.2
CFC-11 (ppt)	224	-1.4 (-5.1)	-	-	-	-
CFC-12 (ppt)	496.8	-5.1 (-1)	-	-	-	-
CFC-113 (ppt)	68.9	-0.5 (-1)	-	-	-	-

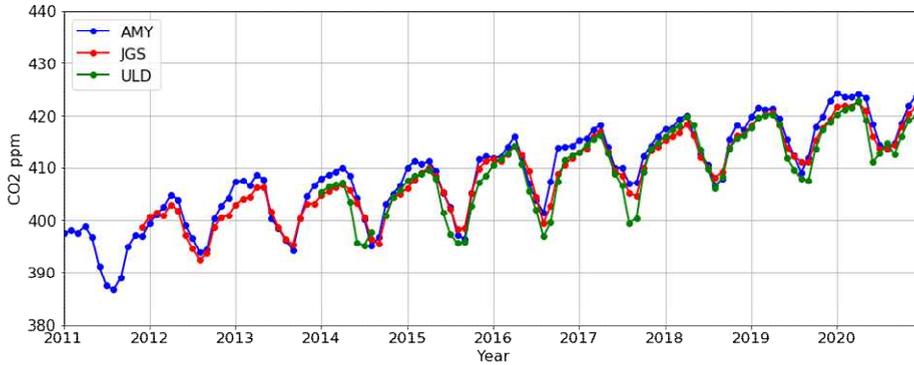
* 최근 10년 증가율: 2010~2019년의 평균 증가율(전년도와의 차이값 평균)(단위/year), CFCs는 5년(2015~2019년)

** 2020년 증가율: 2019년과의 차이값(단위/year)

*** 최근 5년 증가율: 2015~2019년 평균 증가율(단위/year), SF₆는 3년(2017~2019년) 증가율

● 2020년 온실가스 특성

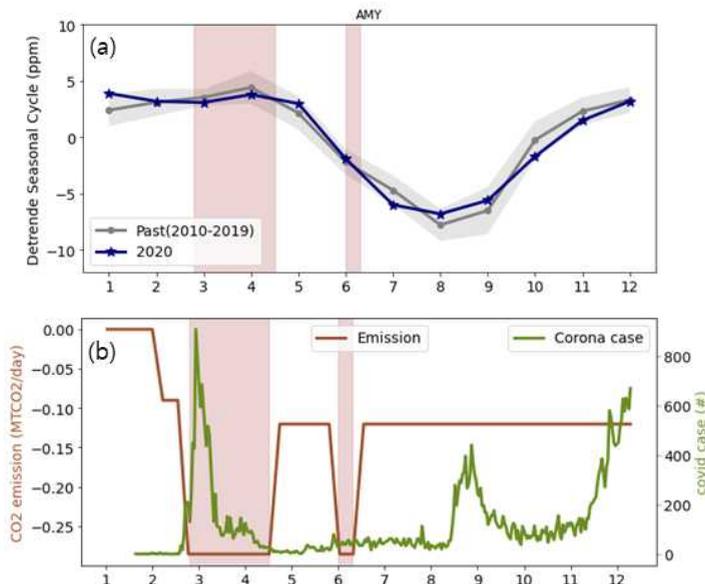
- 코로나19 기간에 전지구 -7%, 한반도 -6% CO₂ 배출량 감소하였으나, 전년도와 비슷한 수준으로 전지구(+2.4 ppm/year)와 한반도(+2.7 ppm/year)상승 [요약그림 1.1, 본문 4.1.1절]
- 전지구와 한반도 모두 증가율이 점차 가속화 됨 [요약표 1.1]
 - ※ 2019년 2.7 ppm/year, 최근 10년 2.7 ppm/year, 2000년대 2.2 ppm/year



▣ 요약그림 1.1 10년간(2011~2020년)의 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 대기중 CO₂ 농도변화 ▣

● 코로나19 기간에도 대기 중 CO₂ 상승하는 이유 [요약그림 1.2, 본문 4.7절]

- 전 지구적으로 CO₂ 배출량 -25% 감소시 봉쇄조치가 이뤄졌던 3월부터 대기 중 CO₂ 월평균 0.2 ppm 정도가 감소할 것으로 예상하였으나, 2020년 전 지구적으로 -7%만 감소
- CO₂는 자연 변동성이 크기 때문에 -7%의 배출량 감소는 대기 중 CO₂에 반영되기 어려움
 - ※ 안면도 CO₂ 계절변동의 최댓값과 최솟값의 차이가 12 ppm, 10년간 계절 변동폭이 ±2 ppm.
- 실제로 2020년 CO₂의 자연 변동성은 지난 10년(2010~2019년, 배출량 감소가 없던 기간)과 유사. 대기의 CO₂ 농도를 낮추기 위해선 자연 변동성을 넘어서는 파격적이고 지속적인 배출량 저감이 필요



▣ 요약그림 1.2 (a) 안면도에서 관측한 계절변동. 회색 영역은 10년(2010~2019년) 평균 계절변동과 변동폭 (1σ 값). 남색 선은 2020년 계절변동 (b) 갈색은 2019년 대비 2020년의 CO₂의 일간 배출량, 녹색은 우리나라 일별 코로나19 확진 사례 수 ▣

2. 반응가스

- 지표오존(O₃): 안면도 40.9 ppb (최근 10년 대비 -3.1%), 고산 41.8 ppb (최근 7년 대비 -3.3%)
 - 여름철 긴 장마와 감소한 일조시간으로 8월 농도 관측이래 최저
- 이산화황(SO₂)는 우리나라 및 중국의 대기환경정책으로 관측이래 지속적으로 감소

■ 요약표 2.1 2020년과 최근 평균 비교 ■

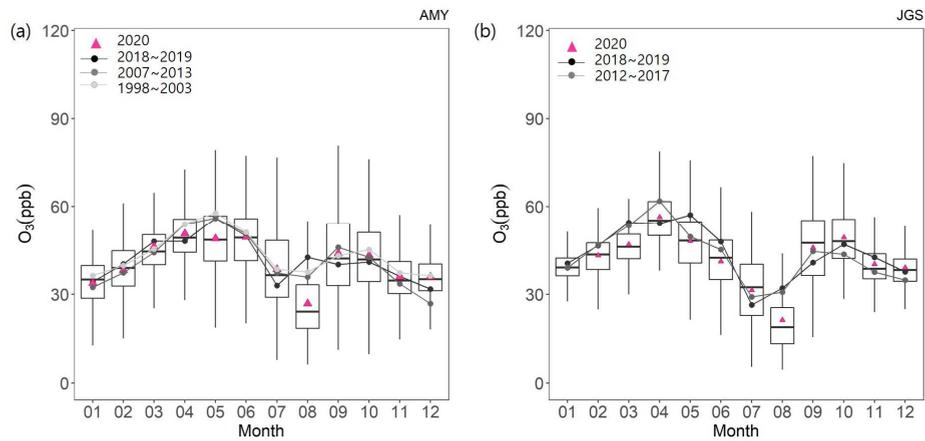
감시소 측정요소 (단위 : ppb)	안면도		고산		울릉도	
	2020년 (변화율)	최근 10년*	2020년 (변화율)	최근 8년*	2020년 (변화율)	최근 5년*
O ₃	40.9 (-3.1%)	42.2	41.8 (-3.2%)	43.2		
CO	257.9 (-8.6%)	282.3	187.6 (-7.5%)	202.9	166.9 (-8.0%)	181.5
NO _x	5.4 (-20.6%)	6.8	4.5 (+18.4%)	3.8		
SO ₂	0.8 (-61.9%)	2.1	0.8 (+25%)	0.6		

* 최근 평균 : 안면도(2010~2019년, 2014.1~2017.2 안면도 관측환경 변화에 따른 무효처리), 고산(2012~2019년), 울릉도(2015~2019년)

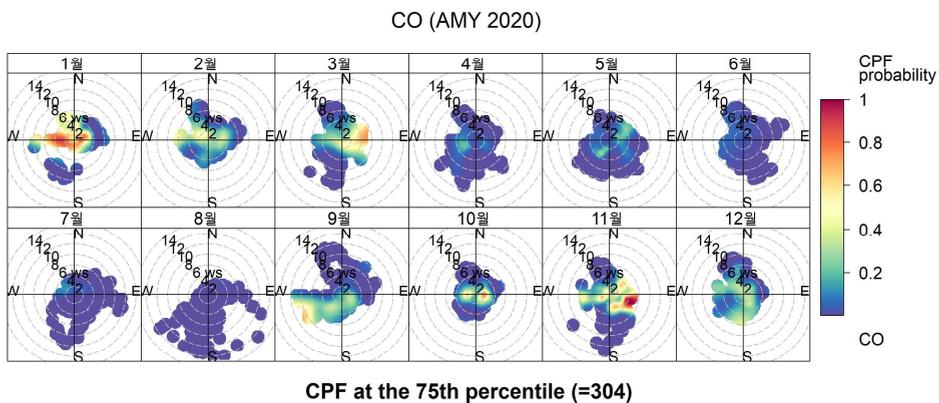
* 안면도 연구동 신설 후 장비 이전 기간 2004~2006년 무효처리, 그 외 2020년 지구대기감시 보고서 통계표 참조

● 2020년 반응가스 특성

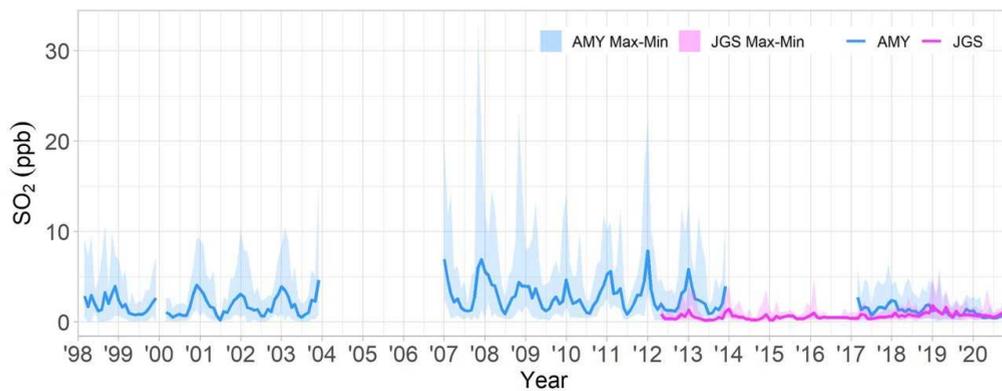
- 안면도, 고산, 울릉도에서 최근 평균에 비해 대부분 낮은 관측값 [요약표 3.1]
- 길어진 장마와 적은 일조시간으로 지표 O₃ 8월 평균 관측 이래 최저 [요약그림 3.2]
- 1, 2월 시베리아 고기압이 약하고 [3장 1절], 안면도 1, 2월 풍속이 최근 10년보다 낮아 [3장 2절] CO는 장거리 이동보다 정체로 인한 고농도 관측
- 안면도 NO_x는 동풍계열의 바람이 불 때, 내륙의 영향으로 고농도 관측하며, 1998년 관측 이후 월 최댓값 점차 감소, 고산 NO_x는 안면도보다 고농도 사례 거의 없음 [본문 5.5 참조]
- SO₂는 우리나라 및 중국의 대기환경정책으로 관측 이래 지속적으로 농도 감소 [요약그림 3.3]



【 요약그림 2.1 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 2020년 월별분포와 과거 월평균 자료와의 비교 】



【 요약그림 2.2 안면도 CO의 2020년 월별 고농도 확률 분포 】



【 요약그림 2.3 안면도와 고산에서 측정된 SO₂ 연변화 경향 】

3. 에어로졸

- PM10: 안면도 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최근 10년 대비 -25%)
고 산 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최근 9년 대비 -6.7%)
- 광산란계수: 74.4 Mm^{-1} (최근 10년 대비 -26%)
광흡수계수: 8.6 Mm^{-1} (최근 10년 대비 +6.9%)
- 안면도 PM10, 광산란계수 연평균: 관측 이래 최저
- 고산 PM10, 총수농도, 안면도 광흡수계수는 증감 추세 뚜렷하지 않음.
- 가을철 입자 생성 최대(총수농도 최대)

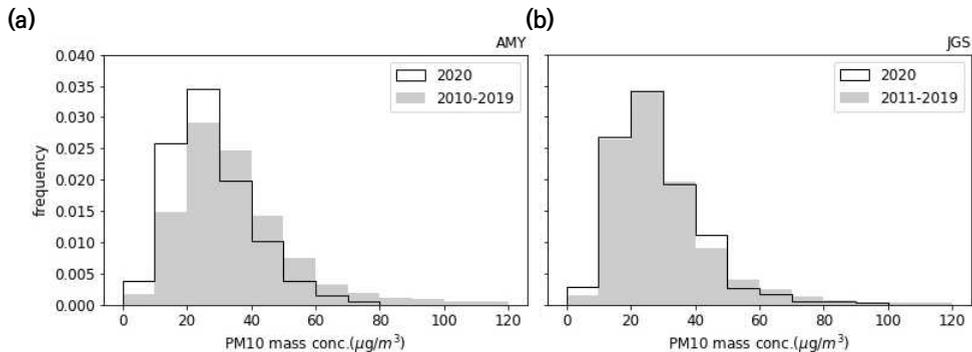
■ 요약표 3.1 2020년과 최근 평균 비교 ■

감 시 소 측 정 요소	안면도		고산	
	2020년 (변화율)	최근 10년*	2020년 (변화율)	최근 9년*
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	27 (-25%)	36	28 (-6.7%)	30
총수농도 (#/cm ³)	4433 (+12.6%)	3935	3979 (-1.7%)	4047
광산란계수 (Mm^{-1})	74.4 (-26%)	101.2		
광흡수계수 (Mm^{-1})	8.6 (+6.9%)	8.0		
검댕 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.1 (+7.5%)	1.0		
수용성 이온성분 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	16.5 (-19.9%)	20.6		

*최근 평균: 안면도(2010~2019년), 고산(2011~2019년)

● 2020년 에어로졸 특성

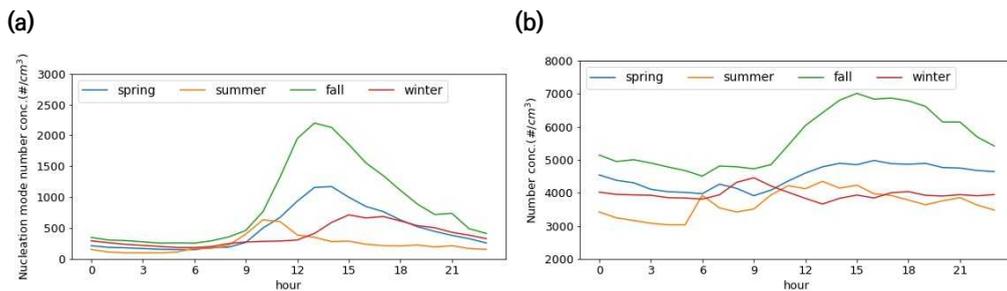
- 안면도 PM10 질량농도 연평균은 관측 시작(2003년) 이후 최저
 - 최근 10년 평균 대비 약 25% 감소 (안면도) [본문그림 6.2.2]
 - 안면도는 3~5월을 제외하고 고농도 사례가 관측되지 않았으며, 최근 10년에 비해 고농도 출현 빈도 낮음 [요약그림 3.1]
 - 에어로졸 연직분포에서도 고농도 출현이 거의 없음 [본문그림 6.3.28]
 - 고산 PM10은 관측 시작 이후 뚜렷한 연변화 경향 없음
- 광산란계수는 최근 평균 대비 26% 감소, 관측 이후 최저 [본문그림 6.3.2]
- 광흡수계수와 총수농도는 뚜렷한 연변화 경향 없음 [본문그림 6.2.4, 본문그림 6.3.3]



■ 요약그림 3.1 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 PM10 질량농도 구간별 출현 빈도 (2020년과 최근 평균과의 비교) ■

- 입자 생성은 가을에 가장 활발하고 겨울에 가장 적음 [요약그림 3.2]

- 9~12시 사이에 입자 생성이 가장 활발함 [본문그림 6.5.2]
- 가을철은 입자 생성을 방해하는 대기 중 에어로졸 농도가 낮아 입자 생성에 유리함
 - 에어로졸 농도가 가장 낮은 여름은 습도와 기온이 높고, 전구물질(SO_2) 농도가 낮아 입자 생성이 활발하지 않음 [본문그림 6.5.5]



■ 요약그림 3.2 안면도의 계절별 입자 수농도의 일변화. (a) 핵화모드(10~25 nm), (b) 총수농도 ■

- 안면도 이온성분 총합: 최근 평균 대비 19.9% 감소, 관측 이래 최저, 고농도 사례($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 없음 [본문그림 6.4.3]
- 안면도 에어로졸 발생원 분석 [본문그림 6.5.6.]
 - PM10: **자연적 발생원 56.5%**, 인위적 발생원 39.9%
 - PM2.5: 자연적 발생원 46.3%, **인위적 발생원 49.8%**

특히, 인위적 발생원 중 쓰레기 소각이 약 6.8%를 차지

※ 자연적 발생원: 해염, 토양 등

인위적 발생원: 이차오염물질(황산염, 질산염), 자동차, 연소 등

4. 대기복사

- 태양하향복사(전천일사) : 안면도 165.8 W/m² (최근 10년 대비 -1.2%)
- 지구하향복사 : 안면도 320 W/m² (최근 10년 대비 +6.9%)
- 안면도의 태양하향복사는 여름철 긴 장마의 영향으로 감소, 지구하향복사는 겨울철 높은 기온과 여름철 폭염으로 인해 증가

■ 요약표 4.1 2020년과 최근 평균 비교 ■

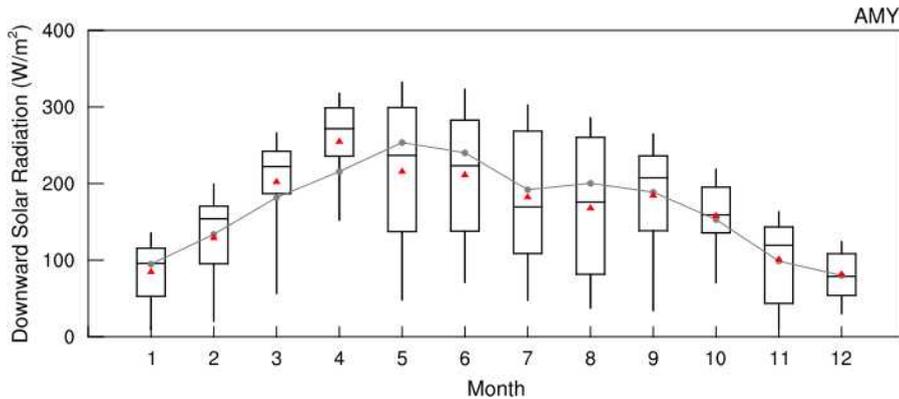
감시소 측정요소 (W/m ²)	안면도		고산	
	2020년 (변화율)	최근 10년*	2020년 (변화율)	최근 10년*
직달일사	136.7 (-10.6%)	152.8	124.8 (+4.2%)	119.7
산란일사	-	78.3	84.1 (-1.5%)	85.3
태양하향복사	165.8 (-1.2%)	167.7	-	160.6
태양상향복사	33.9 (-1.4%)	34.3	-	-
지구하향복사	320.0 (+6.9%)	299.2	-	-
지구상향복사	377.2 (+2.0%)	369.9	-	-
순복사	-	78.1	-	-

* 최근 평균: 안면도, 고산(2010~2019년)

● 2020년 대기복사 특성

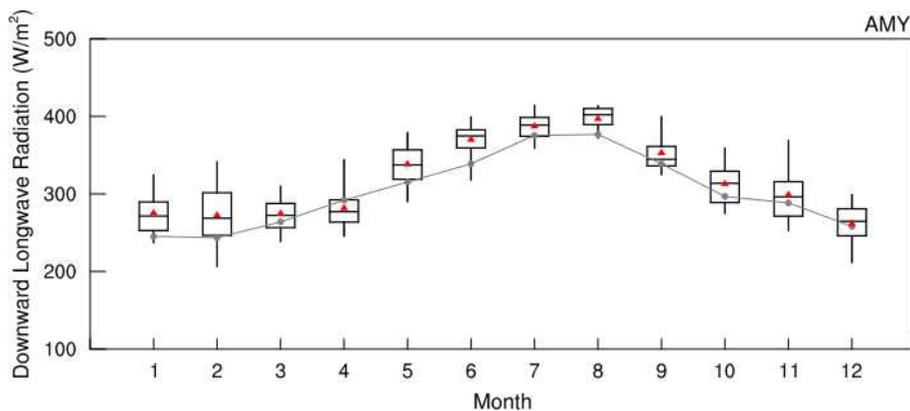
- 태양복사요소(직달일사, 태양하향복사, 태양상향복사, 태양하향복사)는 최근 10년 평균에 비해 다소 낮은 관측값 [요약표 4.1]
 - 태양복사는 태양일사를 받는 시간(일조시간)과 강수량의 영향을 받음
 - 최근 10년 평균보다 다소 높은 일조시간 [본문 7.6절]
- 봄철: 바이칼호 북서쪽 강한 기압능 정체로 인해 북서쪽으로부터 차고 건조한 공기의 유입. 강수량은 적고 일조시간은 많아 안면도와 고산의 태양복사요소(직달일사, 태양하향복사, 태양상향복사) 증가 [요약그림 4.1]

- 여름철 : 한반도 북쪽 찬 공기 정체로 전국적으로 장마가 길어지면서 많은 강수. 안면도 강수량 증가의 영향으로 전천일사, 직달일사 모두 감소 [요약그림 4.1]. 고산도 마찬가지로 최근 평균보다 낮은 직달일사가 관측되었지만 안면도보다는 작은 감소폭 [본문그림 7.2.1]



■ 요약그림 4.1 안면도 월별 전천일사 (2020년 관측값: 박스플롯 최근 10년 평균: 회색선) ■

- 지구복사 요소들은 과거 평균보다 모두 증가 [요약표 4.1]
 - 안면도에서 최근 10년 대비 길었던 일조시간과 높은 기온의 영향 [본문 7.6절]
 - 겨울철 약한 시베리아 고기압의 영향으로 유독 높았던 기온은 겨울철의 높은 지구상향복사와 지구하향복사에 기여
 - 이와 함께 여름철 긴 장마에도 불구하고 비교적 높게 유지된 기온 [본문그림 3.2.4]으로 인해 구름과 기온의 영향을 모두 받는 지구상향복사가 최근 평균 대비 유독 높았음 [본문 7.6절, 요약그림 4.2]



■ 요약그림 4.2 안면도 월별 지구하향복사 (2020년 관측값: 박스플롯 최근 10년 평균: 회색선) ■

5. 성층권오존

- 오존전량 : 안면도 324 DU (최근 7년 대비 +0.5%)
고 산 308 DU (최근 9년 대비 +2.0%)
- 봄철 바이칼호 북서쪽에 정체한 강한 기압능의 영향으로 남북 흐름이 강화되어 고위도의 고농도 오존 유입 증가

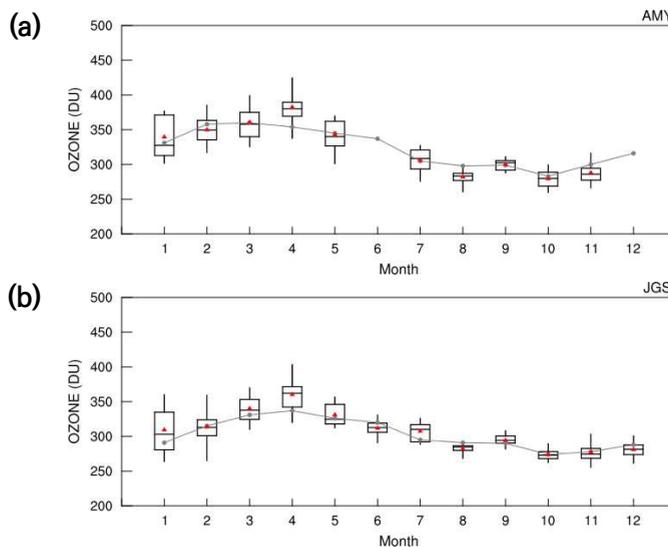
【 요약표 5.1 2020년과 최근 평균 비교 】

감 시 소 측정요소	안면도		고산	
	2020년 (변화율)	최근 7년*	2020년 (변화율)	최근 9년*
오존전량 (DU)	324 (+0.5%)	323	308 (+2.0%)	302

* 최근 평균 : 안면도(2013~2019년), 고산(2011~2019년)

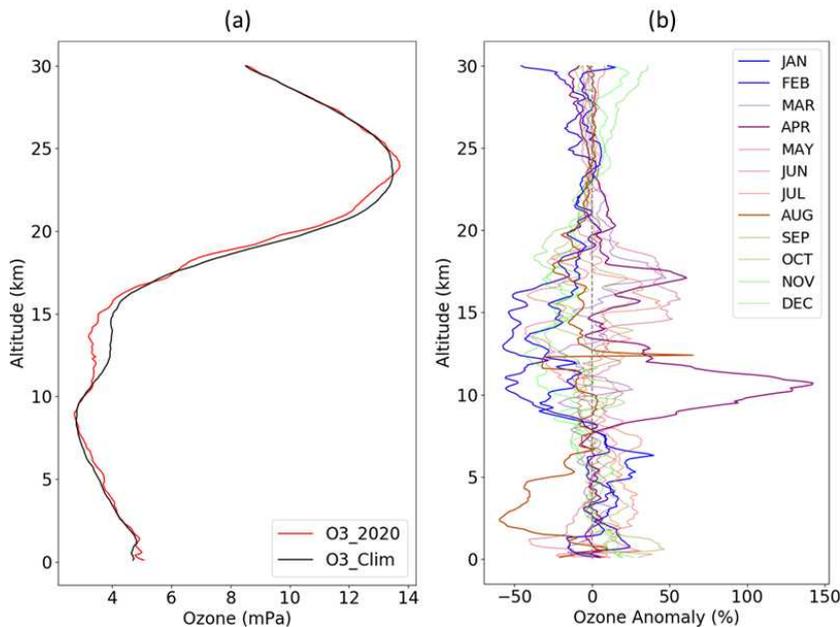
● 2020년 성층권오존 특성

- 오존전량은 안면도와 고산 모두 최근 평균에 비해 다소 높은 관측값 [요약표 5.1]
 - 안면도와 고산 모두 4월에 유독 높은 값을 보였고, 8월에는 최근 평균보다 낮은 값을 보임 [요약그림 5.1]
 - 오존은 고도에 따라 변동 특성이 다르기 때문에 포항의 연직오존과 같이 분석 [요약그림 5.2]



【 요약그림 5.1 2020년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS) 오존전량의 월별분포 (2020년 관측값: 박스플롯, 최근 평균: 회색선) 】

- 오존 연직분포의 연평균은 10~15 km 고도에서 과거 평균보다 눈에 띄게 낮은 값 [요약그림 5.2]
 - 고도별 최근 10년에 대비 편차를 살펴보면, 1월과 2월 10~15 km에서 낮은 값을 보였으며, 이는 1월 과거 평균보다 높았던 오존전량과는 다른 양상 [요약그림 5.1, 요약그림 5.2]
 - 한반도 지역에서 오존의 단기적인 변동성은 대기의 연직운동과 관련된 200 hPa 지위고도와 50 hPa 기온과 높은 상관성을 갖는데, 1월과 2월의 200 hPa 지위고도와 50 hPa 기온은 오존 전량에 서로 상반되는 영향
 - 겨울철 약했던 시베리아 고기압은 대류권의 하강기류를 약화시켜 평상시보다 높은 200 hPa 지위 고도를 형성한 반면, 50 hPa 고도에서는 평상시보다 높은 기온을 보이며 하강류가 오히려 강해진 특성
 - 이와 함께 1월에는 오존전량의 변동폭이 유독 컸으며, 결측일이 많았음
- 공통적으로 오존농도가 높았던 4월에는 7~13 km 고도에서 높은 농도
 - 대류권계면과 봄철 오존이차피크가 주로 발생하는 고도
 - 4월 바이칼호 북서쪽에 정체한 강한 기압능의 영향으로 남북 흐름이 강화되어 차고 건조한 공기가 자주 유입되어 강한 오존이차피크 발생하였고 이로 인해 오존전량 증가
- 오존농도가 낮았던 8월에는 3 km 고도에서 낮은 농도
 - 오염물질 수송이 영향을 미치는 고도로 코로나19로 인한 중국 또는 한반도 자체적인 배출량 감소가 영향을 미쳤을 가능성



【 요약그림 5.2 최근 10년(2010~2019년)과 2020년 포항지역 연직오존농도의
(a) 연평균과 (b) 월별 편차 】

6. 자외선

- 자외선A 일누적 복사량 : 안면도 0.72 MJ/m² (최근 10년 대비 +1.4%)
고 산 0.74 MJ/m² (최근 8년 대비 +3.9%)
- 자외선B 일최대 복사량 : 안면도 0.114 W/m² (최근 10년 대비 -8.0%)
고 산 0.113 W/m² (최근 8년 대비 -18.8%)
- 자외선A는 연 전체적으로 최근 평균보다 높은 일조시간으로 인해 다소 증가, 자외선B는 여름철에 긴 장마로 인해 유독 짧았던 일조시간의 영향으로 크게 감소

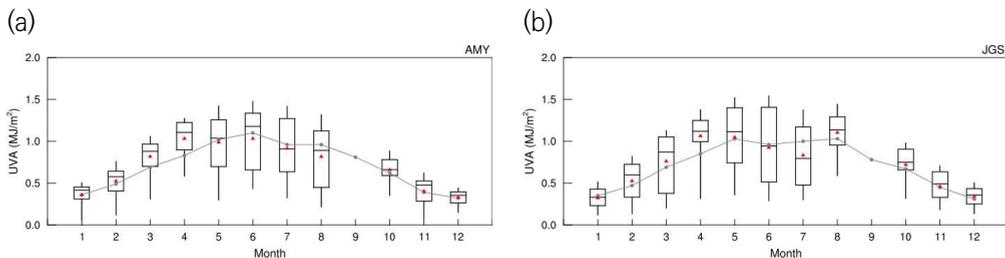
■ 요약표 6.1 2020년과 최근 평균 비교 ■

감시소 측정요소	안면도		고산		울릉도		포항	
	2020년 (변화율)	최근 10년*	2020년 (변화율)	최근 7년*	2020년 (변화율)	최근 7년*	2020년 (변화율)	최근 10년*
자외선A (MJ/m ²)	0.72 (+1.4%)	0.71	0.74 (+3.9%)	0.72	0.69 (+10.1%)	0.63	0.80 (+18.9%)	0.67
자외선B (W/m ²)	0.114 (-8.0%)	0.124	0.113 (-18.1%)	0.138	0.120 (+2.4%)	0.118	0.126 (+5.3%)	0.120

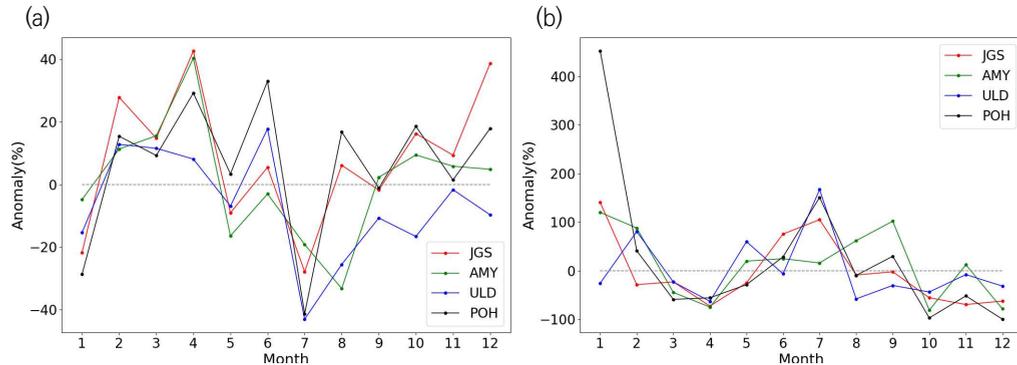
* 최근 평균 : 안면도, 포항(2009~2019년), 고산, 울릉도(2012~2019년)

● 2020년 자외선A 특성

- 자외선A 일 누적 복사량은 전 지점에서 최근 평균보다 높았음 [요약표 6.1, 요약그림 6.1].
 - 일 누적값의 평균으로 분석되기 때문에 일조시간의 영향을 받음
 - 일조시간이 최근 10년 평균대비 높았음
 - 안면도와 고산은 4월에 최근 평균 대비 각각 +40.3%, +42.6%의 높은 일조시간의 영향으로 유독 높은 값을 보임 [요약그림 6.1, 요약그림 6.2]
 - 포항과 울릉도는 6월에 오히려 더 높은 값을 보였는데, 6월 폭염의 영향으로 평년 대비 각각 +32.9%, +17.7% 증가한 일조시간의 영향 [요약그림 6.2]



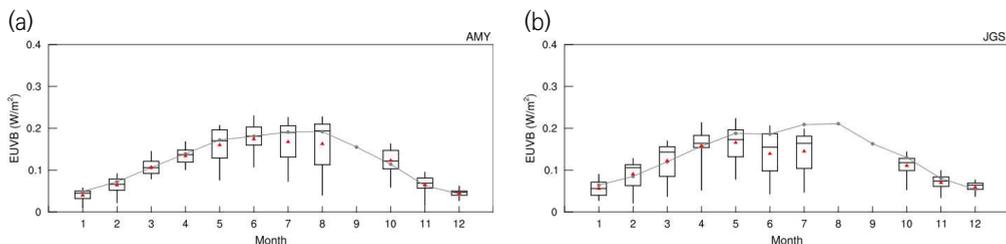
■ 요약그림 6.1 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS) 자외선A 일 누적 복사량의 월 변화 (2020년 관측값: 박스플롯, 최근 평균: 회색선) ■



▣ 요약그림 6.2 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 포항(POH) 네 지점의 최근평균(2010~2019년) 대비 2020년 (a) 일조시간 및 (b) 강수량 월별 변화량 ▣

● 2020년 자외선B 특성

- 자외선B 일 최대 복사량은 지역에 따라 평균값 대비 변화량에 차이를 보임 [요약표 6.1]
 - 자외선은 일조시간과 함께 미량기체 등 다양한 요인들의 영향을 받음
 - 특히, 일반적으로 태양광이 강한 여름철의 짧은 일조시간은 일 최대값으로 분석하는 자외선B 분석값에 크게 영향을 줄 수 있음
- 7월에는 긴 장마로 인해 유독 기온이 낮고 강수가 많아 전 지점에서 공통적으로 낮은 자외선B 관측값을 보임 [요약그림 6.3]
 - 7월에는 전 지점에서 모두 최근 10년 평균보다 강수량이 많고 일조시간은 적었던 것이 자외선B 관측값에 큰 영향 [요약그림 6.2]
- 안면도의 경우, 8월에 일조시간이 최근 평균 대비 가장 큰 비율로 줄었고 이에 따라 8월까지 자외선B 관측값이 매우 낮음 [요약그림 6.2, 요약그림 6.3]
- 고산은 장마의 영향으로 낮은 일조 및 일사와 함께 일반적으로 높은 관측값을 갖는 8~9월에 태풍 및 장비 이상으로 인한 결측이 발생하면서 최근 평균 대비 유독 낮은 연평균을 나타냄 [요약그림 6.3]



▣ 요약그림 6.3 안면도(AMY), 고산(JGS) 자외선B 일 최대 복사량의 월 변화 (2020년 관측값: 박스플롯, 최근 평균: 회색선) ▣

7. 총대기침적

- 습성침적: 안 면 도 5994.0 mg/m²/year (최근 10년 대비 -21.2%)
 고 산 17310.2 mg/m²/year (최근 10년 대비 +62.9%)
 울릉도 17358.3 mg/m²/year (최근 10년 대비 -34.2%)
- 해염 및 생체연소, 황산암모늄과 질산암모늄의 영향을 대부분 받음

■ 요약표 7.1 2020년과 최근 평균 비교 ■

감 시 소 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2020년 (변화율)	최근 10년	2020년 (변화율)	최근 10년	2020년 (변화율)	최근 10년
강수량 (mm)	1211.0 (+28.8%)	940.4	1492.5 (+7.7%)	1386.1	1462.1 (-5.0%)	1539.0
pH	5.23 (+10.3%)	4.74	5.07 (+2.8%)	4.93	4.98 (+3.8%)	4.80
전기전도도	14.5 (-42.9%)	25.4	35.5 (+59.2%)	22.3	37.3 (-25.1%)	49.8
습성침적 (mg/m ² /year)	5994.0 (-21.2%)	7606.1	17310.2 (+62.9%)	10625.9	17358.3 (-34.2%)	26378.0
건성침적 (mg/m ² /year)	2881.0 (-25.4%)	3860.8	-	-	-	-

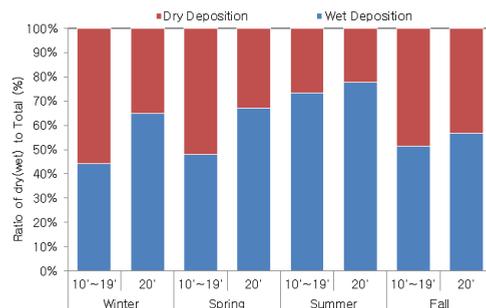
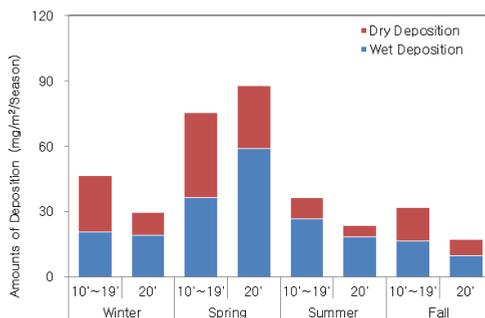
* 최근 10년 평균 : 안면도, 고산, 울릉도(2010~2019년)

● 2020년 총대기침적 특성

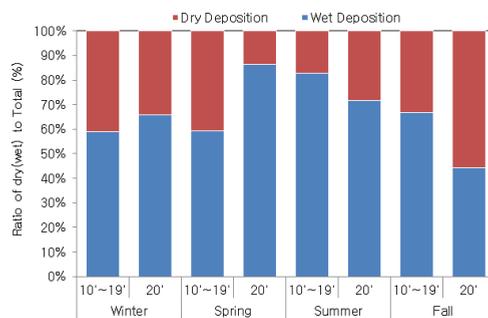
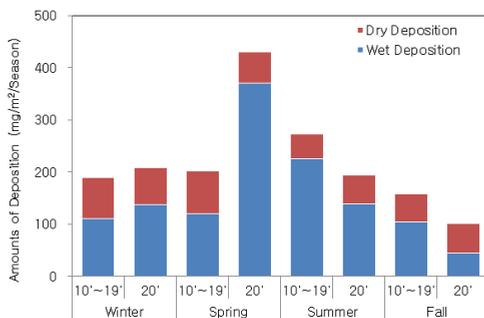
- 울릉도를 제외한 안면도, 고산 감시소 강수량이 최근 10년보다 많았음 [본문그림 10.2.2]
- pH: 2020년 pH가 5.0 이상이며, 최근 10년 대비 약 2%~10%로 높았음 [요약표 7.1]
- 전기전도도: 안면도 최근 10년 대비 약 75% 감소, 고산 최근 10년 대비 약 37% 증가, 울릉도 최근 10년 대비 약 33%로 낮았음 [요약표 7.1]
- 습성침적: 안면도, 울릉도 감시소 최근 10년 대비 약 27%~52% 정도 낮은 침적량을 보임 [요약표 7.1, 요약그림 7.1]
 - 안면도 해염성분(Na⁺, Cl⁻) 변화는 없으나 이차오염물질(NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻) 농도가 감소함 [본문표 10.5.1]
 - 고산(해염성분(Na⁺, Cl⁻))이 타지역보다 영향이 큼 [본문그림 10.5.4]
 - 울릉도 대부분 성분이 감소함 [본문그림 10.5.4]

- 건성침적: 최근 10년 대비 약 32%의 낮은 침적량을 보임 [요약표 7.1, 요약그림 7.1]
 - PM10의 질량농도와 비슷한 결과로 감소하는 결과를 보임 [본문그림 6.2.2.]
- 발생원 분석
 - 안면도 : 황산암모늄과 질산암모늄 및 토양(50%), 해염/생체(42%)로 지배적 [본문그림 10.7.1]
 - 고 산 : 해염 및 생체연소(44%), 황산암모늄, 질산암모늄(39%), 토양(7%), 비료(6%)의 영향받음 [본문그림 10.7.2]
 - 울릉도 : 해염(44%), 인위적오염원(46.7%)의 기여율이 비슷함 [본문그림 10.7.3]

• 토양성분(Ca²⁺)



• 이차반응물(이동형, 자동차) NO₃⁻



■ 요약그림 7.1 최근 10년과 2020년의 계절별 Ca²⁺, NO₃⁻ 성분의 건성 및 습성의 침적량과 비율 ■

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타



2020 지구대기감시 보고서



Report of Global Atmosphere Watch 2020

제1장 머리말



제1장 머리말

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)는 5차 보고서(2013년)에서 지구온난화는 명백하게 진행되고 있으며, 인위적 온실가스의 배출량 증가가 지구온난화의 주원인이라고 선언했다. 최근 전 세계에서 기후변화로 인한 자연재해 발생이 증가하면서 기후변화 수준을 넘어 '기후 위기'로 인식하고 대처해 가야 한다는 움직임이 활발하다.

세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)는 지구온난화를 비롯한 환경 문제에 대처하기 위해 1989년 지구대기감시 프로그램(Global Atmosphere Watch; GAW)을 시작하였다. 이 프로그램에서는 기후변화의 원인을 밝힐 수 있는 기후변화 원인물질의 대기 중 농도를 비롯한 지구대기의 물리·화학적 조성에 대한 관측자료와 자연·인위적 대기조성 변화 정보를 제공한다. 이들 자료는 IPCC, 유엔 기후변화협약(United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC), 그 밖의 국제기구, 정부기관, 과학자 등에게 제공되며 현재와 미래 기후시스템 변화를 분석·예측하여 기후변화 대응을 위한 정책 수립에 활용되고 있다.

현재, WMO 회원국 100개 이상의 국가에서 800개가 넘는 관측소를 GAW 관측시스템에 등록하여 운영하고 있으며, 우리 기상청은 1992년부터 GAW 프로그램에 참여하고 있다. 한반도에서 기후변화 원인물질의 유·출입을 감시하기 위한 지구대기감시 관측망은 안면도, 고산, 울릉도독도, 포항 등 4개의 기후변화감시소와 대학 및 유관기관에서 운영하는 7개의 위탁 관측소를 포함하고 있다. 위탁감시소는 연세대학교(서울), 광주과학기술원(광주), 서울대학교(광릉), 극지연구소의 남극세종과학기지와 남극장보고과학기지, 제주대학교(제주 고산), 숙명여자대학교(서울) 등이다. 이들 한반도 지구대기감시 관측망 중 안면도, 고산, 포항, 남극세종과학기지, 연세대학교(서울)이 GAW 지역급 관측소로 지정되어 있다.

한반도 지구대기감시 관측망에서는 GAW에서 권고하는 온실가스, 반응가스, 에어로졸, 대기복사, 성층권오존/자외선, 총대기침적 분야에서 총 36종의 요소를 관측하고 있으며, 동북아시아 지역을 대표하는 수준 높은 관측자료 제공과 연구 활동을 통해 국제 네트워크와 프로그램에 활발히 참여하고 있다. 또한, 한반도 기후변화에 대한 국민들의 이해를 높이고, 온실가스 감축 등 미래 기후변화에 대비한 국가정책 수립과 사회, 경제적 대응을 위해 2001



년부터 매년 한반도 지구대기감시 관측·분석 결과를 ‘지구대기감시 보고서’로 발간하고 있다. 이 보고서는 지구대기감시 관측망의 운영현황과 요소별 분석 결과 및 통계자료 등을 포함하고 있다.

2012년에는 교토의정서 규제대상 6대 온실가스 중 하나인 육불화황(SF₆)의 관측기술을 인정받아 WMO로부터 육불화황 세계표준센터(World Calibration Centre; WCC)를 유치하였으며, 2015년에는 강수화학 국제 비교실험과 온실가스 관측기술 적합성 평가 등에서 세계 최고 수준의 기술임을 인정받았다. 2016년에는 온실가스의 품질관리 기법을 개선하였고 한미기상협력의 일환으로 수행된 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)과의 온실가스 비교분석 결과를 보고서에 추가하였으며, 연직오존의 고도별 분석 자료를 새롭게 제시하였다. 2017년에는 WMO로부터 안면도와 고산에서 온실가스 및 반응가스 관측기술의 적합성 평가를 받았다. 에어로졸 분야에서는 부유분진측정기, 등가성평가를 실시하여 자료의 생산과 품질관리의 신뢰도를 향상시켰다.

2018년에는 기후변화감시소 에어로졸 관측자료 품질관리를 위해 WMO/GAW 에어로졸 세계표준센터(World Calibration Centre for Aerosol Physics; WCCAP)로부터 관측환경 전반에 대한 적합성 평가를 받았다. 또한, WCCAP에서 수행하는 국제 비교실험(응결핵계수기, 전자기유도입자계수기, 광흡수계수측정기)에 참여하여 관측자료 신뢰도를 확보하였다. 2019년에는 NO_x 세계표준센터에서 수행하는 국제 비교실험을 통해 안면도 NO_x 분석 자료가 기준 장비와 일치하는 결과를 얻었으며, WCCAP에서 수행하는 국제 비교실험(응결핵계수기)에도 참여하여 관측자료 신뢰도를 확보하였다. 제60차 WMO/GAW 강수화학 국제 실험에서 54개국, 81개의 실험실을 대상으로 강수시료의 화학성분 분석결과를 비교·평가하여, 강수화학성분에 대한 분석능력을 검증하고, 신뢰도를 강화하였다.

2020년에는 기후변화감시소 원격제어를 통한 관측 운영자동화를 추진하고, 예비장비 활용 및 긴급보수 등을 통해 관측공백 최소화, 통합품질관리시스템을 통한 품질관리 강화 등을 목표로 감시업무를 수행하였다. 본원 관측실험동 내에 온실가스 중앙실험실을 구축하여 온실가스 생산 및 인증업무를 안정화하였으며, 여름철 제습 과부하 해결을 위한 제습장치 개선, 울릉도 온실가스 관측탑 개선을 통한 안전한 관측환경 구축 등을 수행하였다. 또한, 기후변화감시 관측요원 장비운영 교육, 지구대기감시업무 교육 동영상 제작 등 교육훈련 업무도 강화하였다. 온실가스 국내 순차순환비교실험을 통해 3개 감시소 자료가 WMO/GAW가 제시하는 허용오차 범위 내에 있음을 확인하였고, 미국 해양대기청과 연화불화탄소 국제 비교실험, 제62차 WMO/GAW 강수화학 국제 비교실험, 중앙교정실험실과 육불화황 비교실험 등 관측자료 품질관리를 위해 노력하고 있다.

본 보고서는 2001년부터 시작된 지구대기감시 보고서의 발간 20주년을 맞이하여 특별판으로 구성하였다. 한반도 지구대기감시업무 역사를 한눈에 볼 수 있게 정리하고, 최대한 과거 관측 자료를 수집하여 장기변동특성을 분석하고자 노력하였다. 본 보고서를 통해 기상청에서 관측하고 있는 한반도에서의 지구대기감시업무와 기후변화에 대한 이해도를 높이고, 기후변화 대응 및 2050 탄소중립 등 국가정책에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제2장

한반도 지구대기감시업무현황

2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램	8
2.2 한반도 지구대기감시소 현황	11
2.3 세계기상기구 육불화황 세계표준센터	14



제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램

세계기상기구(WMO) 과학기술 프로그램 중의 하나인 지구대기감시 프로그램(GAW)은 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비 등과 같은 환경문제에 대처하기 위하여 1989년에 전지구오존관측망(Global Ozone Observing System; GO3OS)과 배경대기오염감시망(Background Air Pollution Monitoring Network; BAPMoN)을 통합하여 시작되었다. 이 프로그램은 첫째, 지구대기의 화학조성에 대한 과학적이고 신뢰할 수 있는 관측자료를 제공하고, 둘째, 지구대기의 자연적·인위적인 조성변화 정보를 제공하며, 셋째, 대기·해양·생물 간의 상호작용 과정에 대한 이해를 높이는 것을 목적으로 한다.

지구대기감시 프로그램은 온실가스, 반응가스, 에어로졸, 대기복사, 성층권오존/자외선, 총대기침적 등 6개 분야 요소에 대하여 체계화된 관측을 권고하고 있으며, 세계기상기구의 모든 회원국이 참여하고 있다. 현재, 31개소의 지구급 관측소(global station), 400개 이상의 지역급 관측소(regional station), 그리고 100개 이상의 협력 관측소(contributing station)가 운영되고 있다.

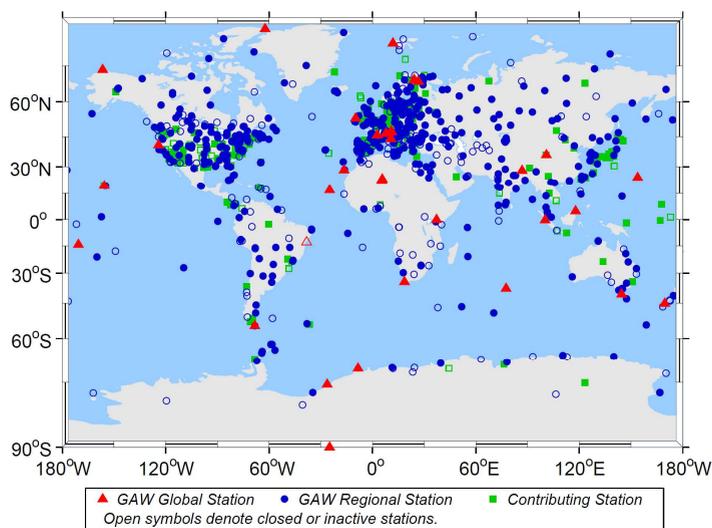


그림 2.1.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 관측소 현황.



지구대기감시 프로그램은 중앙기구를 두어 관측자료의 품질보증기술을 지원하고 있다. 중앙기구는 그림 2.1.2와 같이 품질보증/과학활동센터(Quality Assurance/Science Activity Center; QA/SAC), 세계표준센터(World Calibration Center; WCC), 지역교정센터(Regional Calibration Centre, RCC), 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory; CCL), 세계자료센터(World Data Centre; WDC), GAW관측소정보센터(GAW Station Information System; GAWSIS)로 구성되어 있다. 과학자문그룹(Scientific Advisory Group; SAG)은 프로그램의 과학적 정책 방향을 결정하고 지구대기감시 프로그램 사무국은 중앙기구와 지구대기감시관측소 간의 협력과 운영을 돕는다.

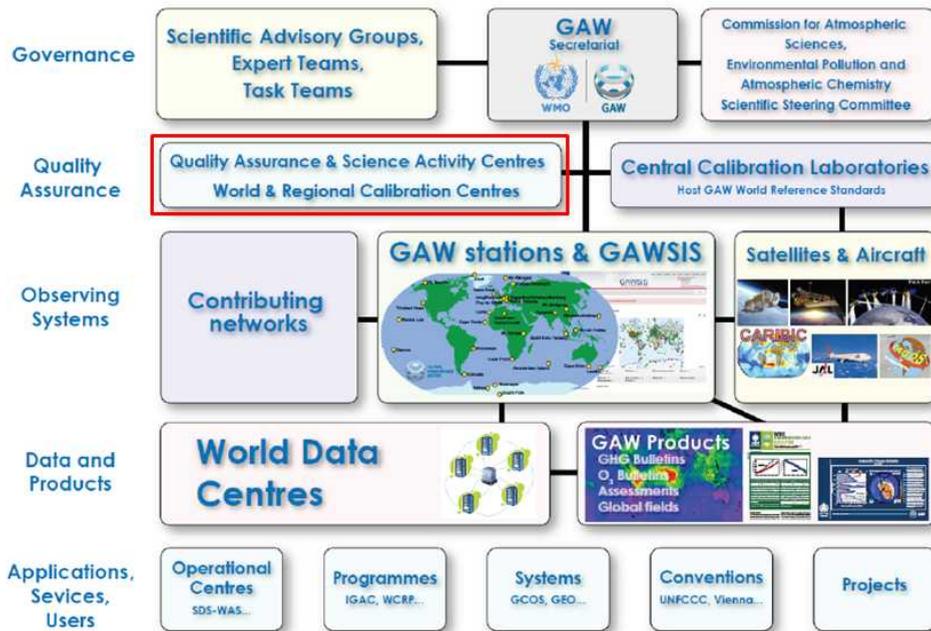


그림 2.1.2 WMO/GAW 프로그램 구성 요소 (WMO/GAW 보고서 No. 228).

전 세계의 지구급 및 지역급 관측소와 협력 관측소로부터 관측되는 자료는 품질검사를 수행 후 관측자료에 따라 운영되는 7개의 자료센터로 전송되어 보관된다. 자료센터는 관측요소에 따라 캐나다, 미국, 노르웨이, 독일, 일본, 러시아에서 운영되며 자료 현황을 표 2.1.1에서 제시하고 있다.

제 2 장 한반도 지구대기감시
전망

표 2.1.1 세계기상기구 지구대기감시 세계자료센터 현황

세계자료센터 명칭	운영국가	웹사이트 주소
World Data Center for Greenhouse Gases (WDCGG)	일본	http://gaw.kishou.go.jp
World Data Centre for Reactive Gases (WDCRG)	노르웨이	http://www.gaw-wdcr.org
World Data Centre for Aerosols (WDCA)	노르웨이	http://www.gaw-wdca.org
World Radiation Data Centre (WRDC)	러시아	http://wrdc.mgo.rssi.ru
World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC)	캐나다	http://www.woudc.org
World Data Centre for Precipitation Chemistry (WDCPC)	미국	http://wdcpg.org
World Data Centre for Remote Sensing of the Atmosphere (WDC-RSAT)	독일	http://wdc.dlr.de

WMO 지구대기감시 세계자료센터 등을 통하여 관련 국제기관, 각국 정부기관 및 연구자에게 제공되는 지구대기감시 관측자료는 지구환경변화에 대처하기 위한 여러 정책 수립과 국제 협약을 지원하며, 기후변화와 장거리 대기오염에 관한 이해를 향상시키는 데 기여하고 있다.



2.2 한반도 지구대기감시소 현황

한반도에서 지구대기감시는 1987년 1월에 충북 단양군 단양읍에 위치한 소백산기상관측소에서 출발하였다. 이곳에서 대기질, 산성비, 대기복사 등이 관측되었다.

1990년부터 국립기상과학원은 고산에서 플라스크 샘플링 방법으로 온실가스를 관측하였다. 이후에 기후변화 유발물질의 감시 필요성이 대두되면서 1992년부터 무안기상대에서 온실가스를 관측하기 시작하였고, 1994년부터 포항기상대(이하 포항, POH)에서 성층권 오존과 자외선 관측도 시작했다.

기후변화가 세계적인 관심사로 떠오르면서 1995년 12월에 소백산기상관측소를 배경대기 관측소로 개편하고 1996년 9월에 현재의 안면도 기후변화감시소(이하 안면도, AMY) 위치로 배경대기관측소를 이전하였다. 또한, 효율적인 배경대기감시를 위하여 1998년부터 무안기상대의 온실가스 관측을 배경대기관측소로 통합·운영하게 되었다.

1999년에 안면도는 WMO/GAW에 지역급 관측소로 등록되었고, 2000년 8월 지구대기감시 관측소로, 2007년 3월 지구대기감시센터로 명칭이 변경되었다. 2008년 3월에는 명칭을 기후변화감시센터로 변경하고, 소속은 국립기상과학원에서 기상청으로 변경되었다.

이후 한반도에서 기후변화 유발물질의 유입을 감시하기 위하여 우리나라 중부 서해안의 안면도를 GAW 관측지침에 맞게 관측환경을 구축하는 한편, 2011년 남부 서해안지역인 제주도에 고산 기후변화감시소(이하 고산, JGS)를 설립하였다. 유출 지역을 감시하기 위하여 2011년 한반도의 최동단인 독도에서 온실가스 관측을 시작하였으며, 2013년 울릉도에 울릉도독도 기후변화감시소(이하 울릉도, ULD)를 신설하였다. 이로써 기후변화감시소는 한반도를 삼각형으로 감시하는 관측망으로 구축되었다(표 2.2.1, 그림 2.2.1). 이 중 고산은 안면도와 마찬가지로 2013년 GAW에 지역급 관측소로 등록되었다. 또한, 대학 및 유관기관에서 운영하는 7개의 위탁관측소도 함께 포함하고 있다(표 2.2.2).

2015년부터 국립기상과학원이 기후변화감시 업무를 맡게 되면서 감시분야별로 개선된 GAW 관측지침에 따라 관측환경을 정비하였고, 자료의 품질관리 체계와 WMO 세계자료센터에 공유할 자료 양식을 표준화하였다.

표 2.2.1 한반도 기후변화감시 정보

지점명	위·경도	해발고도(m)	관측분야(관측시작연도)	비고
안면도	36.53°N 126.32°E	47.0	온실가스(1999), 반응가스(1998) 에어로졸(1999), 총대기침적(1997) 성층권오존(1994), 자외선(1999) 대기복사(1999)	WMO/GAW 지역급 관측소 (1998, AMY)
고산	33.30°N 126.21°E	52.0	온실가스(2009), 에어로졸(2009) 총대기침적(2012), 성층권오존(2009) 자외선(1999), 대기복사(2008)	WMO/GAW 지역급 관측소 (2013, JGS)
	33.29°N 126.16°E	71.0	온실가스(2012), 반응가스(2012) 에어로졸(2014), 총대기침적(1998)	
울릉도독도	37.48°N 130.90°E (울릉도)	220.9	온실가스(2012), 반응가스(2015) 에어로졸(2012), 총대기침적(1997) 자외선(2012)	
	37.23°N 131.86°E (독도)	24.0	온실가스(2011)	
포항	36.02°N 129.37°E	2.5	성층권 오존(1994), 자외선(1999)	WMO/GAW 지역급 관측소 (1994, POH)

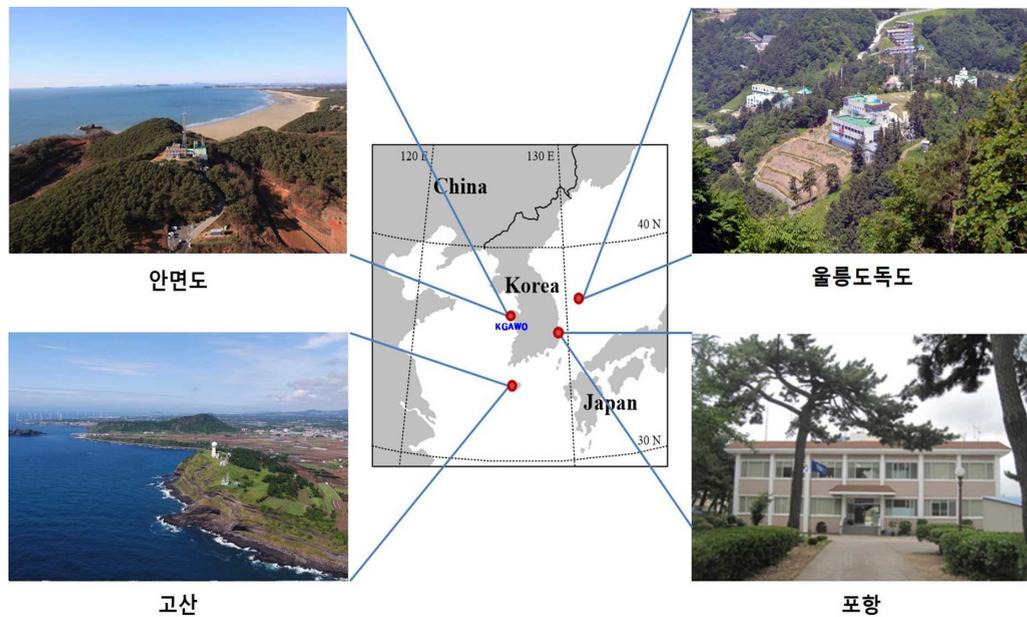


그림 2.2.1 한반도 기후변화감시망의 구성.



표 2.2.2 위탁관측소 운영 현황

위탁기관명	위·경도	관측요소	위탁지정일	비고
연세대학교	37.57°N 126.95°E (서울)	성층권오존, 자외선	2004. 11. 6.	WMO/GAW 지역급 관측소
광주과학기술원	35.22°N 126.83°E (광주)	에어로졸 광학깊이, 연직분포	2007. 1. 1.	
서울대학교	37.75°N 127.15°E (광릉수목원)	산림 이산화탄소	2008. 11. 5.	
극지연구소	62.22°S 58.78°W (남극세종과학기지)	이산화탄소	2010. 10. 26.	WMO/GAW 지역급 관측소
	74.62°S 164.23°E (남극장보고과학기지)	이산화탄소, 성층권 오존	2017. 10. 1.	
제주대학교	33.29°N 126.16°E (제주 고산)	라돈	2012. 4. 1.	
숙명여자대학교	37.54°N 126.97°E (서울)	중층대기 수증기, 성층권 오존	2015. 4. 1.	

2.3 세계기상기구 육불화황(SF₆) 세계표준센터

WMO/GAW내에는 전 세계 약 54개의 관측소에서 육불화황(SF₆)을 관측하고 있다(gawsis.me teoswiss.ch/GAWSIS; last access; March, 2021). 이 관측소들이 생산하는 관측값들로 전 지구 연간 온실가스 평균을 산정하기 때문에, 고품질 자료가 생산되어야 한다. 따라서 WMO/GAW 프로그램은 관측소들이 생산하는 자료들의 품질보증체계를 위한 중앙기구를 두고 각 관측소의 기술적 지원을 하고 있다(그림 2.3.1).

세계표준센터(WCC)는 중앙기구 중 하나로, 1) 비교실험 주관, 2) 적합성평가 이행, 3) 기술노트 등의 발간, 4) 교육훈련과정 운영 등을 통해 각 관측소의 기술을 지원한다.

기상청 국립기상과학원의 경우 2012년 처음으로 WMO와 업무협약을 통해 육불화황의 WCC로 지정되었다. 2012년부터 현재까지 총 3곳의 관측소에 적합성평가를 이행하였으며, 국제 비교실험 1회 주관, 중앙교정실험실과의 격년 비교실험을 진행하였으며, 검교정 관련 WMO 보고서 2권 발간하였고, 개발도상국을 대상으로 교육훈련과정 5회를 개최하는 등 활발한 활동을 통해 국제사회에 기여하였다. 본 보고서에서는 그 동안의 기상청 WCC-SF₆의 성과를 기술하고자 한다.

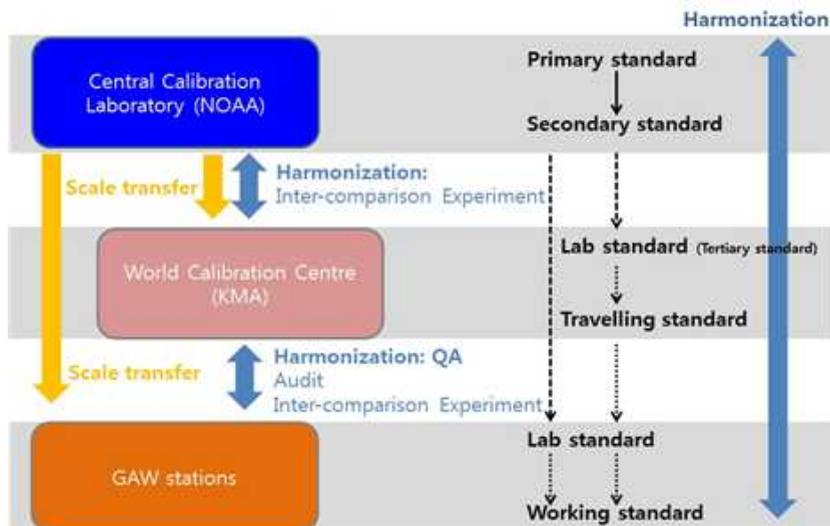


그림 2.3.1 WMO/GAW 프로그램 내에 표준에 대한 소급성 체계(WMO, 2018).



2.3.1 WCC-SF₆의 시스템 구성

WCC-SF₆는 운반표준가스(그림 2.3.1의 travelling standard)를 사용하여, 비교실험과 적합성평가 등을 이행한다. 운반표준가스의 제조는 크게 포집과 인증으로 나뉜다. 포집시설은 현재 안면도 기후변화감시소(126.32°E, 36.53°N, 47 m)에 설치되어 있으며, 포집된 가스실린더는 서귀포 본원 지구대기감시 표준실험실로 송부되어 인증된다.

안면도에 설치된 가스포집 장치는 그림 2.3.2와 같다. 40 m 타워에 연결된 데카본 튜브(Nitta Moore 1300-10)를 통해 공기가 유입되며, 두 단의 제습장치(Mg(ClO₄)₂)를 거쳐 1400 psi까지 채워지며, 만일 실린더의 내부 압력이 1500 psi가 넘어가면, 밸브의 방향이 자동으로 전환되어 공기가 벤트라인(vent line)으로 빠진다. 채워진 실린더는 서귀포 본원으로 이송되어, 중앙교정 실험실(Central Calibration Laboratory; CCL)의 표준가스 척도를 사용하여 인증된다. 기상청에서 인증에 사용하는 분석 시스템은 전처리 장치(Pre-concentrator)와 GC-μECD(Agilent 7890A)로 이루어져 있다. 전처리 장치는 흡착제의 종류에 따라 흡착온도가 다르지만, O₂, N₂, CO₂, Kr 등 피크의 끝이 늘어지는 현상(tailing)으로 인해 SF₆의 피크 분리를 방해할 수 있는 물질을 흡착하기 때문에 전처리 장치의 사용시 SF₆ 분석 정밀도가 0.5%에 이른다(O'Doherty et al., 1993; Maiss et al., 1996; Miller et al., 2008). 또한 GC-μECD의 샘플링 밸브를 총 6방 이상으로 사용하여 Back Flushing method(BF)를 적용한다. BF기법은 CCL에서도 사용하는 방법으로, 주 컬럼(main-column)에서 타겟물질을 얻은 뒤 남은 가스 종들은 밸브의 포지션을 변경하여 후단 컬럼(post-column)으로 보내 분석시스템 밖으로 내보낸다. BF 기법으로 사용 시 정밀도가 0.5%까지 향상되며(Hall et al., 2011) 이 경우 SF₆ 시료 하나당 소요되는 분석시간은 약 15~20분 내외이다. 전처리 장치와 BF를 연결하여 시료를 분석하는 WCC-SF₆ 시스템의 경우 보통 총 분석시간은 30~40분 소요가 되며 정밀도가 0.04%~0.1%, 10시간 동안 표류오차가 평균 ±1% 내에 있다.

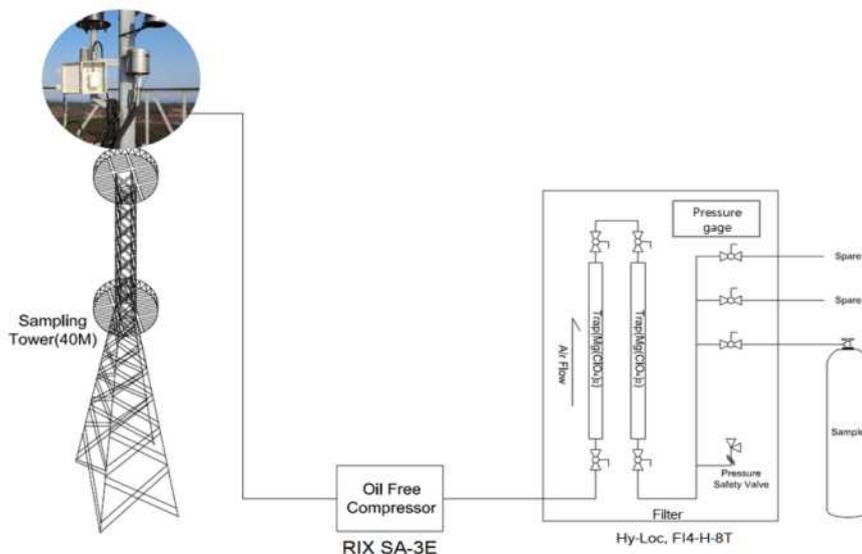


그림 2.3.2 안면도에 설치된 가스포집시스템.

2.3.2 비교실험

WCC의 역할 중 하나인 비교실험(Inter-comparison experiment)은 전 세계 관측소의 자료의 품질을 관리할 수 있도록 지원하는 활동으로, 관측정확도를 검증하기 위한 가장 대표적인 방법이다. 그 간 WMO에서는 비교실험을 주기적으로 또한 항목별로 꾸준히 진행하여왔으며, 실시간 관측자료와 플라스크 관측자료의 비교 또한 자료의 품질관리를 위한 필요성 중 하나로 논의된 바 있다(WMO/GAW, 2020; Masarie, 2001).

WCC에서 주관한 비교실험은 크게 세 가지로, 중앙기구 중 하나인 CCL과의 비교실험과 각 관측소들과의 국제 비교실험, 적합성평가 시 관측소와 진행하는 비교실험으로 구분된다. 적합성평가 시 비교실험의 결과는 다음 페이지에 제시하였다.

CCL과의 비교실험은 WCC가 반드시 이행해야 하는 의무 중 하나로, CCL은 GAW 관측소들의 1차 표준 척도(primary standard scale)를 유지관리 하는 기관이기 때문이다. 여기서 척도란, 공식적 합의를 통해 정해진 기준 값(JCGM, 2012)으로 WMO/GAW는 WMO-X2014 척도를 사용한다. CCL은 이 척도를 유지하고 전 세계 관측소에 전파(propagation)하기 위해 3차 표준(tertiary standard)까지 생산한다. 이 3차 표준은 각 관측소에서 직접 사용하거나 혹은 WCC를 통해 사용이 가능하기 때문에 CCL과의 비교실험을 통해 비슷한 값에 존재하는 지 확인하여야



한다. SF₆에 대한 WCC와 CCL의 비교실험은 총 4차례 진행되었으며, 2013년부터 2019년까지 격년으로 진행하였다(그림 2.3.3). 2015년을 제외하고는 모든 자료가 호환성 범위 안에 있다. 2015년의 경우 1점으로 교정을 진행하였으며, 현재 두 점 이상의 교정을 통해 값을 생산하고 있다.

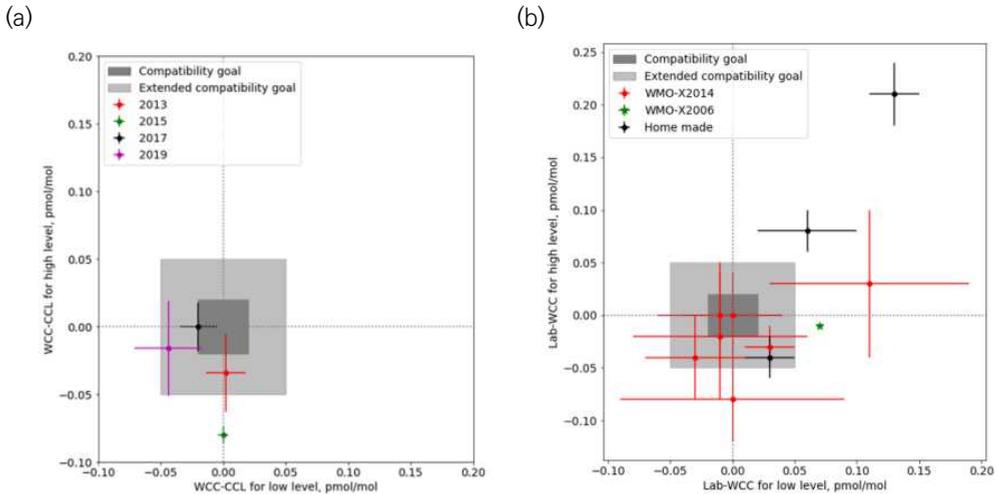


그림 2.3.3 (a) 중앙교정실험실 (b) 제1차 육불화황 국제비교실험의 비교실험 결과.

제1차 육불화황 국제순차순환비교실험(SF₆ Inter Comparison Experiment: SICE)는 WCC-SF₆가 주최한 비교실험 캠페인으로 2016년 5월 1일부터 2017년 2월 10일까지 7개국 11개 기관이 참여하였다. 유럽의 8개 기관, 아시아태평양의 3개 기관이 참석하였으며, 한국에서는 안면도 기후변화감시소와 한국표준과학연구원 이 참여하였다. 방법은 WCC-SF₆가 준비한 운용표준가스를 WCC→참여기관1→참여기관2→...→WCC의 순으로 순차적으로 분석한 후, 각 참여기관은 WCC-SF₆에 각각의 결과 값을 제출한다. 제출 시 분석값 결과, 정밀도, 분석 시 사용한 표준가스의 척도와 농도범위 등을 보고하며, 정밀도가 관측불확도로 정의된다. 이 보고서는 현재 WMO 홈페이지에서 다운 받을 수 있다(<https://community.wmo.int/other-gaw-related-publications>; last access March 2021).

동일한 시료로 WCC-SF₆와 총 11개의 실험실의 분석값의 차이를 그림 2.3.3(b)에 제시하였다. 전체의 50% 실험실이 호환성범위(± 0.02 ppt) 이내에 있었으며, 확장호환성범위(± 0.05 ppt) 이내에 든 실험실은 전체 참가 실험실 중 고농도에서 88%, 저농도에서 75%를 차지하였다.

2014년부터 2015년까지 CCL이 주관하고 17개 실험실이 참석한 6차 국제순차순환비교실험 (esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/wmorr_results.php?rr=rr6¶m=sf6, last access: March, 2021)에서는 SF₆의 경우 약 29%만이 호환성범위 안에 있어, 이 결과와 비교하였을 때 향상된 결과를 보였다.

그림 2.3.3(b)에서 차이값을 세 그룹으로 나누었는데, 붉은색 점은 WMO-X2014, 녹색은 WMO-X2006, 검정색 점은 참가실험실의 개별 척도로 분석한 것이다. 대부분 호환성 범위에 들어온 것은 WMO-X2014척도를 사용한 실험실로 WCC-SF₆의 운용가스 또한 WMO-X2014로 교정하여 분석되었기 때문이다. 반면, 검정색 세 점 중 2점은 가장 큰 차이값을 보이는데, 이는 각각의 기관이 각각의 척도로 산정하였기 때문으로 추측한다. 한 곳은 Heidelberg University 척도, 다른 한 곳은 METAS-2016 척도로 분석하여 제출하였다. Heidelberg University 척도로 분석한 실험실의 경우 WCC-SF₆(WMO-X2014 척도)와 0.13~0.21 ppt(1.6%~2.3%)의 차이를 보였으며, METAS-2016 척도의 실험실은 0.06~0.09 ppt(0.7%~0.9%)의 차이를 보였다. 반면, 한국표준과학연구원의 경우 KRISS 척도로 참여하였으나, 그 차이값이 ±0.04 ppt 수준으로 호환성 범위 안에 있다. 이는 과거 KRISS와 WMO-X2014 척도 비교결과와 유사한 수준이다(0.49%, 0.03-0.04 ppt at 7-9 ppt) (Lim et al., 2017).

2.3.3 적합성평가

적합성평가의 방법은 크게 현장 검사를 통한 체크리스트 작성, 비교실험을 통한 값의 검증 등이 있다. WCC-SF₆에서는 2016년부터 2018년까지 남아프리카공화국의 Cape Point 지구급 관측소, 독일의 Zugspitze 지구급 관측소, 미국의 Mauna Loa 지구급 관측소 순으로 매년 적합성 평가를 이행하였다. 2019년은 중국으로 예정되어있었으나 CFC-11에 대한 중국내 배출량 증가에 대한 논문 등의 발표로 중국 정부에서 적합성평가의 취소를 요청하였으며, 2020년에는 독일 지역관측소의 적합성평가가 코로나19에 의한 팬데믹으로 취소되었다.

남아프리카공화국의 Cape Point 관측소의 경우 관측시스템이 N₂O를 중심으로 이루어져 있었으며, 노후화된 시스템, 표준가스 농도의 잘못된 설정 등 여러 가지 문제점이 확인되었다. 적합성평가 기간 동안 시스템의 개선을 통해 비교실험결과를 향상시켰으며, 향후 자료의 공유 등이 국제사회에 이루어질 것을 권고하였다.

독일의 Zugspitze 관측소는 모든 시스템이 잘 마련되어 있었으며, 오래된 전문가들의 역할로 장비나 시스템의 이상은 발견되지 않았다. 반면, 장비의 비선형성이 발견되어 향후 2점 이상의 검교정을 고려해야 함을 권고하였다.



마지막으로 이행했던 미국 Mauna Loa 관측소는 기기의 비선형성이 명확히 확인되었으며, 이는 검출기의 노후화로 발견되었다. 따라서 적합성평가 이후 Mauna Loa 관측소는 이를 근거로 기기의 변경이 이루어졌다(표 2.3.1).

각 관측소에 대한 적합성평가의 결과 보고서는 www.nims.go.kr/wcc에서 확인이 가능하다.

표 2.3.1. 2016년부터 2018년까지의 적합성평가를 이행했던 관측소 정보, 비교실험 결과 및 개선사항

	Cape Point	Zugspitze	Mauna Loa
평가 기간	2016년 6월 7~10일	2017년 11월 20~24일	2018년 10월 22~26일
위치	34°S, 18°E, 230 m a.s.l.	47.42°N, 10.98°E, 2656 m a.s.l.	19.54°N, 155.58°W, 3397 m
비교 실험 결과			
개선 사항	컬럼과 샘플루프 교체		검출기 교체

제 2 장 한반도 지구 대기 감시
전망

2.3.4 기술노트

기술노트는 WCC-SF₆의 그간의 실험을 바탕으로 크게 두 가지 종류의 기술노트를 2015년과 2018년에 각각 WMO/GAW 보고서 No.222와 No.239로 발간하였다(그림 2.3.4). No.222의 경우 여러 가지 분석방법에 대해 제시하였다. 전통적으로 SF₆ 분석에 사용되는 GC-μECD 방법, GC-μECD와 전처리 장치를 연결하여 사용하는 방법, GC-μECD의 밸브를 교차하여 분석하지 않는 가스 종을 기기 밖으로 배출하는 Back-flush/heart-cutting 방법 등이다. 또한 분석 시 가스 용기의 재질, 가스관의 재질에 따라서 분석 정밀도가 어떻게 향상되는지를 제시하였다. No.239의 경우 GC-μECD를 이용한 검교정방법을 1점 교정, 2점 교정, 다점교정으로 구분하고, 이 교정 시 불확도를 산출하는 방법까지 서술하였다.

이 WMO 기술노트는 교육훈련과정에도 활용되며, 실험의 세팅과 검교정 시 활용될 수 있도록 각 관측소에 배포되어 사용 중에 있다.

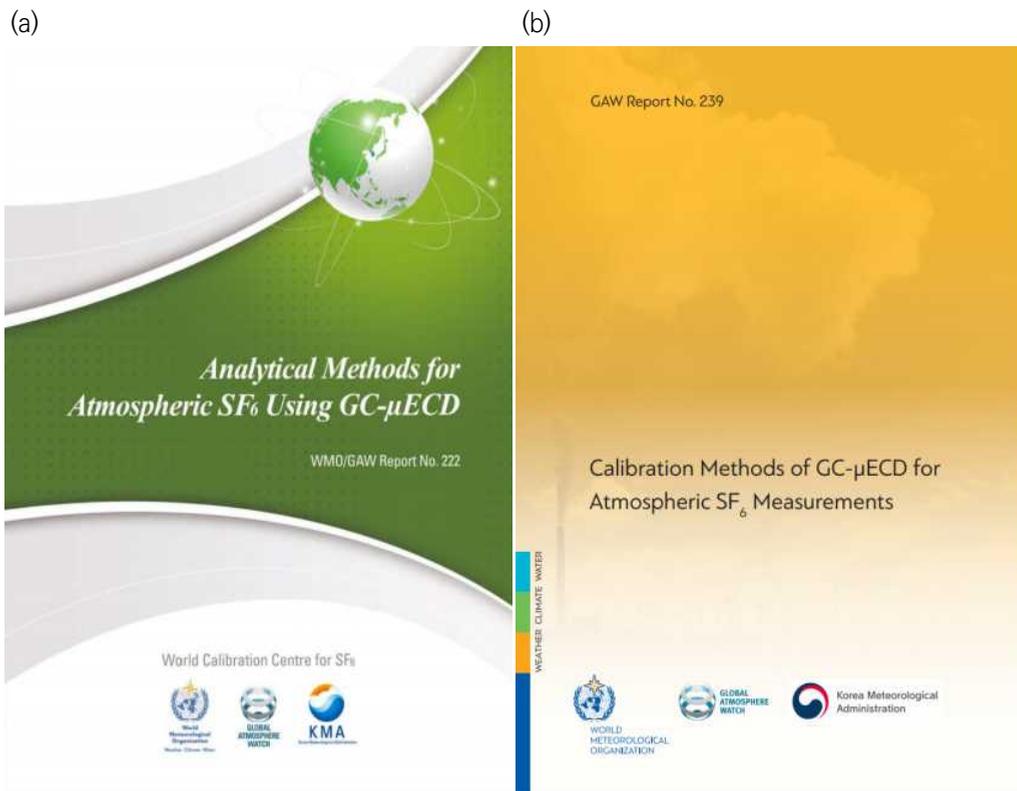


그림 2.3.4 (a) GC-μECD를 이용한 SF₆ 분석방법, (b) GC-μECD를 이용한 SF₆ 검교정 방법.



2.3.5 교육훈련과정

교육훈련과정은 2013년 개최된 제5차 아시아·태평양 기후변화감시 국제워크숍(2009년~)의 토의 시간에 제안되어 2014년부터 운영되었다. 2019년까지 총 5차가 진행되었으며, 현재까지 10개국 총 28인의 교육생이 수료하였다. 인도(6), 인도네시아(5), 베트남(5), 말레이시아(3), 남아프리카공화국(2), 피지(2), 브라질(2), 요르단(1), 타지키스탄(1), 코스타리카(1)의 순이었다(그림 2.3.5).

교육훈련과정은 온실가스의 관측을 주요 타겟으로 이루어졌으며, 장비별 검교정 방법, 유지 보수관리 방법 등을 기본으로 운영되었다(그림 2.3.6). 각 커리큘럼과 교육훈련과정의 내용은 www.nims.go.kr/wcc에서 확인이 가능하다. 2020년에는 코로나19로 인해 운영되지 않았다.

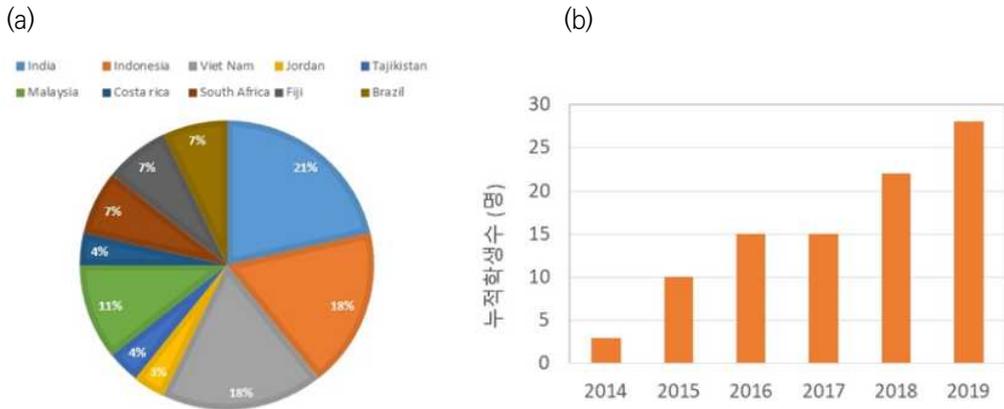


그림 2.3.5 제1차부터 5차까지 교육훈련과정에 (a) 참여국과 (b) 누적 교육생 수.

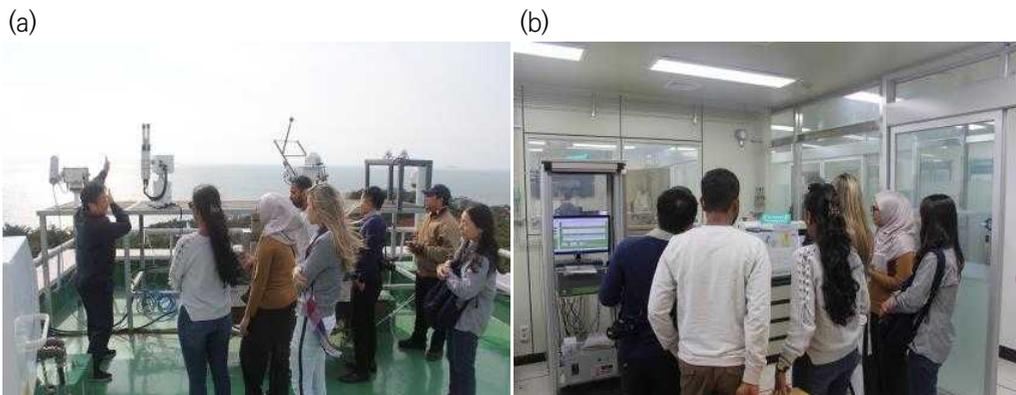


그림 2.3.6 제5차 교육훈련과정 중 (a) 관측소 탐방과 (b) 실습과정 모습.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

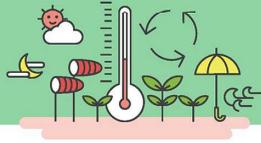
제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제3장 기상특성

3.1 2020년 기상특성	24
3.2 기후변화감시소 기상 특성	53



제3장 기상특성

3.1 2020년 기상특성

2020년 평균기온은 13.2°C로 평년(12.5°C)보다 0.7°C 높았음. 1973년 이후 5번째 전국 강수량은 1591.2 mm로 평년(1207.6~1446.0 mm)보다 많았음. 1973년 이후 6번째

2020년은 1973년 이후 5번째로 더웠던 해로 전국 평균기온은 13.2°C로 평년보다 0.7°C 높았다. 최근 6년 동안이 2017년 9위, 2018년 12위를 제외하고는 상위 5위 안에 들어가는 온난화 경향이 이어졌다(그림 3.1.1). 지역적으로는 강원도와 충북, 경북을 중심으로 기온이 평년보다 0.9~1.2°C 높은 분포를 보였다(그림 3.1.2(a)).

월별로는 봄철과 여름철에 월별 기온 변동폭이 매우 큰 특징을 보였으며, 연 초반인 1~3월은 북극에 찬 공기가 갇힌 가운데 시베리아 지역의 기온이 평년보다 2~3°C 높게 유지되면서 찬 시베리아 고기압의 강도가 약해 전국적으로 높은 기온을 기록(상위 1~3위)하였다. 반면, 4월은 북서쪽에서 찬 공기가 자주 유입되면서 쌀쌀했던 날이 많아 기온이 하위 5위까지 떨어졌다. 여름철 시작인 6월은 이른 폭염이 한 달간 지속되면서 평균 기온과 폭염일수가 상위 1위를 기록하였고, 7월은 선선했던 날이 많아 6월(22.8°C) 평균기온이 7월(22.7°C)보다 높은 현상이 1973년 이후 처음으로 나타났다(표 3.1.1).

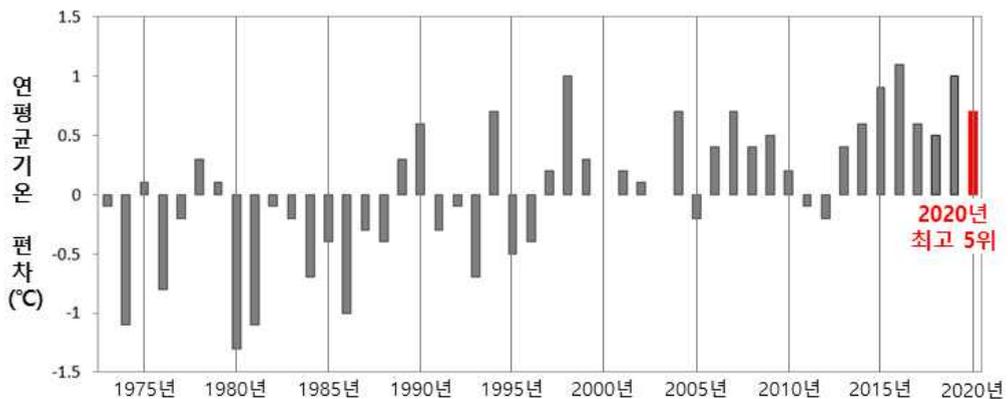


그림 3.1.1 전국 45개 지점의 연평균기온(°C) 평년편차 시계열, 평년: 1981~2010년.



표 3.1.1 우리나라 월평균기온(°C), 편차(°C) 및 1973년 이후 최고 순위

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	2020년
평균(°C)	2.8	3.6	7.9	10.9	17.7	22.8	22.7	26.6	20.3	14.0	8.8	0.7	13.2
편차(°C)	+3.8	+2.5	+2.0	-1.3	+0.5	+1.6	-1.8	+1.5	-0.2	-0.3	+1.2	-0.8	+0.7
순위(상위)	1위	3위	2위	44위	14위	1위	44위	6위	29위	31위	10위	34위	5위

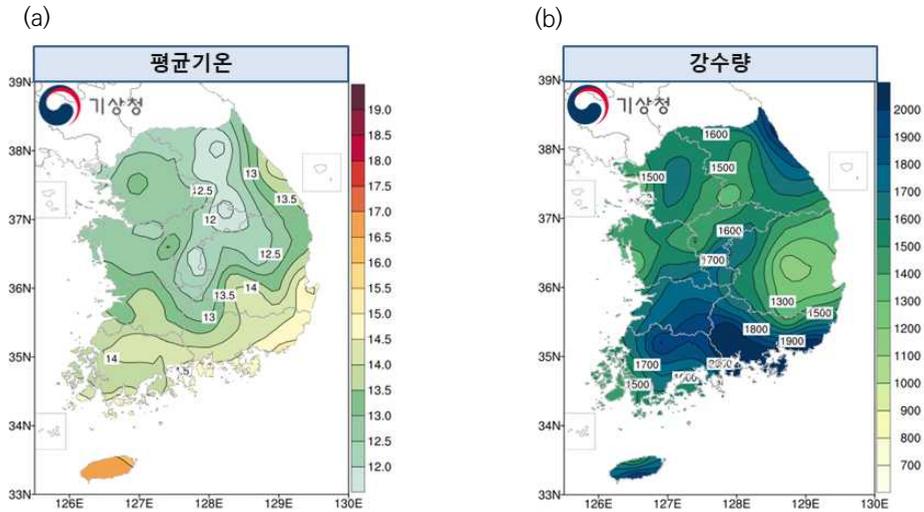


그림 3.1.2 2020년 전국 47개 지점의 (a) 연평균기온(°C) 및 (b) 연강수량(mm) 분포도.

2020년 전국 강수량은 1591 mm로 평년의 1207.6~1446.0 mm보다 많아 1973년 이후로 상위 6위를 기록하였다. 지역적으로는 중부 내륙과 전라 남해안, 제주 북부 등 일부를 제외하고는 전국적으로 강수량이 평년값보다 많았다(그림 3.1.2(b)).

월별로는 1~2월, 7~8월에 평년값보다 매우 많았던 반면, 봄철인 3~4월과 10월, 12월은 적었다. 특히, 역대 가장 긴 장마와 잦은 집중호우로 전국에 많은 비가 내려 여름철 전국 강수량(1012.4 mm)은 상위 3위를 기록하였다(표 3.1.2).

표 3.1.2. 우리나라 월강수량(mm), 퍼센타일(%ile) 및 1973년 이후 순위 (평년: 1981~2010년)

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	2020년
월강수량(mm)	83.4	58.3	28.1	40.3	104.4	182.1	420.7	401.6	210.0	10.5	38.9	7.9	1591.2
퍼센타일(%ile)	98.4	85.2	12.4	12.0	48.9	64.8	88.1	87.1	65.9	2.9	51.9	8.3	87.7
순위(상위)	2위	9위	41위	43위	23위	15위	6위	6위	13위	47위	24위	45위	6위

2020년에는 총 23개의 태풍이 발생하였고, 이 중 4개의 태풍이 우리나라에 영향을 주었다. 우리나라에 영향을 준 태풍은 여름철에 3개(제5호 장미, 제8호 바비, 제9호 마이삭), 가을철은 1개(제10호 하이선)였다. 이 중 제8~10호는 8월 하순 이후 연속 발생하여 우리나라에 영향을 주었고, 제5호 장미와 제9호 마이삭, 제10호 하이선은 우리나라에 상륙하였다.

본 절은 기상청에서 발간한 「2020년 기후특성 보고서」(기상청, 2021) 및 월별 기상특성 보도 자료, 선제기후자료 등을 참고로 작성하였다.



3.1.1 겨울철(2019년 12월~2020년 2월) 기상특성

2019/2020년 겨울철 평균기온은 3.1℃로 평년(0.6℃)보다 2.5℃ 높았음
 전국 강수량은 168.1 mm로 평년(67.7~97.3 mm)보다 많았음

2019년 12월, 2020년 1월과 2월의 평균기온은 각각 2.8℃, 2.8℃, 3.6℃로 평년의 1.5℃, -1.0℃, 1.1℃보다 높아 1973년 이후 이례적으로 가장 따뜻했던 겨울이었다. 2019년 12월은 초순에 짧은 추위가 있었으나, 대체로 따뜻한 남서기류가 자주 유입되면서 평년보다 기온이 높은 날이 많았다. 2020년 1~2월은 대기 상층 기압계의 동서 흐름이 대체로 원활한 가운데, 시베리아 지역의 온도가 평년보다 높아 찬 시베리아 고기압의 강도가 평년보다 약했다. 또한, 우리나라 남쪽에 따뜻하고 습한 고기압이 세력을 유지하면서 우리나라로 따뜻한 남풍 기류를 유입시켜 평년보다 높은 기온을 기록하였다.

2019년 12월 강수량은 26.3 mm로 평년인 16.6~28.5 mm와 비슷했고, 2020년 1월과 2월 강수량은 각각 83.4 mm, 58.3 mm로 평년 1월 19.0~28.6 mm, 2월 19.2~41.4 mm보다 많았다. 남서쪽에서 다가오는 비구름에 의해 잦은 강수로 겨울철 강수량은 168.1 mm로 1973년 이후 3번째로 많았으나, 작년 겨울철(2018년 12월~2019년 2월)과 유사하게 기온이 높아 눈보다도 비가 주로 내려 눈은 가장 적은 겨울이었다.

2019/2020년 겨울철에는 열대 태평양 대부분 해역의 해수면 온도가 평년보다 높았다. 엘니뇨·라니냐 상태를 정의하는 엘니뇨·라니냐 감시구역(Nino 3.4 구역, 5°S~5°N, 170°W~120°W)의 3개월 이동 평균된 해수면 온도는 평년보다 0.5℃ 높은 상태가 유지되면서 2019년 11월부터 시작한 약한 엘니뇨는 2019/2020년 겨울철 동안 지속되었다. 일반적으로 엘니뇨 절정기 해 이른 겨울철(11월, 12월)에는 한반도 동쪽에 쿠로시오 고기압성 흐름이 발달해 한반도에 남풍 기류를 유도함으로써 강수량 증가와 온도 상승에 기여하는 경향이 있다. 2019/2020년 겨울철 열대 서-중태평양(Nino 4구역)의 해수면 온도는 지난 가을철(2019년 9~11월) 이후 지속적으로 평년보다 높은 분포를 보였다. 특히, 12월 중순 이후부터 겨울철 동안 열대 서태평양에서는 엘니뇨 시기에 유도되는 서풍 평년 편차가 강화되면서 평년보다 무역풍이 약화되었다. 이와 더불어 날짜 변경선 부근에서는 상승기류가 평년보다 강하여 대류활동이 증가하였고, 열대 서태평양에서의 하강기류가 강하여 대류활동이 억제되는 경향을 보였다. 또한, 한반도 동쪽에 고기압성 흐름이 발달해 한반도에 남풍 기류를 유도하면서 겨울철 동안 열대에서는 엘니뇨 해의 대기 반응이 나타났다.

이는 미국 환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction; NCEP)의 재분석자료에서도 볼 수 있다. 그림 3.1.3(a)는 2019년 12월~2020년 2월 겨울철 기간의 평균 풍속 및 풍향이며, 중국 내륙 등 육상에서 약한 풍속, 북위 20도 이하의 해양에서 강한 풍속을 보였고, 우리나라에서는 겨울철에 주로 나타나는 주로 북서풍 계열의 바람이 3~5 m/s의 세기로 불었다. 그림 3.1.3(b)는 평년(2001년~2020년) 평균 풍향, 풍속 대비 2019년 12월~2020년 2월 겨울철 기간의 풍향, 풍속 편차이며, 이 기간에는 평년에 비해 남풍 편차를 보였다. 즉, 우리나라에는 겨울철에 주로 북서풍의 불었으나, 남풍기류의 유도로 인하여 평년에 비해 북서풍이 약했음을 의미한다. 이는 해당기간에 시베리아 고기압의 약화와 이로 인한 한반도 지역 남서풍 유입, 고온 현상과도 일관성 있게 해석된다.

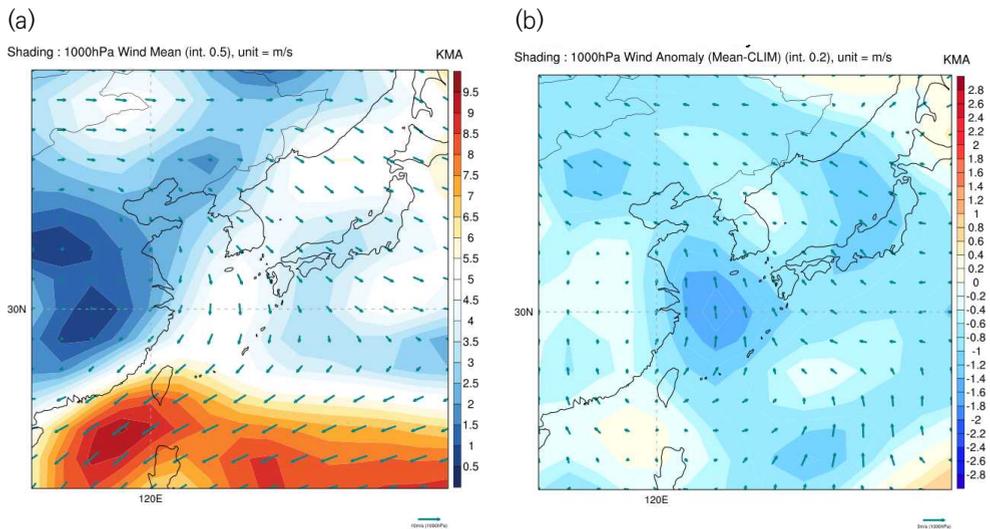


그림 3.1.3 NCEP 재분석자료를 이용한 (a) 2019년 12월~2020년 2월 겨울철 1000 hPa 고도 풍속과 풍향 (기준벡터: 10 m/s) 및 (b) 2001~2020년 대비 풍속과 풍향편차(기준벡터 3 m/s)(b).



가. 1월 기상특성

한반도 기상역사를 다시 쓴 따뜻한 1월

- 1973년 이후 1월 극값 경신: 기온·강수량(상위 1위/2위), 적설(하위 1위)
- 약한 시베리아 고기압과 잦은 남풍기류 영향

1월의 경우 시베리아 지역에 남서기류가 주로 유입되면서 평년보다 3°C 이상 높은 고온현상이 나타나, 차고 건조한 시베리아 고기압이 발달하지 못하였다. 이로 인해 우리나라로 불어 들어오는 찬 북서풍도 약하였으며, 겨울철에 발달하는 극 소용돌이가 평년에 비해 강하여 제트기류가 북상하면서 북극의 찬 공기를 가두는 역할을 하였다. 또한, 아열대 서태평양에서는 해수면온도가 평년보다 1°C 내외로 높아 우리나라 남쪽에 따뜻하고 습한 고기압이 세력을 유지하면서 우리나라로 따뜻한 남풍기류를 유입시켰다(그림 3.1.4). 그 결과 전국 평균기온은 새해 첫날을 제외하고 모든 날이 평년보다 높았으며, 1973년 이후 가장 높은 2.8°C로 평년과 비교하여 약 3.8°C 정도나 높았다. 평균 최고기온은 7.7°C이고 평균 최저기온은 -1.1°C로 모두 가장 높은 기온을 기록하였다. 특히, 6~8일과 22~28일에는 남서쪽에서 이동해온 저기압의 영향으로 따뜻한 남풍기류가 유입되어 전국에 고온현상이 나타났다(그림 3.1.5).

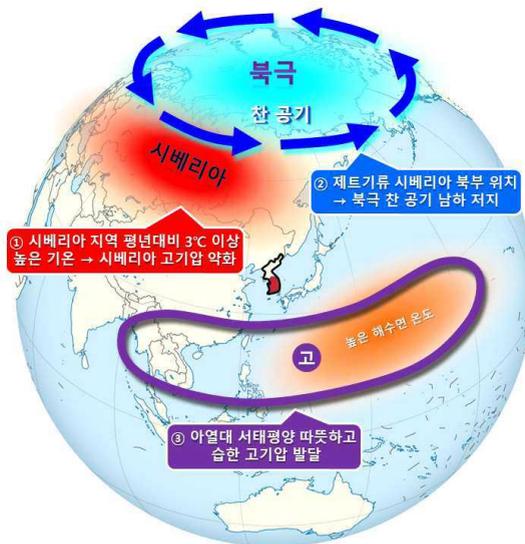


그림 3.1.4 2020년 1월 전지구 기압계 모식도.

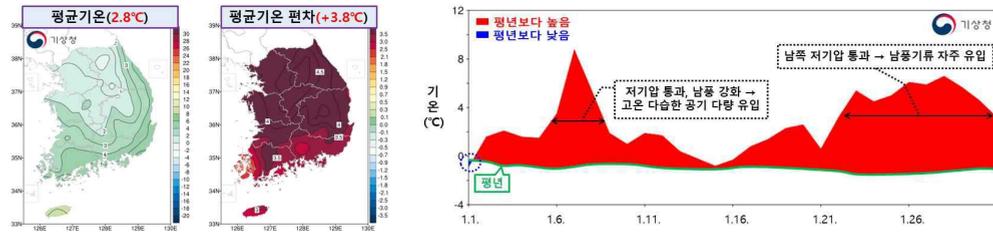


그림 3.1.5 2020년 1월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

한편, 우리나라 남쪽의 고기압과 중국 남부에서 발달하여 다가오는 저기압 사이에서 발달한 강한 남풍기류를 따라 따뜻하고 습한 공기가 다량으로 유입되어 전국적으로 강수현상이 자주 나타났고, 그 결과 1월 강수량은 1973년 이후 두 번째로 많았다. 특히 6~8일에는 저기압이 급격하게 발달해 우리나라를 통과하면서 3일간 누적강수량이 1월 역대 1위를 기록한 곳이 많았다. 하지만, 우리나라 주변 기온이 평년보다 높았고, 약한 시베리아 고기압으로 인해 서해상의 해기차(해수면과 대기의 온도차)에 의한 눈구름대 생성이 약해 1월 적설량은 하위 1위를 기록한 지점이 많았다(그림 3.1.6).

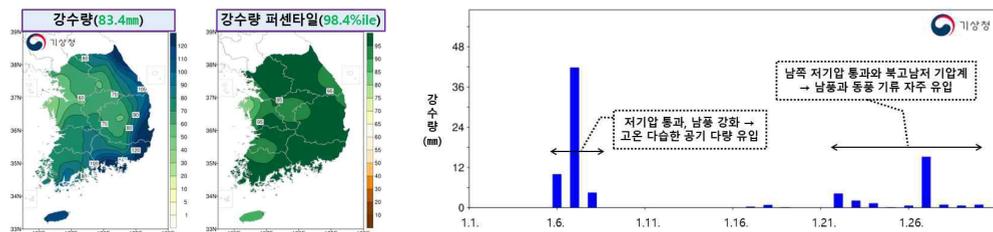


그림 3.1.6 2020년 1월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

나. 2월 기상특성

고온 현상 유지, 강한 남풍 기류로 많은 강수

- 전국 평균기온은 3.6°C로 평년(1.1±0.7°C)보다 높았음
- 전국강수량은 58.3 mm로 평년(19.2~41.2 mm)보다 적었음

2020년 2월의 평균기온은 3.6°C로 평년인 1.1±0.7°C보다 2.5°C 높았다. 평균 최고기온은 8.3°C로 평년에 보다 2.2°C 높았고, 최저기온도 -1.4°C로 평년에 비해 2.8°C 높은 고온현상이 유지되었다. 평균기온과 평균 최저기온은 1973년 이후 상위 3위를 기록하였고, 평균 최고기온도



상위 5위를 기록하였다. 이는 지난 1월에 보였던 약한 시베리아 고기압, 서태평양의 높은 해수면 온도의 영향이 지속되었기 때문이다.

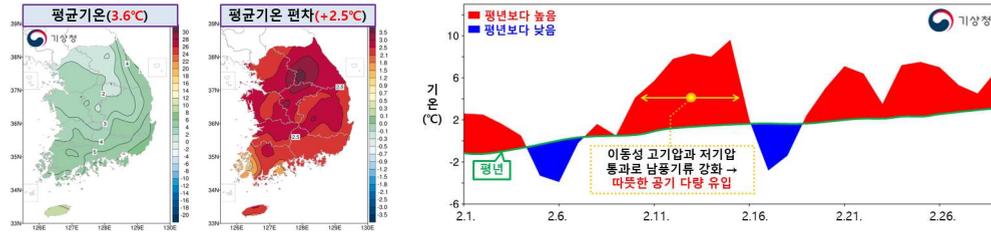


그림 3.1.7 2020년 2월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

한편, 2월의 전국 강수량은 58.3 mm로 평년의 19.2~41.2 mm보다 많았고, 기온이 높아 눈보다는 비가 주로 내렸다. 2월 중순과 하순에 강수량이 많았으며, 특히 2월 25일에는 남서쪽에서 발달한 저기압이 통과하면서, 강한 남풍기류를 따라 습한 공기가 다량으로 유입되어 많은 강수량을 기록하였다. 강수량은 경기, 충청 등 중서부 지방에 많았으며, 전라도와 제주를 포함한 남서부 지방과 중남부 지방, 그리고 강원 영동지역은 강수량이 평년에 비해 적었다.

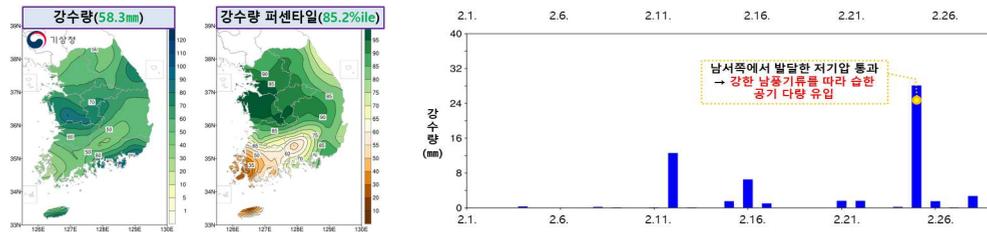


그림 3.1.8 2020년 2월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

3.1.2 봄철(2020년 3~5월) 기상특성

심하게 널뻐 봄철 기온과 3일에 한번 비 왔던 5월

- 1973년 이후 평균기온 3월(상위 2위), 4월(상위 44위), 5월(상위 14위)
- 4~5월 상층에 위치한 차고 건조한 공기 때문

2020년 3월까지 전국 평균기온이 월별 역대 상위를 기록(1월 1위/2월 3위, 3월 2위)하면서 높은 기온 추세가 이어졌으나(1~3월 4.8℃/평년 2.0℃, 상위 1위), 4월에 찬 공기가 자주 유입되어 꽃샘추위가 나타나면서 고온의 추세가 꺾였다(그림 3.1.9). 3월에는 북극에 찬 공기가 갇힌 상태가 지속되는 가운데 시베리아 지역의 기온이 평년보다 2℃ 이상 높게 유지되면서 차고 건조한 시베리아 고기압의 세력이 약했다. 반면, 4월에는 바이칼호 북서쪽에 키가 큰 따뜻한 공기가 정체하면서 남북 흐름이 강화되어 북서쪽에서 찬 공기가 자주 유입되었기 때문이다(그림 3.1.10). 그 결과 2020년 봄철(3~5월) 전국 평균기온은 12.2℃로 평년의 11.7±0.3℃에 비해 약간 높았던 것으로 나타났다.

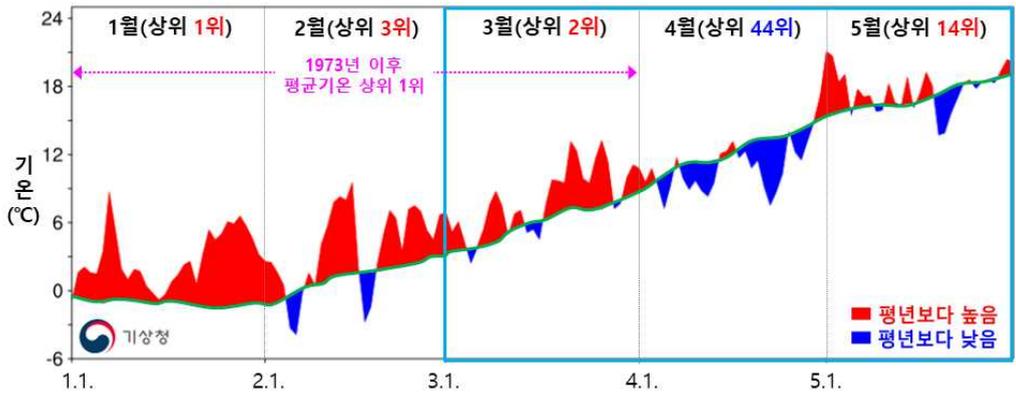


그림 3.1.9 2020년 3~5월 전국 평균기온의 일변화 시계열.

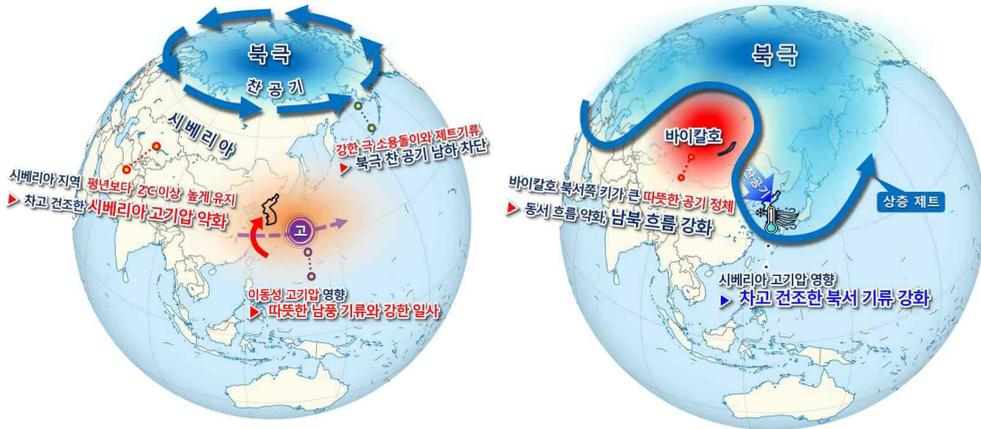


그림 3.1.10 2020년 3월(왼쪽)과 4월(오른쪽) 전지구 기압계 모식도.

3월에는 건조한 공기의 영향을 자주 받았으며, 정체기 풀리면서 서쪽에서 강수대가 주기적으로 접근하여 강수현상이 잦았으며, 흐린 날도 잦아 체감적으로 선선하게 느껴지는 날이 많았다. 4월 중반에 상층에는 -25°C 이하의 찬 공기가 한반도까지 깊게 남하하면서, 12일은 제주도과 강원 산간에 많은 눈이, 22일 새벽에는 서울에 진눈깨비가 내려 1907년 10월 기상관측 이후 4월에 가장 늦은 봄눈이 기록되었다. 2020년 봄철 전국 강수량은 평균 172.8 mm로 평년의 209.1~260.4 mm이 비해서는 적었다.

우리나라 주변으로 북쪽 상층에 찬 공기가, 남쪽 하층에 따뜻한 공기가 자리한 가운데 두 공기 사이에서 기압차가 커지면서 바람이 강하게 부는 날이 많았다. 특히, 3월 19~20일, 4월 21~25일, 5월 11~13일과 18~19일은 태풍 수준의 매우 강한 바람이 불어, 전국 곳곳에 강풍 피해와 함께 산불피해가 발생했다.

NCEP 재분석장 분석 결과, 봄철 우리나라 지표면의 평균 바람은 전반적으로 서풍계열이었고, 평균 풍속은 전국적으로 3~3.5 m/s 정도였다. 풍향/풍속의 편차 분석에서 알 수 있듯이 평년보다 서풍계열의 바람이 0.4~0.8 m/s 강하게 불었다(그림 3.1.11). 한편, 봄철 황사 일수는 1.0일로 평년의 5.4일에 비해 매우 적었다. 월별 황사 지수를 살펴보면 3월은 0.0일, 4월은 0.7일, 5월은 0.3일로 평년의 3월 1.8일, 4월 2.5일, 5월 1.1일에 비해 모두 적었다.

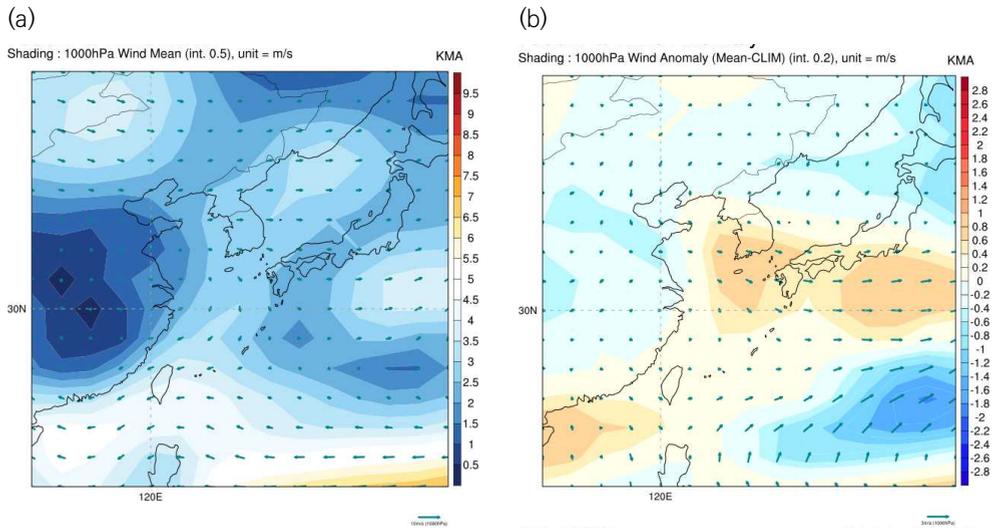


그림 3.1.11 NCEP 재분석자료를 이용한 (a) 2020년 3~5월 봄철 1000 hPa 고도 풍속과 풍향 (기준벡터: 10 m/s) 및 (b) 2001~2020년 대비 풍속과 풍향편차(기준벡터 3 m/s).



가. 3월 기상특성

꽃샘추위에도 역대 두 번째로 기온이 높았던 3월

- 전국 평균기온은 7.9℃로 평년(5.9±0.4℃)보다 높았음(상위 2위)
- 전국강수량은 28.1 mm로 평년(47.3~59.8 mm)보다 적었음

2020년 3월은 1월, 2월에 이어 높은 기온의 추세가 이어졌다. 전국 평균 기온은 7.9℃로 평년의 5.9±0.4℃에 비해 +2.0℃의 편차를 보이며, 1973년 이후 두 번째로 높은 온도를 기록하였다. 2019년 겨울과 유사하게 시베리아 지역의 기온이 평년보다 2℃ 높게 유지되면서, 차고 건조한 시베리아 고기압이 강하게 발달하지 못했다. 또한, 강한 극 소용돌이와 제트기류가 극 가까이에서 형성되어 북극의 찬 공기를 가렸으며, 중위도에서의 동서 흐름이 대체로 원활해 북극 찬 공기의 남하가 차단되었기 때문인 것으로 분석된다. 3월 18~27일은 이동성 고기압과 저기압의 영향을 번갈아 받으면서 따뜻한 남풍기류의 유입과 강한 일사까지 더해져 기온이 크게 상승하였다(그림 3.1.12).

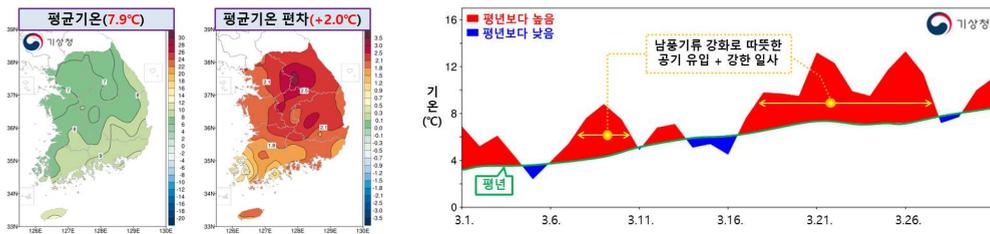


그림 3.1.12 2020년 3월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

3월에는 주기적인 기압골의 영향과 두 차례의 남서쪽에서 다가온 저기압의 영향으로 강수 현상이 잦았고 날씨 변화도 컸다. 그러나 강수대가 우리나라 북쪽과 남쪽 해상을 통과하면서 내륙지방에는 강수량이 적고 건조한 경향을 보였다(그림 3.1.13). 특히, 19~20일에는 북한을 지나는 차가운 저기압과 우리나라 남동쪽의 따뜻한 고기압 사이에서 기압차가 커지면서, 태풍 수준의 강한 바람이 불어 일 최대순간풍속 극값을 경신한 곳이 많았다.

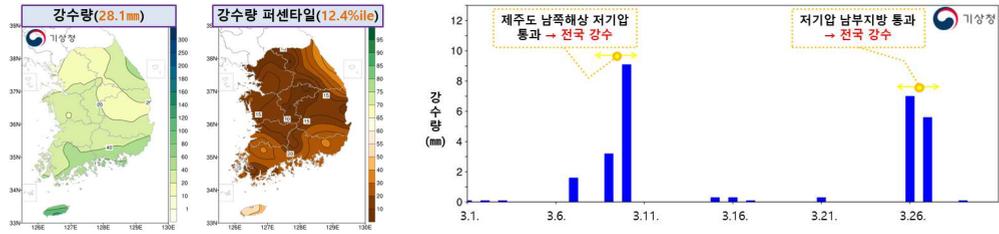


그림 3.1.13 2020년 3월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

나. 4월 기상특성

쌀쌀하고 강풍이 많았던 4월

- 전국 평균기온은 10.9℃로 평년(12.2±0.4℃)보다 낮았음
- 전국강수량은 40.3 mm로 평년(56.1~89.8 mm)보다 적었음

2020년 4월은 쌀쌀한 날이 많았고, 전국 월 평균기온은 10.9℃로 평년의 12.2±0.4℃에 비해 낮았으며, 1973년 이후 상위 44위를 기록하였다. 이는 바이칼호 북서쪽에 키가 큰 따뜻한 공기가 정체하면서 동서 흐름인 편서풍이 약해지고 남북 흐름이 강화됨에 따라, 북서쪽으로부터 차고 건조한 공기가 우리나라에 자주 유입되었기 때문이다(그림 3.1.10). 특히, 4월 21~24일은 우리나라 북서쪽에서 차고 건조한 북서풍이 매우 강하게 한반도로 들어와 전국적으로 기온이 매우 낮았다. 이 기간 전국 평균기온은 8.9℃로 평년 대비 -4.7℃로 기온이 낮았다.

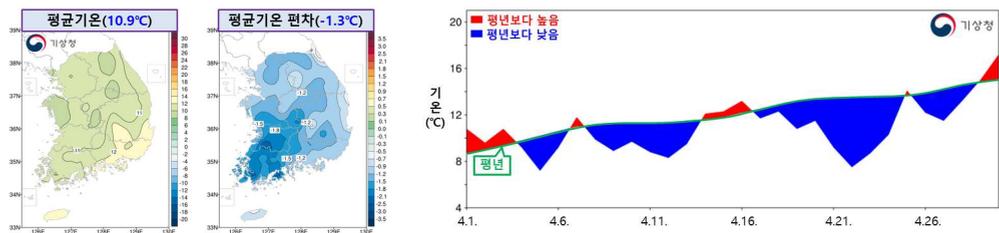


그림 3.1.14 2020년 4월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

4월에는 우리나라에 두 차례 전국적으로 비가 내렸으나, 차고 건조한 공기의 영향을 주로 받아 강수량이 적고 건조한 날이 많았다. 4월 전국 강수량은 40.3 mm였고, 평년의 56.1~89.8 mm에



비해 적었다. 4월 12일과 22일에는 상층에 -25°C 이하의 찬 공기를 동반한 저기압이 한반도까지 깊게 남하하면서, 12일은 제주 산간에 많은 눈이, 22일 새벽에는 서울에 진눈깨비가 내려, 1907년 기상관측 이후 4월 하순에 가장 늦은 봄눈을 기록하였다(그림 3.1.15). 한편, 찬 공기의 영향을 받는 가운데 우리나라 주변으로 기압변화가 커지면서, 강한 바람이 부는 날이 많았으며, 특히 21~25일에는 최대 풍속이 $12.7\sim 25.6\text{ m/s}$, 최대순간풍속이 $19.5\sim 32.4\text{ m/s}$ 로 전국 대부분 지역에 매우 강한 바람이 불었다. 중국 북동지방에서 발원한 황사가 북서풍을 타고 남동진하여 4월 4일은 전국에, 22일은 서해5도와 중부지방에 황사가 관측되었으나, 전국 황사 일수는 4월에 0.7일로 평년 2.5일에 비해 1.8일 적었다.

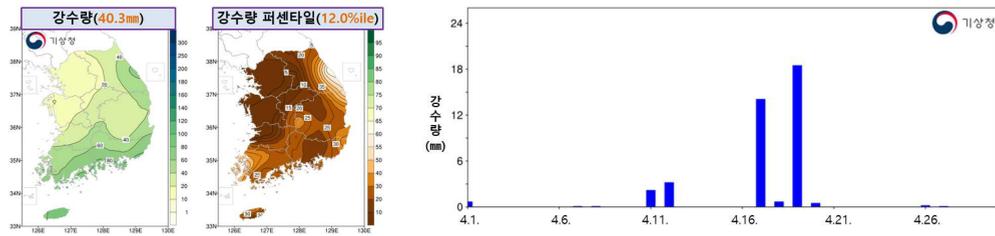


그림 3.1.15 2020년 4월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

다. 5월 기상특성

기온의 상승으로 평년 기온 회복, 잦은 강수, 강풍

- 전국 평균기온은 17.7°C 로 평년($17.2\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)보다 약간 높았음
- 전국강수량은 104.4 mm 로 평년($77.9\sim 114.4\text{ mm}$)과 비슷했음

2020년 5월에는 기온이 소폭 상승하여 평년의 기온을 회복하였다. 5월 하순에 낮은 기온이 한동안 지속되기는 하였으나, 전국 평균기온은 17.7°C 로 평년의 $17.2\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 에 비해 0.5°C 높았다. 또한, 전국 평균 최저기온은 12.8°C 로 2012년의 13.0°C 다음으로 가장 높았다. 온도 편차 분포는 남해안 일부를 제외하고는 전국적으로 평년에 비해 약간 높은 분포를 보였다(그림 3.1.16).

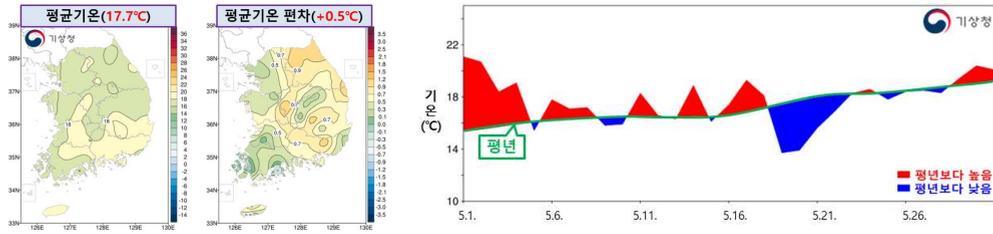


그림 3.1.16 2020년 5월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

4월의 상층 기압능의 정체가 풀리면서 서쪽에서 저기압이 주기적으로 접근하여 강수현상이 잦아져서 3일에 한번 비가 내렸으며, 강수일수는 9.6일로 평년보다 1.0일 많았고, 흐린날도 잦았다. 하지만 강수량은 크게 많지 않아 전국 강수량은 104.4 mm로 평년의 77.9~114.4 mm와 비슷한 경향을 보였다. 강수량은 강원도와 남서해안에서 평년에 비해 많이 내렸고, 다른 지역은 평년과 유사하였으며, 경상도와 제주도는 강수량이 적은 분포를 보였다(그림 3.1.17).

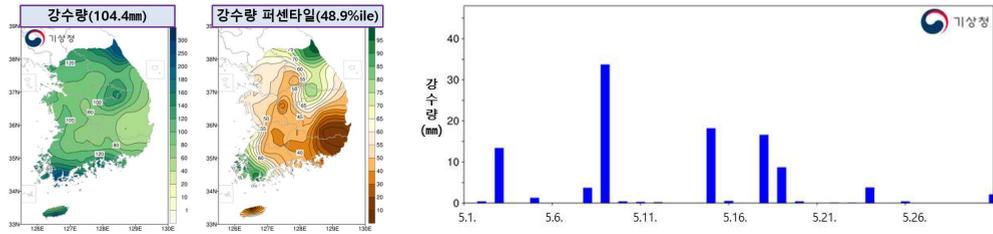


그림 3.1.17 2020년 5월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.



3.1.3 여름철(2020년 6~8월) 기상특성

월별기온 들쭉날쭉, 가장 긴 장마철, 많은 비

- 이른 6월 폭염, 6월보다 낮은 7월 기온 처음, 8월 중순 이후 폭염·열대야
- 6~8월 많은 강수량(3위), 중부·제주 긴 장마철과 많은 강수일수(1위)
- 대기 정체와 찬 공기 유입, 기온·습도 높은 공기의 남~서쪽 확장 때문

2020년 여름철은 6월 초부터 이른 더위가 나타나 무더운 여름으로 시작하였으나, 한여름에는 북태평양고기압의 강도가 약하고 긴 장마로 인한 많은 강수로 시원한 편이었다. 장마가 종료된 8월 중순 이후부터는 폭염과 열대야가 나타나는 늦더위가 이어졌다. 2020년 6~8월의 전국 평균 기온은 22.8℃, 22.7℃, 26.6℃로 6월과 8월은 평년의 21.2℃, 25.1℃보다 높았고, 7월은 평년의 24.5℃보다 낮았으며, 6월의 평균기온보다 낮은 현상이 1973년 이후 처음으로 나타났다. 특히, 6월은 1973년 이후 1위로 매우 높았으나, 7월은 큰 폭으로 떨어지며 하위 5위를 기록하였고, 8월은 다시 상승하여 6위를 기록하면서 2020년 여름철 기온은 월별 변동폭이 매우 컸던 것으로 분석된다.

2020년 6~8월의 전국 평균 강수량은 각 182.1 mm, 420.7 mm, 201.6 mm로 평년과 비교하여 6월은 비슷했으나, 7월과 8월은 많았다. 6월은 남서쪽에서 저기압이 주기적으로 다가오면서 강수 현상이 자주 있었으며, 남부중심으로 비가 내려 중부(강원도 영동 제외)와 남부 강수량의 지역 차이가 컸다. 특히, 중국 남부에서 발달한 저기압이 접근하여 남서풍이 강화되고 많은 양의 수증기가 유입되면서 남부와 강원 영동을 중심으로 국지성 호우와 함께 많은 비가 내렸다. 7월은 후반까지 북태평양고기압의 북쪽 확장이 지연되는 가운데, 상층 찬 공기 사이에서 발달한 저기압에 의해 남부지방을 중심으로 많은 비가 자주 내려 강수량이 평년보다 많았다. 8월은 중반까지 정체전선 상에서 발달한 폭이 좁은 강한 강수대가 남북으로 이동하면서 전국 곳곳에서 집중호우가 발생하였고, 태풍 제5호 장미, 제8호 바비의 영향으로 평년보다 많은 강수량을 기록하였다(그림 3.1.18).

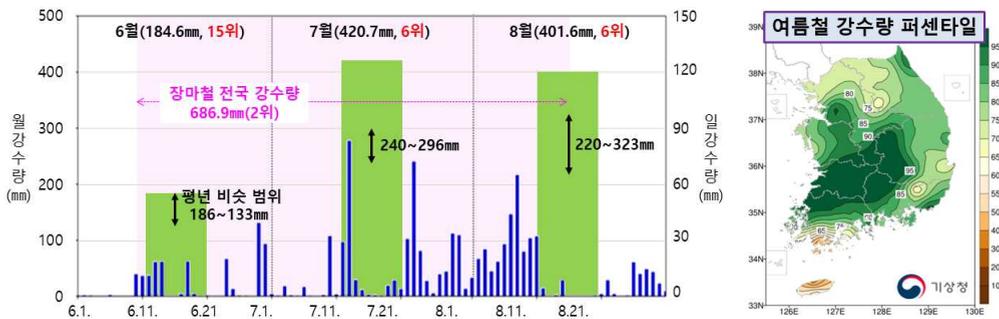


그림 3.1.18 2020년 6~8월 일(파랑), 월(녹색) 전국 강수량 변화 시계열과 강수량 퍼센타일 분포도.

장마철 기간은 제주에서 6월 10일 시작하여 7월 28일 종료(49일)되었고, 중부는 6월 24일 시작하여 8월 16일에 종료(54일)되면서, 1973년 이후 가장 긴 장마로 기록되었다. 장마철 전국 강수량은 686.9 mm로 상위 2위를 기록하였으며, 중부 지방은 851.7 mm로 1위, 남부는 566.5 mm로 4위, 제주는 562.4 mm로 10위를 기록하였다. 전국 강수일수 또한 28.3일로 1위를 기록하였으며, 중부 지방과 제주도 34.7일, 29.5일로 1위, 남부지방은 23.7일로 4위를 기록하였다.

2020년 여름철 바람의 경우, NCEP 재분석장을 이용하여 살펴본 결과 남풍바람이 지배적이었으며, 이는 전국적으로 평년과 대비하여 0.4~0.8 m/s 정도 강한 남서풍 바람이 불었던 것으로 분석되었다(그림 3.1.19).

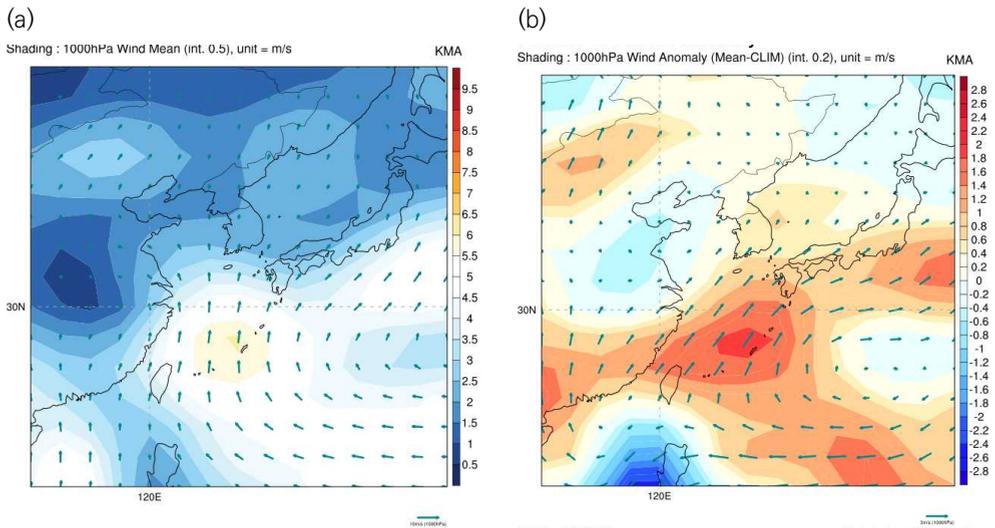


그림 3.1.19 NCEP 재분석자료를 이용한 (a) 2020년 6~8월 여름철 1000 hPa 고도 풍속과 풍향 (기준벡터: 10 m/s) 및 (b) 2001~2020년 대비 풍속과 풍향편차(기준벡터 3 m/s).



가. 6월 기상특성

때 이른 폭염으로 역대 가장 높은 6월 기온
 - 1973년 이후 6월 극값 경신: 평균·최고기온 상위 1위, 폭염일수 상위 1위
 - 우리나라 상하층에 더운 공기 자리하고, 잦은 남서풍과 강한 햇빛 때문

2020년 6월의 전국 최고기온과 평균기온은 각각 28.0℃, 22.8℃로 평년 대비 +1.5℃, +1.6℃ 높아 1973년 이후 가장 높았고, 폭염일수도 2.0일로 평년 대비 +1.4일로 가장 많았다. 최저기온도 18.4℃로 평년보다 +1.7℃ 높아 상위 2위를 기록하였다. 이는 6월 초부터 상층과 하층에 더운 공기가 자리잡은 가운데, 기온과 습도가 높은 북태평양 고기압의 영향과 서쪽에서 접근한 저기압에 의해 따뜻한 남서풍이 유입되었고, 강한 일사까지 더해지면서 전국에 더위가 이어졌다. 특히, 6월 초와 중반에는 남서풍의 따뜻한 공기가 태백산맥을 넘어 더욱 고온건조해져 강원도 영동은 국지적으로 기온이 크게 상승하기도 했다(그림 3.1.20).

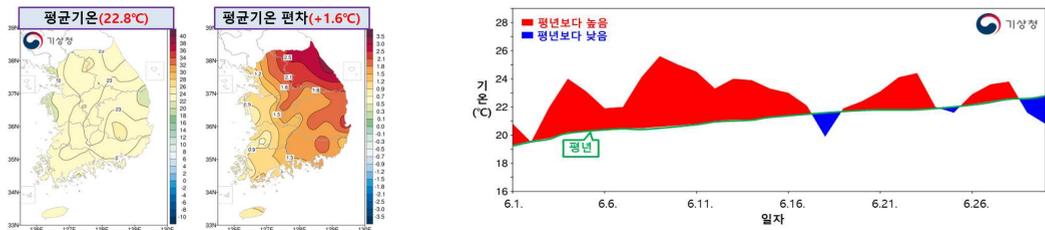


그림 3.1.20 2020년 6월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

2020년 6월 전국 강수량은 184.6 mm로 평년인 132.9~185.9 mm와 비슷하였다. 그러나, 남서쪽에서 주기적으로 자주 다가온 저기압의 영향으로 강수현상은 자주 나타났으며, 남부중심으로 비가 내려 중부와 남부 강수량의 지역 차이가 컸다(그림 3.1.21). 특히, 12~14일과 29~30일에는 우리나라 남동쪽에 북태평양 고기압이 위치하는 가운데, 중국 남부에서 발달한 저기압이 접근하면서 남서풍이 강화되어 많은 양의 수증기가 유입되었고, 이로 인해 남부와 강원 영동을 중심으로 국지성 호우와 함께 많은 비가 내려 교통사고 및 주택과 농경지 침수 등 인명과 재산피해가 발생하였다. 장맛비는 10일 제주도를 시작으로, 24일 전국에 비가 내렸으며, 장마철 시작은 평년과 비교하여 제주도는 9~10일 빠르게, 남부는 1일 늦게, 중부는 1일 빠르게 시작되었다.

제 3 장 기상특성

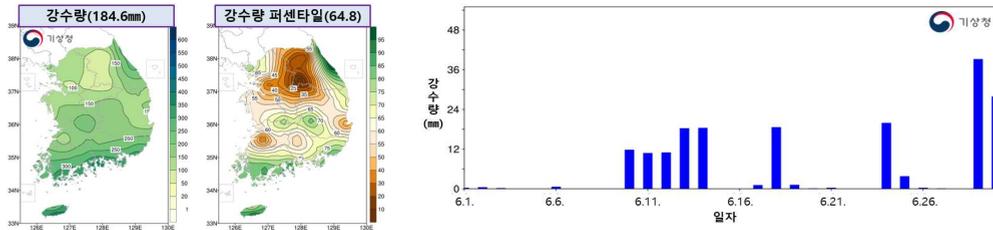


그림 3.1.21 2020년 6월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

나. 7월 기상특성

6월보다 낮은 7월 기온(1973년 이후 처음), 태풍 미발생

- 전국 평균기온 22.5℃로 평년비교 -1.4℃로 낮았음(하위 8위), 폭염일수 0.1일
- 전국 강수량은 420.7 mm로 평년 240.4~295.9 mm로 많은 비

2020년 7월에는 때 이른 폭염이 나타났던 6월과 달리 전국 평균기온은 22.5℃로 평년 대비 -1.4℃로 1973년 이후 하위 8위를 기록하였으며, 폭염일수와 열대야 지수가 각각 0.1일로 평년 대비 -1.5일, -1.0일 적었다(그림 3.1.22). 특히 6월보다 기온이 낮은 현상이 1973년 이후 처음으로 나타났으며, 2003년 7월은 22.3℃ 이후 가장 낮은 기온을 보여 이례적인 특징을 보였다. 6월 말부터 우리나라 주변의 대기 상·하층에는 찬 공기가 정체하여 영향이 이어지는 가운데 북태평양 고기압이 북상하지 못하고 일본 남쪽에 머물렀다. 장마철 흐리거나 비가 오는 날이 잦아 낮 동안의 기온도 오르지 못했다.

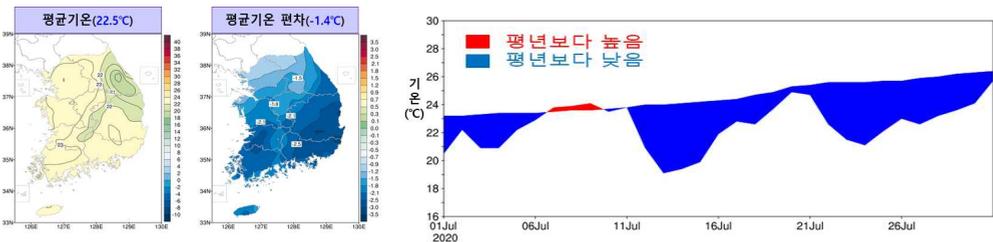


그림 3.1.22 2020년 7월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.



2020년 7월의 전국 강수량은 420.7 mm로 평년의 240.4~295.9 mm에 비해 매우 많았다(그림 3.1.23). 이는 7월 후반까지 북태평양 고기압이 북쪽으로 확장되는 가운데, 상층 찬 공기 사이에서 발달한 저기압에 의해 남부지방을 중심으로 많은 비가 자주 내려 강수량이 많았던 것으로 분석되었다. 보통 7월 중순 이후 북태평양 고기압이 북상하면서 장마철이 종료되는데, 2020년에는 7월 하순에 북태평양 고기압이 확장하면서 정체전선이 중부지방으로 이동함에 따라 제주도의 장마철은 7월 28일에 종료되었고, 남부지방은 7월 31일에 종료되었다. 한편 상층 찬 공기로 인해 정체전선에 의한 강한 강수대가 자주 형성되어 중부지방의 장마철은 8월까지 이어진 것도 원인이라 할 수 있다. 이로 인해 강수일수도 15.5일로 상위 6위를 기록하였다.

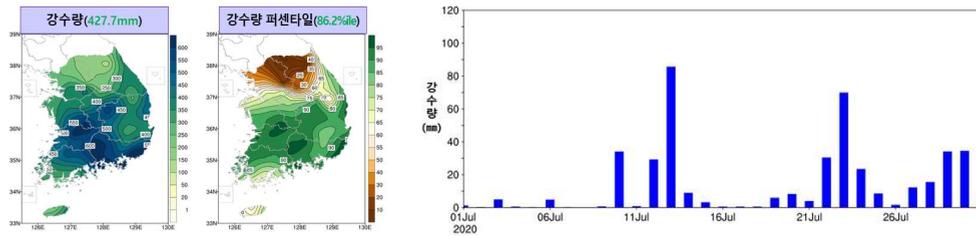


그림 3.1.23 2020년 7월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

한편 2020년에는 태풍이 5월과 6월에 각각 1개씩 발생하였으나, 평균적으로 3.6개가 발생하는 7월에는 태풍이 전혀 발생하지 않아 1951년 이후 처음으로 7월 태풍이 발생하지 않은 해로 기록되었다. 그 원인은 태풍 발생해역의 해수면온도가 29℃ 이상으로 양호한 조건이었으나, 7월에 북태평양 고기압이 평년보다 남서쪽으로 확장하여 대류 억제(하강기류) 구역이 넓었고, 강한 동풍으로 인해 태풍을 발생시키는 파동이 만들어지기 어려웠기 때문으로 분석된다(그림 3.1.24).

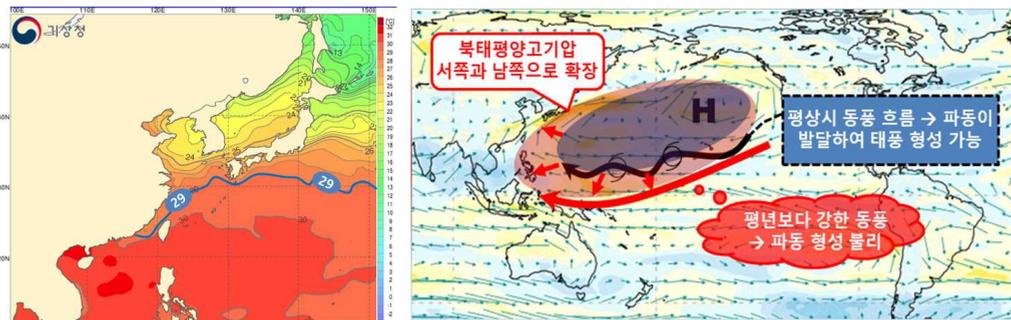


그림 3.1.24 2020년 7월 해수면온도 분포도(7월 31일 기준)와 850 hPa 평균 바람장 모식도.

다. 8월 기상특성

8월 전국 평균기온은 평년보다 높았으며, 전국 강수량도 평년보다 많았음
 - 전국 평균기온 26.6℃로 평년(25.1±0.5℃)보다 높았음
 - 전국 강수량은 401.6 mm로 평년(220.1~322.59 mm)보다 많았음

2020년 8월 전국 평균기온은 26.6℃로 평년보다 +1.5℃ 높았다. 8월 상순에는 평년과 비슷하거나, 기온이 낮은 경우도 있었으나, 기온이 높고 습도가 낮은 공기(티벳 고기압)와 북태평양 고기압이 동시 확장하여 우리나라 주변 대기 상·하층에 더운 공기가 자리 잡았고, 특히 남부지방부터 장마 종료 이후 기온이 급격히 상승하여 폭염과 열대야가 이어졌다(그림 3.1.25, 그림 3.1.26).

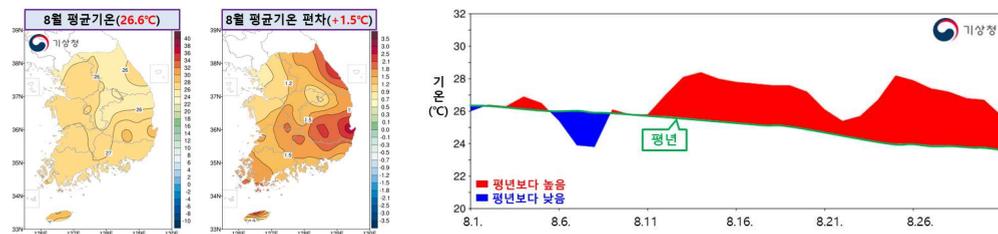


그림 3.1.25 2020년 8월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

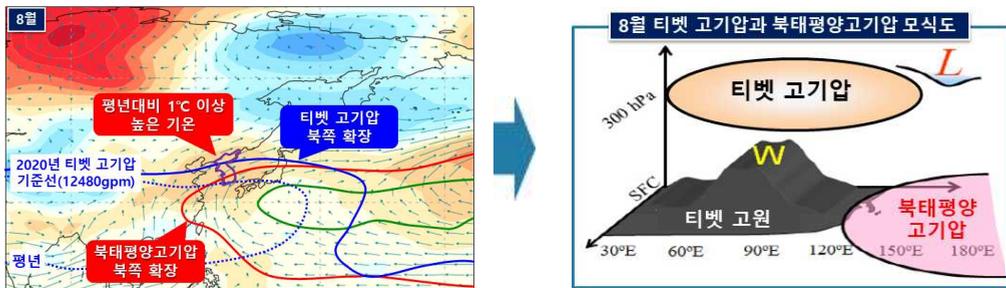


그림 3.1.26 2020년 8월 850 hPa 기온편차(채색)와 바람(화살표), 티벳고기압(파랑선)과 북태평양 고기압(파랑선) 분포도(왼쪽) 및 모식도(오른쪽).

2020년 8월의 전국 강수량은 401.6 mm로 평년의 220.1~322.59 mm보다 많았다. 중부지방은 8월까지 장마가 이어졌고, 정체전선 상에서 발달한 폭이 좁은 강한 강수대가 남북으로 이동하면서 전국 곳곳에 집중호우가 발생하였고, 태풍 제5호 장미, 제8호 바비의 영향으로 평년보다 많은 강수량을 기록하였다. 강수 퍼센타일 분포에서 부산지역을 제외한 동해안과 남해안 지역, 그리고



제주는 평년에 비해 강수가 적었으나, 이들 지역을 제외한 대부분의 지방에서 강수가 많았던 것을 확인할 수 있다.

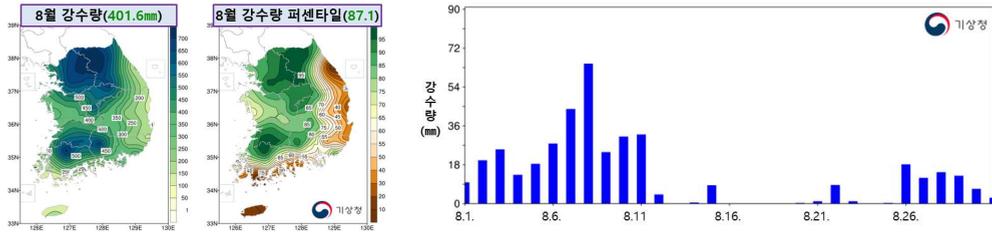


그림 3.1.27 2020년 8월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

3.1.4 가을철(2020년 9~11월) 기상특성

맑고 건조했던 10월, 변덕스러운 11월

- 주기적 기온 변화 속에, 11월 중순 기온 전국 큰 폭 상승
- 맑은 날이 많았으나, 11월 중순 서울 104년 만의 폭우

2020년 가을철은 평균적으로 기온과 강수 모두 평년 수준을 보였으나, 10월은 이례적으로 월 강수량과 강수일수가 2019년보다 16개, 2.5배 적어 최소 2위를 기록하며 매우 건조했던 반면, 11월 중순에는 연일 극값을 경신하는 등 매우 높은 기온과 기록적으로 많은 비가 내려 기온과 강수량의 변동이 매우 컸다.

2020년 가을 전국 평균기온은 14.4℃로 역대 2위로 따뜻했던 2019년보다 1.0℃ 낮게 나타났으나, 따뜻한 이동성 고기압의 영향과 북서쪽의 찬 대륙고기압이 번갈아 영향을 주며, 기온의 변동폭이 컸다. 특히 10월 23~24일과 11월 3~4일에는 우리나라 상공의 찬 공기 유입과 강한 북서풍의 영향으로 기온이 크게 떨어진 반면, 11월 17~19일은 남서쪽에서 따뜻한 공기가 지속적으로 유입되어 일시적으로 기온이 큰 폭으로 상승하면서 전국 일평균기온 최고 1위를 매일 경신하는 등 변동폭이 매우 컸던 것으로 분석되었다.

2020년 가을철에는 고기압의 영향을 주로 받아 맑은 날이 많았으나, 전국 강수량은 259.4 mm로 평년(259.7 mm) 수준을 나타냈다. 이는 9월 초 태풍의 영향과 11월 중순 저기압에 의한 많은 비로 강수 극값을 기록하는 등 강수 쏠림현상이 나타났기 때문이다. 9월 초 태풍 마이삭(8.28.~9.3.)과 하이선(9.1~9.7)이 2~3일과 6~7일 우리나라에 상륙하면서 매우 많은 비를 내렸다. 11월 17~19일에는 남서쪽의 따뜻하고 습한 공기가 유입되어 전국적으로 기온이 큰 폭으로 상승하였고, 북서쪽의 찬 공기와 만나 19일에 이례적으로 많은 가을비가 내리면서, 서울은 11월 일강수량 최대 1위(86.9 mm)를 경신하기도 하였다. 그러나, 역대 가장 많은 10월 강수량을 기록했던 2019년(169.0 mm)과 달리 2020년 10월은 강수량이 10.5 mm, 강수일수가 2.6일로 1973년 이후 두 번째로 적어 매우 건조하였다.

찬 대륙고기압이 일시적으로 확장하면서 2020년 첫눈은 11월 3일 백령도를 시작으로 28~29일 울릉도, 흑산도, 인천, 수원, 홍성에서 관측되었으며, 백령도는 2019년보다 15일 빨랐고, 인천과 수원은 11일 늦었던 것으로 기록되었다.

NCEP 재분석장을 이용한 바람장 분석 결과, 2020년 가을철에는 주로 중부지방에는 북서풍, 남부지방에는 북풍의 바람이 불었던 것으로 나타났으며, 전국적으로 평년과 비교하여 0~0.4 m/s 정도 약간 강한 바람이 불었던 것으로 나타났다(그림 3.1.28).

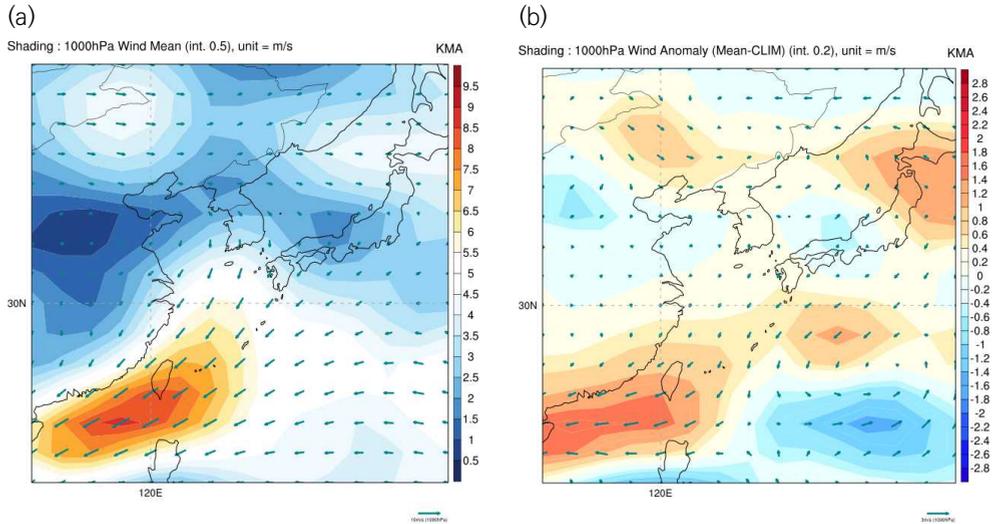


그림 3.1.28 NCEP 재분석자료를 이용한 (a) 2020년 9~11월 가을철 1000 hPa 고도 풍속과 풍향 (기준벡터: 10 m/s) 및 (b) 2001~2020년 대비 풍속과 풍향편차(기준벡터 3 m/s).

가. 9월 기상특성

9월 전국 평균기온 및 전국 강수량은 평년과 비슷

- 전국 평균기온 20.3℃로 평년과 비슷했음
- 전국 강수량은 210.0 mm로 평년(74.0~220.7 mm)와 비슷하나 많은 편

가을로 접어들면서 기온이 점차 하강하는 가운데, 9월 전국 평균기온은 20.3℃로 평년 대비 -0.2℃로 비슷한 수준을 보였다(그림 3.1.29). 그러나, 북쪽 찬 공기의 유입과 태풍 및 이동성 고기압의 영향으로 주기적인 기온변화를 보였다. 최고기온은 25.1℃로 평년보다 -0.8℃ 낮고, 최저기온은 16.1℃로 평년보다 높아 일교차가 작은 편이었다.

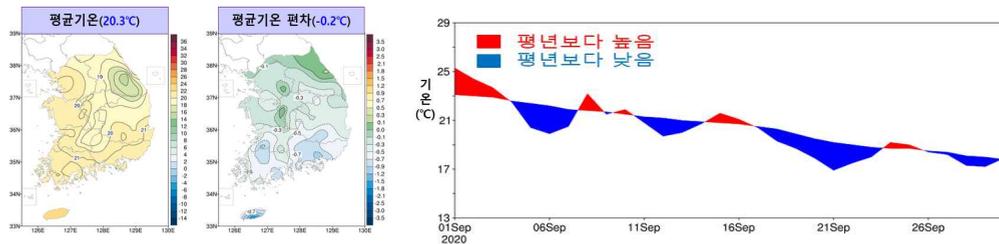


그림 3.1.29 2020년 9월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

9월의 전국 강수량은 210.0 mm로 평년의 74.0~220.7 mm와 비슷하였으나, 약간 많은 편에 속하였다(그림 3.1.30). 지역적으로는 제주도가 412.7 mm, 전남이 229.3 mm, 전북이 190.3 mm, 강원영동이 528.3 mm로 많은 강수량을 기록하였고, 특히 북동기류의 영향으로 강릉이 613.8 mm, 속초가 482.8 mm로 강원 동해안에서 매우 많은 강수량을 기록하였다. 9월 2~3일은 제9호 태풍 마이삭의 영향을, 6~7일에는 제10호 태풍 하이선의 영향으로 제주도, 경상도, 강원 영동을 중심으로 강풍과 함께 매우 많은 비를 내렸고, 이후 주기적으로 상층 찬 공기를 동반한 기압골이 통과하면서 전국적으로 비가 내렸다.

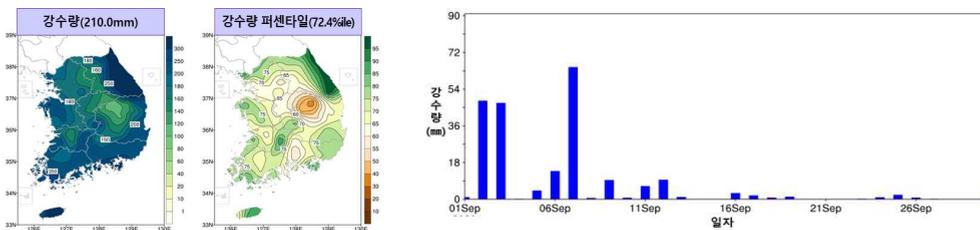


그림 3.1.30 2020년 9월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.



나. 10월 기상특성

주기적인 기온변동과 두 번째로 적었던 10월 강수량

- 전국 평균기온 14.0℃로 평년(13.9~14.7℃)과 비슷했음
- 전국 강수량은 10.5 mm로 평년(33.1~50.8 mm)보다 매우 적어 건조함

2010년 10월에는 북서쪽 찬 공기를 동반한 대륙고기압과 상대적으로 따뜻한 이동성 고기압의 영향을 번갈아 받아 주기적인 기온 변동을 보였다. 두 차례 쌀쌀한 날씨를 보였으나, 10월 전국 평균기온은 14.0℃로 평년의 13.9~14.7℃와 비슷하였다. 전국적으로 11.7~18.5℃(평년 11.6~19.2℃) 내외의 분포를 나타내, 대부분 지역이 평년과 비슷하였으나, 강원영동(14.7℃)과 전남(15.6℃)은 평년보다 낮았다. 특히 10월 23~24일에는 상층 찬 공기의 유입으로 기온이 전국적으로 크게 떨어져 서울과 안동 등 내륙지역에서는 첫서리와 첫얼음이 관측되었다. 서울의 첫서리와 첫얼음은 2019년보다 각각 3일과 15일, 평년보다 2일과 6일 빨랐다.

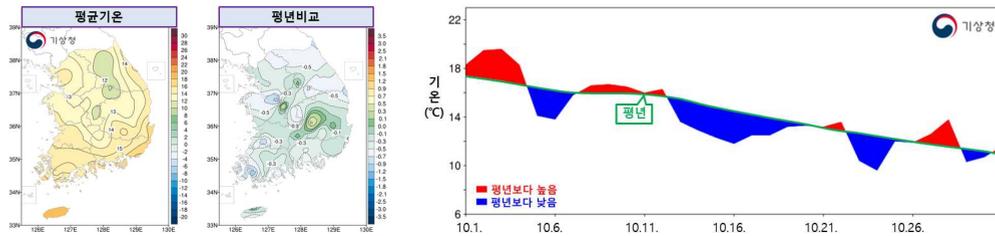


그림 3.1.31 2020년 10월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

역대 가장 많은 10월 강수량을 기록했던 2019년(169.0 mm)과 달리 2020년 10월의 경우 고기압의 영향을 주로 받았으며, 태풍이나 기압골에 의한 많은 강수도 없어 전국 강수량은 10.5 mm(평년 33.1~50.8 mm), 강수일수는 2.6일(평년 대비 -3.1일)로 1973년 이후 두 번째로 적어, 전국적으로 매우 건조하였다. 특히, 지점별로 서울은 0.0 mm, 인천은 1.9 mm, 춘천은 0.1 mm, 강릉은 0.6 mm로 10월 강수량 최소 1위를 기록하였다. 10월 2~4일은 중국 북동부, 21~22일은 대한해협을 통과한 저기압의 영향으로 강수 현상이 나타났으나, 제주도와 남해안, 중부지방 일부 지역 위주로 강수가 내려 10월 전체적으로 매우 적은 강수량을 기록하였다(그림 3.1.32). 2020년 10월에는 7개의 태풍이 발생하여 1984년과 1992년과 동일하게 1951년 이후 가장 많은 태풍이 발생하였으나, 우리나라 남쪽에 고기압이 위치하면서 14호 태풍을 제외한 대부분이 동남아 부근으로 이동하여 우리나라에 영향을 준 태풍은 없었다.

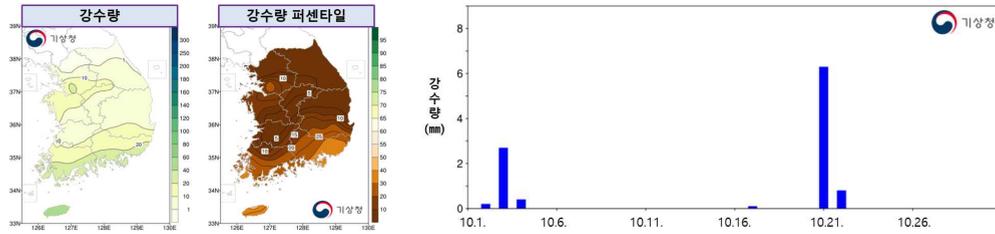


그림 3.1.32 2020년 10월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

다. 11월 기상특성

주기적인 기온변동과 두 번째로 적었던 10월 강수량

- 전국 평균기온 8.83℃로 평년(7.6±0.6℃)보다 높았음
- 전국 강수량은 38.9 mm로 평년(22.8~55.8 mm)과 비슷했음

2020년 11월의 전국 평균기온은 8.83℃로 평년의 7.6±0.6℃보다 높았다. 특히 11월 17~19일에는 남서쪽에서 따뜻한 공기가 지속적으로 유입되어 일시적으로 기온이 큰 폭으로 상승하면서 전국 일평균기온이 17일 14.6℃, 18일 17.6℃, 19일 16.8℃로 1973년 이후 최고 1위를 매일 경신하는 등 변동폭이 매우 컸다. 그 결과 전국 대부분 지역에서 평년보다 높은 평균 기온을 보였다(그림 3.1.33).

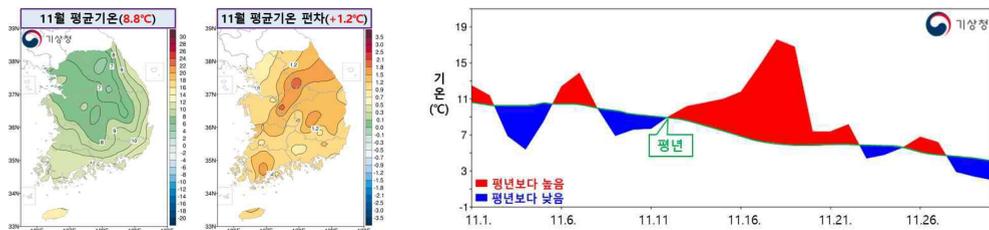


그림 3.1.33 2020년 11월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

11월의 전국 강수량은 38.9 mm로 평년의 22.8~55.8 mm와 비슷하였다. 11월 17~19일에 남서쪽의 따뜻하고 습한 공기가 유입되어 기온이 큰 폭으로 상승하였고, 북서쪽의 찬 공기와 만나 19일에 이례적으로 많은 가을비가 내리면서 서울(86.9 mm), 춘천(72.0 mm), 북창원(64.7 mm) 등 일부 지점은 11월 일 강수량 최다 1위를 경신하였다. 2020년 첫눈은 찬 대륙성 고기압이 일시적



으로 확장하면서 11월 3일 백령도를 시작으로 28~29일 울릉도, 흑산도, 인천, 수원, 홍성에서 관측되었다. 이는 백령도는 2019년에 비해 15일 빨랐고, 인천과 수원은 11일 늦은 것이다.

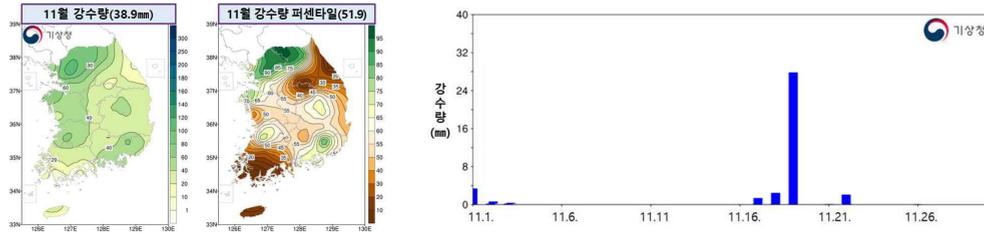


그림 3.1.34 2020년 11월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.

3.1.5 2020년 12월 기상특성

북극 찬 공기의 영향으로 두 차례 강추위, 건조했던 12월
 - 전국 평균기온 0.7℃로 평년(1.5±0.6℃)보다 낮았음
 - 전국 강수량은 7.9 mm로 평년(16.6~28.5 mm)보다 적었음

2020년 12월에는 찬 공기를 동반한 대륙고기압과 상대적으로 따뜻한 이동성 고기압의 영향을 번갈아 받았으나, 13일 오후~21일에 찬 대륙고기압이 크게 확장하면서 강한 북서풍과 함께 기온이 큰 폭으로 떨어져 10일 가까이 지속되었고, 30일 이후 다시 강추위가 이어졌다. 그 결과 전국 평균기온은 0.7℃로 평년의 1.5±0.6℃보다 낮았다. 전국 평년편차 분포도에서 볼 수 있듯이 서해안과 중부 내륙, 경상북도, 강원영동 일부지역을 제외하고는 대부분의 지역에서 평년보다 낮은 기온을 기록하였다.

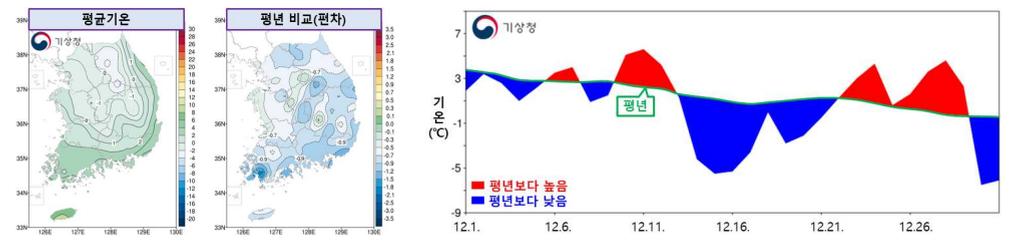


그림 3.1.35 2020년 12월 전국 45개 지점의 평균기온과 평년편차 분포도 및 일변화 시계열.

2020년 12월에는 고기압의 영향을 주로 받으면서 건조한 날이 많아 전국 강수량은 7.9 mm로 1973년 이후 네 번째로 적은 강수량을 기록하였으며, 또한 강수일수도 3.6일로 평년 대비 3.0일 적어 최하 3위를 기록했다. 12월 13일, 17~18일, 27일, 29일 등 네 차례 기압골이 지났고, 14~16일, 30~31일 찬 공기가 따뜻한 서해상을 지나면서 형성된 구름대의 영향으로 충남·전라 서해안과 제주도를 중심으로 많은 눈이 내렸으나, 전국 강수량은 적었다.

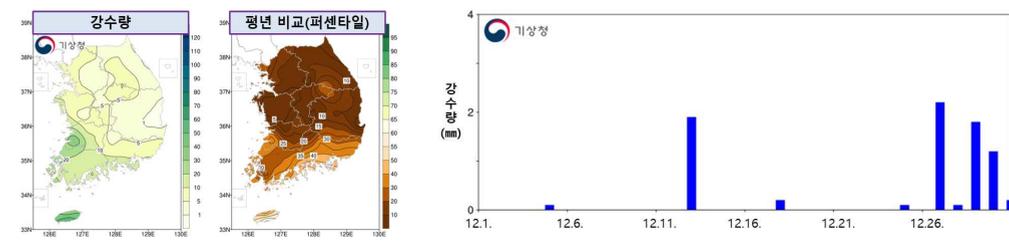


그림 3.1.36 2020년 12월 전국 45개 지점의 강수량과 강수 퍼센타일 분포도 및 강수량 시계열.



3.2 기후변화감시소 기상 특성

안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시소의 기상특성을 파악하기 위하여 각 감시소 혹은 근접한 기상대에서 측정된 기상자료를 활용하였다. 고산과 울릉도는 오래전부터 기상대에서 기상자료를 측정하여왔으나 안면도에서 2007년 11월부터 보유하고 있는 기상자료의 기간에 맞추어 여기서는 2008년 1월 이후의 자료를 분석하였다.

여러 가지 측정항목 중 풍향, 풍속, 기온, 상대습도를 분석하였다. 풍향의 경우 월별 풍향 조성비율과 풍향 풍속을 함께 나타낸 바람장미에 시간평균을 사용하였다. 모든 측정항목의 장기간 연변화는 일평균값으로 월평균과 월 최솟값, 월 최솟값으로 표현하였다.

안면도 기상자료 중 2009년 11월부터 2011년 8월까지 자료는 AWS의 위치를 이전하면서 일부 풍향이 측정되지 않아 이 기간의 전체 측정항목들을 분석에서 제외하였다. 고산 기상자료 중 2020년 1월부터 9월까지의 풍향과 풍속 자료는 신중한 검토가 필요하여 분석에서 제외하였다. 분단위의 자료를 중심으로, 시간, 월, 연평균을 산출할 때 반올림 등의 소수점 처리 없이 그대로 사용하였다.

세 감시소 모두 최근 12년과 비교하여 2020년도에 풍속이 0.1~0.2 m/s 감소하였고, 기온은 0.2~0.7°C 높았다. 세 감시소 중 고산에서 풍속이 가장 강하였고, 내륙과 근접한 안면도의 풍속이 가장 낮았다. 연평균 기온은 위도가 낮은 고산(33.29°N)이 높고, 안면도(36.53°N)는 울릉도(37.48°N)보다 위도가 조금 낮으나 기온이 울릉도보다 조금 낮았다.

표 3.2.1 기후변화감시소별 기상요소의 2020년 연평균과 최근 12년 연평균

기상요소	연도	안면도	고산	울릉도
풍속	2020년	2.8 m/s	6.5 m/s	3.7 m/s
	2008~2019년	2.9 m/s	6.6 m/s	3.9 m/s
기온	2020년	13.1°C	16.0°C	13.4°C
	2008~2019년	12.4°C	15.8°C	12.8°C

세 감시소 모두 8월 말부터 9월 사이 태풍 바비(8호), 마이삭(9호), 하이선(10호)의 영향을 받았으며 이때 절대습도가 증가하였다.

3.2.1 안면도 기후변화감시소

- 최근 12년(2008~2019년)과 비교하였을 때 1, 2, 3월 풍속 낮고, 기온 높음
- 7월 기온이 6월보다 낮고, 8월에 태풍으로 강한 남풍 나타남

2008~2020년 동안 안면도에 영향을 주는 풍향은 겨울철에 주로 북, 북서풍이 불고 여름철에 남, 남서풍의 비율이 높은 계절변동을 보였다(그림 3.2.1). 2014년 이후로는 북풍보다 북북서풍의 비율이 더 커졌다. 또, 안면도 풍속의 연변화에서 여름철에 2~3 m/s, 겨울철에 2.5~4.5 m/s로 분포하였다(그림 3.2.1(b)). 풍속의 월 최솟값은 평균 풍속보다 약 2배 이상 높았고, 종종 12 m/s 까지 풍속이 높았는데, 이러한 피크는 주로 가을에 나타났다.

안면도의 2020년 풍향과 풍속을 바람장미로 나타내어 최근 12년인 2008~2019년의 풍향 풍속과 비교한 결과, 2020년 풍향의 패턴은 최근 12년과 비슷하나 풍속은 과거에 비해 1, 2월에 북풍-북서풍 계열에서 낮았고, 5, 6월에 남서풍-남풍계열이 높았다(그림 3.2.2). 8월에는 안면도에서 남서풍-남풍의 강한 바람이 부는 태풍을 관측하였다.

2008~2020년 동안 안면도 기온은 연변화에서 낮고 여름에 높은 1년 주기가 뚜렷하였다(그림 3.2.3). 기온의 월평균은 -4~27℃ 사이에 분포하였고, 최댓값은 2018년 7월 29.7℃였고, 최솟값은 2016년과 2018년 1월에 -10.4℃이었다. 2018년 이후 겨울철 월평균과 월 최솟값은 눈에 띄게 증가하였다(그림 3.2.4). 2020년 1, 2, 3월 기온은 찬 시베리아 고기압의 강도가 약하여 최근 12년의 월별 평균에 높았고, 7월의 기온은 북태평양 고기압이 북상하지 못한데다 흐리고 비가 오는 날이 많아 6월보다 월평균 기온이 낮았고 최근 12년보다 약 2.7℃ 낮은 16.9℃였다(3.1 참조).

2008~2020년 동안 안면도의 상대습도는 연변화에서 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기가 보였다(그림 3.2.5). 상대습도의 월평균은 60%~98% 사이에 분포하였고, 월 최솟값은 2013년 6, 7월에 99%로 가장 높았고, 월 최솟값은 2020년 5월에 31%로 가장 낮았다. 상대습도는 특정 기온에서의 포화수증기압에 대한 실제 수증기압의 비율이며 기온이 증가함에 따라 포화수증기압도 증가한다. 따라서 같은 수증기량이라도 기온의 변화에 따라 상대습도가 다르게 표현되며, 상대습도를 기온의 변화에 상관없는 절대습도로 바꾸어 나타내었다(그림 3.2.6). 2020년 절대습도의 월평균은 겨울에 낮고 8월에 높았다. 7월의 절대습도가 6월보다 조금 높은 패턴은 기온의 변화와 비슷하였다. 2020년 절대습도는 최근 12년의 월별 평균에 비해 7월에 낮았고 8월에 높았으며 그 외 시기에는 비슷하였다.

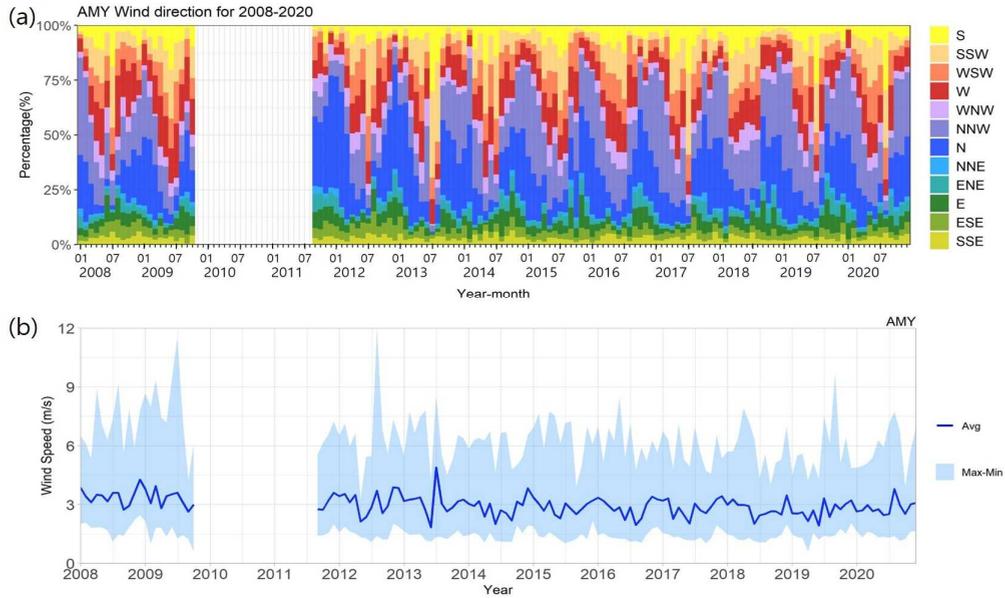


그림 3.2.1 2008~2020년 동안 안면도에서 측정된 (a) 풍향 조성비율과 (b) 풍속 연변화.

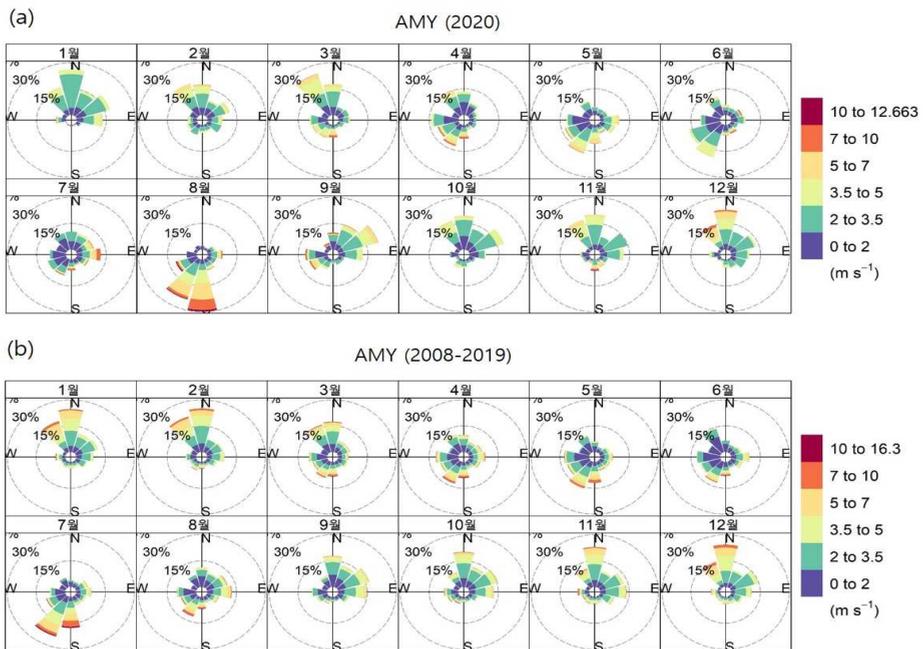


그림 3.2.2 안면도에서 측정된 (a) 2020년 풍향·풍속과 (b) 최근 12년(2008~2019년)간 평균 풍향·풍속.

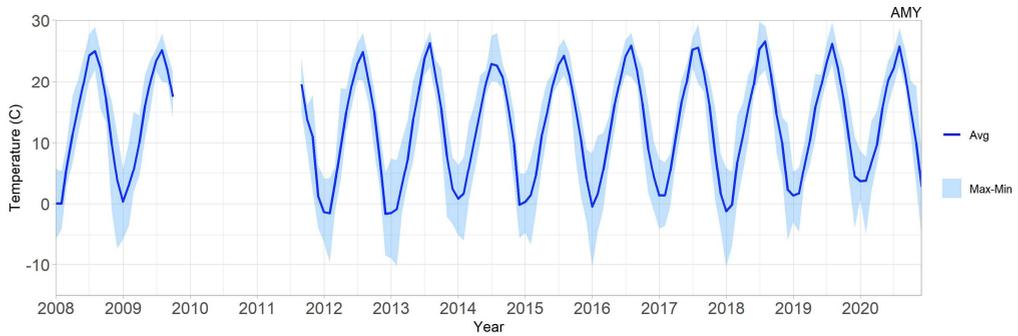


그림 3.2.3 2008~2020년 동안 안면도에서 측정된 기온의 연변화.

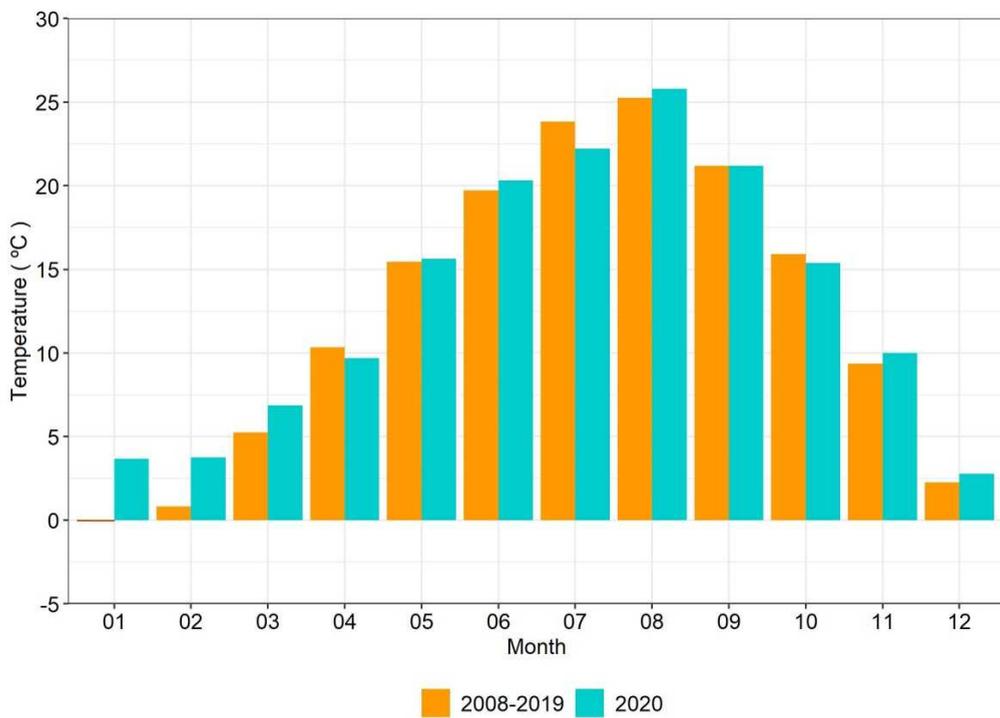


그림 3.2.4 안면도의 2020년 월평균 기온과 최근 12년(2008~2019년) 월평균 기온 비교.

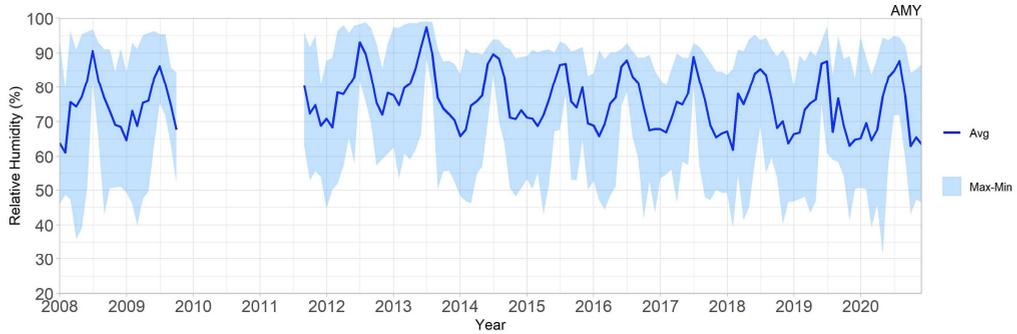


그림 3.2.5 2008~2020년 동안 안면도에서 측정된 상대습도의 연변화.

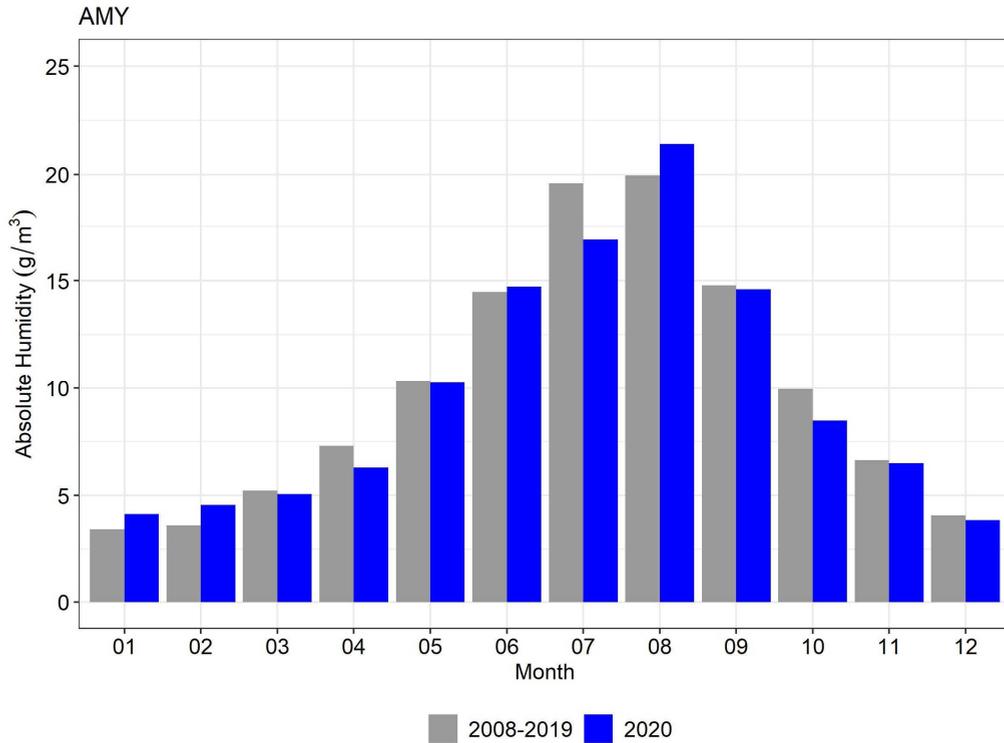


그림 3.2.6 안면도의 2020년 월평균 절대습도와 최근 12년(2008~2019년) 월평균 절대습도 비교.

3.2.2 고산 기후변화감시소

- 최근 12년(2008~2019년)과 비교하였을 때 1, 2, 3월 풍속 낮고, 기온 높음
- 4월 강한 북풍 측정, 7월 기온이 6월보다 낮고, 8월에 태풍으로 강한 남동풍 나타남

2008~2020년 동안 고산에 영향을 주는 풍향은 겨울철에 주로 북, 북서풍이 불고 여름철에 남남동, 남풍의 비율이 높은 계절변동을 보인다(그림 3.2.7). 매해 7월마다 남동풍의 비율이 일시적으로 높아졌다. 또, 고산의 일평균 풍속으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값으로 표현하였을 때(그림 3.2.7(b)) 평균 풍속은 여름철에 3~5.5 m/s, 겨울철에 5.5~12.5 m/s로 분포하였다. 풍속의 월 최솟값은 평균풍속보다 약 1.5~2배 가량 높았고, 종종 20 m/s 이상 풍속이 높아지기도 했는데, 2020년 12월 22.3 m/s가 2008년 이후 가장 높은 측정값이다. 풍속은 매년 가을부터 강해지기 시작하여 겨울에 가장 강하였다. 고산의 2020년 풍향과 풍속을 바람장미로 나타내어 최근 12년인 2008~2019년의 풍향, 풍속과 비교한 결과, 2020년 풍향의 패턴은 최근 12년과 비슷하나 풍속은 과거에 비해 1, 2월에 북풍-북서풍 계열의 빈도가 낮았고, 4월에 북풍의 빈도가 높았으며, 10월과 11월에 동풍계열의 빈도가 높았다(그림 3.2.8). 8월에는 고산에서 남동풍의 강한 바람이 부는 태풍을 관측하였다.

2008~2020년 동안 고산에서 측정한 기온의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기가 뚜렷하였다(그림 3.2.9). 기온의 월평균은 2.5~27℃ 사이에 분포하였고, 최댓값은 2019년 7월 30.4℃였고, 최솟값은 2016년 1월에 -4℃이었다. 2018년 이후 겨울철 월평균과 월 최솟값은 눈에 띄게 증가하였다. 2020년 기온은 찬 시베리아 고기압의 강도가 약하여 최근 12년의 월별 평균에 비해 1, 2, 3월의 기온이 높았고, 7월의 기온은 북태평양 고기압이 북상하지 못한 데다 흐리고 비가 오는 날이 많아 최근 12년보다 약 2.5℃ 낮은 23.1℃였으며 같은 해 6월보다 낮았다(그림 3.2.10, 3.1 참조).

2008~2020년 동안 고산에서 측정한 상대습도의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 기온만큼 뚜렷하지는 않으나 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기가 보였다(그림 3.2.11). 상대습도의 월평균은 50%~95% 사이에 분포하였고, 월 최솟값은 99.9%로 2012년 6월, 2014년 8월, 2015년 4, 5월, 2018년 5, 6월 2020년 5, 6, 7월에 나타났고, 월 최솟값은 2012년 11월에 32%로 가장 낮았다. 2020년 절대습도의 월평균은 겨울에 낮고 8월에 가장 높았다(그림 3.2.12). 7월의 절대습도가 6월보다 조금 높은 패턴은 기온의 변화와 비슷하였다. 2020년 절대습도는 최근 12년의 월별 평균에 비해 4, 7, 10월에 낮았고 그 외에 높거나 비슷하였다.

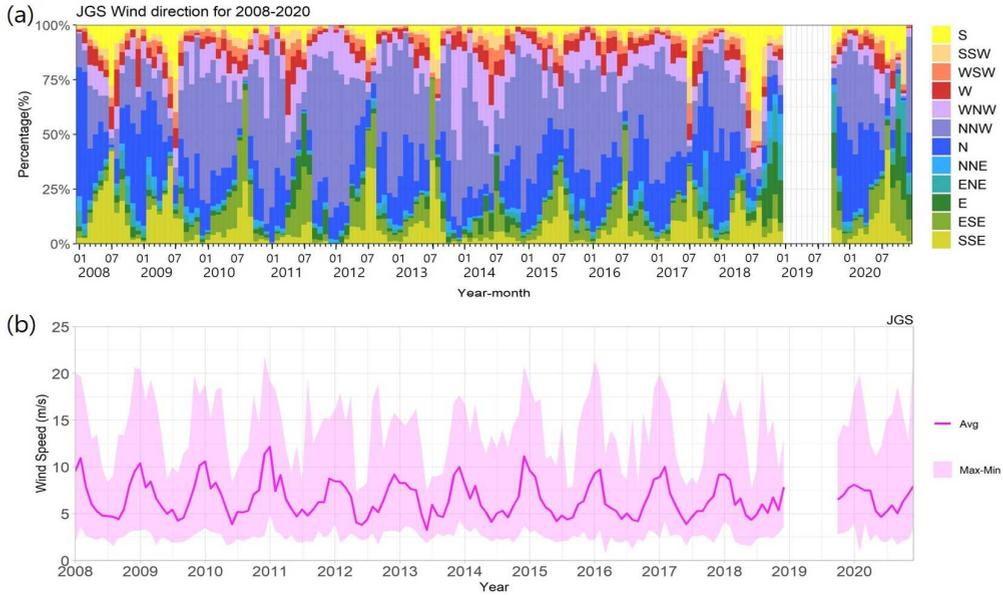


그림 3.2.7 2008~2020년 동안 고산에서 측정된 (a) 풍향 조성비율과 (b) 풍속 연변화.

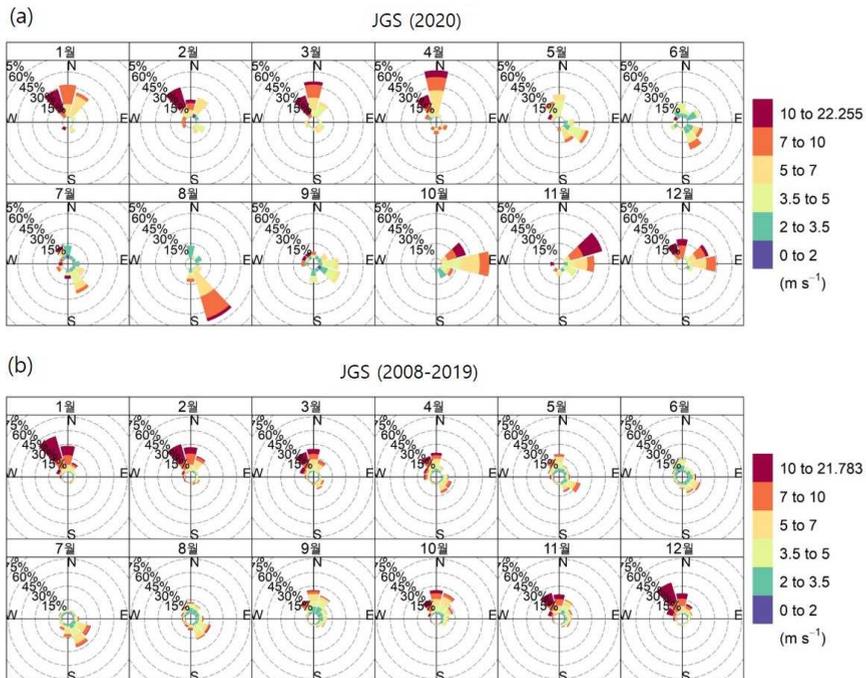


그림 3.2.8 고산에서 측정된 (a) 2020년 풍향·풍속과 (b) 최근 12년(2008~2019년)간 평균 풍향·풍속.

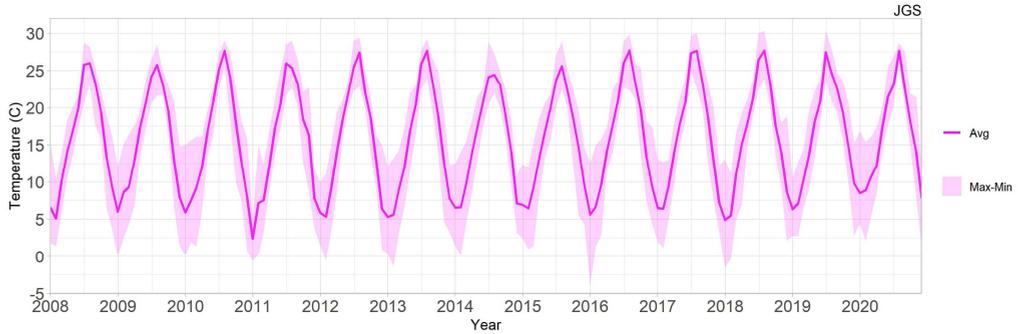


그림 3.2.9 2008~2020년 동안 고산에서 측정된 기온의 연변화.

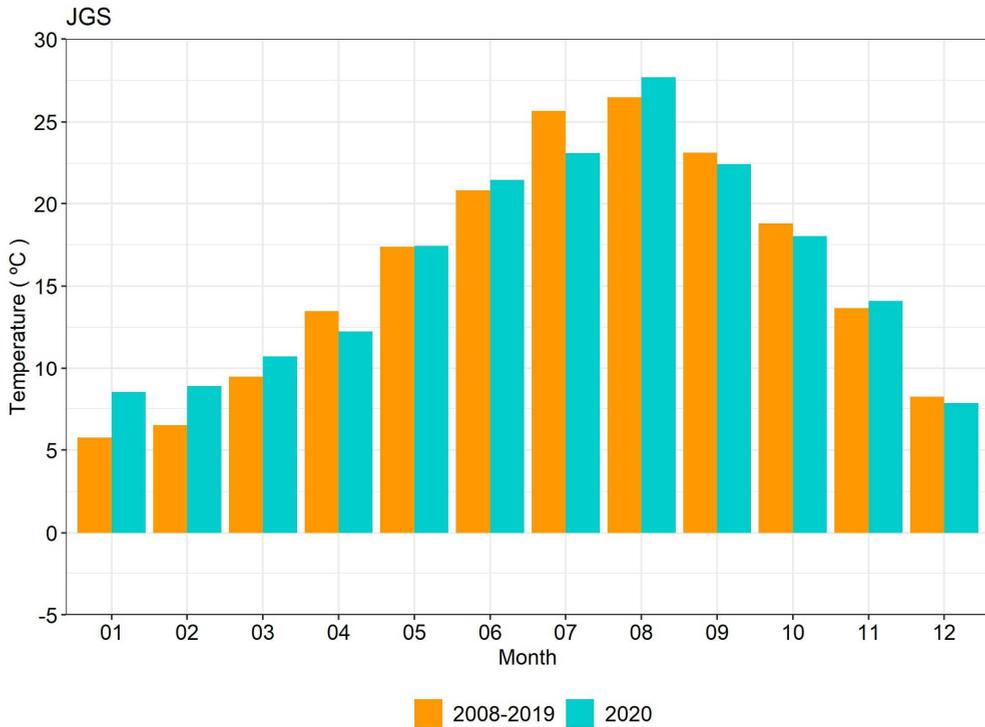


그림 3.2.10 고산의 2020년 월평균 기온과 최근 12년(2008~2019년) 월평균 기온 비교.

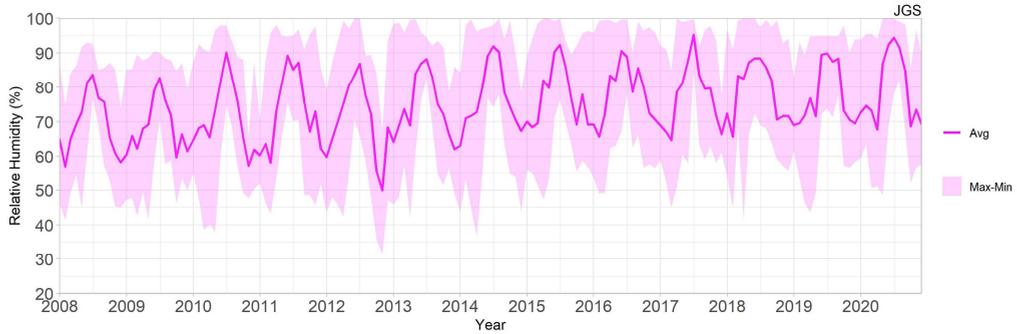


그림 3.2.11 2008~2020년 동안 고산에서 측정된 상대습도의 연변화.

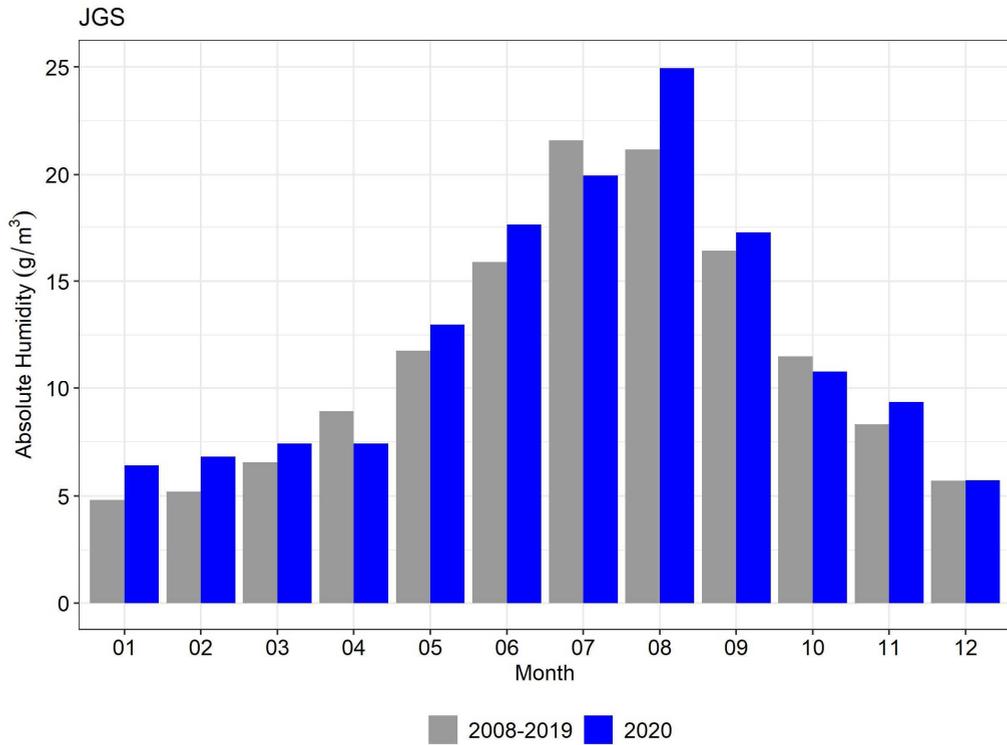


그림 3.2.12 고산의 2020년 월평균 절대습도와 최근 12년(2008~2019년) 월평균 절대습도 비교.

3.2.3 울릉도독도 기후변화감시소

- 최근 12년(2008~2019년)과 비교하였을 때 1, 2월 북동풍 강하고, 1~3월 기온 높음
- 7월 기온이 6월보다 낮고, 태풍으로 8월 강한 남서풍, 9월 강한 북동풍 나타남

2008~2020년 동안 울릉도에 영향을 주는 풍향은 연중 남서풍과 서남서풍이 불고 겨울철에 북동풍이 여름철보다 많이 부는 계절변동을 보인다(그림 3.2.13). 울릉도의 일평균 풍속으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값으로 표현하였을 때(그림 3.2.13(b)) 평균 풍속은 여름철에 2.5~4 m/s, 겨울철에 4~6 m/s로 분포하였다. 풍속의 월 최댓값은 평균풍속보다 약 3배 가량 높았고, 봄, 여름, 가을에 종종 12 m/s 이상 풍속이 높아지기도 했는데, 2015년 8월 14.9 m/s가 2008년 이후 가장 높은 측정값이다. 풍속의 월 최댓값은 안면도, 고산과 달리 겨울에 낮았다. 울릉도의 2020년 풍향과 풍속을 바람장미로 나타내어 최근 12년인 2008~2019년의 풍향, 풍속과 비교한 결과, 2020년 풍향의 패턴은 최근 12년과 비슷하나 풍속은 2020년 상반기에 북동풍 계열의 빈도가 지속적으로 높았고, 8월에는 남서풍이, 9월에는 북동풍의 빈도가 눈에 띄게 높았다(그림 3.2.14). 이는 8~9월에 울릉도 부근을 지난 태풍의 영향으로 보인다.

2008~2020년 동안 울릉도에서 측정한 기온의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기가 뚜렷하였다(그림 3.2.15). 기온의 월평균은 -2.5~26℃ 사이에 분포하였고, 최댓값은 2013년 8월 31℃였고, 최솟값은 2018년 1월에 -8.9℃이었다. 2018년 이후 겨울철 월평균과 월 최솟값은 눈에 띄게 증가하였다. 2020년 기온은 찬 시베리아 고기압의 강도가 약하여 최근 12년의 월별 평균에 비해 1, 2, 3월의 기온이 높았고, 7월의 기온은 북태평양 고기압이 북상하지 못 최근 12년보다 약 2.6℃ 낮고 20.8℃였고 같은 해 6월보다 낮았다(그림 3.2.16, 3.1 참조).

2008~2020년 동안 울릉도에서 측정한 상대습도의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 여름에 높은 계절변동을 보였다(그림 3.2.17). 상대습도의 월평균은 55%~92% 사이에 분포하였고, 월 최댓값은 99.6%로 2020년 9월에 나타났고, 월 최솟값은 2017년 4월에 22.5%로 가장 낮았다. 2020년 절대습도의 월평균은 6월과 10월에 나타났고, 겨울에 낮고 8월에 가장 높았다(그림 3.2.18). 2020년 절대습도는 최근 12년의 월별 평균에 비해 4, 7, 10, 12월에 조금 낮았고 그 외에 높거나 비슷하였다.

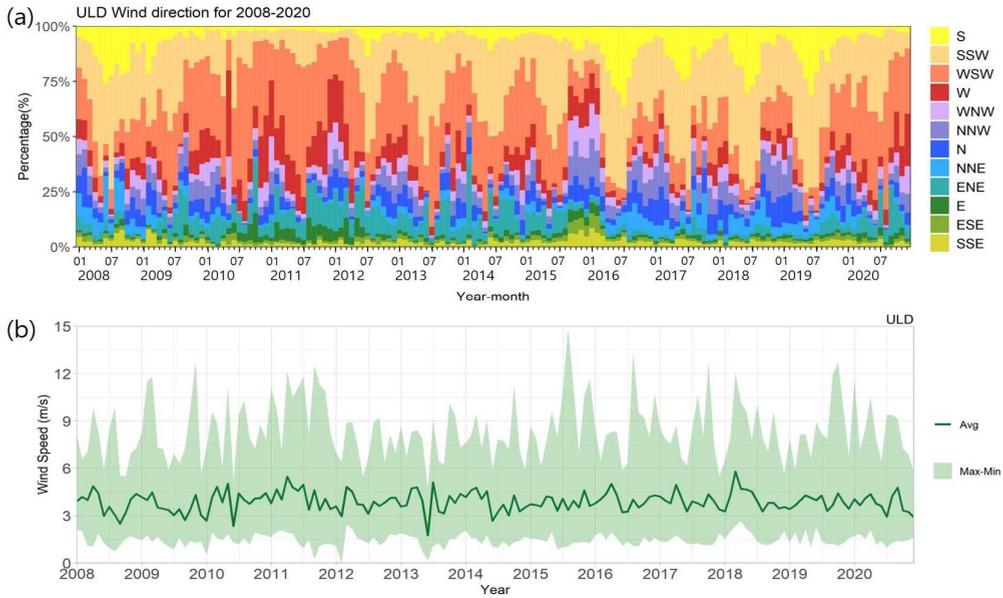


그림 3.2.13 2008~2020년 동안 울릉도에서 측정된 (a) 풍향 조성비율과 (b) 풍속 연변화.

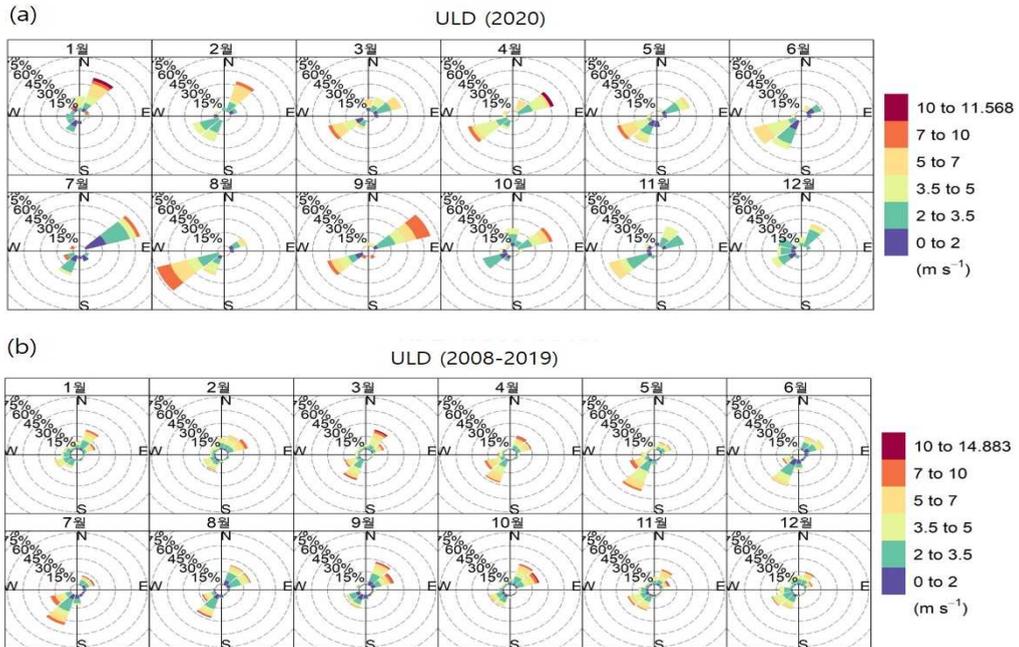


그림 3.2.14 울릉도에서 측정된 (a) 2020년 풍향·풍속과 (b) 최근 12년(2008-2019년)간 평균 풍향·풍속.

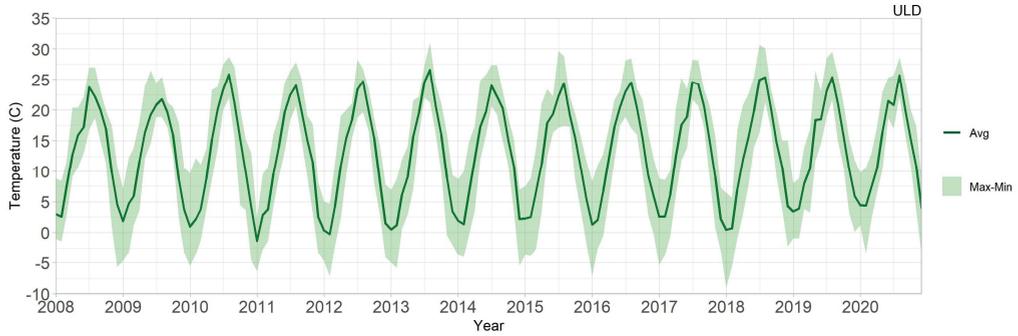


그림 3.2.15 2008~2020년 동안 울릉도에서 측정된 기온의 연변화.

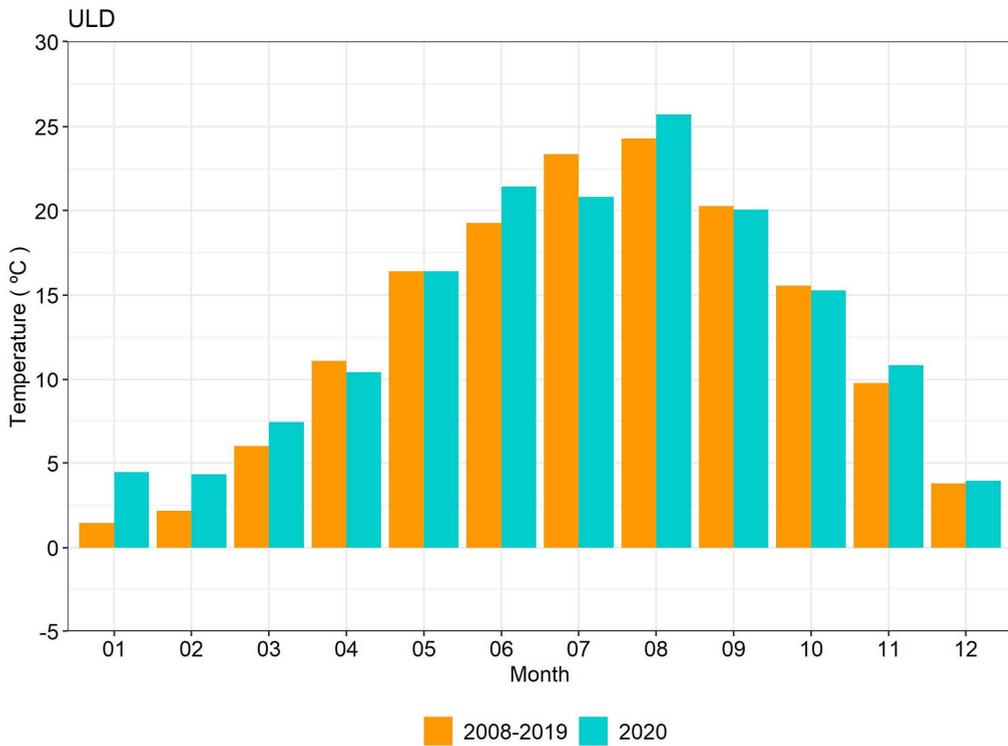


그림 3.2.16 울릉도의 2020년 월평균 기온과 최근 12년(2008~2019년) 월평균 기온 비교.

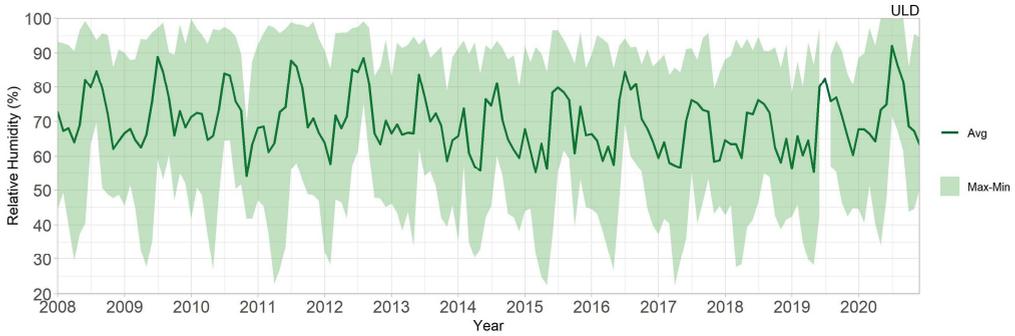


그림 3.2.17 2008~2020년 동안 울릉도에서 측정된 상대습도의 연변화.

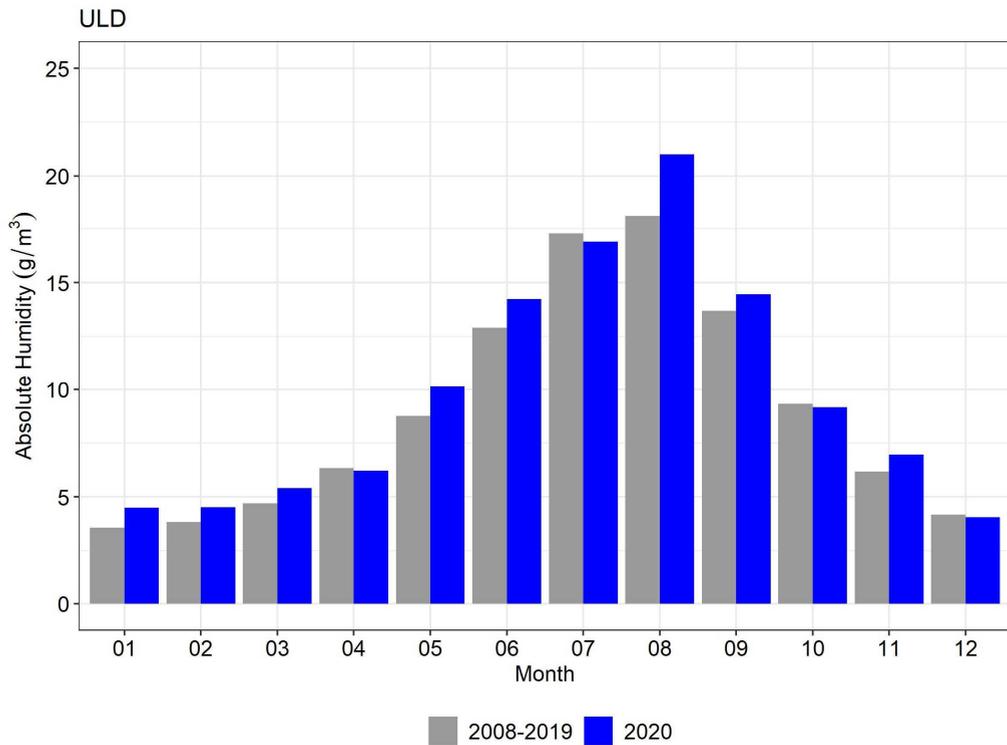


그림 3.2.18 울릉도의 2020년 월평균 절대습도와 최근 12년(2008~2019년) 월평균 절대습도 비교.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제4장 온실가스

4.1 온실가스 감시의 목적	70
4.2 이산화탄소(CO ₂)	72
4.3 메탄(CH ₄)	99
4.4 아산화질소(N ₂ O)	102
4.5 육불화황(SF ₆)	104
4.6 염화불화탄소(CFCs)	106
4.7 2020년 온실가스 특성 분석	109



제4장 온실가스

- 이산화탄소(CO₂) 코로나19 기간 중에도 여전히 증가
 - 안면도: 420.4 ppm (2020년 증가율: 2.7 ppm/year, 최근 10년 증가율: 2.7 ppm/year, 2000년대 2.2 ppm/year)
 - ※ 전지구: 412.5 ppm (2020년 증가율: 2.4 ppm/year, 최근 10년: 2.4 ppm/year, 2000년대: 1.9 ppm/year, 1980년대: 1.5 ppm/year) ※ 하와이: 411.4 ppm (2019년 증가율: 2.9 ppm/year, 최근 10년 2.3 ppm/year)
 - 2020년 코로나19로 인해 CO₂ 배출량 전지구 -7%, 한반도 -7% 감소하였으나, 대기 중 농도에 즉각적으로 반영되기 어려운 수준
- 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆) 등 배경농도 증가 지속
- ※ 몬트리올 의정서로 제한하고 있는 염화불화탄소류 (CFCs) 배경농도 감소 지속

안면도(1999~), 고산(2012~), 울릉도독도(2014~) 기후변화감시소에서 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆), 염화불화탄소(CFC-11, CFC-12, CFC-113) 등 7종을 관측하고 있다. 또한 안면도 기후변화감시소에서 FTS를 이용하여 대기의 총 CO₂를 관측하고 있다.

안면도 기후변화감시소의 관측을 기준으로 1999년부터 현재까지 총 22년간의 온실가스 배경 대기농도 관측자료를 확보하고 있다. 2020년에는 모든 관측소의 온실가스 값이 업데이트 되었다.

(1) 온실가스의 모든 L2자료가 1999년부터 현재까지 재확정 되었다. 모든 플래깅을 복원하고, 자료를 사용가능성을 철저히 비교 검증하여 확정하였다. 그 결과 전 지구와 비슷한 경향성이 많은 관측소에서 반영되었다.

(2) 모든 관측소의 CO₂의 척도가 변경되었다.

현재 사용하고 있는 온실가스의 척도 기준은 CO₂는 WMO-X2019, CH₄ WMO-X2004, N₂O WMO-X2006A, SF₆는 WMO-X2014이다. 척도란, 공식적 합의를 통해 정해진 기준 값이다(JCGM, 2012). CO₂ 척도는 1957년 킬링 박사가 하와이 마우나로아에서 최초로 관측을 시작했을 때의 기준값과 이어져 있다. 이 최초 기준값(Primary scale)은 현재 미국해양대기청(NOAA/ESRL)으로 이관되어 유지되고 있으며, 전 세계로 보급하고 있다. 2019년 온실가스 전문가회의(GGMT-2019)에서 CO₂의 척도변화(WMO-X2007 → WMO-X2019)가 있을 것을 발표하였으며, 2020년부터 적용되었다(Hall et al., 2021). 2020년의 CO₂농도는 척도의



변경으로 인해 전 세계 모든 관측소들에 적용되어 CO₂농도의 값이 변경되었다. 우리 기후변화 감시소의 CO₂농도 값들도 이번 보고서부터 업데이트되어 작성되었다.

위탁관측소로 지정된 남극세종과학기지, 남극장보고과학기지에서 대기 중 CO₂ 농도를 관측하고 있으며, 광릉수목원에서 산림 CO₂ 플럭스를 측정하고 있다.

올해는 안면도 기후변화감시소에서 측정 중인 CO₂ 전량농도(원격관측)의 장기관측자료를 추가하여 제공하며, 울릉도 N₂O자료가 공개되었다.

2020년 WMO 온실가스 연보

2020년 10월 WMO는 2019년의 전 지구 평균 온실가스 농도를 발표하였으며, 이 때 CO₂ 410.5±0.2 ppm, CH₄ 1877±2 ppb, N₂O 332±0.1 ppb로 나타났다. 이들 CO₂는 산업화 이전(1970년대 이전)보다 각각 148%, 260% 그리고 123% 증가했다. 세계기상기구(WMO)는 이번 연보를 통해 코로나19 확산으로 인해 인위적인 CO₂ 배출이 감소했을 것으로 추정하나 대기 중 CO₂ 농도 변화는 미미할 것이라고 언급하였다. 이 기간 동안 전 세계 이산화탄소 배출량이 4%~7% 줄어든 것으로 추측되며, 이는 대기 중 CO₂ 농도를 0.08~0.23 ppm 정도만 낮출 것으로 예상했다. 따라서 온실가스 저감으로 인한 기후 영향은 최대 수십 년 후에 나타나므로 온실가스 배출 감소 노력을 빨리할수록 온난화 효과를 더 빨리 줄일 수 있다.

4.1 온실가스 감시의 목적

온실가스는 지표면이 반사하는 태양복사의 장파복사를 흡수 또는 반사하여 지구표면의 온도를 상승시키는 역할을 하는 가스종을 말한다. 이들은 긴 체류시간으로 한 번 배출되면 대기에 지속적으로 누적되어 지구온난화를 가속한다. 유엔 기후변화협약(UNFCCC)의 제3차 당사국총회(일본 교토, 1997)에서는 CO₂, CH₄, N₂O, CFCs, SF₆, 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs)을 규제대상 온실가스로 규정하였고, 제17차 당사국총회(남아프리카공화국 더반, 2011)에서 삼불화질소(NF₃)를 추가하였다.

대기 중 온실가스 측정은 지구온난화의 직접적 영향을 추산하고 배출원과 소멸원의 변화를 유추할 수 있는 과학적 근거자료이다. 온실가스 농도는 흔히 에어로졸이나 반응가스의 농도 등과 비슷하게 산출된다고 생각하지만, 실제 우리가 말하는 온실가스의 농도는 전체 관측농도의 산술 평균이 아닌, 배경농도(baseline or background level)이다. 배경농도란, 그 지역에서 기원과 소멸에 의해 자연적으로 나타나는 변동성과 지역/혹은 전 지구 단위에서 잘 희석된 배출원이 혼합되어 나타난다(US EPA, 1999). 여기서 '잘 희석된'이란 의미는 배출 후 소멸이 모두 이루어지고 대기 중 남은 양을 일컫는다.

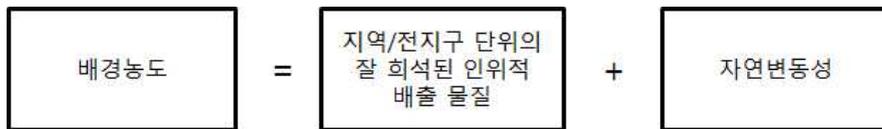


그림 4.1.1에서 보이는 붉은선이 배경농도이다. 온실가스에서 고농도를 포함하지 않고, 배경 농도만을 논하는 이유는 전 세계 증가율¹⁾과 연계되어 있으며, 그 지역의 자연변동성²⁾을 통해 지역의 배출/흡수 정보를 알 수 있기 때문이다. 온실가스의 경우 실제 고농도 사례가 발생하더라도 대기 중 체류시간이 길기 때문에 반응가스나 에어로졸과 같이 지역 규모로 영향을 주지 않는다.

- 1) 증가율:** 온실가스 농도는 측정하는 위치와 높이에 따라 그 분포가 다르나, 증가율은 결국 같은 위도대의 관측소들이 비슷한 경향성을 나타내게 된다. 이는 온실가스가 대기 중 체류시간이 길어 배출지역에 영향을 미치기보다 전 지구적 증가율에 영향을 미치기 때문이다. 증가율이 증가한다는 의미는 결국 전 지구적 흡수원이 포화상태가 되어가고 배출원이 증가하고 있다는 의미와 같다.

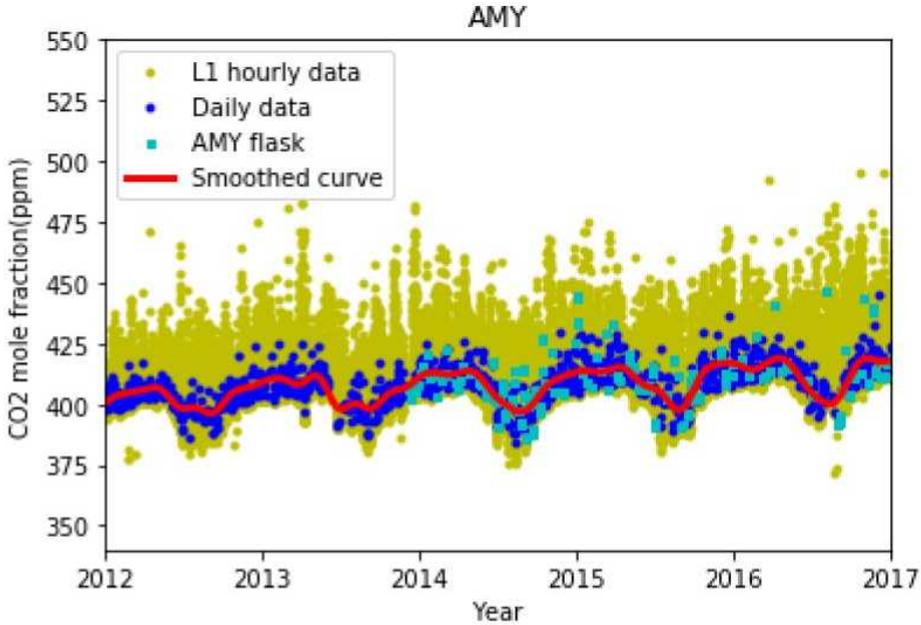


그림 4.1.1 안면도 CO₂ 시간 평균농도(L1 노란색), 고농도를 제거하여 선별한 일 평균농도(파란색), 잘 희석된 공기를 채취한 플라스크자료(하늘색), 선별된 자료를 바탕으로 계산한 배경농도(붉은색, 계산법 부록 1)(Lee et al., 2019).

2) 자연변동성: 그림 4.1.1에서 보듯이 CO₂는 여름철에 낮고 봄철에 높다. 여름철 식생의 광합성 활동으로 CO₂의 흡수가 증가해 그 농도가 낮아지다가 여름철이 지나면 점차 광합성 활동이 줄어들고 겨울철 난방 등이 증가하기 시작하면서 배출된 CO₂는 점차 대기에 누적된다. 이 값은 광합성 활동이 다시 시작되는 봄철까지 최대치를 이룬다. 따라서 이 최솟값과 최댓값의 차이(진폭)로 그 지역의 흡수원과 배출원을 이해할 수 있다. 예를 들어 남반구는 북반구에 비해 CO₂의 계절변동의 폭이 작다. 이는 인구가 북반구에 비해 적어 인위적 배출원이 적으며, 식생의 분포도 적어 흡수하는 양도 적기 때문이다. 따라서 계절변동 폭은 북반구가 크고, 남반구가 작다.

반면 자연변동성이 나타나지 않고 증가를 한다는 것은, 지표에 배출원은 있으나 흡수원이 없다는 의미를 갖는다. 이러한 가스종은 대부분 대류권에서 오랫동안 체류하게 된다. 따라서 자연변동성이 없다면, 지표에 흡수원이 없어 대기 중 체류시간이 상대적으로 길다. 이러한 가스들은 한번 배출되면 대기 중에 지속적으로 누적되기 때문에 그 증가율 또한 가파르고, 배출량을 줄인다고 하더라도 단번에 감소 효과를 볼 수 없다. 대표적으로 SF₆, CFCs 등이 이에 속한다.

4.2 이산화탄소(CO₂)

4.2.1 한반도 기후변화감시소: 지표관측

이산화탄소(CO₂)는 지구온난화를 유발하는 주요 원인물질로 인간의 화석연료 소비증가로 배출되는 대표적인 온실가스이다. CO₂의 전 지구 평균 농도는 꾸준히 증가하고 있다. 일반적으로 인위적(화석연료 등) 및 자연적(해양, 토양의 유기활동, 생체 활동, 생체 소각 등)으로 이산화탄소가 배출되면 생태와 해양에서 약 50%가 흡수되고, 그 나머지가 대기 중에 잔존하는 것으로 알려져 있다. 모든 온실가스의 전 지구 복사강제력은 산업화 이전 시기(1750년 이전)와 비교하여 2011년 3.0[2.22~3.78] W/m²에 이르며 이 중 CO₂가 차지하는 전 지구 복사강제력은 1.68[1.33~2.03] W/m² (56%)에 이르는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2013).

2020년 코로나19 기간의 CO₂의 인위적 배출이 전 세계적으로 약 7%, 우리나라는 약 7% 감소한 것으로 보고하였으나, 대기 중 농도의 증가율은 계속되었다. 자세한 사항은 4.7절에 서술하였다.

2020년 안면도에서 관측된 CO₂ 연평균 배경대기 농도는 420.4 ppm이다(표 4.2.1). 안면도에서 처음 CO₂ 농도를 관측한 1999년 연평균 농도 369.2 ppm과 비교하여 21년간 51.2 ppm 증가하였으며 1999년 농도 대비 1.14배로 증가하였다. 산업화 이전인 1750년 CO₂ 전 지구 평균 농도 278.0 ppm와 비교하면 1.5배로 증가한 값이다. 안면도 CO₂는 전년도에 비해 2.7 ppm 증가하였으며, 최근 10년(2010~2019년) 안면도에서 관측된 CO₂ 연간 증가값의 평균인 2.7 ppm과 비슷하다. 고산은 418.9 ppm으로 전년도 보다 2.4 ppm 증가하였고, 울릉도는 417.6 ppm으로 전년도보다 2.3 ppm 증가하였다. 독도의 2020년 평균농도는 416.6 ppm이었다.

미국해양대기청(NOAA)에서 발표한 2020년 전 지구 CO₂ 농도는 412.5 ppm으로 전년도에 비해 2.4 ppm 증가했으며, 최근 10년간(2010~2019년)의 연간 증가값의 평균인 2.4 ppm/year 과 같다. 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 2020년 연평균 농도는 전 지구 평균보다 약 7.9 ppm, 6.4 ppm, 5.1 ppm, 4.1 ppm 높다. 우리나라 관측소 4소와 NOAA에서 관측한 전 지구 평균 CO₂ 농도의 시계열을 그림 4.2.1에 제시하였다. 북반구에 위치한 우리나라 관측소 모두 봄철에 가장 높은 값, 여름철에 가장 낮은 값을 보이며, 전 지구 평균값보다 높다. 이는 북반구가 남반구에 비해 많은 인구가 분포하고 육상생태계가 발달하여 농도가 높고 계절변동이 크기 때문으로 밝혀진바 있다(Nevison et al., 2008). 전 지구 값을 포함하여 우리나라 관측소 모두 관측 이래 지금까지 꾸준히 CO₂ 농도가 증가하고 있으며, 그 증가 기울기가 유사하다. 특히 전 지구와 안면도 모두 2000년대와 비교하여 최근 10년의 증가값의 평균이 증가하였으며, 대기 중 CO₂의 증가가 가속화됨을 보인다.



표 4.2.1 2020년 안면도, 고산, 울릉도, 독도 전지구의 CO₂ 농도 (단위 : ppm)

지 점	안면도	고산	울릉도	독도	전지구 ¹
2020년 평균값	420.4	418.9	417.6	416.6	412.5
2019년 대비 절대 증가값 ² (단위: ppm/year)	2.7	2.4	2.3	1.8	2.4
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2010~2019년) (단위: ppm/year)	2.7	-	-	-	2.4
과거 10년간 절대 증가값 평균 (2000~2009년) (단위: ppm/year)	2.2	-	-	-	1.9

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

² 절대 증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

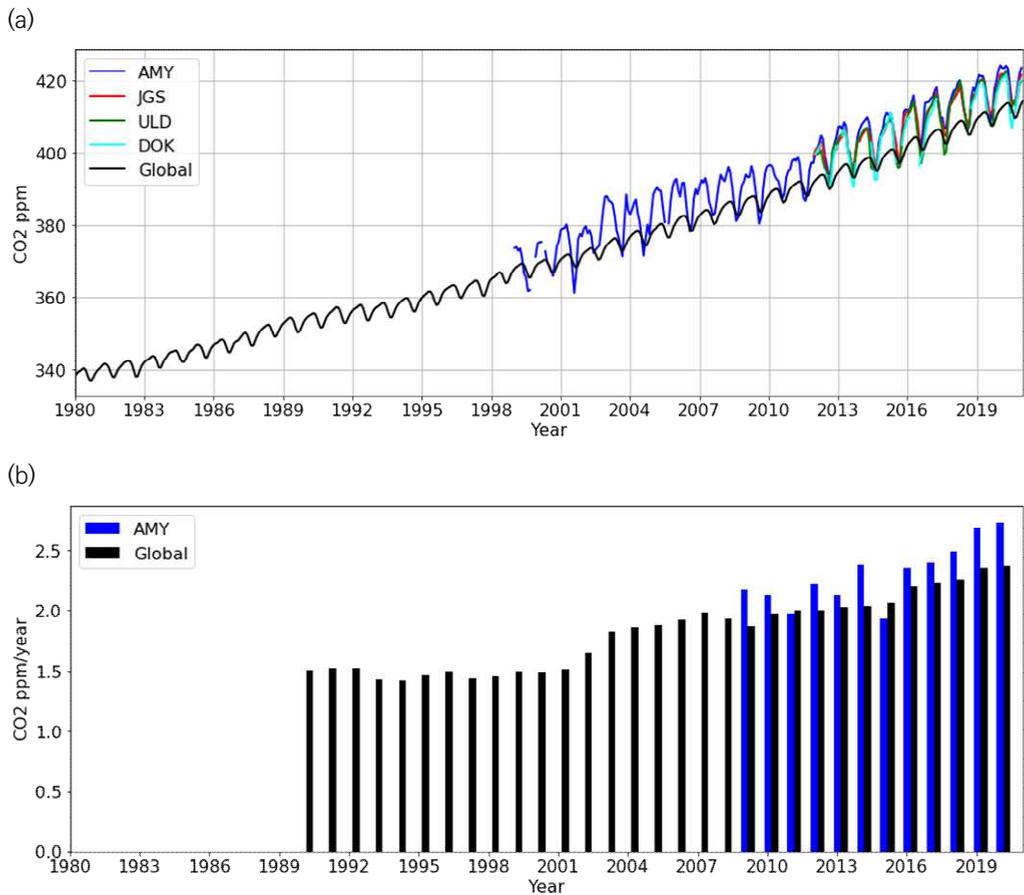


그림 4.2.1 (a) 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 독도(DOK)와 전지구(Global)의 이산화탄소 배경농도. (b) 매 10년간 증가값(ΔCO_2)의 평균.

1980년대 전 지구 CO₂ 증가율을 보면, 10년간 약 1.5 ppm/year의 평균 증가율을 보였으나, 2000년대 들어 1.9 ppm/year까지 증가하였으며, 최근 10년 2.4 ppm/year를 보였다. 한반도도 이와 동일하게 2000년대에 약 2.2 ppm/year를 보였으나 최근 10년 2.7 ppm/year 수준을 보이면서 지속적으로 CO₂가 증가하고 있음을 보인다.

그림 4.2.2는 2011년부터 2020년까지 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 CO₂ 배경대기 농도 시계열이다. 안면도의 CO₂농도는 1999년부터 꾸준히 증가하여 2012년에 처음으로 연평균 농도가 400 ppm을 넘었다. 2015년까지 여름철에는 300 ppm 후반으로 관측되었으나, 2016년부터는 월평균 전체가 400 ppm을 넘었다. 울릉도는 2017년까지 여름철에 400 ppm 이하의 농도를 보여 한반도 서쪽에 비해 농도가 낮았으나, 2018년부터 한반도의 모든 관측소가 400 ppm을



넘었다. 전 지구 농도도 2016년부터 연평균이 400 ppm을 넘었다.

400 ppm은 과학적으로 의미있는 값으로 중기 지질시대(약 330~300만년 전)는 가장 최근에 지구 평균온도가 오랫동안 높게 지속되었던 기간으로 대기 중 CO₂ 농도가 산업혁명 이전의 280 ppm 보다 높은 360~400 ppm을 나타냈고 해수면과 기온은 산업혁명 이전보다 각각 15~25 m과 2~3℃ 높았던 것으로 나타났다(IPCC 4차보고서, 2007, IPCC 5차보고서, 2013). 따라서 400 ppm 이상의 증가는 제16차 유엔기후변화총회에서는 기온의 폭발적 상승을 막을 수 없는 전환점으로 “산업화 대비 2℃ 상승”으로 보고, 지구 평균온도 상승을 2℃ 이하로 억제하기로 합의하였으며(UNFCCC 합의문, 2010), 400 ppm은 이 2℃를 위협하는 농도에 근접했음을 나타낸다고 판단하고 있다.

모든 지점의 증가율은 1~4 ppm/year로 비슷하게 나타나 한반도의 CO₂ 농도가 지속적으로 증가함을 보인다. 특히 2015/2016년 ENSO의 영향으로 증가율이 높았으며, ENSO가 관측되지 않았으나 기온이 높았던 2019년과 2020년 모두 안면도의 증가율이 높다.

안면도, 고산, 울릉도, 독도 CO₂의 최댓값은 보통 4월에, 최솟값은 보통 8월에 관측되나 2020년 울릉도의 경우 6월에, 독도는 7월에 최솟값이 관측되었다. 이러한 계절변동은 CO₂의 발생원과 흡수원, 주풍에 따른 이동에 의한 영향을 알 수 있는 지표가 된다.

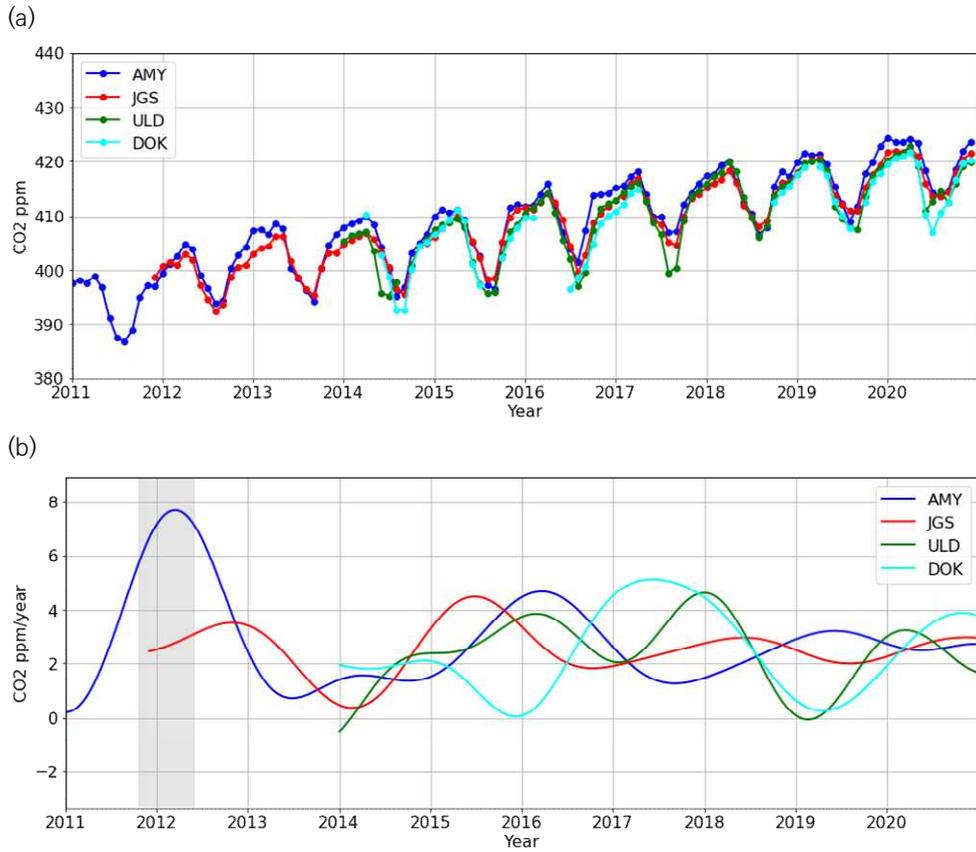


그림 4.2.2 10년간(2011~2020년)의 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 독도(DOK)의 (a) 대기 중 CO₂ 농도변화와 (b) 그 증가율. 증가율의 회색기간은 안면도의 관측장비 등 시스템의 변경으로 인한 인위적 영향의 증가율임(Lee et al., 2019).



4.2.2 한반도 기후변화감시소: 원격관측

고분해 태양흡수분광간섭계(FTS)를 이용한 온실가스 원격관측은 2013년 12월 독일 Bruker사의 FTS 본체(IFS-125HR)와 태양추적장치(A547N Solar Tracker)를 도입하여 2014년도 시험운영을 거쳐 현재까지(8년 동안) 운영 중이며, 2014년 8월 전 지구 탄소전량관측망(Total Carbon Column Column Observing Network: TCCON)으로 지정되었다.

관측은 FTS 장비를 통해 최대 분해능 0.0008 cm^{-1} , 최대 스펙트럼 범위는 $5 \sim 50000 \text{ cm}^{-1}$ 에서 TCCON 기준에 따라 스펙트럼 범위 $3800 \sim 16000 \text{ cm}^{-1}$ ($0.63 \sim 2.63 \mu\text{m}$), 분해능 0.02 cm^{-1} 로 설정하여 전량농도를 산출하였다. 이 산출 농도는 안면도 지역의 탄소순환 특성을 나타낸다.

또한 전량농도는 대기 전체에 걸친 이산화탄소(CO_2)의 농도를 연직방향으로 적분한 것으로 정의하며, 지상관측소와 같은 해당 지점의 농도가 아닌 지표부터 대기 상단(약 72 km)까지 쌓여 있는 CO_2 기체의 양을 의미한다. 그 전량농도 표기는 XCO_2 로 한다.

XCO_2 는 관측된 스펙트럼에 대해 순방향 모델 스펙트럼을 비교하는 비선형 최소제곱 접근법(GGG)을 사용하여 계산되었으며, 총 열 평균의 CO_2 추정치이다. 순방향 모델은 CO_2 , 대기 온도, 수증기(H_2O) 및 기기 매개변수에 따라 차이를 나타내며, 그 오차는 0.25% 보다 낮다. 또한 여기서 사용된 GGG는 2014년 개선된 최근 버전으로 TCCON에서 제공된 것이며, 개선 농도 오차는 표 4.2.2.에서 보여준다. XCO_2 의 농도 정밀도는 GGG 2014에 의해 확연히 개선되었으며, 개선된 구간은 오차농도 0~5 ppb이다. 개선구간은 작은 농도 오차범위를 갖는 것에 큰 이점이다.

안면도 XCO_2 의 산출된 불확도는 이전(Oh et al, 2018)에 발표된 결과치와 일치하며, 그 농도는 약 0.26 ppm이다. 또한 전체 기동 편향을 고려한 후 대류권 CO_2 추정치를 고려한 오차는 0.55 ppm이다. 이는 안면도 지역의 낮은 대류권에서 약 12 ppm의 겨울~여름철 변동성을 포착하기에 충분했다.

안면도 지역은 공간변동량의 정량화가 필요한 곳이며, 서쪽 바다와 동쪽 육지로 구성된 해안 지역으로 육지의 주변 방출원에 의한 상대 강도를 정량화하는 데 용이하다. 안면도는 겨울철에 약한 수직 혼합층으로 얇은 PBL이 발생하고 이로 인해 수평 추적 전송이 향상되어 공간변동이 증가한다. 그림 4.2.3은 안면도 지역 XCO_2 의 시계열을 보여준다. 안면도의 격년변동은 봄에 최대, 여름에 최소를 나타내며, 매년 2~3 ppm 범위로 꾸준히 증가하였다. 또한 2020년도 관측 기간 중 최고 농도인 415 ppm의 XCO_2 가 분석되었으며, 코로나19 영향이 크게 나타나지 않았다. 다른 해와의 차이는 2019년 말부터 2020년 초에는 각 달에 대한 XCO_2 평균농도변동이 8 ppm으로 크게 나타났다.

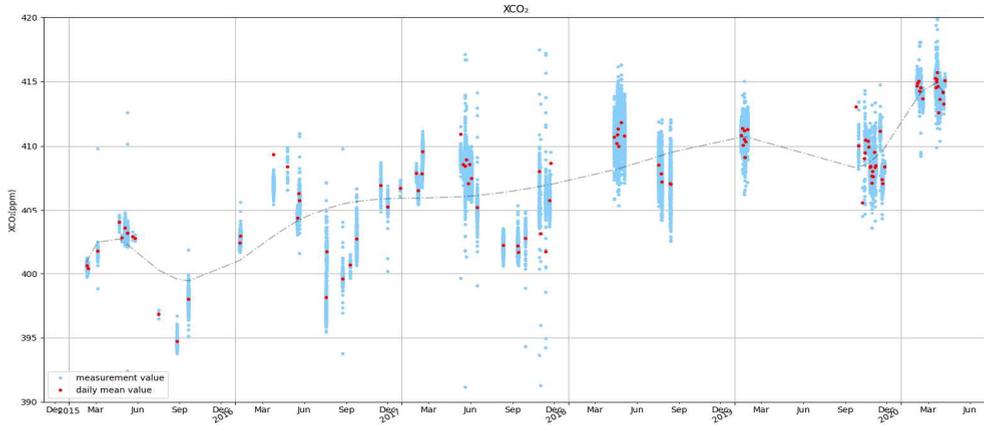


그림 4.2.3 안면도 지역의 전량 이산화탄소(XCO₂) 농도의 장기간(2015~2020년) 계절 변동성.

표 4.2.2 비선형 최소 제곱 접근법(GGG) 버전에 따른 농도오차 개선 값

	GGG 2010	GGG 2012	GGG 2014
XCO ₂	1.0043±0.0074	1.0003±0.0052	0.9996±0.0049



4.2.3 남극세종과학기지

남극세종과학기지(62° 13' S, 58° 47' W, 이하 세종기지)는 남극반도 끝단에 위치하며 2010년 1월부터 파장스캔 공동감쇄분광기(Wavelength-scanned cavity ring down spectroscopy; WS-CRDS)를 이용한 CO₂ 농도 관측이 시작되었다(기상청, 2010). 그리고 2010년 10월 26일에 CO₂ 농도를 포함하여 성층권 오존 농도 등의 관측요소에 대해 세계기상기구(WMO) 산하 지구대기감시(Global Atmosphere Watch; GAW) 프로그램의 지역급 기후변화감시소로 등재되었다.

세종기지에서의 CO₂ 농도 관측시스템은 세종기지 본관동에서 남서쪽 약 180 m 떨어져 있는 관측동에서 운영된다. 기지는 연중 북서풍계열이 우세한 지역에 위치하여 관측동은 기지의 풍하측에 위치하는 경우가 많아, 상대적으로 기지 활동의 영향이 관측에 미치는 영향이 많다. CO₂ 농도 관측은 WS-CRDS(Wavelength- Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy) 방식의 CO₂/H₂O 분석기(G1200, Picarro, Inc., USA, 이하 간단히 CRDS)와 제습 장치, 그리고 유량 조절 및 교정 장치로 구성되어 있다. 관측동 옥상 약 2.7 m 높이(지표면으로부터 약 6 m)의 흡입구(inlet)에서 포집되는 샘플 공기는 펌프에 의해 제습장치에 도달한다(그림 4.2.4). 두 개의 냉동챔버로 구성된 제습장치에서 수증기가 제거되고, 기체유량제어시스템인 MFC(mass flow controller)에 의해 일정하게 조절된 유량(400 mL/min)중 약 230 mL/min의 양만 최종적으로 분석기에 도달하여 1~2초 단위로 농도가 측정되고 이 값은 CRDS에 저장된다. 보다 자세한 사항은 기상청(2010)을 참조하면 된다.

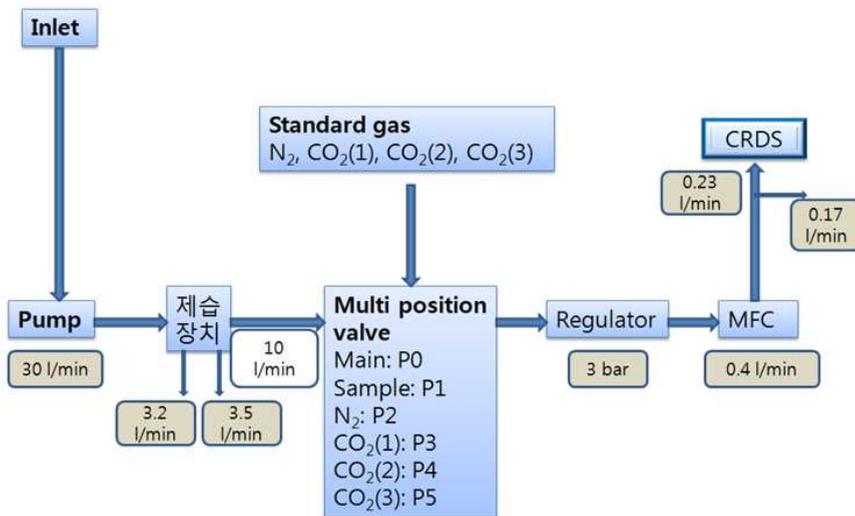


그림 4.2.4 남극세종과학기지 CRDS 관측 모식도.

2017년 1월 CRDS의 내부 문제로 제조사로 반출하여 장기간 결측이 발생하였고 2018년 1월 30일 수리된 CRDS가 기지에 재반입되어 관측이 재개되었다. 기존에 사용하던 화학제습장치를 냉동제습장치로 교체하여 운영을 시작하였으나, 냉동제습 장치에 문제가 발생하여 2019년까지 제습을 실시하지 못하였고, 2020년 1월 17일 수리된 냉동제습장치를 설치하여 현재는 정상 작동 중이다. Korkiakoski(2014년)에 의하면 이슬점온도 약 18℃에 상응하는 수증기 농도 2.0%까지는 CRDS에 내장된 수증기 교정 함수를 사용하여 수분 영향이 제거된 CO₂ 농도를 도출할 수 있음을 제시하였고, 매우 낮은 농도의 수증기량이 관측되는 남극 및 북극 관측소에서 충분히 적용된다는 연구결과가 있다(Vinther et al., 2006; Bromwich et al., 2013). 한편, 2020년도에 세종기지에서 관측된 수증기 농도는 1%를 넘지 않았으므로 Picarro 내장함수가 적용된 수증기 교정된 CO₂ 농도를 최종 분석에 이용하였다. 2020년 남극세종과학기지의 일평균 수증기 농도는 그림 4.2.5와 같다.

2020년 세종기지에서 교정용으로 사용된 표준가스 2세트는 국립기상과학원에서 제조한 표준가스(CO₂: 380.149 ppm, 405.128 ppm; 2017년 공급)이며, 2020년 1월 12일부터 2020년 12월 23일까지 약 15일 간격으로 총 24회 표준가스 농도 측정이 이루어졌고, 측정 결과를 이용한 교정은 나중에 자료 분석 시 적용되었다.

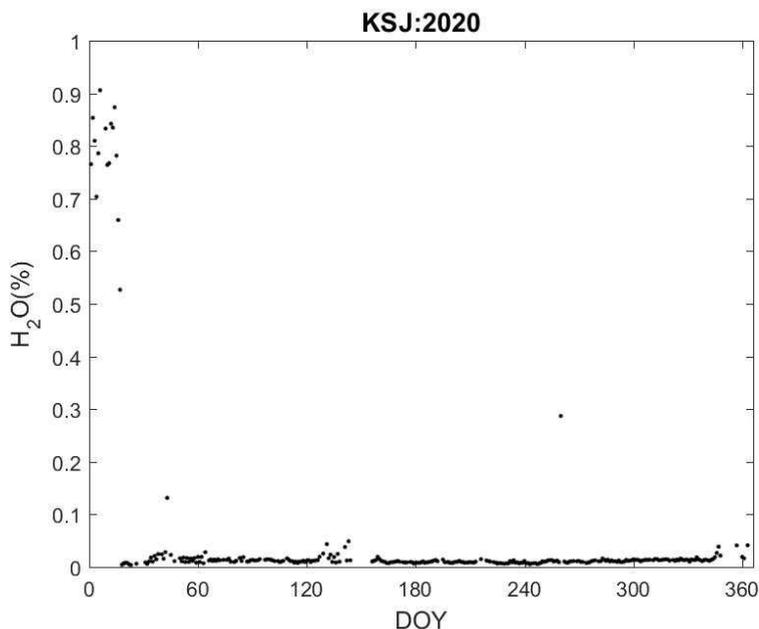


그림 4.2.5 2020년 남극세종과학기지에서 측정된 일평균 수증기 농도의 변동.



CO₂ 관측 자료는 다음의 절차에 따라 최종 자료가 산출되었다. 우선, 30초 동안 관측한 자료로부터 평균과 표준편차가 계산된다. 평균으로부터 표준편차 2배 이상의 편차를 보이는 자료는 제외하고 후 중앙값(median)을 30초 대푯값으로 정해진다. 그런 후 20개의 30초 대푯값으로부터 10분 평균이 산출된다. 10분 평균 자료에 대해 다음과 같은 조건에 해당되면 그 값은 제거되었다. 1) 장비의 정상 작동 범위(cavity 내부의 온도가 44~46°C, 압력은 139~141 torr)를 벗어난 경우, 2) 10분 동안 관측된 원자료의 개수가 200개 이하인 경우, 3) 풍향이 355 ~ 55°(발전동의 풍하측에 해당)인 경우, 4) 블랙카본 농도가 100 ngm⁻³ 이상인 경우, 5) 평균 산출에 사용한 30초 대푯값의 갯수가 10개 미만인 경우, 6) 10분 동안 표준편차가 0.25 ppm이상인 경우. 10분 평균을 이용하여 시간 평균, 일평균, 월평균을 산출하였고, 상위 시간 평균 산출을 위해 필요한 하위 시간 평균값의 수가 50% 이상 가용한 경우에만 상위 시간 평균을 산출하였다. 자료의 필터링 기준과 자료처리 결과는 아래의 표 4.2.3과 표 4.2.4에 각각 제시되었다.

표 4.2.3 2020년 남극세종과학기지 CO₂ 자료 필터링 기준

Criteria2	Value
H ₂ O Threshold	< 1.0%
Valid Wind Sector	55 ~ 355°
CO ₂ Variability(st dev)	0.25 ppm in 10-min window
Black Carbon Criteria	< 100 ng/m ³
Minimum sample Size for Representativeness	50%
Minimum 10-min Sample Size for 1 Hour Average	4/6
Minimum 1-hr Sample Size for 1 Day Average	12/24
Minimum 1-day Sample Size for 1 Month Average	50%
Maximum Difference of CO ₂ Conc. in 1 Hour	1 ppm

표 4.2.4 2020년 남극세종과학기지 CO₂ 농도 자료 처리 결과

Criteria	Number of data in 10- min
Version	202104251346
Numeric samples	52693
Samples in normal cavity condition	51117
Samples without events recorded in logbook(e.g., calibration)	50186
Samples with proper dehumidification(H ₂ O<1.0%)	52575
Samples with smaller variability(CO ₂ std<0.25 ppm)	48181
Samples with <100 ng/m ³ BC	47241
Samples with WD sector between 55 and 355 (Not from the station)	46081
Samples with more samples for averaging(50%)	52677
Remaining samples after filtering complete	41039

2020년 세종기지 기상특성은 연간평균 기온은 지난 33년 중 10위권에 해당하는 따뜻한 해였으며 1월은 예년보다 따뜻하고 8월은 예년보다 추워서 연교차가 컸다(극지연구소, 2021). 그림 4.2.6은 2020년 세종기지에서 측정된 월평균 풍속과 기온의 변동이다. 풍속은 평균적으로 하계 기간보다 동계기간이 강하게 나타났으며 5월부터 9월에는 평균 풍속 및 최대 풍속의 변동이 크게 나타났다. 1월의 평균 풍속이 4.8 ms⁻¹로 가장 약하였고, 3월부터 평균 풍속이 증가하여 8월에 10.0 ms⁻¹로 가장 강하였다. 연중 순간 최대 풍속은 5월에 기록된 38.8 ms⁻¹이었다. 풍향은 북서풍(303.75~326.25°)과 북북서풍(326.25~348.75°)이 차지한 비율이 각각 13.1%와 10.9%로 가장 우세하였고, CO₂ 농도 측정에 영향을 주는 발전동 방향(355~55°)의 바람은 약 14.6%를 차지하였다(그림 4.2.7). 연평균 풍속은 7.2 ms⁻¹로 예년의 8.0 ms⁻¹보다 다소 약하였다. 기온은 뚜렷한 계절변동을 보였으며 1월 월평균 기온이 3.0℃로 가장 높았고, 8월에 -7.7℃로 가장 낮았다. 연평균 기온은 -1.3℃로 예년보다 다소 높았다. 연평균 기압은 991 hPa로 예년(989 hPa)과 비슷하였다.

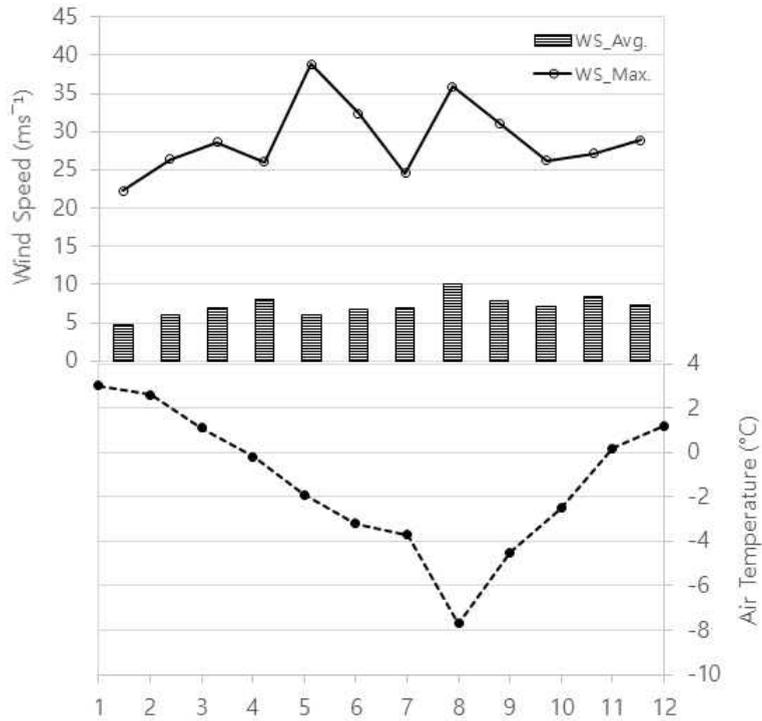


그림 4.2.6 2020년 남극세종과학기지에서의 월평균 풍속, 최대 풍속 및 기온의 변동.

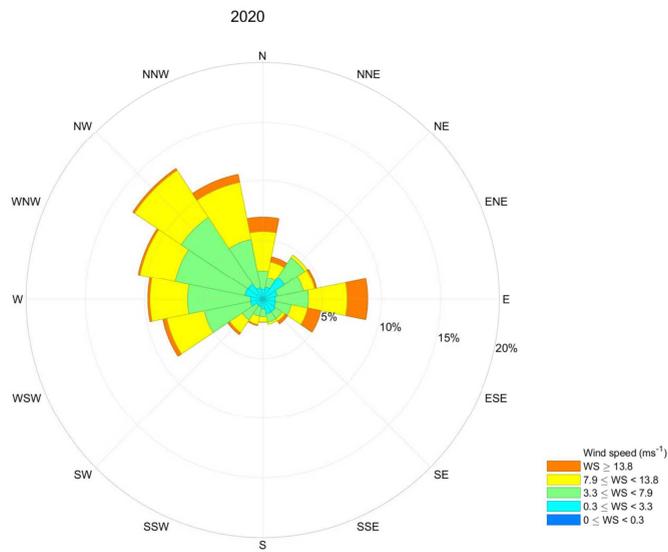


그림 4.2.7 2020년 남극세종과학기지의 풍향 분포.

그림 4.2.8는 2020년 세종기지에서 관측한 CO₂ 일평균 농도의 연변동이다. 1월 18일 일평균 CO₂ 농도는 407.1 ppm을 시작으로 2월 중순경까지 감소 추세를 보인 후, 10월까지 지속적인 증가 추세를 보였다. 2020년 10월 12일, 연중 일평균 최댓값인 410.2 ppm이 관측되었고, 11월과 12월이 되면서 다시 감소하는 추세였다. 일평균 최솟값은 2월 4일에 관측된 406.4 ppm으로 나타났다.

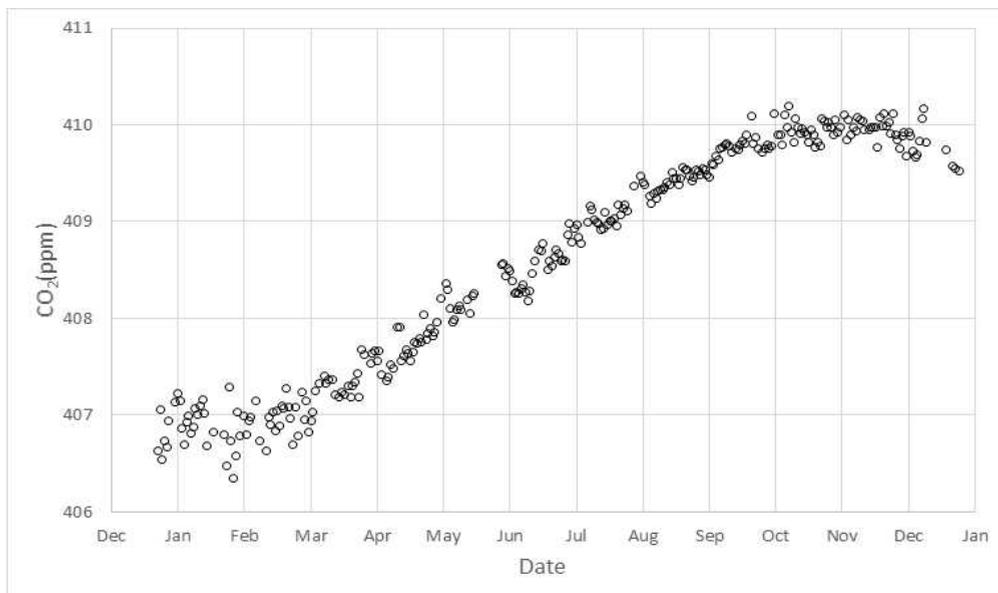


그림 4.2.8 2020년 남극세종과학기지에서 측정된 일평균 CO₂ 농도의 변동.

남극반도의 북쪽 끝단에 위치한 세종기지는 남극 다른 지역에 비해 저위도에 위치하며 지리 및 지형적 원인으로 기상의 경년 변동이 크다. 2010년부터 2020년까지 연평균 기온은 -1.9°C 이고, 2016년이 -1.1°C 로 가장 높았으며, 2020년은 두 번째로 높은 -1.3°C 이었다. 2010년을 제외한 2011년부터 2020년까지 세종기지 연평균 기온은 매년 0.13°C 증가 추세이다($p < 0.01$). 하지만 2010년을 포함하면 추세는 통계적으로 유의미하지 않다. 이는 남극 기상의 경년 변동이 크기 때문이다. 반면에 풍속의 경우 2010년부터 2020년까지 매년 0.13 ms^{-1} 씩 감소 추세에 있다($p < 0.01$). 이런 기상 환경 하에 2010년부터 11년간 측정된 CO₂ 농도 변동이 그림 4.2.9에 제시되었다. 결측이 있었던 달은 장기추세와 계절변동을 반영하여 자료를 메웠다(WMO, 2009). 장기추세 산정을 위해 선정된 자료 기간은 2012년 3월부터 2014년 2월까지의 24개월이다. 세종기지서 첫 관측(2010년 1월 월평균 농도 384.7 ppm)이후, 2016년 6월 처음 월평균



농도가 400 ppm을 넘어섰고 2020년 12월 현재 월평균 이산화탄소 농도는 409.8 ppm이었다. 2010년 연평균 농도는 386.3 ppm이었고, 2020년 연평균 농도는 408.6 ppm으로 지난 11년 동안 CO₂ 농도는 22.3 ppm 증가하여 2010년 대비 6% 증가하였다. 2020년 농도는 전년도 (406.3 ppm) 대비 2.3 ppm 증가하였으며, 2010~2019년 연간 증가값의 평균인 2.2 ppm 보다는 조금 높았다. 참고로 장보고기지의 2020년 이산화탄소 농도의 증가율은 2.2 ppm/year 이었다.

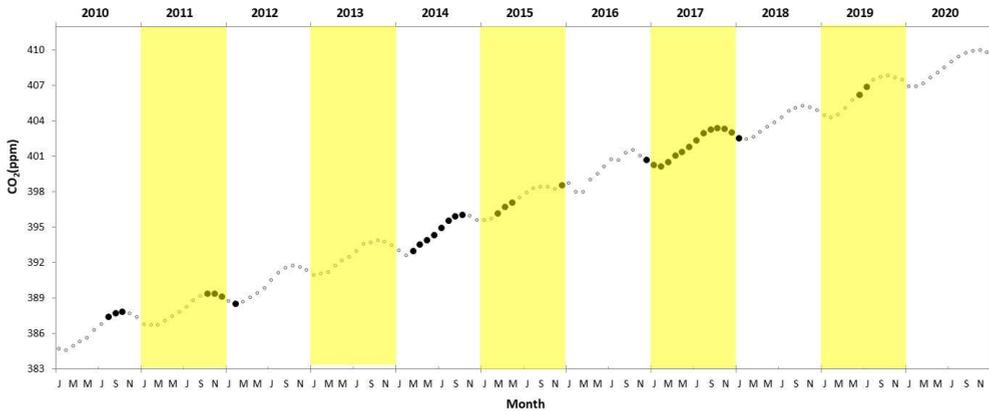


그림 4.2.9 2010~2020년 남극세종과학기지에서 측정된 월평균 CO₂ 농도의 변동. 단 검은색 동그라미는 채워진 자료임.

4.2.4 남극장보고과학기지

남극장보고과학기지(74° 37.4'S, 164° 12.0'E, 이하 '장보고기지')는 동남극 북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 테라노바 만(Terra Nova Bay)에 위치한 대한민국의 두 번째 남극 과학기지로 2014년 2월에 준공되었다. 장보고기지는 정규 기상 관측(WMO Index 89859), 라디오존데 및 오존존데를 이용한 상층 기상 및 성층권 오존 관측, 지상 온실기체 측정 등 대기물리, 화학, 복사 등의 대기과학 전 분야에 걸친 연구 장비를 갖춘 과학기지이다.

장보고기지에서의 CO₂ 농도 관측은 본관동으로부터 북쪽으로 약 1km 떨어진 대기구성물질 관측동에서 이루어진다. 기지는 연중 서풍계열이 우세한 지역에 위치하여 관측동은 기지의 풍상측에 위치하는 경우가 많아, 상대적으로 기지 활동의 영향이 적은 관측 자료를 상당수 확보할 수 있다. CO₂ 농도 관측을 위하여 WS-CRDS(Wavelength- Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy) 방식의 CO₂, CH₄, H₂O 분석기(G2301, Picarro, Inc., CA, USA)를 이용하고 있으며, 부속 장치로는 분석 시료로부터 수분을 제거하는 냉동 제습장치, 주기적인 교정 및 기체의 흐름을 조절하는 유량 조절 및 교정 장치가 설치되어 있다(그림 4.2.10). 유량 조절 및 교정 장치는 기체분석기로 주입하는 유량을 일정하게 유지하며, 로터리밸브를 통해 주기적으로 표준가스를 주입한다.

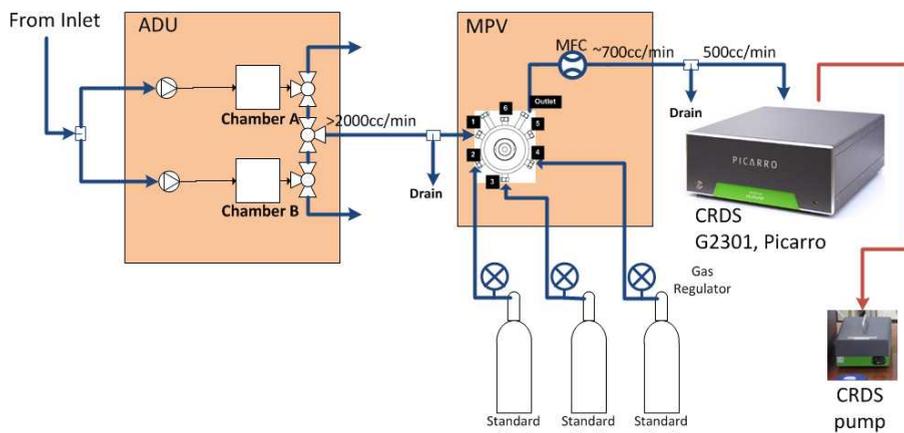


그림 4.2.10 CO₂ 측정 시스템 개요도(ADU: 냉동제습장치, MPV: 유량조절 및 교정 장치).

관측동 옥상에 설치된 흡입구(지상으로부터 약 5 m)로부터 유입된 공기는 실내에 설치된 매니폴드(manifold)를 통해 냉동제습장치로 분기된다. 냉동제습장치는 샘플 공기의 온도를 -80℃까지 냉각하여, 분석용 시료에 포함된 수분의 양을 0.001% 이하로 낮춘다. 그러나 2019년



관측기간 동안, 냉동제습장치 두 대 중 한 대에 문제가 발생하여 격일로 제습이 수행되었다. 그로 인해 2020년 초반 장보고기지에서 관측된 일평균 수증기량이 최대 0.4%까지 증가하여 4월 22일 이후 냉동제습장치 사용 없이 화학제습장치를 제습에 사용하였다. 화학제습 장치 사용 이후 수증기 농도는 감소하였으며 제습제 교체는 수증기 농도가 2%를 넘어서면 수행되었다(그림 4.2.11). 세증기지와 마찬가지로 CRDS 내장 수증기 교정 함수가 적용된 건조공기 대비 CO₂ 농도를 자료 분석에 사용하였다.

2020년 장보고기지에서 교정용으로 사용된 표준가스 3세트는 국립기상과학원에서 제조한 것으로 2020년 1월 4일부터 2020년 3월 01일까지는 (1) CO₂: 406.030 ppm, CH₄: 1.99870 ppm, 2) CO₂: 370.380 ppm, CH₄: 1.82690 ppm, 3) CO₂: 400.886 ppm, CH₄: 1.97361 ppm; 2017년 공급), 2020년 3월 2일부터 (1) CO₂: 387.470 ppm, CH₄: 1.73119 ppm, 2) CO₂: 411.44 ppm, CH₄: 1.81653 ppm, 3) CO₂: 421.08 ppm, CH₄: 1.87357 ppm; 2019년 공급)가 사용되었다. 표준가스는 약 5일 간격으로 주입하도록 설정하여 총 64회 표준가스 농도 측정이 이루어졌고, 측정 결과를 이용한 교정은 나중에 자료 분석 시 적용되었다.

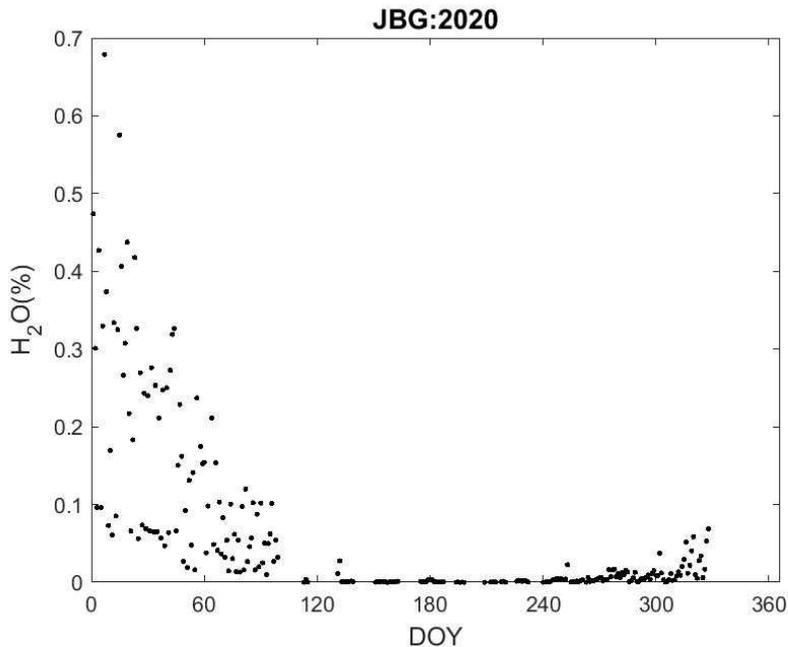


그림 4.2.11 2020년 남극장보고과학기지에서 측정된 일평균 수증기 농도의 변동.

CO₂ 관측은 매 2~3초마다 이루어지며, 10분간 관측 자료는 약 200~210개 샘플로부터 결정된다. 10분 동안 산술평균과 표준편차를 구한 후 산술평균으로부터 표준편차의 2배 이상의 잔차를 보이는 자료를 제외한 후, 30초 자료 구간마다 중앙값(median) 20개를 선정하고 이들을 산술평균하여 10분 대푯값으로 정의하였다. 10분 평균자료에 대해서는 다음 조건에 해당되는 10분 자료는 분석에서 제외하였다. 기지의 풍향에 따른 블랙카본 농도 분포에 근거하여, 1) 풍향이 발전동이 위치한 185~205°일 때와 기지에서 측정된 블랙카본의 농도가 100 ng m⁻³ 이상인 경우, 2) 기지 활동의 영향(혹은 관측동 주변의 인위적 발원)을 받은 것으로 간주된 경우, 3) 월동 대원의 기록에 근거하여 관측동 주변의 오염이 의심되는 경우. 10분 평균자료를 이용하여 한시간, 일, 월평균 등의 산출 과정과 자료 처리 결과는 아래의 표 4.2.5와 표 4.2.6에 각각 요약되어있다.

표 4.2.5 2020년 남극장보고과학기지 CO₂ 자료 필터링 기준

Criteria	Value
H ₂ O Threshold	< 2%
Valid Wind Sector	0 ~ 185, 205 ~ 360
CO ₂ Variability(st dev)	0.1 ppm in 10-min window
Black Carbon Criteria	< 100ngm ⁻³
Minimum Sample Size for Representativeness	50%
Minimum 10-min Sample Size for 1 Hour Average	4/6
Minimum 1-hr Sample Size for 1 Day Average	12/24
Minimum 1-day Sample Size for 1 Month Average	50%
Maximum Difference of CO ₂ Conc. in 1 Hour	0.1 ppm

표 4.2.6 2020년 남극장보고과학기지 CO₂ 자료 처리 결과

Criteria	Number of data in 10-min
Version	202104231323
Numeric samples(CO ₂)	44461
Samples in normal cavity condition	44434
Samples without events recorded in logbook(e.g., calibration)	42449
Samples with proper dehumidification(H ₂ O<2%)	44456
Samples with smaller variability(CO ₂ std<0.1ppm)	43648
Samples with <100 ng/m ³ BC	44301
Samples with WD sector out of range: 185 - 205(Not from the station)	43985
Samples with more samples for averaging(CO ₂ 50%)	44351
Remaining samples after filtering complete(CO ₂)	41384

장보고기지에서의 2020년 기상은 2015~2019년 기상과 크게 다르지 않았다. 다만, 기지 운영 이래 최저기온(-38.3℃)이 기록되었다(극지연구소, 2021). 그림 4.2.12는 2020년 장보고기지에서 측정된 월평균 풍속과 기온의 변동이다. 연중 월평균 풍속의 변동이 크게 나타났으나 평균적으로 겨울철에 풍속이 강하고 여름철에 약하였다. 5월 월평균 풍속이 2.0 ms⁻¹로 최저로 나타났으며, 3월 평균 풍속은 5.9 ms⁻¹로 가장 강하였다. 순간 최대 풍속은 4월에 기록된 37.9 ms⁻¹이었다. 풍향은 작년과 동일하게 서풍과 서남서풍이 각각 약 15.5, 15.6%의 비율을 차지하며 우세하였고, 2020년에 기지 주변의 주요염배출원인 발전동 배출 가스에 영향 구간인 185~205°의 풍향이 차지하는 비율은 3% 미만이었다(그림 4.2.13). 연평균 풍속은 3.9 ms⁻¹로 지난 4년 평균에 비해 가장 낮았다. 기온은 풍속과 비교하여 상대적으로 뚜렷한 계절변동을 보였으며 12월 평균 -0.3℃로 가장 높았고, 5월이 -23.6℃로 가장 낮아, 연중 영하의 월평균 기온을 기록하였다. 연평균 기온은 -14.6℃로 지난 4년의 평균기온(-15.0℃)보다 0.4℃ 높았다. 2020년 장보고기지의 연평균기압은 983.3 hPa이었으며, 950.5 hPa(7월 25일)에서 1012.4 hPa(6월 29일)의 범위를 보였다.

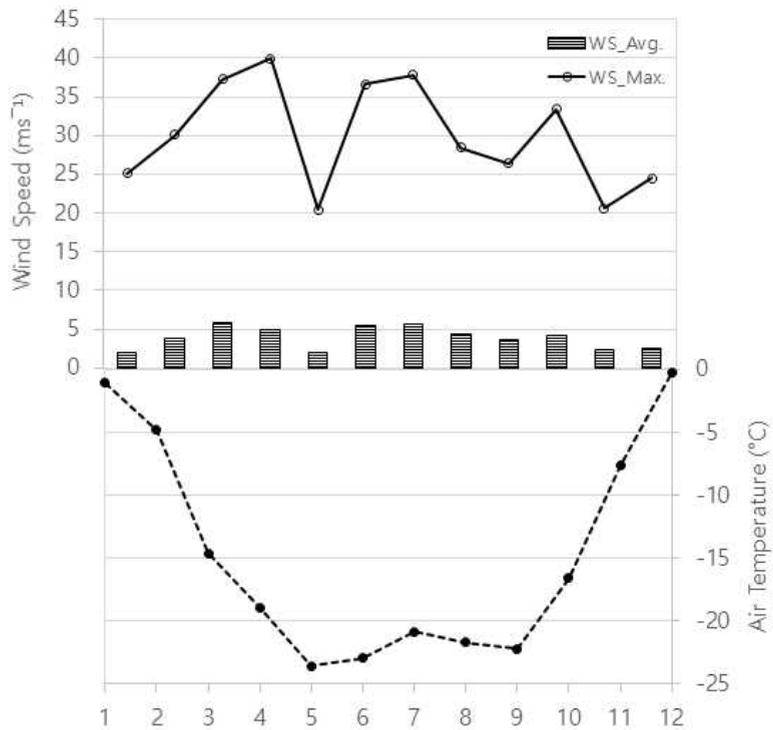


그림 4.2.12 2020년 남극장보고과학기지 월평균 풍속, 최대 풍속 및 기온의 변동.

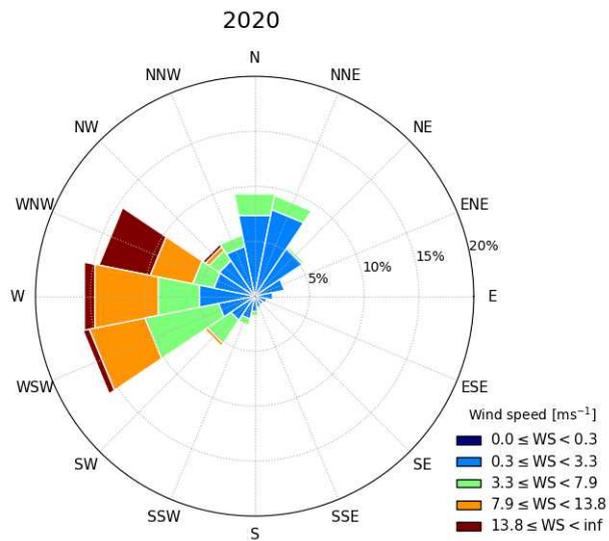


그림 4.2.13 2020년 남극장보고과학기지의 풍향 분포.



그림 4.2.14는 2020년 장보고기지에서 관측된 일평균 CO₂ 농도의 변동을 나타낸다. 2020년 일평균 CO₂ 농도는 407.9 ppm (3월 05일)에서 411.1 ppm (11월 9일)의 범위를 보였다. 해양에 의한 이산화탄소 흡수가 우세한 여름철(1~2월) 낮은 농도를 보이다가 겨울철로 가면서 높아지고, 여름이 도래하면서 다시 낮아지는 패턴을 보였다. 세종기지 CO₂ 농도 변동과 달리 일별 변동이 크지 않았다. 이는 장보고기지의 바람이 주로 내륙에서 연안으로 불어나가며, 또한 하계기간에도 기지 주변 바다는 해빙이 존재하고, 상대적으로 생물량도 적기 때문이다. 2020년 장보고기지 주변 바다가 완전히 결빙이 되지 않는 기간은 70일로 매년 늘어나는 추세이다(극지연구소, 2021).

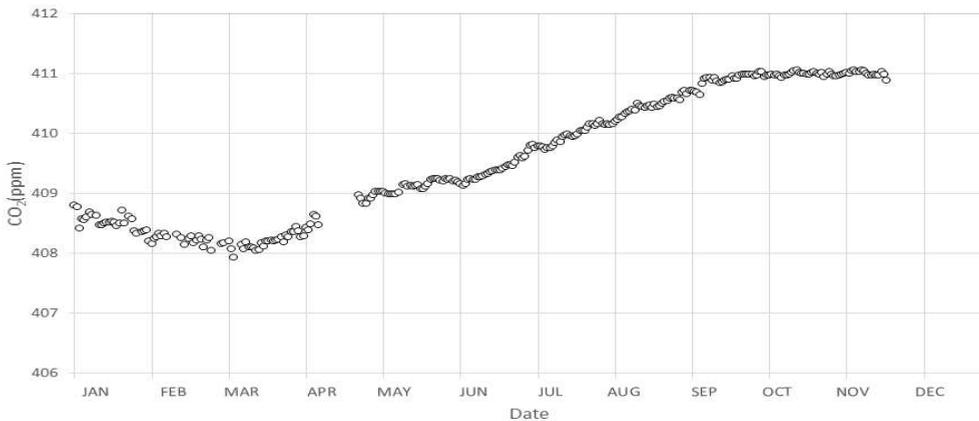


그림 4.2.14 2020년 남극장보고과학기지에서 관측된 일평균 CO₂ 농도의 변동.

2015년부터 2020년까지 장보고기지에서의 기온은 매년 0.34℃ 증가 추세에 있다(p<0.05). 지난 6년 동안 2019년 기온이 가장 높았고, 2020년 기온이 두 번째로 높았다. 반면에 풍속은 유의미한 변화가 없었으며, 연평균 풍속은 2020년이 가장 낮았다. 그림 4.2.15는 같은 기간 월평균 이산화탄소 농도의 변동이다. 결측이 있었던 달은 장기추세와 계절변동을 반영하여 자료를 메웠다(WMO, 2009). 장기추세 산정을 위해 선정된 자료 기간은 2015년 3월~2016년 10월의 20개월이다. 2015년 1월 월평균 CO₂ 농도는 395.5 ppm이었으며, 2016년 5월 평균농도가 400.5 ppm으로 400 ppm을 넘었다. 2020년 12월 현재 월평균 CO₂ 농도는 410.3 ppm이었다. 2015년 연평균 농도는 397.3 ppm이었고, 2020년 연평균 농도는 409.6 ppm으로 지난 5년 동안 CO₂ 농도는 12.3 ppm 증가하여 2015년 대비 3% 증가하였다. 전년도(407.5 ppm) 대비 2.2 ppm 증가하였으며, 2015~2019년 연간 증가값의 평균 2.5 ppm 보다는 낮았다. 참고로 세종기지의 2020년 이산화탄소 농도의 증가율은 2.3 ppm/year이었다.

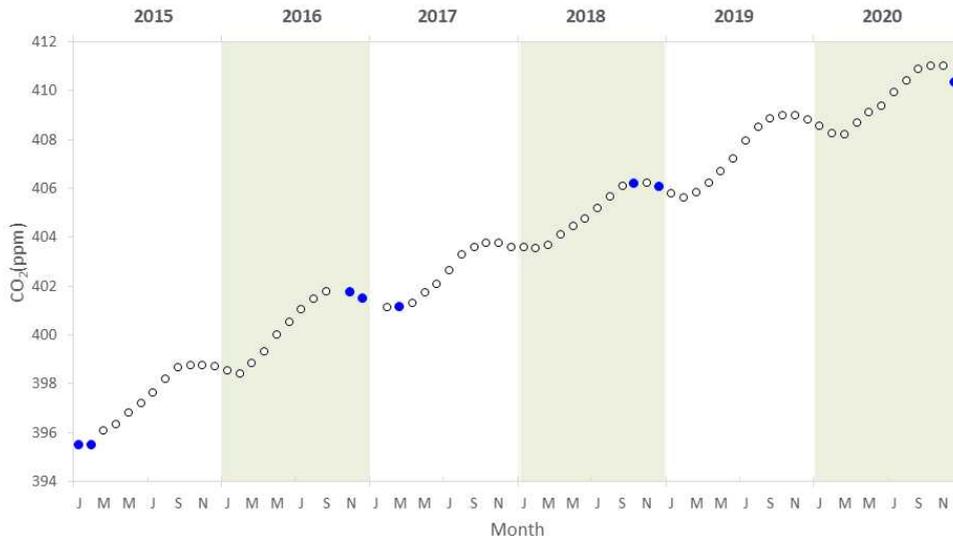


그림 4.2.15 2015~2020년 남극장보고과학기지에서서의 측정된 월평균 CO₂ 농도의 변동. 단, 파란색 동그라미는 채워진 자료임.



4.2.5 산림생태계 CO₂ 플럭스

광릉 관측지는 KoFlux(Korean Flux Monitoring Network; <http://ncam.kr/page/koflux/database/index.php>)의 주요 관측지로 한반도 중서부에 위치한 경기도 포천시 소재 국립수목원내 활엽수림 지역(37° 44' 56" N, 127° 8' 57" E: 252m a.s.l.)에 위치한다. 광릉 산림은 550년간 훼손되지 않는 숲으로 국내에서 가장 잘 보존된 자연림으로 꼽힌다. 광릉 관측지는 80~200년 수령의 졸참나무(*Quercus serrata*)와 서어나무(*Carpinus laxiflora*)가 주종을 이룬다(Lee et al., 2007). 군락 높이(canopy height)는 평균 18m이고 최대 엽면적지수(leaf area index)는 약 6으로 여름에 나타난다. 토양은 사양토(75%), 사질식양토(13%), 사토(12%)를 함유하고 있다.

CO₂ 플럭스 관측을 위한 에디 공분산 시스템은 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(footprint), 접근성 등을 고려하여 플럭스 타워의 40 m 높이에 설치되어 있다(그림 4.2.16). 에디 공분산 시스템은 삼차원 초음파 풍향풍속계(모델 CSAT3, Campbell Scientific Inc.)와 고속반응 폐회로 적외선 기체분석기(모델 EC155, Campbell Scientific Inc.)로 구성되어 있다. 삼차원 풍속과 CO₂ 농도는 10 Hz로 관측하였고, 10 Hz의 원자료(raw data)와 30분 평균 자료를 집록기(모델 CR3000, Campbell Scientific Inc.)에 각각 집록하였다. 에디 공분산 시스템 이외에도 저류항 관측을 위한 프로파일 시스템이 지면부터 군락 위까지 대기 중 CO₂ 농도의 변화를 관측하고 있다. 프로파일 시스템의 노후화로 2013년 7월부터 해당 관측이 중단되었으며, 2014년 10월에 새로운 시스템(모델 AP200, Campbell Scientific Inc.)을 설치하여 관측을 재개하였다. 새로운 프로파일 시스템에서는 폐회로 적외선 기체분석기(모델 LI-840, LI-COR Inc.)를 통해 CO₂이산화탄소 농도분석이 초당 2회씩 이뤄지고, 전체높이 분석시간은 120초/회이며, 30분 평균자료를 집록기(모델 CR1000, Campbell Scientific Inc.)에 저장되고 있다.

기체분석기 보정은 에디 공분산 시스템의 경우 연 2회 장비를 현장으로부터 회수하여 실내에서 내외부 청소와 필터 및 화학물질 교체 등을 비롯한 기기 유지보수와 함께 수동 보정을 수행하고, 프로파일 시스템의 경우 일 1회(자정) 자동으로 이뤄지며, 추가로 격주마다 현장에 방문해 기체 흡입구 청소와 필터 교체 등을 비롯한 기기 유지보수와 함께 수동 보정을 수행한다. 에디 공분산 시스템의 경우 CO₂ 농도의 '분산'을, 프로파일 시스템의 경우 CO₂ 농도의 '평균'을 정확히 관측하는 것을 목적으로 하기에, 본 보고서에는 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO₂ 플럭스와 프로파일 시스템에서 관측된 CO₂ 농도를 보고하였다. 2020년도 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO₂ 플럭스의 품질관리 후 자료 수득률은 40%, 프로파일 시스템에서 관측된 CO₂ 농도의 품질관리 후 자료 수득률은 98%로 작년과 비슷하거나 조금 높은 수준이었다.

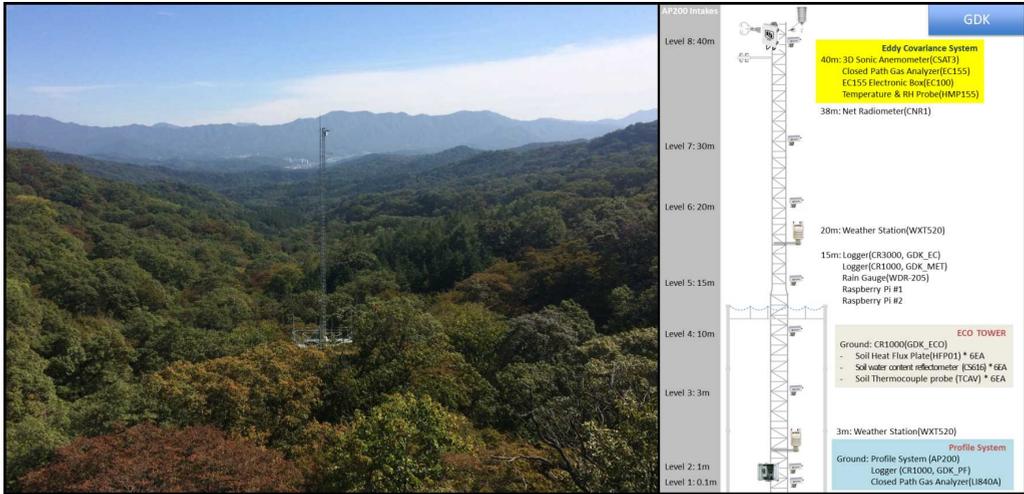


그림 4.2.16 광릉 활엽수림 타워의 모습(왼쪽)과 관측장비 모식도(오른쪽).

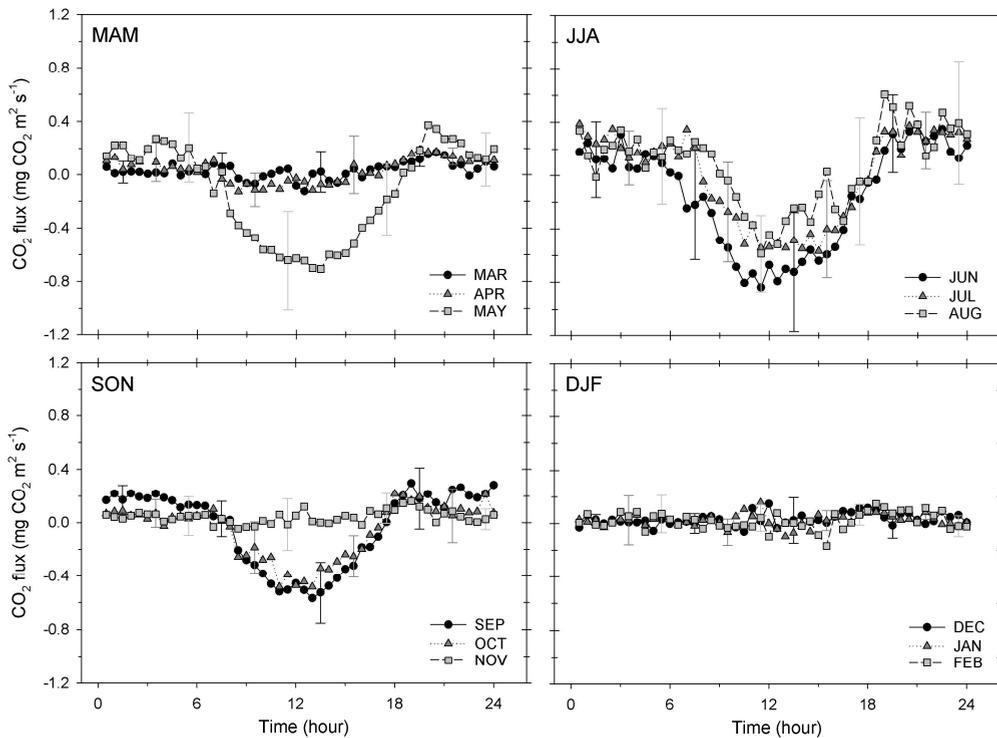


그림 4.2.17 광릉 활엽수림의 월별 CO₂ 플럭스의 평균 일 변동. 오차막대는 각 시간대의 가용한 자료들의 표준편차를 나타냄.



그림 4.2.17는 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO₂ 플럭스의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 이산화탄소 플럭스는 40 m 높이에서 에디 공분산 시스템이 관측하는 발자국 영역(예를 들면 200~1000 m) 내를 대표하는 값이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5~9월) 동안 이산화탄소 플럭스는 밤에는 양의 값(CO₂ 방출)을 갖고, 낮에는 음의 값(CO₂ 흡수)을 갖는 뚜렷한 일 변동을 보였다.

그림 4.2.18은 프로파일 시스템으로 관측된 CO₂ 농도의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 CO₂ 농도는 배경대기농도 관측과 같이 넓은 수평적 공간을 대표하는 경계층 내의 잘 혼합된 평균적인 농도이기보다는 에디 공분산 플럭스 관측과 마찬가지로 40 m 높이에서 프로파일 시스템이 관측하는 발자국 영역 내의 CO₂ 농도이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5~9월) 동안 CO₂ 농도는 밤에는 증가하고, 낮에는 감소하는 뚜렷한 일 변동을 보였다. 이는 앞에서 확인한 밤에 식생 및 토양의 호흡으로 농도가 증가하고 낮에 광합성 작용으로 농도가 감소한 것에 기인한다.

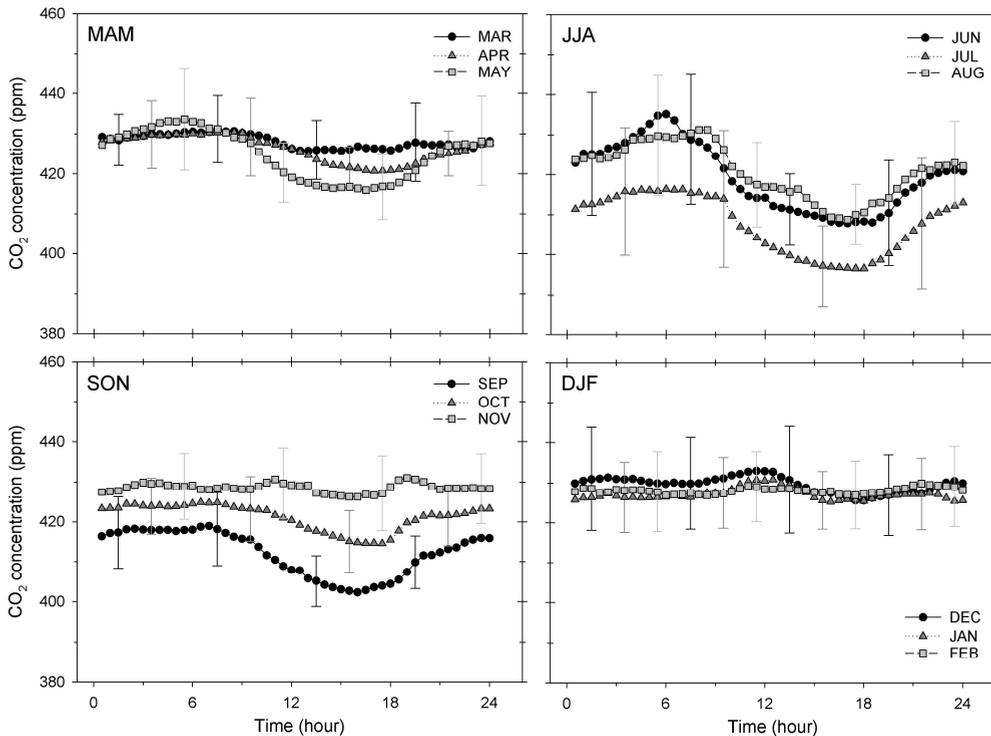


그림 4.2.18 광릉 활엽수림의 월별 CO₂ 농도의 평균 일 변동. 오차막대는 각 시간대의 가용한 자료들의 표준편차를 나타냄.

일적산 이산화탄소 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료)는 $-6\sim 8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 의 변동 범위를 보였다. 개엽 후인 4월 말부터 CO_2 흡원으로 나타나다가 장마기간 CO_2 증립 또는 발원으로 변했다. 이후 다시 CO_2 흡원으로 나타나다가 낙엽이 지기 시작하면서 다시 탄소 발원으로 바뀌었다(그림 4.2.19).

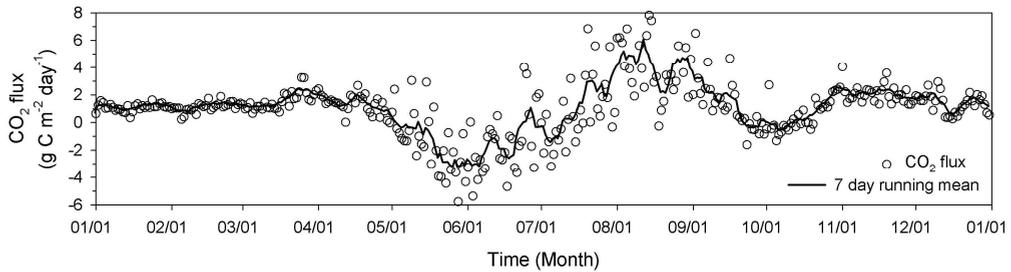


그림 4.2.19 광릉 활엽수림의 일적산 CO_2 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료).

일평균 CO_2 농도는 390~460 ppm의 변동 범위를 보였으며, 개엽(4월 중순)의 시작과 함께 꾸준히 감소하여, 식생의 활동이 최대인 여름에 최솟값을 보였다(그림 4.2.20). CO_2 플럭스 및 농도의 계절 변동은 식생 변화와 관계가 깊은데, 식생 계절 변화를 감시하기 위해 낮 동안 한 시간 간격으로 카메라를 이용한 이미지 촬영이 이뤄졌다. 관측 타워의 15 m 높이에 카메라가 설치되어 아래 방향으로 관측지(에디 공분산 시스템과 프로파일 시스템의 주간 발자국 영역)의 경관을 촬영하였다(그림 4.2.21). 2020년에는 개엽이 4월 중순부터 시작하여 예년과 비슷했거나 조금 빨랐다.

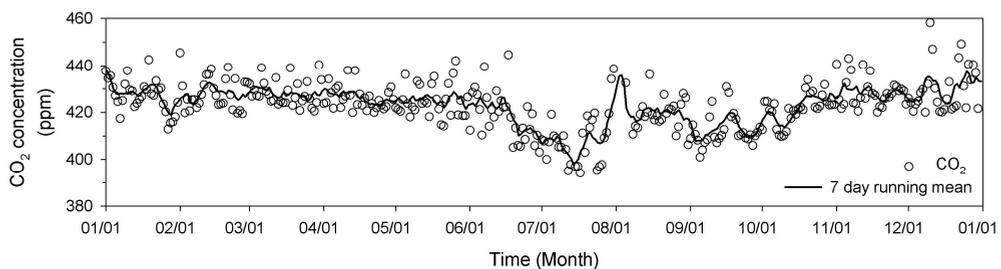


그림 4.2.20 광릉 활엽수림의 일평균 CO_2 농도.

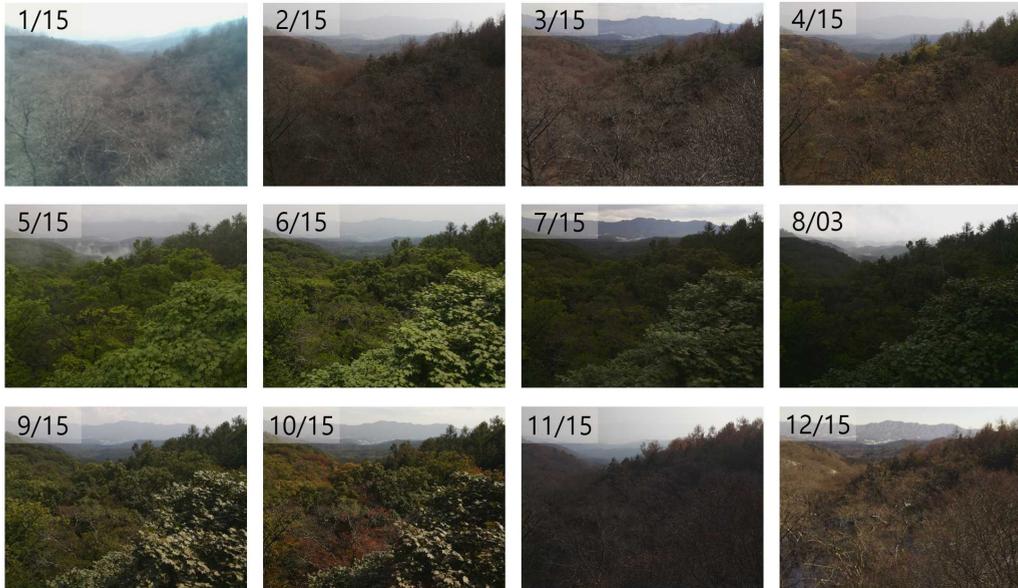


그림 4.2.21 광릉 활엽수림 타워에서 촬영한 타워 주변 경관.

광릉 활엽수림 관측지는 산림에서 관측된 CO₂ 플럭스 중 국내에서 가장 긴 자료를 보유하고 있다(그림 4.2.22). 2006년부터 자료가 안정적으로 수집되어, 10년이 지난 현재도 산림과학원과 기상청의 협력 및 지원으로 장비와 타워 구조물들을 교체하면서 꾸준히 관측을 이어나가고 있다. 광릉 활엽수림은 550년간 보존된 숲으로 중부 온대활엽수림의 극상(climax)에 가까운 것으로 알려져 있는데, 그 이유는 (1) 숲의 천이과정의 극상 단계에서 나타나는 수종인 서어나무 (*Carpinus laxiflora*)가 해당 숲의 우점종 중에 하나이며, (2) 극상 단계의 특징들(예, 다양한 식생이 혼재, 수직적 계층 분화, 복잡한 군집 구조)이 나타나기 때문이다. 광릉 활엽수림과 같은 극상림(climax forest)이자 노령림(old-growth forest)의 경우, 광합성량은 상대적으로 적고 고사목의 분해로 인하여 탄소 흡수와 방출이 균형을 이루는 것으로 알려져 있으며, 2006년부터 관측된 CO₂ 플럭스 결과를 보면 연적산 시 약한 탄소 흡원이거나 중립($0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$ 내외)을 이루는 것을 확인하였다(Kang et al., 2014).

다만 최근(2015년 이후)에는 지속적으로 탄소 발원으로 나타났는데 이는 기후요인 뿐만 아니라 생태계 내부 요인으로 설명할 수 있다(Yang et al., submitted). 최근에 연간 전천일사가 지속적으로 증가했는데, 이에 따라 지표면 온도도 같이 증가하였다. 광포화점이 낮은 광릉 활엽수림의 경우 지표면 온도가 올라갈수록 광합성량은 최적 온도 이상(27°C 주변)에서 줄어들고, 고사목 분해를 포함한 생태계 호흡량은 상한 없이 지수함수적으로 증가하였다. 이는 2015년 이후에

전천일사 증가에 따라 지표면 온도가 증가하자, 생태계호흡량의 증가가 광합성량의 증가보다 상대적으로 더 커져서 발원이 되었음을 나타낸다. 이렇게 생태계호흡량이 증가한 또 다른 원인은 최근 광릉 활엽수림에 고사목 발생이 증가했기 때문으로 파악된다. 고사목이 증가한 이유에는 여러 가지가 있을 수 있으나, 2010년과 2012년에 광릉 활엽수림을 강타한 태풍 곤파스와 불라벤이 주된 이유로 조사되었다(Korea National Arboretum, 2020).

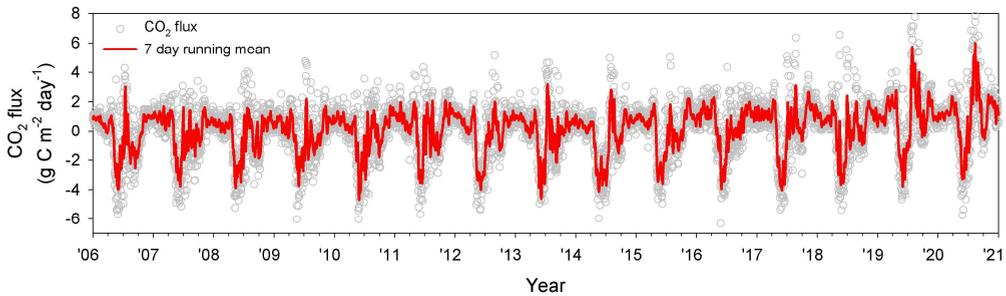


그림 4.2.22 광릉 활엽수림에서 관측된 2006~2020년 일적산 CO₂ 플럭스.



4.3 메탄(CH₄)

메탄(CH₄)은 CO₂ 다음으로 중요한 온실가스 중 하나로 ppb(part per billion, 10억 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 복사강제력은 0.97 0.74~1.2 W/m²로 전 지구 온실가스 복사 강제력의 32% 기여하고 있다(IPCC, 2013). 남극과 북극에 아이스코어를 분석한 결과 현재 관측되고 있는 CH₄의 농도는 지난 650,000년 동안 최고의 농도로 나타났다(IPCC, 2013).

과거 1000 A.D.와 1800 A.D. 사이에 북반구와 남반구의 CH₄ 농도 차이는 약 24~58 ppb로 나타났으나, 1984년부터 2012년까지의 자료를 비교하였을 때 그 차이값이 135 ppb에 이르렀다. 이는 명백한 북반구의 인위적인 혹은 자연적인 배출량이 증가했기 때문이다(Etheridge et al., 1998).

CH₄의 배출원은 습지, 바다, 대지의 사용, 쌀농사, 발효, 화석연료 등 인위적·자연적 요소가 다양하게 존재하는 반면, 소멸원은 주로 OH 라디칼로 알려져 있다. CH₄은 한번 배출되면 약 9년 정도 대기 중에 체류하고, 다른 온실가스종에 비해 체류시간이 짧기 때문에 정책적으로 배출량을 줄이면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다.

한반도에서는 안면도기후변화감시소에서 1999년부터 CH₄을 측정하기 시작하였다. 이후 고산과 울릉도에서 측정이 추가되어 한반도 3면을 둘러싼 CH₄에 대한 정보를 얻게 되었다. 본 보고서에서는 고산은 2014년 자료부터, 울릉도는 2018년 자료부터 공식적으로 사용하기 시작하였다(표 4.2.1).

전 세계적으로 CH₄의 농도는 1999년부터 2006년까지 증가가 둔화(0 ppb/year)되었다가 다시 2007년부터 꾸준히 증가하는 것(8 ppb/year)으로 나타난다. 안면도도 걸측된 기간이 많지만 이러한 경향성을 잘 반영한다(그림 4.3.1). 안면도는 1999년부터 2006년까지 평균 절대 증가값이 약 1 ppb/year로 관측되었으나, 최근 10년 동안은 9 ppb/year로 증가하였으며, 2019년과 2020년 사이의 증가값 7 ppb/year은 과거 10년보다 낮다. 고산과 울릉도는 전년도에 비해 각각 6 ppb와 16 ppb로 증가하였다(표 4.3.1).

NOAA에서 발표한 전 지구 농도는 1879 ppb로 2019년도에 비해 2020년도는 13 ppb 증가한 것으로 나타났다. 이는 그간 관측역사상 가장 높은 증가율이다. 우리나라가 2019년 가장 큰 증가값을 나타낸 것과는 약간 다른 양상이다. 앞서 언급했듯이 CH₄의 기원은 다양하기 때문에 국가 혹은 지역의 배출특성에 따라 증가율이 상이 할 수 있을 것으로 판단하나, 증가율 값의 차이를 고려하여도 2006년 이후 한반도를 포함한 전 지구의 CH₄ 농도는 지속적으로 증가하고 있다. 우리나라의 경우 2019년의 증가의 원인은 고온으로 인한 지표 온도와 지표 습도 증가로 생물학적

배출(예, 벼농사 등)이 강화된 것으로 파악되었다(Kenea et al., 2021).

2020년 안면도의 CH₄농도는 1998 ppb로 최초 관측을 시작했던 1999년에 비해 137 ppb 증가하였으며, 산업화 이전의 농도를 700 ppb로 간주할 때 이 농도는 2.85배 증가한 값이다.

안면도, 고산, 울릉도는 전 지구 평균보다 각각 119 ppb, 94 ppb, 97 ppb 높은 것으로 관측되었다. CH₄의 계절변동은 여러 배출원과 소멸원인 OH 라디칼과 계절풍 등에 의해 일어난다. 특히 북반구에서 계절변동의 변동 폭이 크며, 여름철 OH 라디칼의 농도가 높아지면서 CH₄과 반응하여 CH₄의 농도는 낮아진다. 2020년 한반도 감시소에서는 7월 혹은 8월에 가장 낮고 12월에 가장 높은 값을 보였다. 낮은 농도가 여름철에 나타나는 것은 거의 일정하지만, 높은 농도가 나타나는 것은 CH₄의 기원인 습지나 생태소각 등과의 관련이 높아 대기의 흐름에 따라 약간의 변동이 있을 수도 있다. 그러나 기본적으로 북반구의 전형적인 계절변동 특성은 여름철에 낮고 겨울철에 높은 값을 나타내며, 한반도의 관측자료도 이를 잘 반영한다(그림 4.3.1(a)). 세 관측소의 증가율은 2014년에 높게 나타났다(그림 4.3.1(b)).

표 4.3.1 2020년 안면도, 고산, 울릉도, 전지구의 CH₄ 농도(단위 : ppb)

	안면도	고산	울릉도	전지구 ¹
2020년 평균값	1998	1973	1976	1879
2019년 대비 절대 증가값 ²	7	6	16	13
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2010~2019년)	9 ppb/year	-	-	8 ppb/year
과거 절대 증가값 평균 (2000~2006년)	1 ppb/year	-	-	0 ppb/year

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

² 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

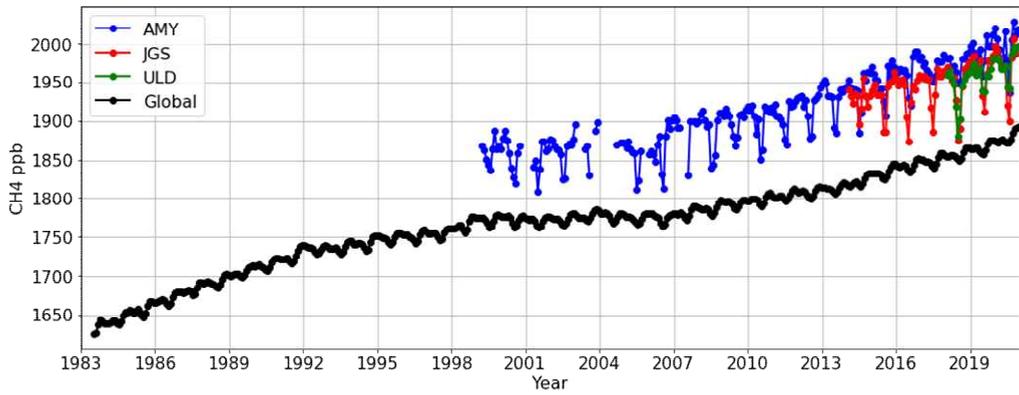


그림 4.3.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)와 전지구(Global)의 CH₄ 배경농도.

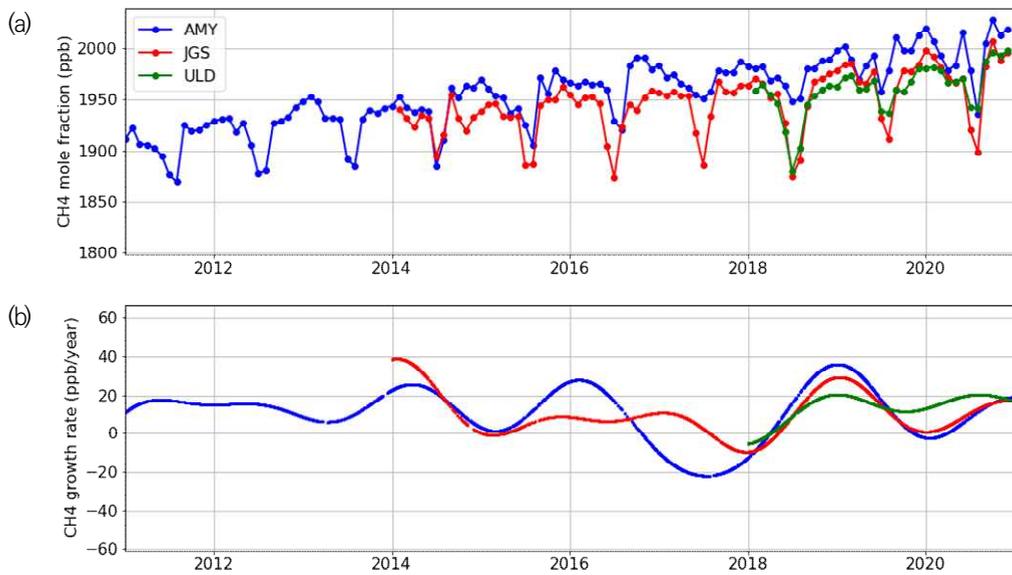


그림 4.3.2 10년간(2011~2020년)의 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 (a) 대기중 CH₄ 농도변화와 (b) 증가율.

4.4 아산화질소(N₂O)

아산화질소(N₂O)는 대기중 체류시간이 약 121년 정도 되는 온실가스이며, 1750년 기준 2011년의 복사강제력이 0.17[0.13~0.21] W/m²로 전체 온실가스 중 5%를 차지하였다(IPCC, 2013). N₂O는 인위적 온실가스 중 세 번째로 많은 것으로 알려져 있으며, 산업화 이전(1750년)에는 270 ppb 수준으로 존재했다. N₂O의 자연기원은 해양, 토양 등이 있으며, 화석 연료, 생태소각, 농업비료의 사용, 여러 산업공정에서 배출되는 인위적 기원 등이 있다. 인위적 배출원과 자연적 배출원의 비율은 거의 같다. N₂O는 광분해에 의해 성층권에서 소멸되며 때론 오존층파괴 과정의 촉발제(trigger)로 작용하기도 한다. 그러나 아직도 N₂O의 전체 순환에 대해서 이해하진 못하고 있다.

1999~2020년까지 안면도, 고산, 울릉도의 N₂O의 농도를 전 지구와 비교했다(그림 4.4.1). 그 기울기는 최근 10년간 전 지구와 안면도 모두 유사(1~1.2 ppb/year)하고, 전 지구는 전년도에 비해 1.2 ppb 증가하였으며, 한반도 또한 1~1.5 ppb 증가하였다. 1980년도만 해도 북반구와 남반구의 농도차이는 0.2 ppb로 관측되었으나, 2010년대 들어 그 차이가 1.4 ppb까지 증가하였다. 이는 북반구에 농업활동이 활발해 지면서, N₂O의 사용이 증가하였기 때문이다. 이와 비슷하게 안면도와 전 지구 평균의 차이는 1999~2000년대 초반까지 0.3~0.6 ppb의 차이를 보였으나 2020년 현재 안면도, 고산, 울릉도 관측소 모두 전 지구 평균보다 약 1.4~1.9 ppb 높다. 이는 한반도 관측소의 위치가 농업지대에 있어, 상대적으로 영향이 크기 때문으로 판단되며, 또한 N₂O의 사용이 한반도에 증가하였기 때문으로 판단된다. 한반도 내에서도 작은 차이지만 안면도, 고산, 울릉도 관측소 순으로 농도가 높게 나타난다.

최근 10년간 한반도의 N₂O 증가율은 0~2 ppb에서 일정하게 유지되고 있음을 보이며 지속적으로 증가하고 있다(그림 4.4.2).

표 4.4.1 2020년 안면도, 고산, 울릉도, 전지구의 N₂O 농도 (단위 : ppb)

	안면도	고산	울릉도	전지구 ¹
2020년 평균값	335.0	334.7	334.5	333.1
2019년 대비 절대 증가값 ²	1	1	1.5	1.2
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2010~2019년)	1 ppb/year	-	-	1 ppb/year

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

² 절대 증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

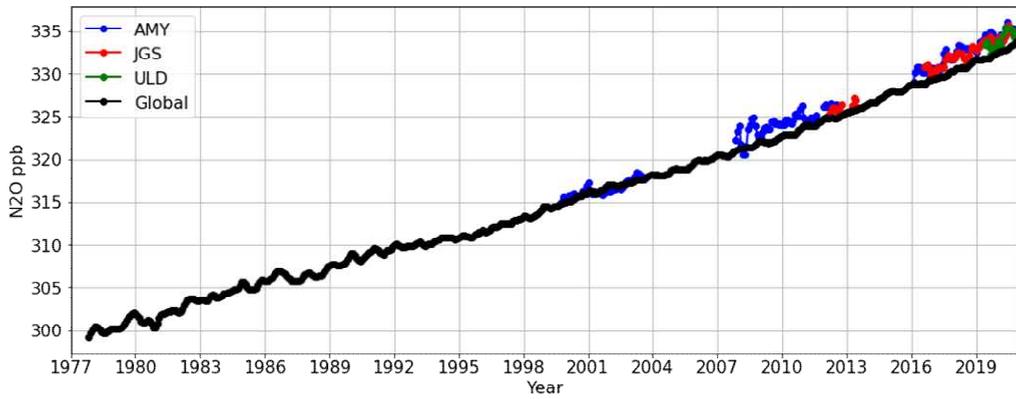


그림 4.4.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 전지구(Global)의 N₂O 배경농도.

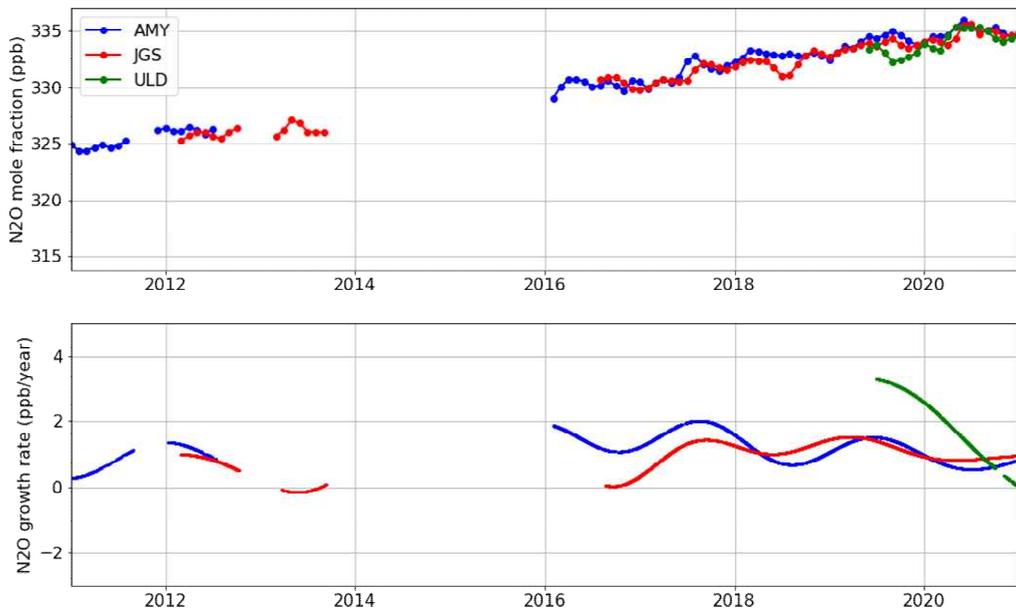


그림 4.4.2 최근 10년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 전지구(Global)의 N₂O 배경농도.

4.5 육불화황(SF₆)

육불화황(SF₆)은 ppt(part per trillion; 1조 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 100년을 기준으로 지구온난화지수가 이산화탄소보다 22,500배가 높아 향후 기후변화에 영향을 줄 수 있는 잠재력 높은 온실가스이다(IPCC, 2013). 주로 전기의 절연체 등으로 사용되며 적은 양이지만 마그네슘과 알루미늄 산업, 반도체 산업에서도 배출되어 대부분 산업에 기원한다. 대류권에는 소멸기작이 거의 없고 중간권에서 처음으로 분해가 시작되기 때문에 대류권에서 육불화황의 체류시간은 약 850년(580~1400년)으로 길며(Ray et al., 2017), 한번 대기로 배출되면 거의 선형으로 누적되어 빠르게 증가한다.

SF₆은 2007년 안면도를 시작으로 2016년 고산과 울릉도에 관측기기를 추가로 설치하여 2017년부터 공식적으로 관측을 시작하였다.

2020년 한반도의 SF₆농도는 안면도, 고산, 울릉도 모두 10.5 ppt로 나타났으며, 전년도 대비 증가율도 0.2 ppt로 동일하다(표 4.5.1). 지표의 배출원과 소멸원이 동시에 존재하는 온실가스의 경우 지역에 따른 값의 차이가 크게 존재하나, SF₆의 경우 지표에 배출량은 있으나 소멸원이 없기 때문에 잘 섞인 배경농도에서는 그 차이값이 크지 않다.

한반도의 값과 전 지구 평균(2020년 10.3 ppt)과는 0.2 ppt 차이가 났고 이는 전년도와 유사한 차이이다(표 4.5.1). 북반구에 비해 활발하지 않은 산업활동으로 남반구에서의 SF₆ 배출농도가 낮기 때문에 전 지구의 평균값이 북반부 관측소인 우리나라나 보다는 낮다. 안면도를 비롯하여 전 세계적으로 지난 10년간 0.3 ppt/yr 씩 증가하여 그 증가율이 한반도는 평균보다 약간 낮다(표 4.5.1와 그림 4.5.1).

2020년 관측기기의 수리점검 기간 등이 많이 포함되어, 향후 증가율에 대해 해석할 때 이 부분이 고려되어야 한다.



표 4.5.1 2020년 안면도, 고산, 울릉도, 전지구의 SF₆ 농도 (단위 : ppt)

	안면도	고산	울릉도	전지구 ¹
2020년 평균값	10.5	10.5	10.5	10.3
2019년 대비 절대 증가값 ²	0.2	0.2	0.2	0.3
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2010~2019년)	0.3 ppb/year	-	-	0.3 ppb/year

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

² 절대 증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

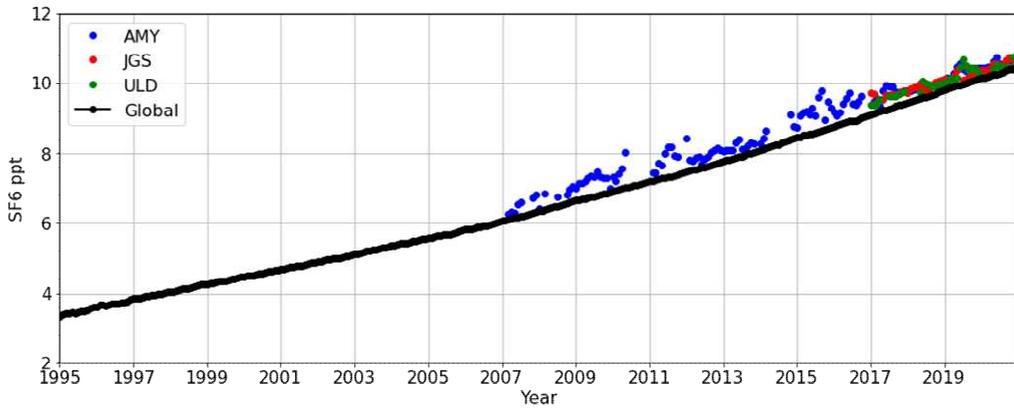


그림 4.5.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 전지구(Global)의 SF₆ 배경농도.

4.6 염화불화탄소(CFCs)

염화불화탄소류(CFCs)는 냉매제로 주로 사용되며, CFCs는 주로 성층권에서 자외선에 의해 분해되며, 성층권의 오존층을 파괴하는 염소와 브로민이 포함되어있어, 1990년대 몬트리올의 정서를 채택하여 규제를 시작하였다. 지표에는 CFCs의 소멸원이 없기 때문에 대기 중 체류시간이 CFC-11은 50년, CFC-12는 110년으로, CFC-113은 85년으로 비교적 길게 나타난다.

북반구의 관측소에서는 CFC-11는 1992년에 최고값을 보였다가 감소 추세를 나타내며, CFC-12는 2005년에 최솟값을 보이고 감소 추세를 보이고 있다. CFC-12의 경우 대기 중 체류 시간이 다른 두 물질에 비해 상대적으로 길기 때문에 규제에 대한 실제 반응속도는 늦고, 따라서 감소 추이가 상대적으로 늦다.

한반도의 CFCs 또한 감소하고 있다. CFC-11은 점차 감소해 관측을 시작한 1999년에 비해 약 43.9 ppt 감소하였으며, 전년도에 비해 5.1 ppt 낮아진 224.0 ppt이다(표 4.6.1). 중국의 CFC-11의 배출로 인해 CFC-11의 농도 감소율이 완화된 것이 2019년 논문에 의해 발표되었으나(Rigby et al, 2019; Montzka et al, 2019) 다시 그 지역의 배출량이 줄어들면서 실제 대기의 농도가 다시 감소하고 있음이 2021년 발표되었다(Park et al., 2021; Montzka et al., 2021). 이를 반영하듯 한반도와 전 지구 모두 2020년 CFC-11의 대기 중 농도의 전년 대비 감소율(2020-2019년 농도)은 지난 5년 평균 감소보다 더욱 뚜렷하다(그림 4.6.1).

CFC12 또한 관측을 처음 시작한 1999년에 비해 39.7 ppt 감소하였으며, 전년도에 비해 1.0 ppt 낮게 관측되었다. CFC-113은 2007년 관측한 이래 가장 낮은 값인 68.9 ppt로 관측 시작해인 2007년보다 9.8 ppt 낮아졌으며, 전년도에 비해 1 ppt 낮아졌다.

CFCs의 한반도 관측자료는 기기의 이상과 표준가스의 변경 등으로 현재 품질관리 방법을 적용하였을 때 걸러진 자료가 가장 많은 항목이었다. 따라서 장기 경향성을 분석할 시 정확한 관측의 중요성이 강조되었으나, 그림에도 전 지구 경향성과 일치하는 것을 보였다. CFC-11과 CFC-113 모두 1999년 이후 전 지구와 함께 감소 추세가 뚜렷하게 나타났다. CFC-12는 전 지구와 한반도 모두 2002~2006년 가장 높은 값이 관측되었다가 차츰 감소하는 경향성을 보였다.

안면도의 CFCs의 농도는 전 지구와 흡사하거나 조금 더 낮다. 이는 실제 한반도의 농도가 낮다고 해석하기 보단 관측의 불확도 내에 차이가 존재할 것으로 판단한다. 실제로 CFCs의 경우 재현성이 CFC-11의 경우 ± 1.5 ppt, CFC-12가 ± 2.5 ppt 등으로 분석된바 있다. 따라서 자료 활용자를 위해 관측 불확도를 위한 실험이 향후 진행될 예정이다.



표 4.6.1 2020년 안면도와 전지구의 CFCs 농도 (ppt)

	안면도			전지구 ¹		
	CFC-11	CFC-12	CFC-113	CFC-11	CFC-12	CFC-113
2020년 평균값	224.0	496.8	68.9	224.0	497.2	69.0
2019년 대비 절대 증가값 ²	-5.1	-1.0	-1.0	-2.4	-4.2	-0.6
최근 5년간 절대 증가값 평균 (2015~2019년: ppt/year)	-1.4	-5.1	-0.5	-1.5	-3.7	-0.6

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

² 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

※ 안면도는 본래 KRISS척도를 사용하여 관측하였으나, 2019년 5월부터 WMO 척도를 이용하여 관측을 시작함.

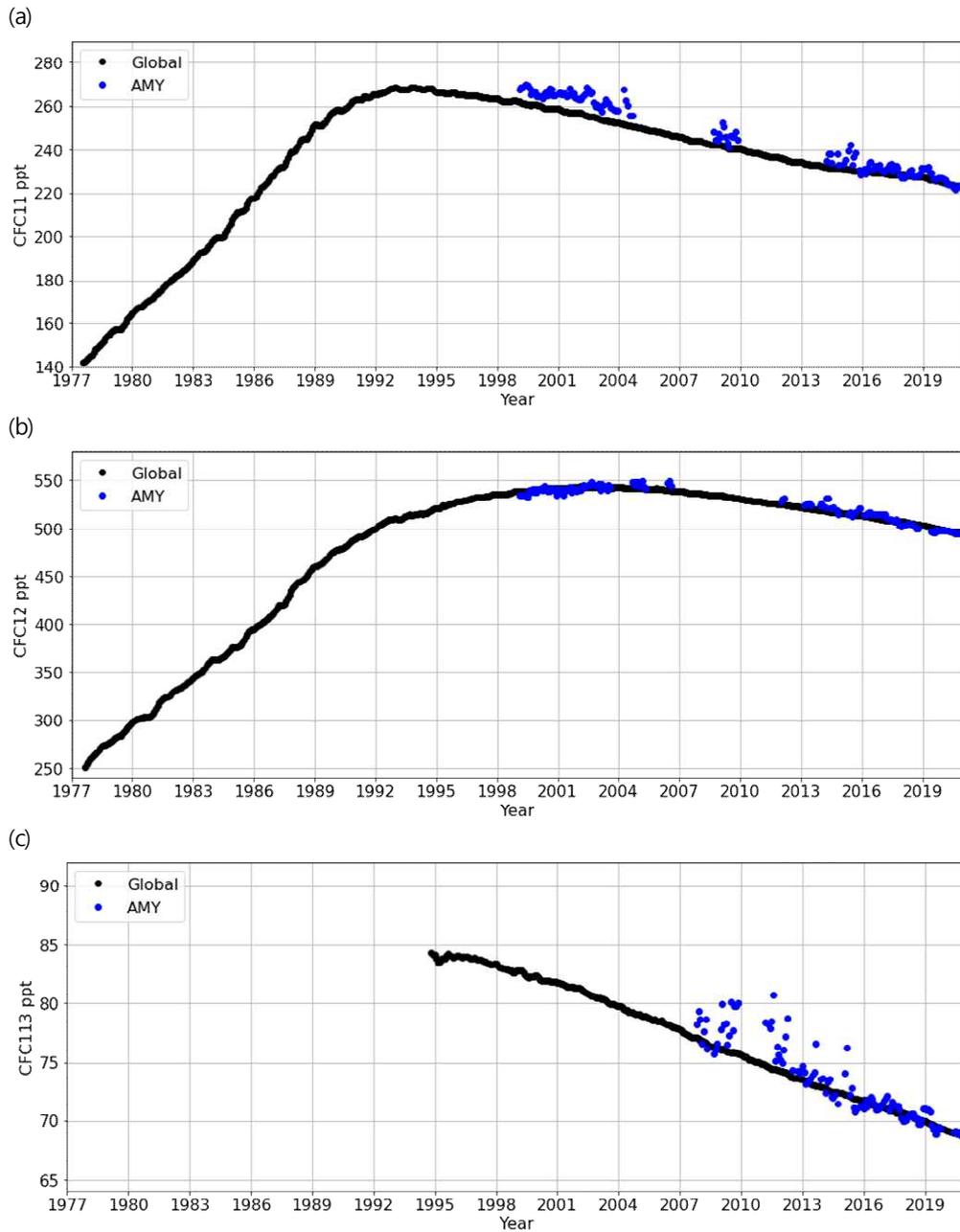


그림 4.6.1 안면도(AMY)와 전지구(Global)의 (a) CFC-11, (b) CFC-12, (c) CFC-113의 배경농도.



4.7 2020년 온실가스 특성 분석

2020년 코로나19의 영향으로 전 지구 CO₂ 배출량이 평균 7%(불확도 -3%에서 11%), 우리나라는 7% 감소한 것으로 보고되었으나(Le Quere et al., 2020) 대기 중 CO₂ 농도는 지속적으로 증가하였다.

2019년 대비 2020년 우리나라 CO₂ 배출량의 차이를 보면 2월 이후부터 확진자 수가 급격히 증가하여, 사회적 거리두기가 이행되었던 2월 말에서 4월 중순까지의 배출량의 감소폭이 가장 컸다(그림 4.7.1(c)).

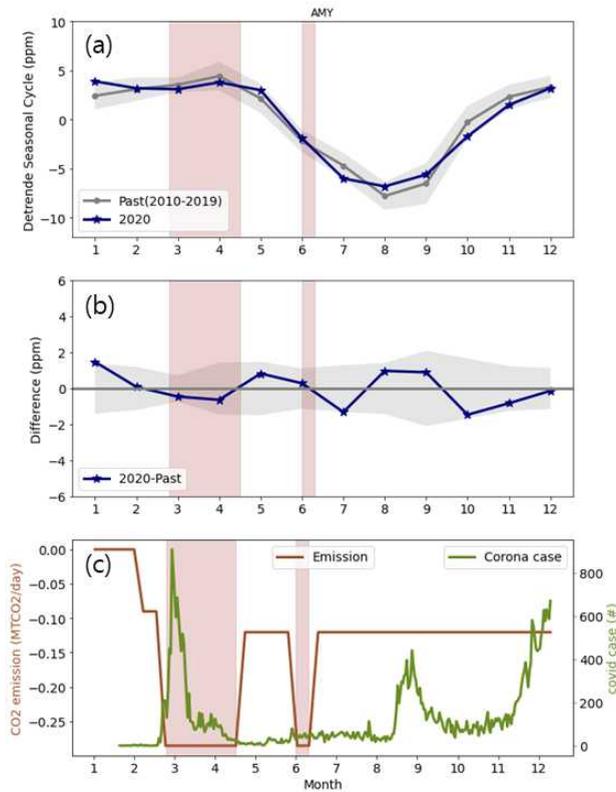


그림 4.7.1 (a) 안면도에서 관측한 계절변동. 회색영역은 2010~2019년의 10년간 평균 계절변동과 변동폭(1σ 값). 남색선은 2020년 계절변동. 2010~2019년의 배출량의 감소가 없었으며, 2020년은 코로나19로 인해 배출량이 9% 감소함. (b) 2020년과 10년 평균된 대기중 이산화탄소(CO₂) 농도의 차이값. 회색영역은 10년 동안의 변동폭. (c)갈색은 2019년 대비 2020년의 CO₂의 일간 배출량(Le Quere et al., 2020, <https://www.icos-cp.eu/gcp-covid19>: last access, May 2021), 녹색은 우리나라 일별 코로나19 확진 사례 수(<http://ncov.mohw.go.kr/>: last access, May 2021).

이 기간 동안 대기 중 CO₂ 농도 값이 실제 감소하였는지 살펴보기 위해 안면도 기후변화감시소의 2020년 CO₂ 월별 변동값과 과거 10년(2010~2019년, 배출량 감소가 없었던 기간) 평균 변동값을 비교하였다(그림 4.7.1(b)). 회색 음영 처리한 부분은 지난 10년간의 자연변동폭이다. 코로나 19로 인한 배출량 감소가 가장 두드러졌던 2020년 봄철을 포함하여 2020년 대기 중 CO₂ 농도의 감소량은 10년간의 자연변동폭(회색 음영) 안에 있어, 지난 10년간과 비슷한 경향을 보였다.

배출량 감소에도 불구하고 대기 중 CO₂ 농도가 줄어들지 않은 이유는 무엇일까? CO₂는 대기로 한번 배출되면 해양과 지표 생태에서 흡수하고 남은 양이 대기 중에 머물기 때문에, 자연변동폭이 크다. 그림 4.6.1(a)를 보면, 대기 중 CO₂ 최댓값은 지표 식생이 활발해지기 직전까지 누적된 CO₂로 인해 4월에 관측되며, 최솟값은 광합성 활동으로 흡수가 큰 8월에 나타난다. 최댓값과 최솟값의 차이가 약 12 ppm에 이르며, 지난 10년간의 이 값의 불확도(1 σ)인 자연변동폭은 ± 2 ppm(그림 4.7.1(a, b) 회색 음영)이다.

전 지구 CO₂의 배출량이 코로나19가 시작되던 2월부터 만일 25% 정도 감소하면 3월부터의 CO₂ 월별 농도 값이 약 0.2 ppm 정도 낮아질 것으로 예상하였으나(<https://gml.noaa.gov/ccgg/covid2.html>) 실제 전 지구 배출량 감소가 7% 정도에 그쳐 대기 중의 차이를 나타내지 못했으며, 0.2 ppm의 감소가 나타났더라도 자연변동성에 의해 관측되기 어렵다.

따라서 CO₂ 배출량 감소를 통해 대기 중 농도 감소를 이뤄내기 위해서는 자연변동성을 넘어서는 파격적이고 지속적인 배출량 감소가 이루어져야 한다.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타



2020 지구대기감시 보고서



제5장 반응가스

5.1 반응가스의 감시 목적	114
5.2 반응가스 특성	116
5.3 지표오존(O ₃)	117
5.4 일산화탄소(CO)	120
5.5 질소화합물(NO _x)	123
5.6 이산화황(SO ₂)	126
5.7 2020년 반응가스 특성 분석	129



제5장 반응가스

- 지표오존(O₃): 안면도 40.9 ppb (최근 10년 대비 -3.1%),
고 산 41.8 ppb (최근 7년 대비 -3.3%)
 - 여름철 긴 장마와 감소한 일조시간으로 8월 농도 관측이래 최저
- 이산화황(SO₂)는 우리나라 및 중국의 대기환경정책으로 관측이래 지속적으로 감소

5.1 반응가스의 감시 목적

반응가스에는 지표오존(O₃), 일산화탄소(CO), 휘발성유기화합물(VOCs), 질소화합물(NO_x, NO_y), 그리고 이산화황(SO₂) 등이 있다. 이들은 자연성분이기도 하지만 인위적으로 배출되기도 하며, 대기 내 화학반응에 관여하고 체류시간이 수 시간 ~ 수 개월 정도이다. 따라서 전 지구적으로 봤을 때 지역에 따라 반응가스의 시간과 공간적인 분포가 고르지 않다. 반응가스는 광화학 반응에 의한 오존 생성과 에어로졸 생성에 전구체로 작용하여 대기오염뿐만 아니라 기후와의 상호관계에 깊이 관여하고 있으며, 오존의 경우 직접적인 온실가스이기도 하다(IPCC, 2014).

장기적으로 볼 때 CO, NO_x, SO₂ 등 배출원에서 직접 배출되는 일차오염물질들을 지역환경에 맞춰 규제하면 이들 전구물질들의 광화학반응으로 생성되는 이차 오염물질인 지표오존의 생성이 줄어들다(그림 5.1.1). 온실가스인 지표오존의 농도가 줄어들면 궁극적으로 반응가스가 지구 온난화에 대한 기여도가 줄어들게 된다.

반응가스는 기후에 영향을 줄 뿐만 아니라 대기질에 직접 관련이 있고 풍향, 풍속, 기온, 습도 등의 기상조건이 농도 수준에 영향을 주므로 기상자료와 함께 해석함으로써 감시소의 국지오염 영향이나 장거리 이동된 사례의 분석에 활용할 수 있다.

따라서 반응가스의 수준을 감시하여 그 결과를 분석하면 반응가스가 장거리 수송되는 과정을 이해하는 데 도움이 되며, 지역별 배출원의 변화를 감지할 수 있고, 배출원 저감 활동의 성공 여부를 파악할 수 있다. 이러한 반응가스의 역할과 영향을 이해하기 위해서는 반응가스의 분포와 장기간 변화 경향에 대한 분석이 필요하다.

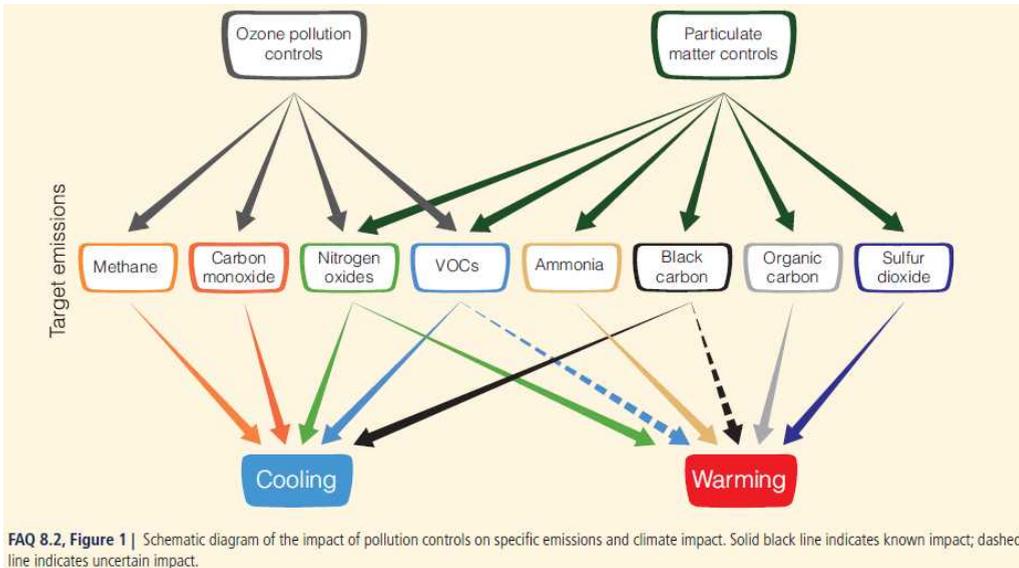


그림 5.1.1 반응가스와 에어로졸이 기후에 미치는 영향(IPCC(WG1AR5), 2013).

O₃, CO, NO_x, SO₂의 자료는 안면도에서 2004년부터, 고산에서 2012년부터 확보하고 있으며, 울릉도에서는 2015년부터 CO를 측정하고 있다. 2017년에 O₃과 CO는 세계기상기구 지구 대기감시(WMO/GAW)에서 권고하는 관측지침을 참고하고 관측환경을 개선한 후 O₃과 CO 세계 표준센터의 적합성 평가에서 좋은 결과를 얻었다(WCC-Empa, 2017a, 2017b), NO_x는 GAW와 EMEP¹⁾에서 지원하는 ACTRIS²⁾의 관측 지침을 참고하여(WMO, 2010, 2011, 2013) 기후변화 감시소의 상황에 맞게 관측환경, 관측방법 및 자료품질처리에 대한 매뉴얼을 작성하고 이에 따라 자료를 생산하고 있다(지구대기감시업무 매뉴얼, 2017). 이러한 과정에서 2014년 3월부터 2017년 3월 중순까지의 자료는 신뢰하기 어려워 본 보고서 부록의 통계표에서 제시하지 않았다.

1) EMEP: The European Monitoring and Evaluation Programme. 유럽 내 월경성 대기오염 문제를 해결하기 위한 과학적 기반의 국제협력 프로그램.

2) ACTRIS: Aerosols, Clouds, and Trace gases Research InfraStructure Network

5.2 반응가스 특성

반응가스는 시간평균으로 2020년 월별 분포를 월별 혹은 계절별 변화를 파악하였고, 과거 월평균을 함께 표시하여 과거 대비 2020년의 농도변화를 알아보기 쉽도록 하였다. 또, 반응가스의 일평균으로 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값을 산출하여 관측기간 전체의 연변화를 나타내었다.

이 때 안면도는 1998년부터 반응가스 관측을 시작한 이후 2004~2006년의 자료는 연구동을 신설하고 관측장비를 이전하면서 품질 저하로 본 보고서에 포함하지 않았다. 2014~2017년 상반기의 자료 또한 GAW 관측지침에 따라 관측환경을 개선하면서 품질 저하로 무효처리하였다.

따라서, 2020년의 반응가스는 1998~2003년, 2006~2013년, 2018~2019년의 세 시기로 구분하여 평균한 자료와 비교하였다. 이렇게 구분된 관측기간 동안 안면도 반응가스 농도에 영향을 줄 만한 국내의 상황은 다음과 같다. 1981년 저황유 공급 등의 황 저감 정책으로 이후 국내 SO₂ 농도가 서서히 감소하였고 중국의 제11, 12차 국가 5개년 계획(2006~2015)으로 강력한 오염규제 정책을 펼치면서 안면도에서 SO₂ 고농도 사례가 점차 감소하였다. 또, 2001년 서해안 고속도로가 개통되고, 2002년 안면도에서 국내 최초로 국제공인된 꽃박람회 개최되면서 교통량이 점차 증가하였다. 안면도의 동쪽 내륙에 위치한 보령에서 1993년 화력발전소를 설립하였고, 이어 안면도의 북쪽에 위치한 당진에서 1999년에, 안면도와 인접한 태안에서 2001년에 화력발전소를 설립하여 현재까지 운영하고 있다. 화력발전소의 배출원은 우리나라 대기환경 보전법으로 배출량을 규제하고 있어 안면도의 반응가스는 도심지보다 낮은 수준을 보이며 기상 특성에 따라 오염물질이 거의 없는 배경대기의 영향을 받기도 한다. 이러한 환경은 안면도에서 관측한 반응가스 농도에 잘 반영되었다. 또한 2050 탄소중립 정책에 따라 충청남도에서 노후화된 원전을 폐쇄하고 탈석탄 정책으로 전환함에 따라 향후 농도 수준이 변할 것으로 기대된다.

고산과 울릉도는 안면도에 비해 내륙과 거리가 멀고 바다에 접한 영역이 넓으며 직접적인 배출원이 거의 없어 반응가스 농도가 안면도와 비교하여 낮게 나타났다. 그러나 지표 O₃은 CO, NO_x, SO₂와 달리 직접 배출되지 않으며 안면도와 고산의 지표 O₃ 농도는 월별로 비슷한 수준을 보였다.



5.3 지표오존(O₃)

지표오존(이하 지표 O₃)은 직접 배출원이 없고 대기 중에서 전구물질들의 광화학 반응에 의해 생성된다. 특히, 인위적인 배출로 인한 질소산화물(NO_x)과 휘발성유기화합물(VOC)의 농도가 높고, 기온이 높고, 일사량이 클수록 많이 생성된다. 지표 O₃은 강력한 산화제로 사람의 호흡기에 영향을 주고 식생의 성장과 광합성 활동을 저해하여 CO₂ 흡수를 방해하며, 화학반응 과정에서 CH₄와 반응하는 등 간접적으로 기후에 영향을 끼친다. 그리고 온실가스로서 직접적인 복사 강제력이 $0.40 \pm 0.20 \text{ W/m}^2$ 이며 이는 CO₂와 CH₄ 다음으로 큰 값이다(IPCC, 2014).

안면도와 고산에서 측정된 지표 O₃은 광화학 생성이 활발한 봄과 가을에 높게 분포하였고, 여름과 겨울에 낮게 분포하는 계절 특성을 보였다. 겨울에는 전구물질의 농도가 높더라도 광량이 적어 지표 O₃의 농도가 낮으나, 여름에는 전구물질의 농도가 낮고 복잡한 해양 기단의 영향을 받아 지표 O₃ 농도가 낮게 나타났다(Yamaji et al., 2006).

2020년 안면도 지표 O₃의 월평균을 2017년 적합성평가 이후 관측환경을 개선하였던 2018~2019년의 평균과 이 시기의 약 10년 전인 2007~2013년 동안의 평균, 그리고 안면도에서 최초로 반응가스 측정을 시작하였던 1998년부터 2004년까지 월평균으로 나누어 비교하였다(그림 5.3.1).

2020년 안면도 지표 O₃의 연평균은 40.9 ppb로 최근 2년(2017년 적합성 평가 이후의 측정값) 평균인 41.7 ppb보다 조금 낮았다. 월평균은 4월에 50.6 ppb로 가장 높았고, 8월에 26.8 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 5월 최솟값, 1월 혹은 12월 최솟값으로 나타나는 패턴과 다른 분포를 보였다.

2020년 고산 지표 O₃의 연평균은 41.8 ppb로 최근 2년 평균인 43.9 ppb보다 조금 낮았다. 월평균은 4월에 56.4 ppb로 가장 높았고, 8월에 21.3 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 4월 최솟값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷하였다. 2020년에는 안면도와 고산 모두 8월에 가장 낮은 농도가 관측된 공통점을 보였다.

일평균 자료로 월평균, 월 최솟값, 월 최댓값을 나타낸 안면도와 고산의 연변화 경향을 보면 안면도와 고산의 월평균의 농도 수준과 분포범위가 유사하였다(그림 5.3.2).

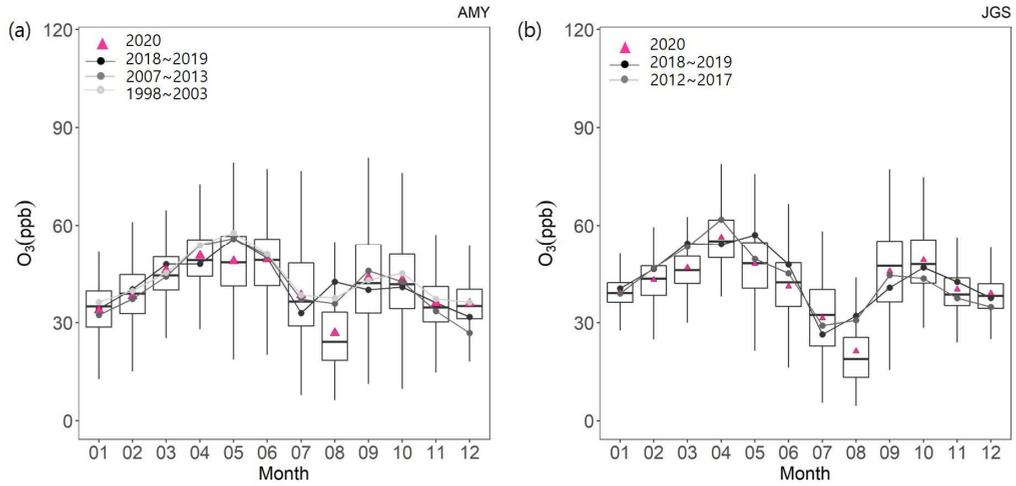


그림 5.3.1 2020년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 지표 O₃ 월변화. 2020년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형 및 점-선은 연도별 월평균).

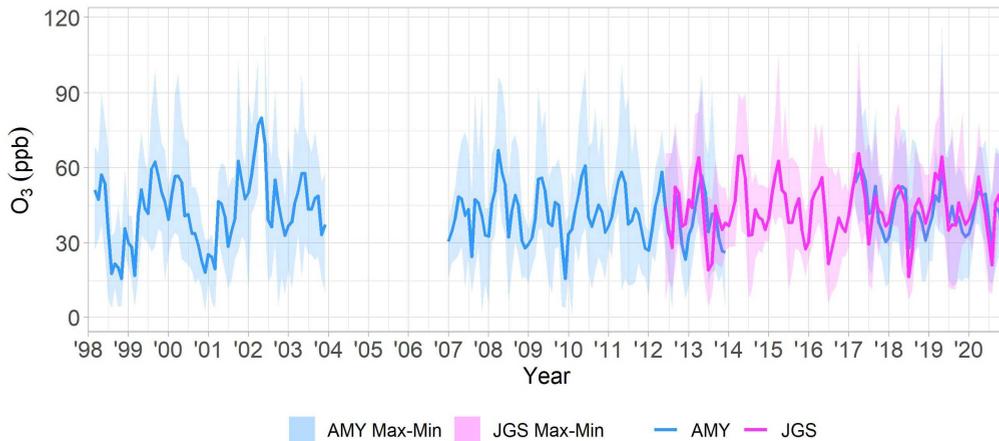


그림 5.3.2 안면도(AMY, 1998~2020년)와 고산(JGS, 2012~2020년)에서 관측한 지표 O₃의 연변화 경향(선은 월평균, 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).



지표 O₃ 농도를 계절별로 나누어 연변화를 살펴보았다. 이때 겨울은 지난해 12월, 당해 1, 2월로 하고, 봄은 3, 4, 5, 6월로 보았으며, 여름은 7, 8월, 가을은 9, 10, 11월로 구분하였다. 이러한 구분은 본 보고서에서 기온과 절대습도의 일평균 변화가 적은 달들로 겨울과 여름을 정하였다. 안면도와 고산에서 봄에 농도가 높았으며 안면도에서는 겨울에 농도가 낮은 반면 고산에서는 여름에 농도가 낮았다(그림 5.3.3).

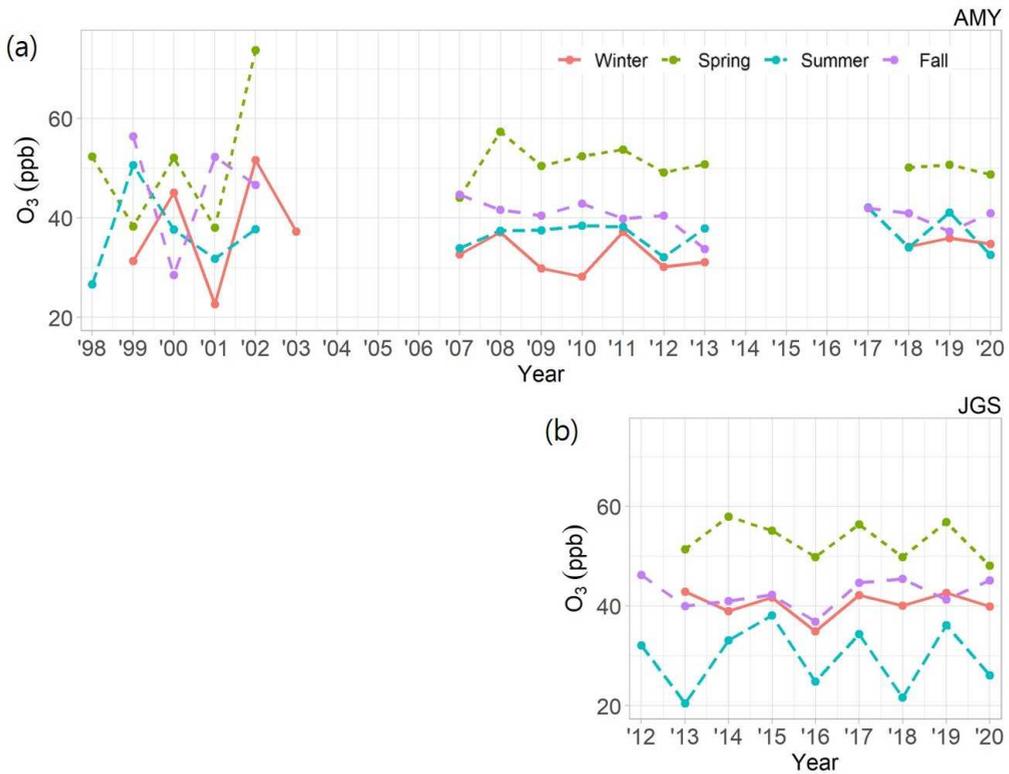


그림 5.3.3 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)에서 관측한 지표 O₃의 계절평균 연변화.

5.4 일산화탄소(CO)

일산화탄소(CO)는 OH 라디칼과의 반응으로 이산화탄소로 산화되거나, 메탄의 대기 중 체류 시간을 늘림으로써 온실가스 농도를 변화시켜 지구온난화에 영향을 미친다(IPCC, 2014). 전 세계 GAW 관측소에서 공유한 CO 농도로 계산한 2015년 전 지구 평균은 91 ± 2 ppb(WDCGG No.41)이고 북반구에서 인위적인 오염원 배출로 인해 남반구보다 높게 분포한다. CO는 대기 체류시간이 계절이나 지역에 따라 10일에서 일 년 이상으로 대기 이동의 좋은 지시자이며, 탄소 연료 연소의 주요 추적자, 대기의 강력한 산화제인 OH 라디칼의 흡수원이기도 하여 GAW의 핵심 항목으로 관측하고 있다.

CO는 안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시소에서 측정하고 있다.

2020년 안면도 CO의 연평균은 257.9 ppb로 최근 2년 평균인 276.5 ppb보다 약 19 ppb 낮았다. 월평균은 1월에 358.6 ppb로 가장 높았고, 8월에 126.4 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1월 최솟값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷한 분포를 보였다(그림 5.4.1).

2020년 고산 CO의 연평균은 187.6 ppb로 최근 2년 평균인 208.1 ppb보다 약 20 ppb 이상 낮았다. 월평균은 1월에 251.6 ppb로 가장 높았고, 8월에 72.2 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1, 2월 최솟값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷하였다.

2020년 울릉도 CO의 연평균은 166.9 ppb로 최근 2년 평균인 177.8 ppb보다 약 8 ppb 낮았다. 월평균은 2월에 207.6 ppb로 가장 높았고, 8월에 118.7 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 2, 3월 최솟값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷하였다. 2020년에는 안면도, 고산, 울릉도 모두 8월에 가장 낮은 농도가 관측된 공통점을 보였다. 또, 세 감시소 중 울릉도의 CO 변동폭이 가장 좁았고, 울릉도가 연평균이 가장 낮지만, 8월 최저농도는 세 감시소 중 가장 높았다.

일평균 자료로 월평균, 월 최솟값, 월 최솟값을 나타낸 안면도, 고산, 울릉도의 연변화 경향을 보면 안면도, 고산, 울릉도의 순서로 월평균이 낮았다(그림 5.4.2). 월별 최솟값 또한 안면도, 고산, 울릉도의 순서로 낮았는데 이는 내륙에 붙어 있는 안면도 기후변화감시소의 위치가 섬에 위치한 고산, 울릉도 두 감시소에 비해 중국과 우리나라와 가까워 장거리 이동 오염물질의 영향을 더 쉽게 받기 때문으로 보인다.

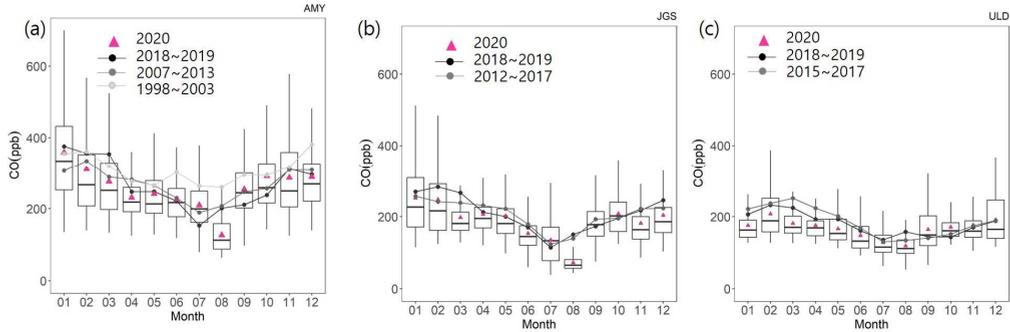


그림 5.4.1 2020년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD)의 CO 월별분포. 2020년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형 및 점-선은 연도별 월평균).

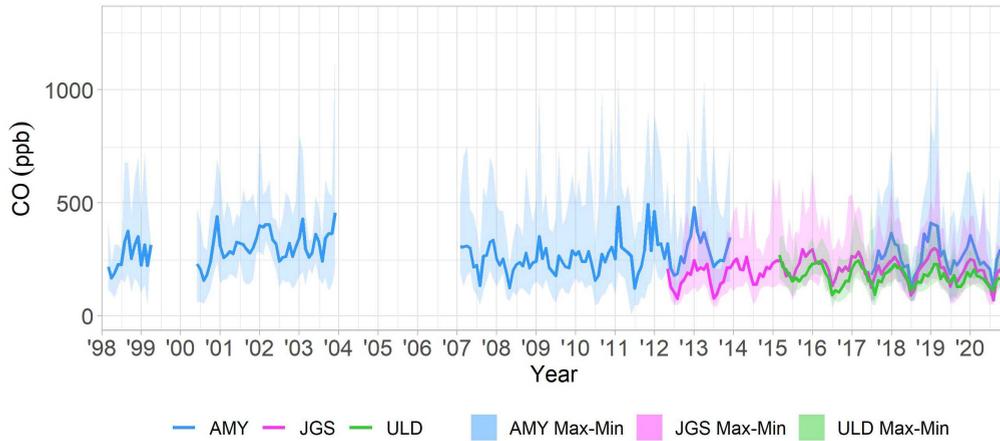


그림 5.4.2 안면도(AMY, 1998~2020년), 고산(JGS, 2012~2020년), 울릉도(ULD, 2015~2020년)에서 관측한 CO의 연변화 경향(선은 월평균, 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

CO 농도를 계절별로 나누어 연변화를 살펴보았다. 이때 계절은 지표 O₃과 같은 방식으로 구분하였다. CO 농도는 세 감시소에서 모두 겨울에 높았고 여름에 낮았다(그림 5.4.3). 안면도와 울릉도에서는 최근일수록 CO 농도가 감소하는 경향을 보인 반면 고산의 겨울철 CO는 약하게 증가하는 것으로 나타났다.

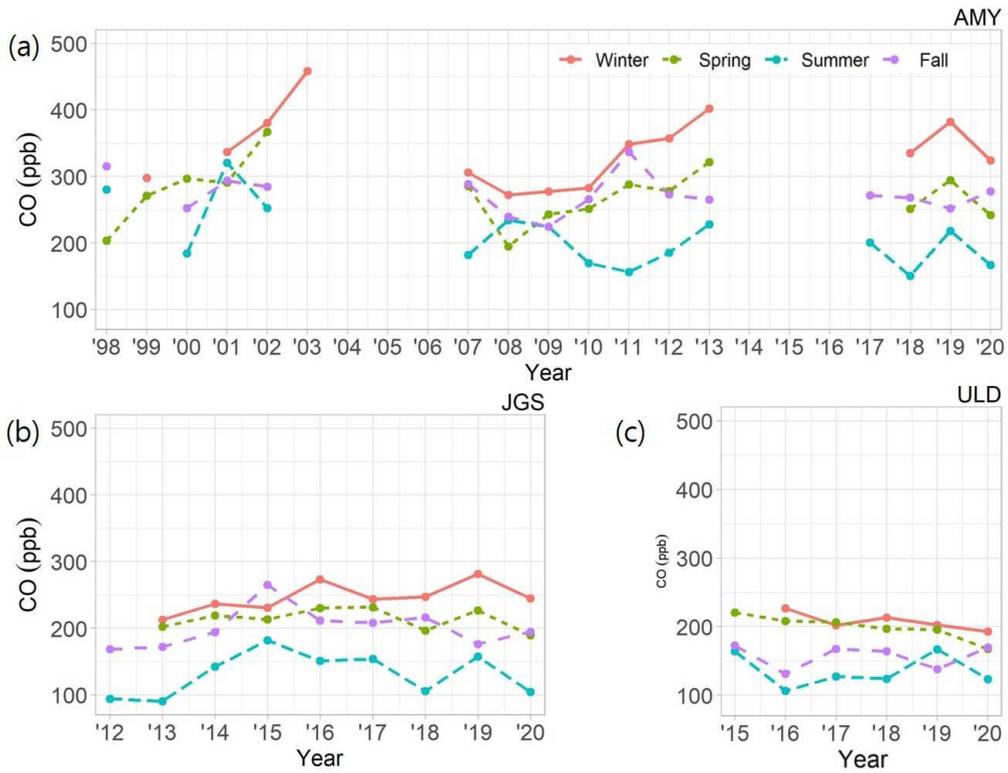


그림 5.4.3 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS)과 (c) 울릉도(ULD)에서 관측한 CO의 계절평균 연변화.



5.5 질소화합물(NO_x)

질소산화물(NO_x)은 O₃의 전구물질로 광화학반응을 포함한 대기화학 반응 과정에서 CO₂의 생성에 관여하고, 질산염을 포함하는 에어로졸의 전구물질로 작용하여 간접적으로 음의 복사 강제력을 발생시키고, CH₄와의 반응으로 성층권 H₂O에 영향을 미친다(IPCC, 2014). 그러나 NO_x는 반응성이 높아 대기 체류시간이 짧고, 지역에 따라 고르지 않게 분포하며 가스상은 물론 에어로졸 과도 상호작용을 하므로 기후에 미치는 순 영향을 파악하기 어렵다.

NO_x는 자연적으로 대류권 상층에서 번개에 의해 생성되기도 하고, 토양, 식물 등의 질산염에서 광화학 활동으로 발생한다. NO_x는 인위적으로 발전소, 석유계 자동차, 선박, 항공기 등에서 화석연료를 사용한 고온 연소와 산불, 산림 벌채 등의 저온연소에서 발생한다. NO_x는 낮 동안의 빠른 광화학반응으로 O₃과 OH 라디칼의 농도를 조절하고 밤에 광화학반응이 없는 야간 화학의 주요성분(예, N₂O₅)을 생성하는데 관여한다. NO_x는 대기 중 체류시간이 짧아 발생원에서 높은 농도로 분포하여 자동차, 발전소, 소각 등의 배출원에서는 많게는 수십 ppb 이상으로 관측되기도 하고, 시골에서는 보편적으로 1 ppb 이하로, 해양이나 자유대기층(free troposphere)과 같은 배경대기 지역에서는 0.1 ppb 수준으로 관측된다.

NO_x는 안면도와 고산에서 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 부록에 소개되었다. 2020년 안면도에서 측정한 NO_x의 연평균은 5.4 ppb로 최근 2년 평균인 6 ppb보다 조금 낮았다. 월 평균은 1월에 8.7 ppb로 가장 높았고, 8월에 2.3 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1월 최솟값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷한 분포를 보였다(그림 5.5.1). 반면에 고산 NO_x는 연평균 4.5 ppb로 최근 2년 평균인 4.3 ppb와 비슷하였다. 월평균은 10월에 5.7 ppb로 가장 높았고, 8월에 2.6 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 10, 11월 최솟값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷하였다.

일평균 자료로 월평균, 월 최솟값, 월 최솟값을 나타낸 안면도와 고산의 연변화 경향을 보면(그림 5.5.2) 고산 NO_x는 안면도에 비해 뚜렷한 계절변동이 나타나지 않았다. 안면도에서 NO_x의 월 최솟값은 2003년 이후 꾸준히 감소하였고, 관측환경 개선 후 다시 측정을 시작한 2018년부터 2020년까지도 월 최솟값이 감소하였다. 고산의 월 최솟값은 월평균과 마찬가지로 큰 폭의 변화가 없어 안면도가 고산보다 국지오염의 영향을 더 크게 받는 것으로 볼 수 있다.

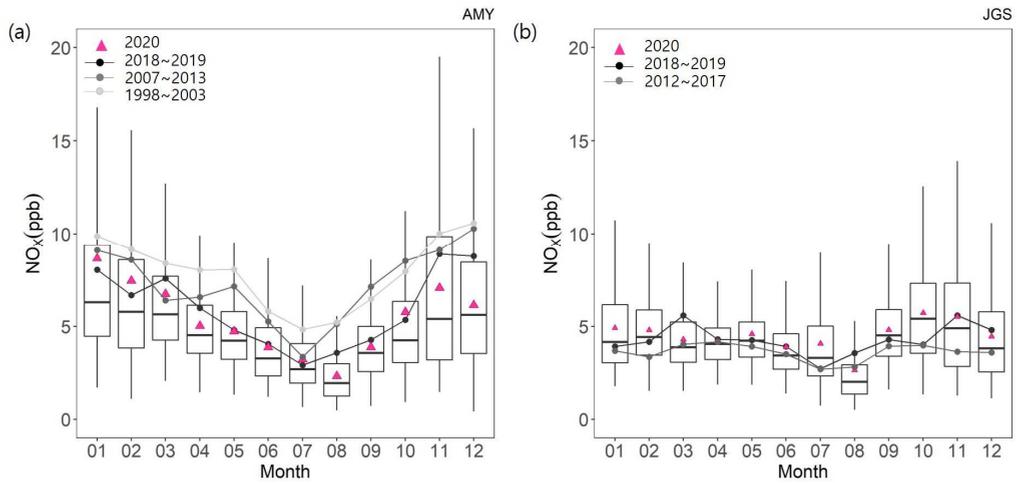


그림 5.5.1 2020년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 NO_x 월변화. 2020년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형 및 점-선은 연도별 월평균).

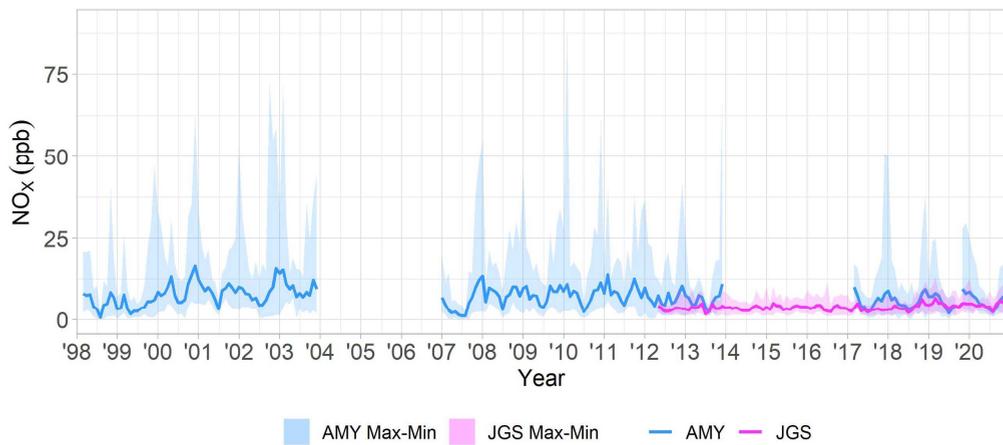


그림 5.5.2 안면도(AMY, 1998~2020년)와 고산(JGS, 2012~2020년)에서 관측한 NO_x 의 연변화 경향 (선은 월평균, 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).



NO_x 농도를 계절별로 나누어 연변화를 살펴보았다. 이때 계절은 지표 O₃과 같은 방식으로 구분하였다. NO_x농도는 안면도에서 겨울에 높았고, 여름에 낮았으며, 고산에서는 안면도에 비해 계절별로 뚜렷하게 차이가 나지 않으나 여름에 농도가 가장 낮았다(그림 5.5.3). NO_x의 배출원은 도로 이동 오염원(자동차·버스·화물차 등)과 에너지산업 오염원(발전·난방 시설 등)이 있다. 2001년 서해안 고속도로가 개통되면서 안면도를 오가는 교통량이 증가하였으며 이는 2001년도 급증한 NO_x 농도에 잘 반영되었다. 고산은 모든 계절에서 NO_x 농도가 안면도보다 낮게 나타났다.

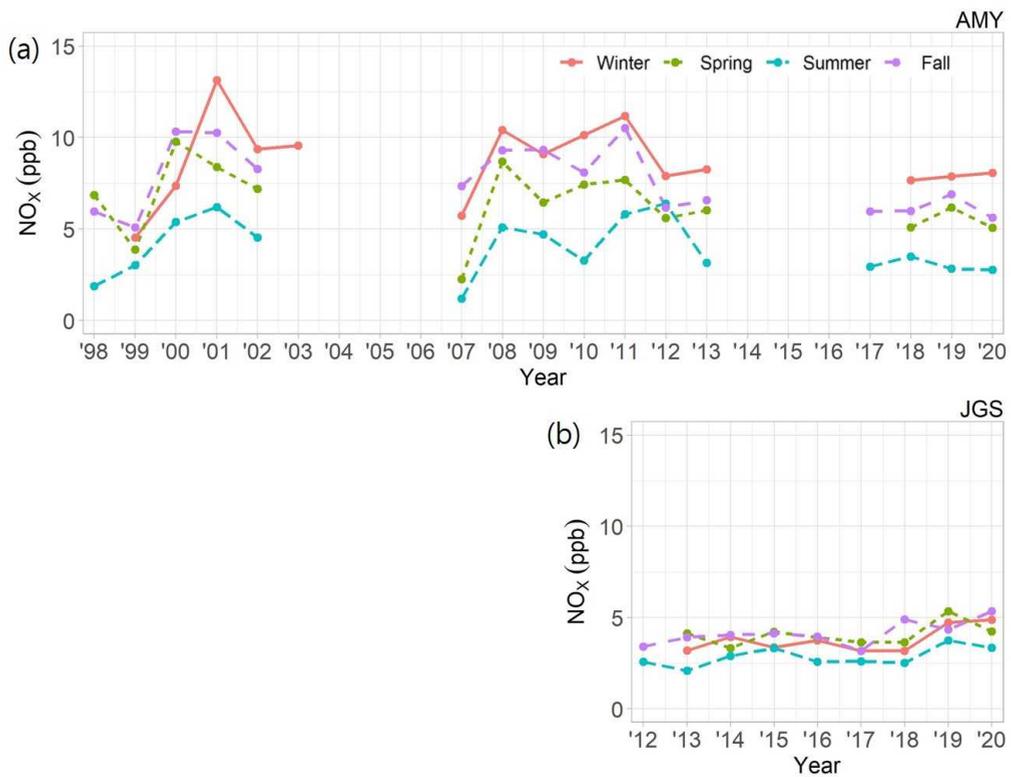


그림 5.5.3 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)에서 관측한 NO_x의 계절평균 연변화.

5.6 이산화황(SO₂)

이산화황(SO₂)은 H₂SO₄의 주요 공급원이며, H₂O, O₃과 반응하여 H₂SO₄를 생성한다. H₂SO₄는 산성비를 유발하거나 새로운 입자를 형성하는데 결정적인 역할을 한다. 1980년대부터 1990년대까지 산성비 등 산성강하물이 주요 환경문제였을 때 유럽과 북아메리카에서 대기오염 측정 네트워크와 배경대기 지역에서 관측되었다. 유럽, 북아메리카는 환경정책으로 SO₂ 배출을 규제하여 농도가 감소하였다. 우리나라에서도 황 저감 정책으로 1990년대 이후 SO₂의 농도 수준이 감소하여 2016년 전국 평균 0.004 ppm(4 ppb) 이하이다(국립환경과학원, 2020). 그러나 중국에서는 황을 포함한 석탄을 연료로 사용하고 있어 우리나라보다 SO₂ 농도 수준이 높으며 장거리 이동으로 우리나라에 영향을 줄 가능성이 크다. 또, SO₂는 주로 산업공정, 발전소, 화산 분출 등에서 발생하며 지역 오염이나 화산 영향의 좋은 지시자이다. 또, SO₂는 화학반응을 거쳐 황산염 에어로졸을 생성하는 전구물질로 작용한다. 황산염 에어로졸은 태양빛을 산란시켜 지구 냉각화에 기여하고 복사강제력은 약 -0.41 W/m²(IPCC, 2014)로 추정한다. 따라서 SO₂는 간접적으로 기후에 영향을 주는 요소로 지속적인 감시를 통한 장기 변화를 분석할 필요가 있다.

SO₂는 안면도와 고산에서 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 부록 1.2에 소개하였다.

2020년 안면도에서 측정한 SO₂의 연평균은 0.8 ppb로 최근 2년 평균인 1.3 ppb보다 0.5 ppb 낮았다. 월평균은 1월에 1.3 ppb로 가장 높았고, 7월과 8월에 0.4 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1, 12월 최솟값, 7, 8월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷한 분포를 보였다(그림 5.6.1). 2020년 고산 NO_x의 연평균도 0.8 ppb로 최근 2년 평균인 0.9 ppb와 비슷하였다. 월평균은 12월에 1.1 ppb로 가장 높았고, 7월에 0.5 ppb로 가장 낮았으며 최근 2년 월평균과 비교하여 월평균이 1~8월에는 낮았고 9월 이후 높아졌다.

일평균 자료로 월평균, 월 최솟값, 월 최댓값을 나타낸 안면도와 고산의 연변화 경향을 보면(그림 5.6.2) 고산 SO₂는 안면도에 비해 뚜렷한 계절변동이 나타나지 않았다. 안면도에서 SO₂의 월 최솟값은 2007년 이후 꾸준히 감소하였고, 관측환경 개선 후 다시 측정을 시작한 2018년부터 2020년까지도 월 최솟값이 감소하였다. 고산의 월 최솟값은 월평균과 마찬가지로 큰 폭의 변화가 없어 안면도가 고산보다 국지오염의 영향을 더 크게 받는 것으로 볼 수 있다.

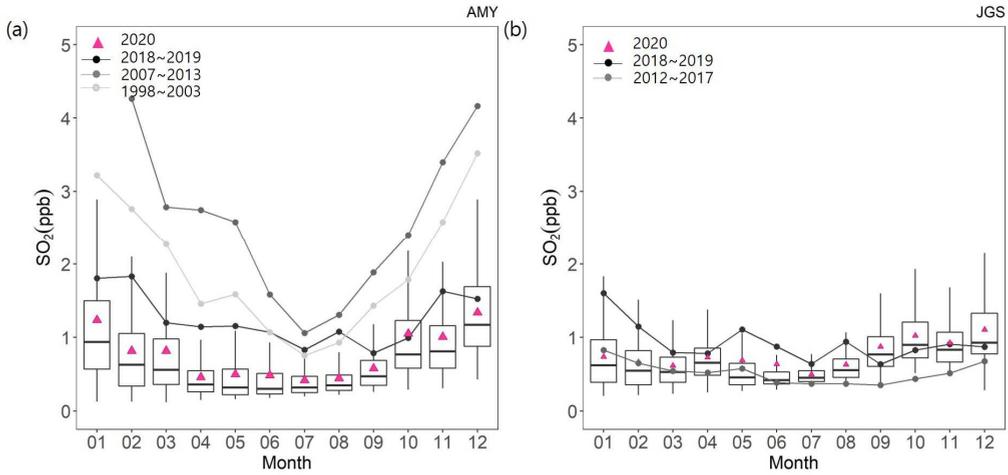


그림 5.6.1 2020년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 SO₂ 월변화. 2020년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형 및 점-선은 연도별 월평균).

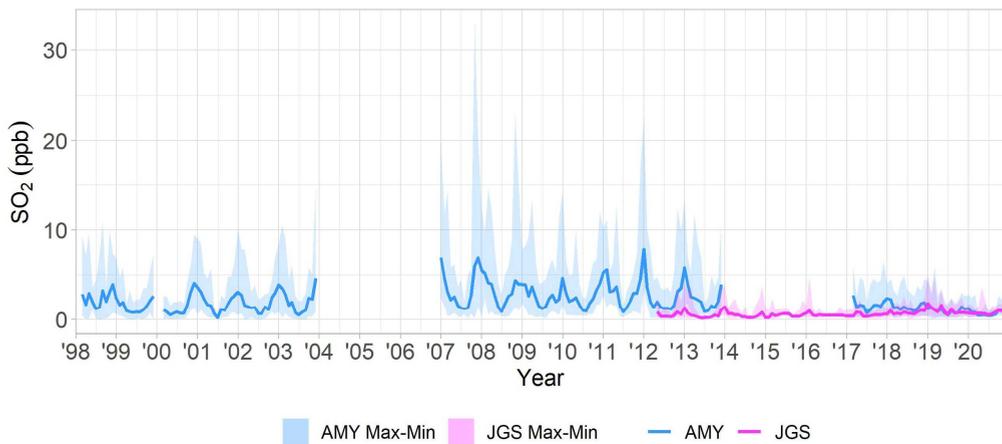


그림 5.6.2 안면도(AMY, 1998~2020년)와 고산(JGS, 2012~2020년)에서 관측한 SO₂의 연변화 경향 (선은 월평균, 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

SO₂ 농도를 계절별로 나누어 연변화를 살펴보았다. 이때 계절은 지표 O₃과 같은 방식으로 구분하였다. SO₂ 농도는 안면도에서 겨울에 높았고, 여름에 낮다(그림 5.6.3). 우리나라의 SO₂는 1978년부터 대기환경기준으로 꾸준히 규제를 강화하였고, 1990년대 말부터 전국 SO₂ 연평균이 10 ppb 이하로 나타났으며 최근일수록 점차 감소하였다(천성남, 2018). 1998년부터 2020년까지 안면도 겨울철 SO₂의 농도 분포는 우리나라 SO₂의 배출량 감소 경향보다 2005년까지 최대로 증가하다가 이후 저감정책 효과로 감소한 중국 SO₂ 배출량의 감소 추세와 비슷한 경향을 보였다(우정현 등, 2018). 그에 비해 고산의 SO₂는 안면도에 비해 계절별로 뚜렷하게 차이가 나지 않았고 겨울에 농도가 조금 높았다.

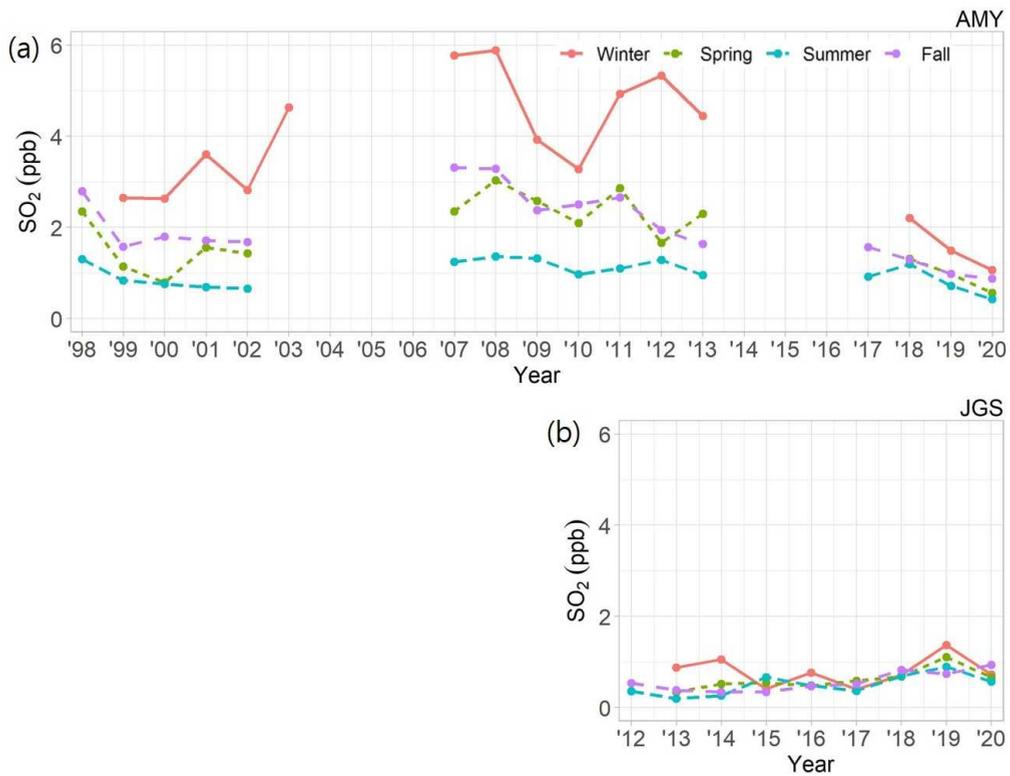


그림 5.6.3 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)에서 관측한 SO₂의 계절평균 연변화.



5.7 2020년 반응가스 특성 분석

2020년 1, 2, 3월에는 시베리아 고기압이 약하였고, 이에 따라 세 감시소에서 최근 12년에 비해 풍속이 약하고, 기온이 낮았다(3.1절, 3.2절). 이와 유사한 기상특성을 보였던 2019년의 1~3월의 평균은 최근 평균보다 높게 나타났으나(2019 지구대기감시 보고서), 2020년에는 세 감시소에서 대부분 항목에서 최근 자료에 비해 월평균과 연평균이 낮았다(그림 5.3.1, 그림 5.4.1, 그림 5.5.1, 그림 5.6.1, 표 5.7.1). 2020년의 농도감소는 코로나19확산으로 비슷한 시기에 있었던 각국의 봉쇄조치 및 집합금지의 효과를 큰 요인으로 볼 수 있다. 2020년 1월 23일 ~ 4월 7일 중국의 봉쇄조치로 중국 우한의 대기질이 2019년 대비 약 30%~40% 개선되었고(Chen et al., 2020), 우리나라는 최근 5년간 1,2,3월 중 2월이 정체로 오염농도가 높았으나 중국의 봉쇄조치로 인한 효과와 2월 말부터 시작된 집합금지, 사회적 거리두기 등으로 대기질이 개선되었고 3월에는 풍속이 강해지면서 공기가 순환되면서 오염농도가 더욱 낮아졌다(Koo et al, 2020). 세 감시소의 반응가스도 이들 연구와 같이 최근자료보다 농도가 낮게 나타났다.

2020년 8월에 지표O₃이 특히 낮았으며, 이는 8월에 정체전선으로 장마가 길어졌고, 일조 시간이 짧아졌기 때문으로 추측된다.

표 5.7.1 반응가스의 2020년과 최근 평균 비교

감시소 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2020년 (변화율)	최근 10년	2020년 (변화율)	최근 8년	2020년 (변화율)	최근 5년
O ₃	40.9 (-3.1%)	42.2	41.8 (-3.3%)	43.2		
CO	257.9 (-9.4%)	282.3	187.6 (-8.2%)	202.9	166.9 (-8.8%)	181.5
NO _x	5.4 (-25%)	6.8	4.5 (16%)	3.8		
SO ₂	0.8 (-162%)	2.1	0.8 (23%)	0.6		

* 최근 10년 : 2010~2019년(2014.1~2017.2 안면도 관측환경 변화에 따른 무효처리)

* 안면도 연구동 신설 후 장비 이전 기간 2004~2006년 무효처리, 그 외 2020년 지구대기감시 보고서 통계표 참조

2018~2019년과 2020년 안면도에서 관측된 CO 농도가 322 ppb 이상의 고농도가 관측될 확률을 CBPF(Conditional Bivariate Probability Functions)로 나타낸 결과, 2020년 1, 2월의 풍속이 작아 장거리 이동의 영향을 없었고, 정체로 인한 고농도가 예상됨에도 최근 2년보다 낮은 농도로 관측되었다(그림 5.7.1).

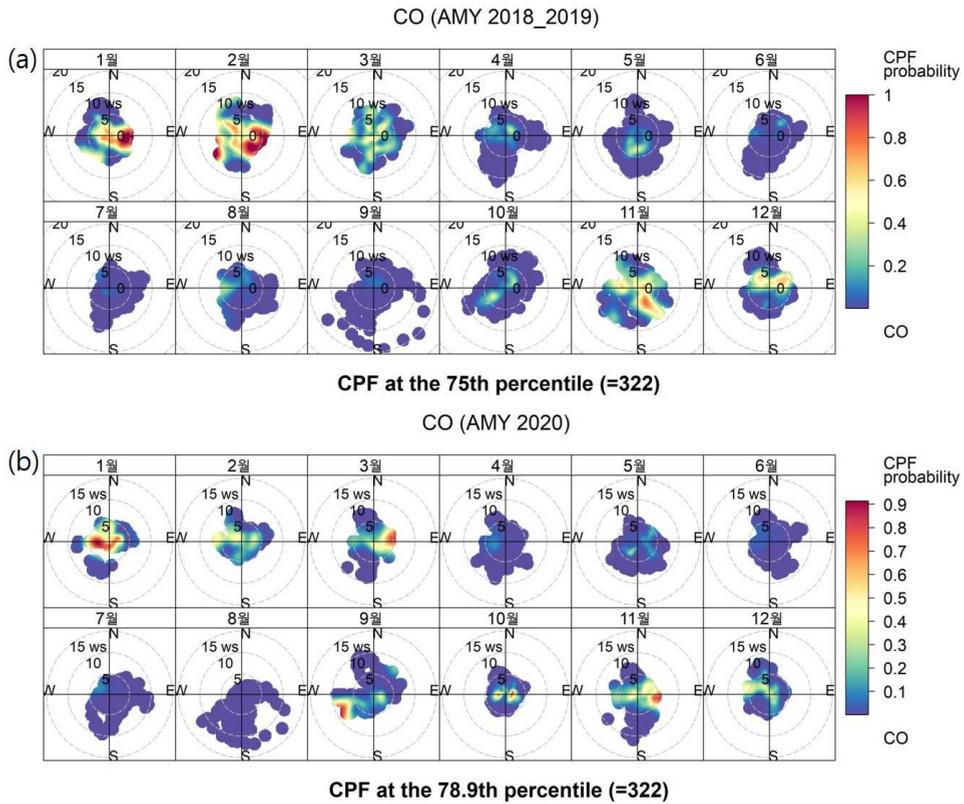


그림 5.7.1 안면도 CO의 (a) 2018~2019년과 (b) 2020년 월별 고농도 확률분포.



2018~2019년과 2020년 안면도에서 관측된 NO_x 농도가 7.1 ppb 이상의 고농도가 관측될 확률을 CBPF(Conditional Bivariate Probability Functions)로 나타낸 결과, 2020년과 최근 2년의 월별 고농도 분포가 비슷하게 나타났으며 동풍계열의 바람이 내륙에서 불 때 고농도가 관측되었다(그림 5.7.2).

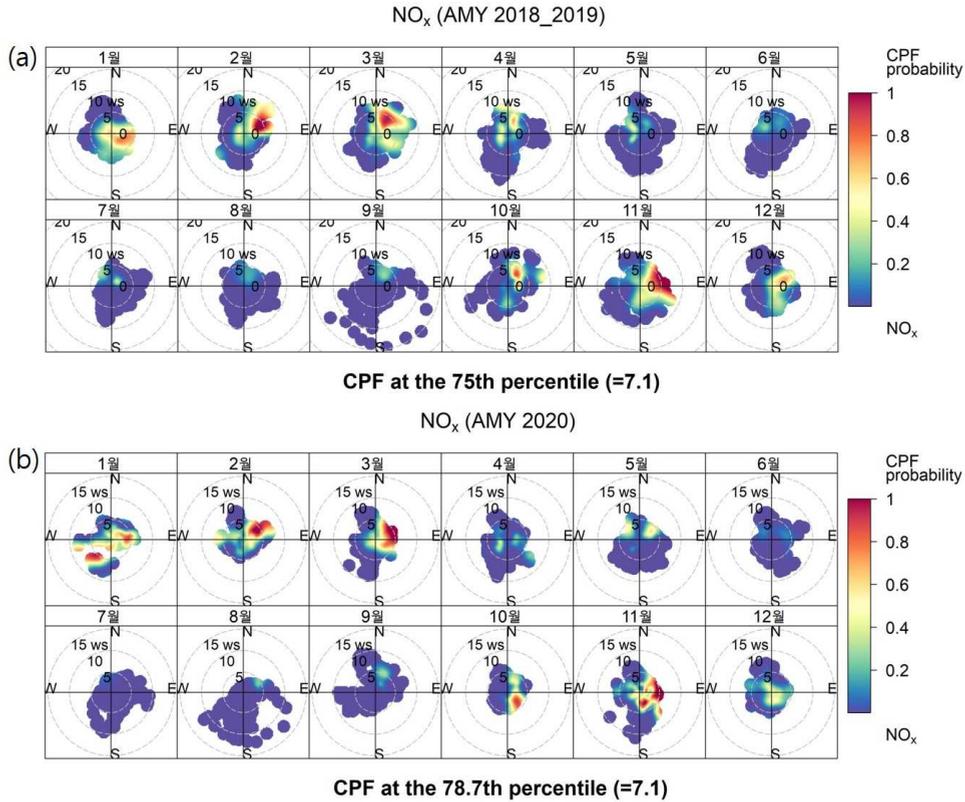


그림 5.7.2 안면도 NO_x의 (a) 2018~2019년과 (b) 2020년 월별 고농도 확률분포.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총 대기침적지구대기감시자료 분석

제11장 기타



2020 지구대기감시 보고서



제6장 에어로졸

6.1 에어로졸 감시의 목적	134
6.2 에어로졸 물리 특성	138
6.3 에어로졸 광학 특성	144
6.4 에어로졸 화학 특성	162
6.5 2020년 에어로졸 특성 분석	178



제6장 에어로졸

- PM10: 안면도 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최근 10년 대비 -25%)
고 산 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최근 9년 대비 -6.7%)
- 광산란계수: 74.4 Mm^{-1} (최근 10년 대비 -26%)
광흡수계수: 8.6 Mm^{-1} (최근 10년 대비 +6.9%)
- 안면도 PM10, 광산란계수 연평균: 관측 이래 최저
- 고산 PM10, 총수농도, 안면도 광흡수계수는 증감 추세 뚜렷하지 않음.
- 가을철 입자 생성 최대(총수농도 최대)

6.1 에어로졸 감시의 목적

에어로졸은 공기 중에 떠 있는 고체 또는 액체 상태의 다양한 크기(수 nm~수십 μm)로 존재한다. 에어로졸은 대기 중으로 직접 배출되거나³⁾, 배출된 입자나 가스가 대기 중 화학반응을 통해 생성된다⁴⁾. 배출된 에어로졸은 추가적인 화학 반응, 응결, 증발, 응집 등의 과정을 거치며 크기와 화학조성이 변한다. 또한 에어로졸의 분포는 수송과 침적 등에 의해 영향을 받으며, 대기 중에 수 일 정도 체류한다(IPCC, 2013).

에어로졸은 호흡기질환, 심질환 발병 등 건강에 영향을 줄 뿐 아니라 대기오염물질과 결합하여 산성비, 스모그, 시정 감소의 원인이 되기도 한다. 또한, 지표로 들어오는 태양복사에너지를 산란하거나 흡수하여 기후변화를 유발하는 강제력으로 작용하기도 한다. 에어로졸의 복사강제력은 다음과 같이 세 가지 효과로 구분한다.

- 1) 에어로졸-복사 상호작용(산란, 흡수 등 직접 복사강제력)
- 2) 에어로졸-구름 상호작용(구름 알베도 효과, 구름 수명 변화)
- 3) 눈과 얼음 표면의 검댕으로 인한 지표 알베도 변화

3) 1차 에어로졸: 검댕(black carbon, BC), 유기 탄소(organic carbon, OC), 해염(sea salt), 먼지(dust) 등

4) 2차 무기 에어로졸: 황산염(sulfate), 질산염(nitrate), 암모늄(ammonium); 2차 유기 에어로졸(secondary organic aerosols, SOA)



1750년과 2011년 사이 에어로졸-복사 상호작용에 의한 직접 복사강제력의 전 지구 평균은 $-0.35(-0.85 \sim +0.15) \text{ W/m}^2$ 이고, 에어로졸-복사 상호작용과 에어로졸-구름 상호작용을 모두 고려한 평균 강제력은 $-0.9(-1.9 \sim -0.1) \text{ W/m}^2$ 이며 중간 수준의 신뢰도를 가지는 것으로 보고되었다(IPCC, 2014). 검댕은 대기 중에 존재하는 동안 태양복사에너지를 흡수할 뿐만 아니라 눈과 얼음에 쌓여 지표의 알베도를 증가시켜 총 $+0.64 \text{ W/m}^2$ 의 강제력을 가지는데, 이는 CO_2 다음으로 두 번째 큰 강제력으로 평가되었다(그림 6.1.1)(IPCC, 2013). 에어로졸이 기후에 미치는 영향에 대해서는 점차 과학적 이해수준이 높아져 가고는 있지만, 에어로졸과 구름간의 상호작용에 대한 부분은 여전히 과학적 이해도가 낮으며 시간적, 공간적 다양성이 크기 때문에 전 지구적 복사강제력을 추산하는 데 있어 여전히 가장 큰 불확실도를 제공하는 요소이다. 따라서, 지정된 장소에서 종합적인 에어로졸 장기관측을 수행함으로써 에어로졸과 기후 상호작용을 과학적으로 이해하고 미래 기후변화를 예측하는 데 기여할 수 있다.

세계기상기구(WMO) 지구대기감시프로그램(GAW)에서 에어로졸을 감시하는 목적은 수십 년의 시간 규모와 지역, 전구 등 공간 규모에서 기후강제력, 대기질과 관련한 에어로졸 특성의 시공간 분포를 결정하는 것이다. 이를 위해 에어로졸의 물리특성, 광학특성, 화학특성, 총대기관측 및 연직관측 등을 권고하고 있다. 전 세계 약 90여 개의 에어로졸 관측소에서 기후변화와 직접 관련된 요소인 에어로졸 광학특성(광산란계수, 광흡수계수)과 물리특성(에어로졸 총수농도, 크기분포)의 최근 10년간 지역 및 전구의 변동성에 관한 연구결과들이 발표되었다(Collaud Coen et al., 2020; Laj et al., 2020). 이 자료들은 에어로졸 세계자료센터와 WMO/GAW 과학자문위원회의 품질확인을 거쳐 신뢰도가 확보된 것이며, 우리나라에서는 안면도 기후변화 감시소 자료(2007~2017년)와 제주 고산 관측 자료가 기여하였다. 에어로졸 광산란계수의 경우 북미와 서유럽에서는 지난 20년간 뚜렷하게 감소한 반면, 최근 10년 우리나라를 포함한 동아시아에서는 유의미한 증감 경향이 보이지 않았다(Collaud Coen et al., 2020)(그림 6.1.2(a)). 광흡수계수는 대부분 지역에서 감소하거나 유의미한 변동이 보이지 않았으며, 우리나라 안면도에서는 변동이 없는 것으로 분석되었다(그림 6.1.2(b)).

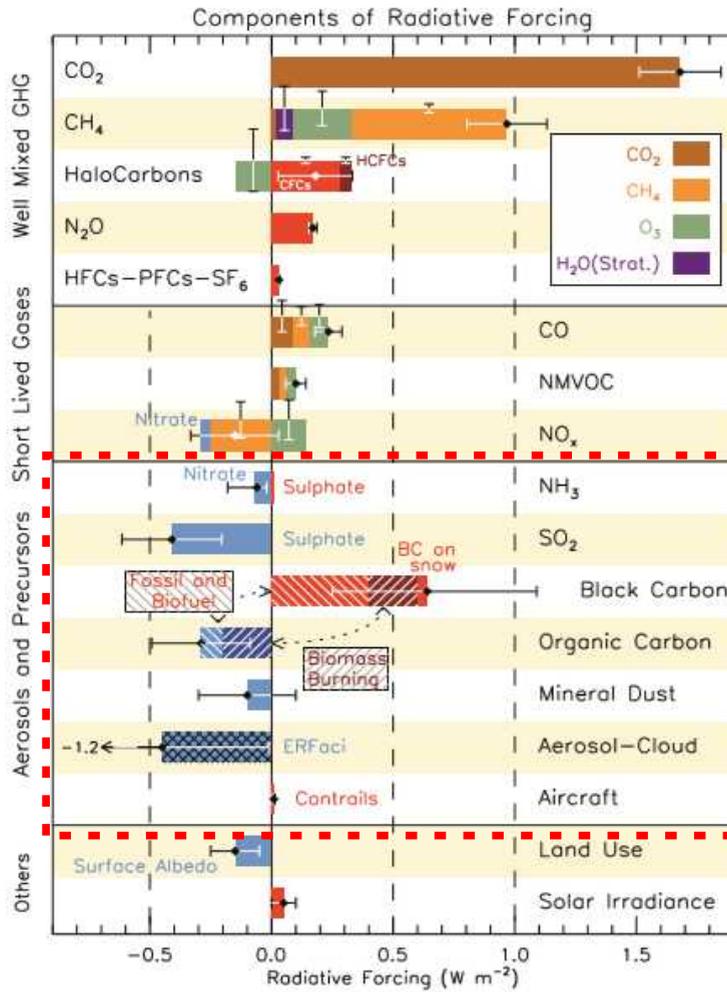


그림 6.1.1 대기조성물질의 복사 강제력(1750~2011년)(IPCC, 2013).

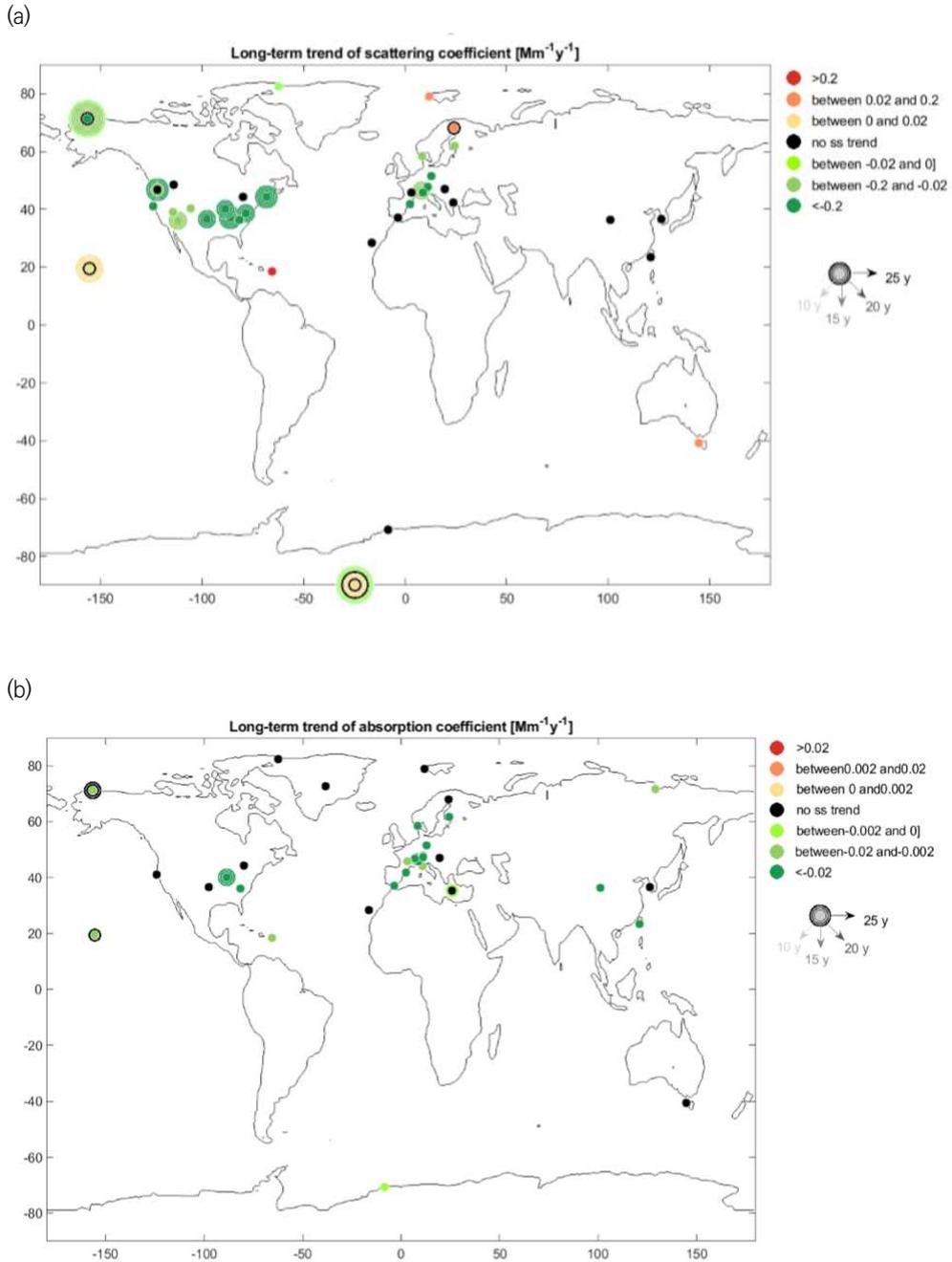


그림 6.1.2 (a) 에어로졸 광산란계수, (b) 에어로졸 광흡수계수의 장기 변동 경향. 지역에 따라 유의미한 변동 경향이 없거나(검정), 통계적으로 유의미하게 감소(초록) 또는 증가(주황) 경향을 나타냄 (Collaud Coen et al., 2020).

6.2 에어로졸 물리 특성

기후변화감시소에서는 한반도 배경대기 에어로졸의 물리특성 감시를 위해 에어로졸(PM10) 질량농도와 수농도(총수농도, 크기분포)를 측정하고 있다. PM10 질량농도는 부유분진측정기(β 선 감쇄법)로 연속 관측하는데, 이 장비는 국내 황사 관측망의 기본 관측장비로 운영되며 자료가 실시간 공개되고 있다. 에어로졸 총수농도와 크기별 수농도를 응결핵계수기(condensation particle counter; CPC, 0.01~3.0 μm), 공기역학계수기(aerodynamic particle sizer; APS, 0.5~20 μm), 전자기유도입자계수기(scanning mobility particle spectrometer; SMPS, 0.01~1.0 μm) 등을 이용하여 측정한다.

6.2.1 PM10 질량농도

안면도에서 측정한 PM10 질량농도의 2020년 월평균은 17~36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이에 분포하며 최근 10년간(2010~2019년) 월별 평균보다 낮았다. 7월의 평균 농도가 가장 낮고(17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 3월 평균이 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연중 가장 높았으며, 이 경향은 2019년과 일치한다(그림 6.2.1(a)).

2020년 고산의 PM10 질량농도 월평균은 18~37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이로 안면도와 유사하며, 최근 9년(2011~2019년)간 월별 평균과 비교할 때 8월은 과거보다 높았고, 나머지는 비슷하거나 낮았다(그림 6.2.1(b)). 2020년 8월 고산의 PM10 질량농도 월평균은 최근 9년의 8월 평균에 비해 약 54% 높은 수준인데, 이는 8월 1~7일 고농도 사례가 기여한 것으로 보인다. 고산 PM10 질량농도의 월별 변동은 8월을 제외하면 봄철에 가장 높고, 여름과 가을에 낮아 안면도와 유사한 양상을 보였다. 8월과 11~12월을 제외하고 안면도와 고산의 PM10 질량농도 월평균은 유사하게 관측되었다.

울릉도에서 관측한 PM10 질량농도 월평균은 9~24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 안면도, 고산에 비해 약 40%~50% 낮은 수준이다. 월별로는 4월에 가장 높고, 7월에는 가장 낮았다(6.2.1(c)).

안면도 PM10 질량농도 연평균은 2004년 관측 이후로 감소하는 추세이다(-1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, p -value: 5.6E-06). 2019년에는 2013년 이후 최댓값이 관측되었으며, 2020년 안면도 PM10 질량농도 연평균은 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측 이래 가장 낮았다(그림 6.2.2). 2020년 고산의 PM10 질량농도 연평균은 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 안면도와 유사하며, 2011년 관측 이후로 증감 추세가 뚜렷하지 않다. 반면, 안면도는 고산의 최후 관측년도인 2011년 이후에도 감소 추세를 보여(-0.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, p -value: 0.038), 2017년부터는 안면도와 고산의 PM10 연평균이 유사하게 관측되고 있다. 2020년 울릉도의 PM10 질량농도 연평균은 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 안면도, 고산에 비해 약 37%~39% 낮은 수준이었다.

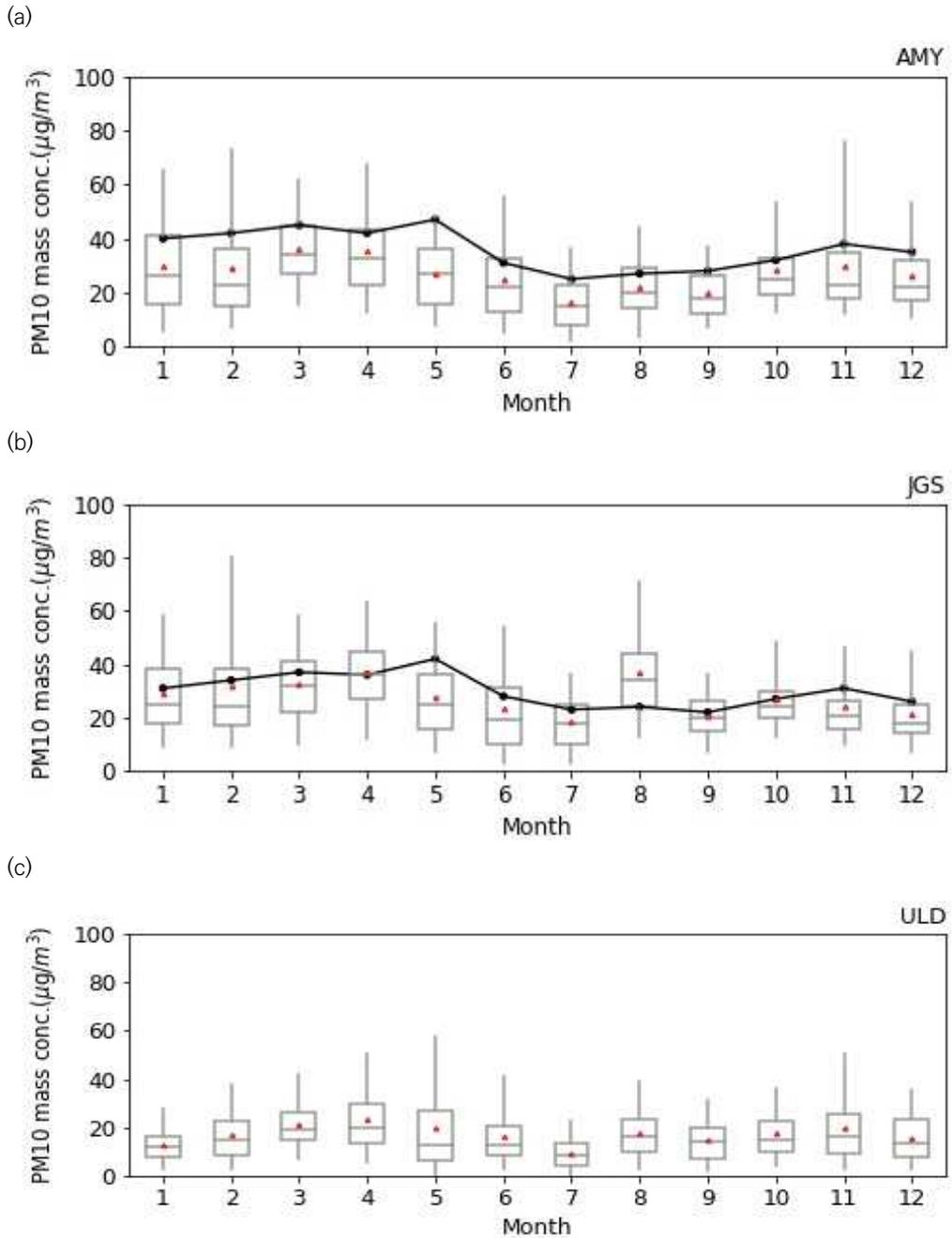


그림 6.2.1 (a) 안면도, (b) 고산, (c) 울릉도의 PM10 질량농도 월변화(μg/m³). 2020년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2010~2019년(안면도), 2011~2019년(고산) 평균(점-선).

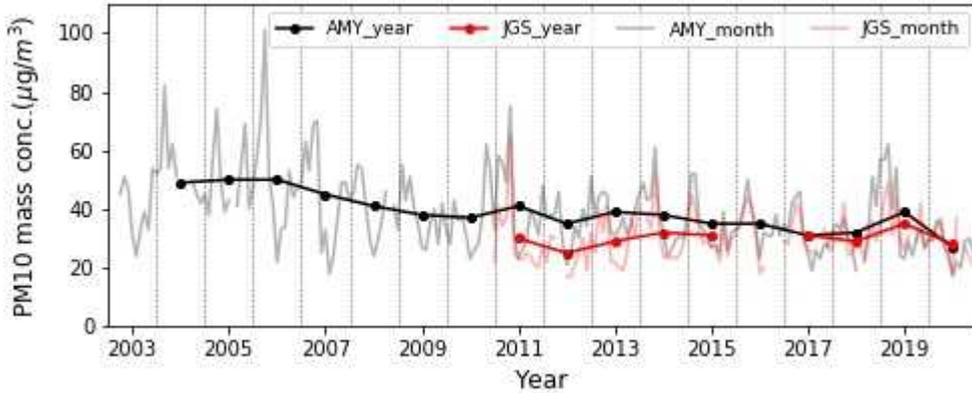


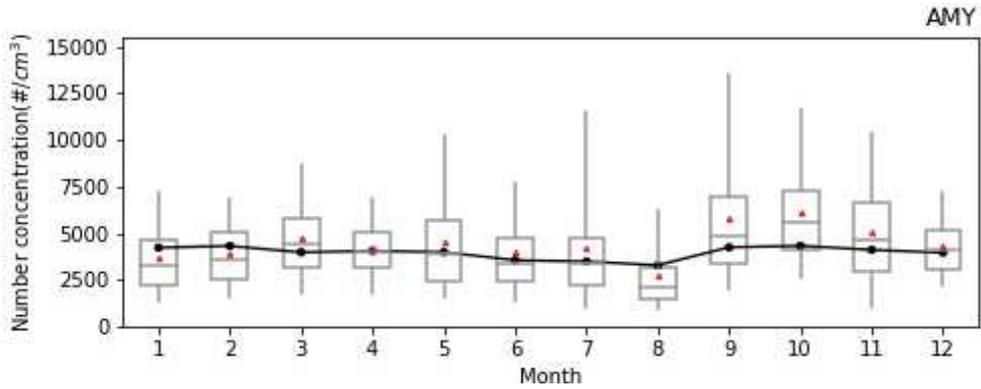
그림 6.2.2 안면도(AMY)와 고산(JGS) PM10 질량농도의 연변화(µg/m³).

6.2.2 에어로졸 총수농도

에어로졸 수농도와 크기 분포는 모든 에어로졸 과정에 있어 가장 기본이 되는 정보이다. 고산에서는 응결핵계수기를 이용하여 총수농도를 측정하며(0.01~3 µm), 안면도에서는 전자기유도 입자계수기에서 측정된 크기별 수농도와 총수농도(0.01~1 µm)를 측정한다. 안면도와 고산에서 측정된 총수농도의 월변동을 그림 6.2.3에 보였다. 2020년에 관측된 안면도의 월별 총수농도는 9, 10월을 제외하고 최근 10년(2010~2019년)의 월평균과 비슷하였다. 고산의 경우는 8월의 총수농도가 최근 8년(2012~2019년) 평균의 약 62% 수준으로 낮았으며, 이는 8월에 고산에서 관측된 고농도 사례와 관계가 있으며, 이로 인해 입자의 생성이 감소했던 것으로 추정된다. 한편, 두 감시소 모두 연평균 총수농도의 연간 변화 추세는 통계적으로 유의미하지 않게 분석되었다(그림 6.2.4).



(a)



(b)

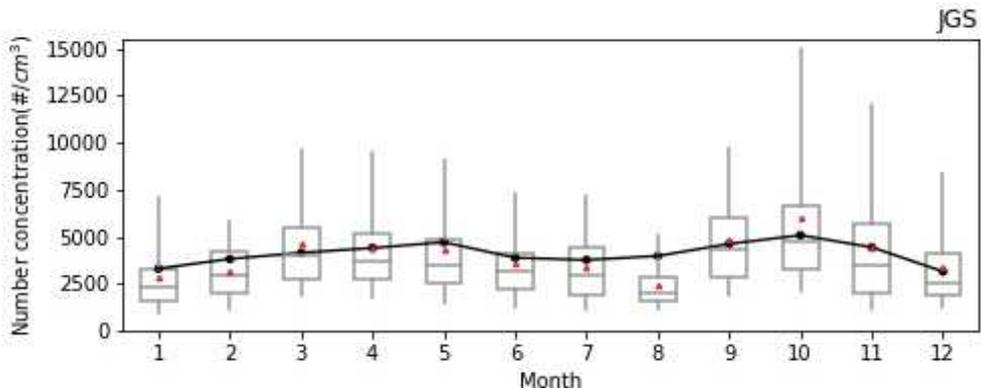


그림 6.2.3 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS)의 총수농도($\#/cm^3$) 월변화. 2020년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2010~2019년(안면도), 2012~2019년(고산) 평균(점-선).

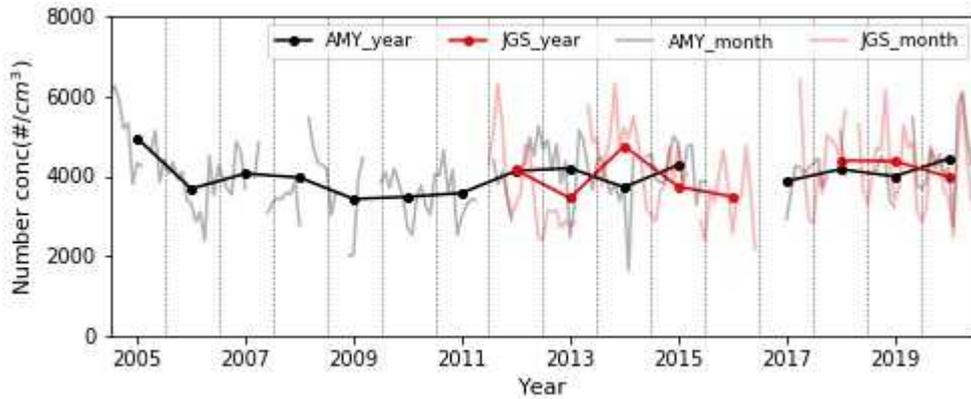


그림 6.2.4 안면도(AMY)와 고산(JGS) 총수농도(#/cm³)의 연변화.

6.2.3 에어로졸 크기 분포

2020년에 관측된 안면도, 고산, 울릉도의 입자 크기별 부피농도 분포(0.5~20 μm)를 그림 6.2.5에 보였다. 세 감시소 모두 미세입자 영역(1 μm 이하)과 조대입자 영역에 피크가 관측되는 이산형(bi-modal) 분포를 보였으며, 안면도와 고산은 울릉도에 비해 고농도 사례가 빈번하게 출현하고 있으며, 울릉도는 안면도와 고산에 비해 전 기간에 걸쳐 농도가 낮게 측정되었다. 특히, 가을철에 미세입자 농도가 가장 낮았다. 고산 관측자료에서는 8월 상순에 미세입자 고농도가 두드러지는데, 이는 8월 평균 PM10 질량농도가 과거에 비해 증가한 것과 관련이 있는 것으로 볼 수 있다. 9월 초에는 태풍에 대비하여 세 감시소 모두 장비운동을 일시적으로 정지하였다.

그림 6.2.6은 안면도에서 측정한 미세입자 크기별 수농도 분포이다. 가을철은 다른 계절에 비해 수농도가 높으며, 겨울철의 수농도가 가장 낮았다. 2020년 안면도 미세입자 크기별 수농도 변화에 대한 분석은 본문 6.5에 상세히 기술하였다.

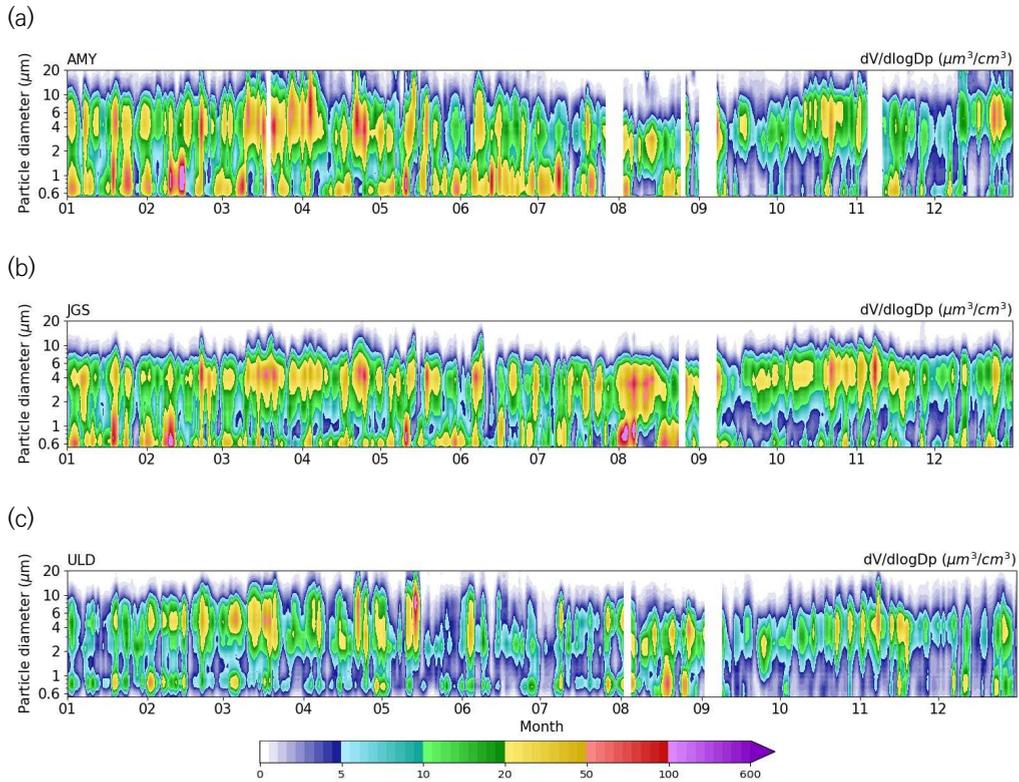


그림 6.2.5 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD)의 2020년 크기별 부피 농도($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$).

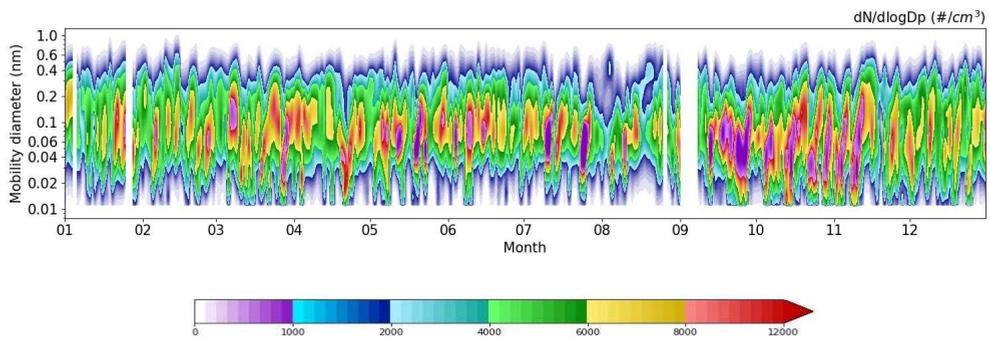


그림 6.2.6 2020년 안면도 미세입자 크기별 수농도 분포($\#/ \text{cm}^3$).

6.3 에어로졸 광학 특성

6.3.1 에어로졸 광산란계수

2020년 안면도의 월평균 에어로졸 광산란계수(550 nm)는 44.0~108.2 Mm^{-1} 이며, 월평균 최댓값과 최솟값은 각각 2월과 9월에 관측되었다(그림 6.3.1). 2020년의 월평균 에어로졸 광산란계수는 과거 10년 평균(2010~2019년)에 비해 월별로 14%~44% 낮게 관측되었다. 2020년 월평균 최댓값이 관측된 2월에는 상자의 수염(75%~95% 자료)이 길어 광산란계수에 영향을 주는 에어로졸 고농도 사례가 빈번하게 일어났을 것으로 추정할 수 있으며(그림 6.3.1), 이는 그림 6.2.5(a)의 크기별 부피농도에서 확인된다. 에어로졸 광산란계수의 연평균은 2003년 이후로 관측 전체 기간에 대해서는 감소하는 추세를 보이거나($-5.5 \text{ Mm}^{-1}/\text{year}$), 2015년 이후의 증감 추세는 통계적으로 유의미하지 않게 분석된다(선형회귀식 기울기: -7.0 , 표준오차 3.8, p -value: 0.14). 2020년 연평균 에어로졸 광산란계수는 74.4 Mm^{-1} 으로 관측 이래 가장 낮았고, 최근 10년(2010~2019년) 평균인 101.2 Mm^{-1} 보다 26% 감소한 값이다(그림 6.3.2). 과거 관측 전체 기간(2003~2019년)의 평균인 120.3 Mm^{-1} 에 비하면 62% 낮았다.

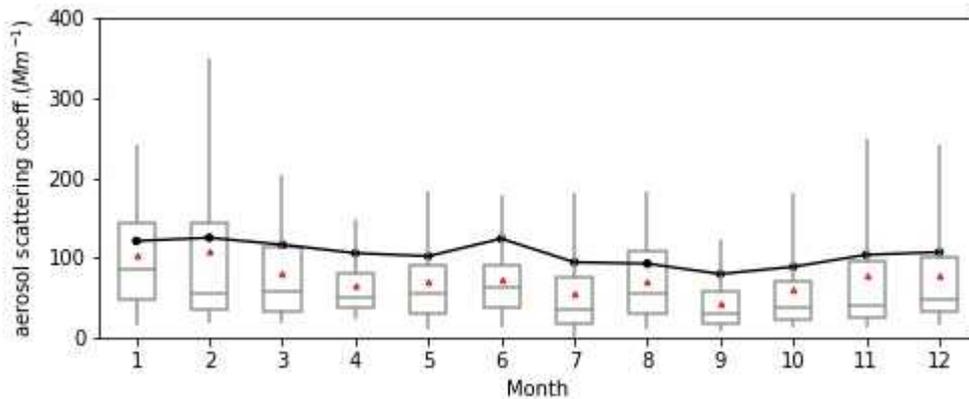


그림 6.3.1 2020년 안면도의 550 nm 광산란계수(Mm^{-1})의 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2010~2019년 평균(점-선).

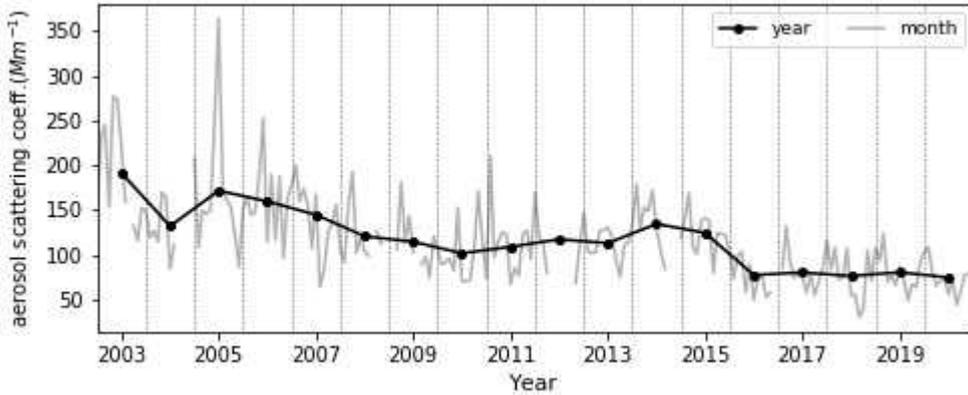


그림 6.3.2 안면도 에어로졸 광산란계수(550 nm, Mm^{-1})의 연변화.

2020년 안면도에서 측정한 월평균 에어로졸 산란옹스트롬 지수를 그림 6.3.3에 보였다. 에어로졸 산란옹스트롬 지수의 월평균은 1.13~1.53이며 최댓값은 5월, 최솟값은 8월에 관측되었다. 최근 10년 평균과 비교할 때 모든 월평균이 낮아졌는데, 낮은 옹스트롬 지수는 상대적으로 큰 입자의 비중이 높아진 것을 의미하므로, 과거에 비해 미세먼자 농도가 감소했거나 조대입자 농도가 증가했을 것으로 해석될 수 있다. 2007년 이후 에어로졸 산란옹스트롬 지수 연평균은 2016년부터 점차 낮아져 관측 이래 가장 낮은 1.38로 관측되었다(그림 6.3.4).

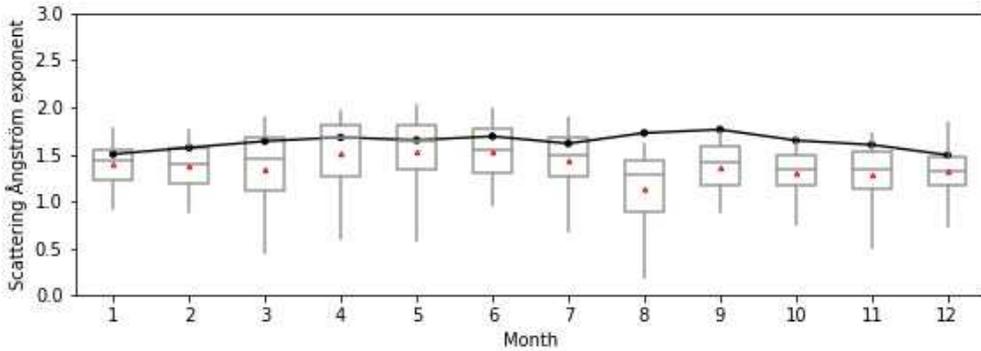


그림 6.3.3 안면도 산란옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2010~2019년 평균(점-선).

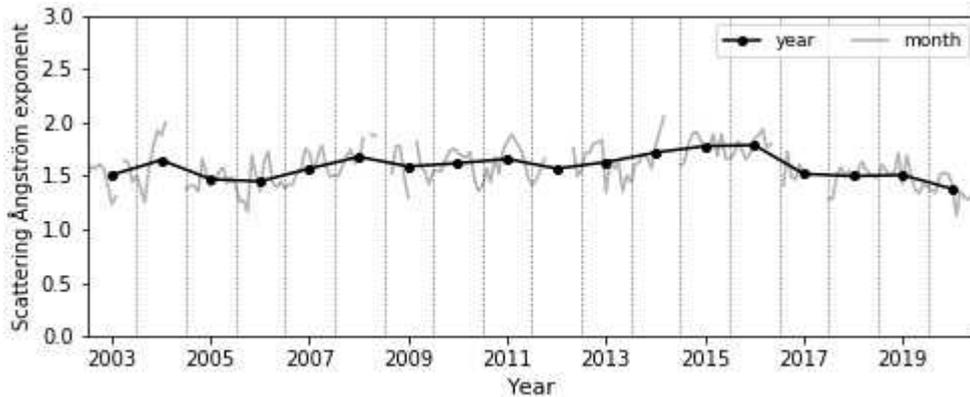


그림 6.3.4 안면도 산란옹스트롬 지수(550 nm)의 연변화.

6.3.2 에어로졸 광흡수계수

2020년 안면도 기후변화감시소에서 측정된 검댕 질량농도 월평균은 $0.6\sim 1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 8월에 최소, 1월에 최대였다. 최근 9년 평균(2011~2019년) 평균에 비해 1~7월에는 6%~46% 높고, 8~12월에는 4%~19% 낮았다(그림 6.3.5). 광흡수계수(550 nm) 월평균은 $6.6\sim 13.2 \text{ Mm}^{-1}$ 으로 관측되었으며, 검댕 질량농도와 월변동이 유사하였다(그림 6.3.6). 즉, 최근 평균에 비해 1~7월에는 8%~57% 높고, 8~12월에는 0.2%~19% 낮았다.

안면도에서 관측한 검댕 질량농도는 관측 초기인 2004년까지 $1.5\sim 2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 높게 유지되었으며, 이후 2005년부터 2016년까지 $1.0\sim 1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이로 큰 변동이 없었다. 2004년부터 2020년까지는 감소하는 경향($-0.031 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, p -value: 0.003)이나 관측 초기(2001~2004년)를 제외하고 2005년 이후의 증감 추세는 통계적으로 유의미하지 않게 분석된다(선형회귀식 기울기: -0.012 , 표준오차: 0.007, p -value: 0.098). 2018년 연평균은 0.7로 가장 낮게 관측되었으며, 이후 다시 증가하여 2020년에는 $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년(2010~2019년, $1.0\pm 0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 유사하였다(그림 6.3.7). 에어로졸 광흡수계수(550 nm)의 연평균은 2012년에 가장 높았고(9.4 Mm^{-1}), 이후 점차 감소하다가 2019년에는 8.2 Mm^{-1} 로 2016년 수준으로 다시 높아졌다. 2020년 평균은 8.6 Mm^{-1} 로 최근 10년(2010~2019년, $8.0\pm 1.2 \text{ Mm}^{-1}$)과 비슷한 수준이며, 2010년 관측 이후 2020년까지 증감 추세가 뚜렷하지 않았다(그림 6.3.8).

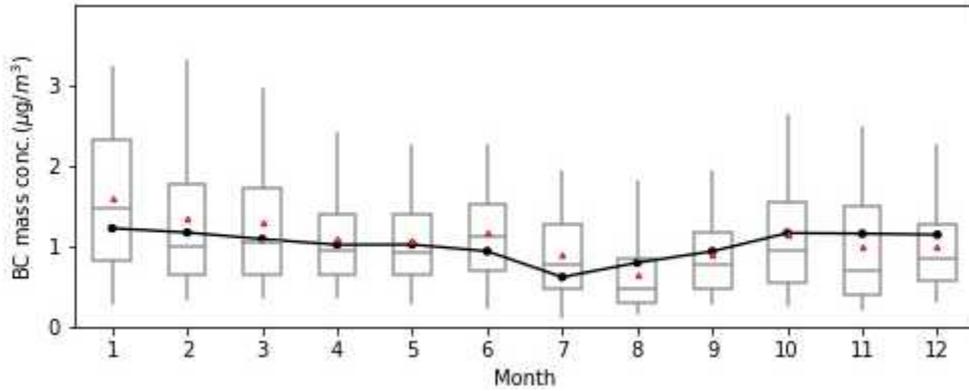


그림 6.3.5 안면도 검댕 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2010~2019년 평균(점-선).

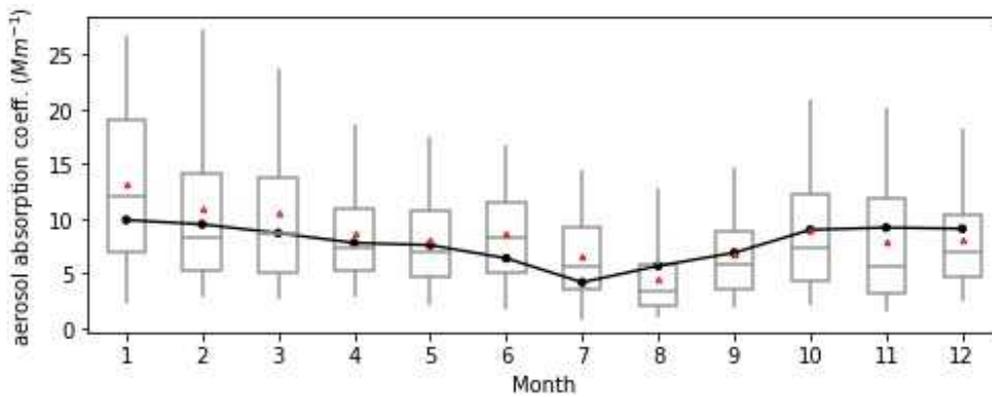


그림 6.3.6 안면도 에어로졸 광흡수계수(550 nm , Mm^{-1})의 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2010~2019년 평균(점-선).

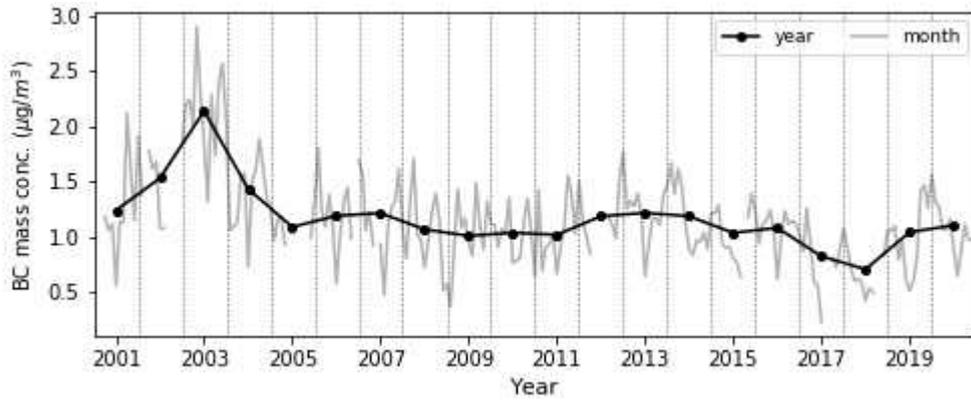


그림 6.3.7 안면도 검댕 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 연변화.

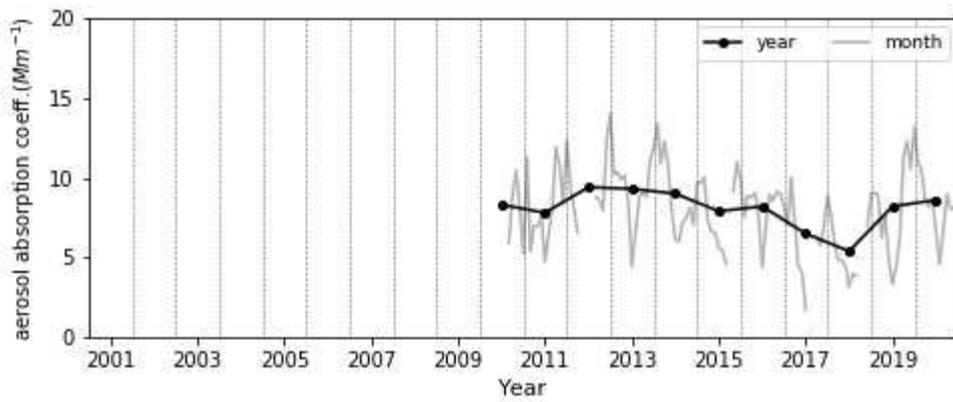


그림 6.3.8 안면도 에어로졸 광흡수계수(550 nm, Mm^{-1})의 연변화.



6.3.3 에어로졸 광학깊이(AOD)

가. 안면도, 고산, 울릉도

에어로졸 광학깊이(AOD)는 태양복사가 대기의 상한에서 지표까지 도달하는 동안 대기 중에 존재하는 여러 성분들에 의해 감소되는 효과를 나타내는 척도로서, 에어로졸과 복사강제력의 평가에 중요하게 활용되는 요소이다. AOD는 태양광도계(Sun-Photometer)나 필터복사계(Filter Radiometer) 등의 관측기기를 이용하여 태양으로부터 직달태양복사의 스펙트럼 투과를 관측함으로써 산출된다.

안면도 기후변화감시소에서는 AOD 산출을 위하여 2010년 11월에 정밀필터복사계(Precision Filter Radiometer; GAW-PFR)를 설치하였고, 2011년 12월에는 고산과 울릉도에 추가로 동일한 장비를 설치하였다.

그림 6.3.10과 그림 6.3.12은 안면도에서 2010~2020년까지 관측한 500 nm에서의 AOD와 옹스트롬 지수를 보여준다. 2013년 1월~ 2014년 4월의 관측결과는 세계 광학두께 연구 및 교정 센터(World Optical Depth Research and Calibration Centre; WORCC)에서 품질 관리가 완성된 자료(● 모양)이며, 2014년 5월부터는 자체 분석자료(○ 모양)이다. 그림 6.3.9와 그림 6.3.11은 안면도의 2020년 AOD(500 nm)와 옹스트롬 지수의 월 변동성을 나타낸 것이다. 최근 10년(2010~2019년) 월별 평균을 점-선으로 나타냈으며, 유효한 일평균 자료수가 해당 월의 30% 이상인 자료들을 평균하였다.

AOD는 에어로졸의 양에 대체로 비례하며, 옹스트롬 지수는 에어로졸의 크기와 반비례 관계를 나타낸다. 최근 10년의 AOD 분포를 보면 2분기(4~6월)에 가장 높고, 3분기(7~9월)에 대체로 낮으며, 월별로는 6월에 최대 7월에 최소로 관측되었다. 2020년 안면도 AOD는 3월에 가장 낮았으며, 7월이 가장 높았다. 7월 7~9일까지 고농도의 에어로졸 관측이 되었으며, 8월에도 많은 에어로졸이 관측되었다(그림 6.3.10). 상반기 AOD는 최근 10년 평균과 비슷하거나 낮았으나, 하반기에는 최근 10년 평균보다 높았다. 옹스트롬 지수는 연중 큰 변동이 없었으나, 3, 5월에 가장 낮고, 8월에 가장 높았다.

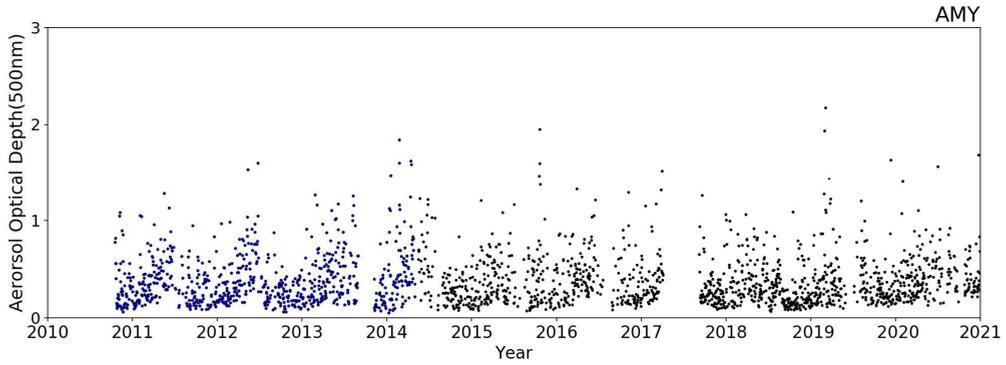


그림 6.3.9 안면도의 AOD(2010~2020년).

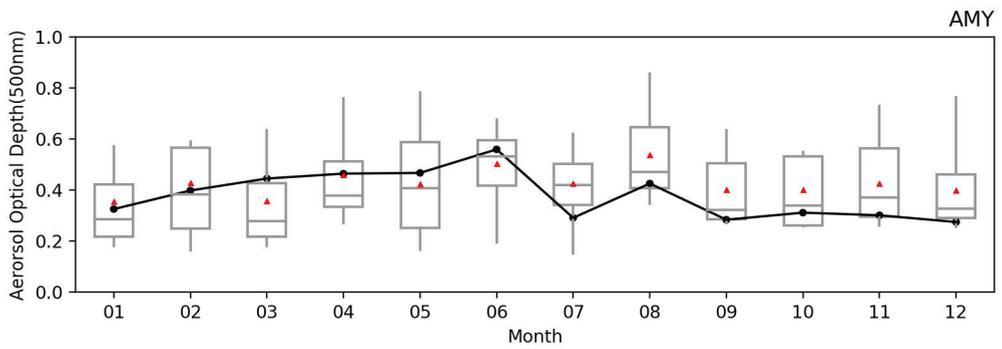


그림 6.3.10 2020년 안면도 AOD 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균, 2020년 10월 유효자료일수 9일)와 2010~2019년 평균(점-선).

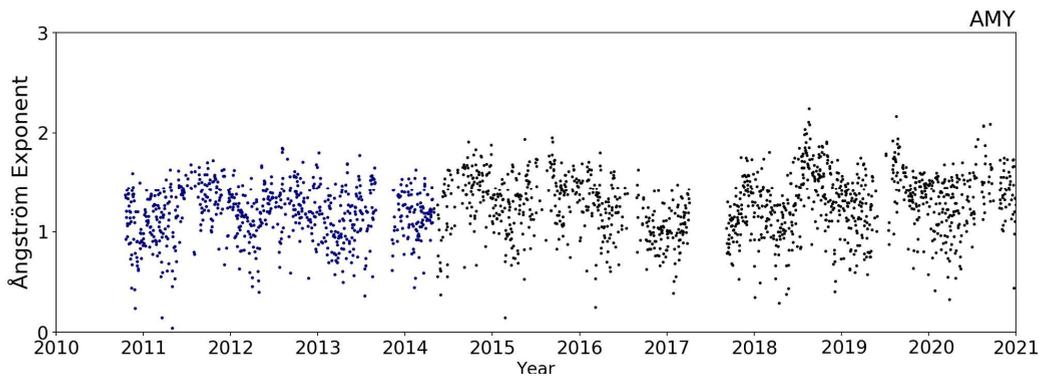


그림 6.3.11 안면도 에어로졸 옹스트롬 지수(2010~2020년).

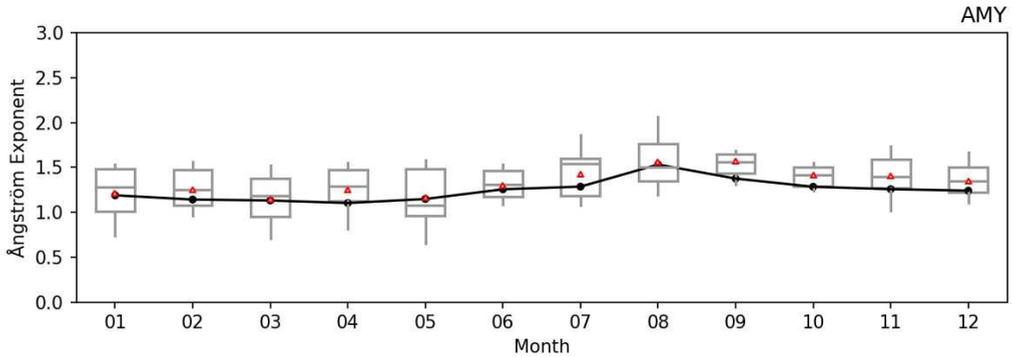


그림 6.3.12 2020년 안면도의 에어로졸 옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균, 2020년 10월 유효자료일수 9일)와 2010~2019년 평균(점-선).

그림 6.3.13과 그림 6.3.14에는 안면도에서 정밀필터복사와 유사한 원리로 관측하는 태양광도계로부터 2020년에 관측한 500 nm에서 AOD와 옹스트롬지수의 월변화를 나타내었다. 태양광도계로 관측한 결과는 정밀필터복사계(그림 6.3.10, 그림 6.3.12)와 유사한 계절 변화를 나타내고 있다. 2019년 11월부터 2020년 2월 4일 이전에는 기기교정을 위해 NASA로 반출하여 관측이 이루어지지 않았다. 한편, 정밀필터복사계와 상호 비교한 그림 6.3.15에서 두 장비의 AOD는 거의 유사하나, 정밀필터복사계의 옹스트롬지수는 태양광도계에 비해 약 5% 가량 크게 산출되었다. 이는 각 기기별로 사용 파장대가 달라 직접적인 비교에는 한계가 있다.

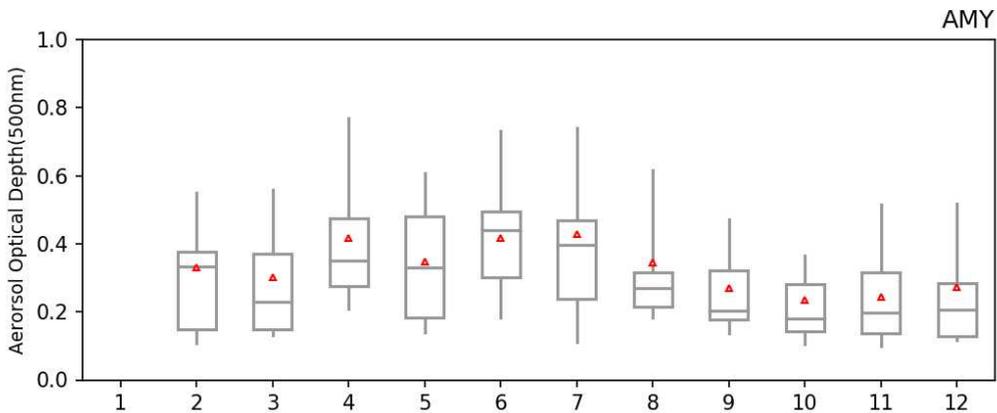


그림 6.3.13 2020년 태양광도계로 산출한 안면도의 AOD 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균).

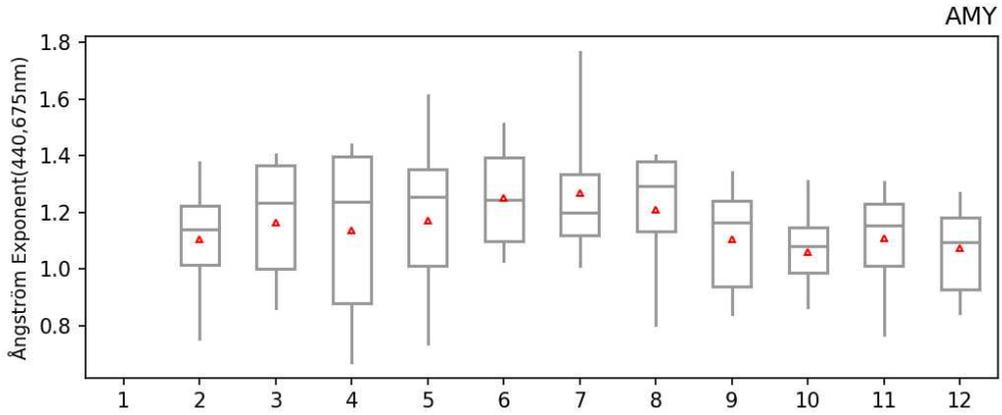


그림 6.3.14 2020년 태양광도계로 산출한 안면도의 옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균).

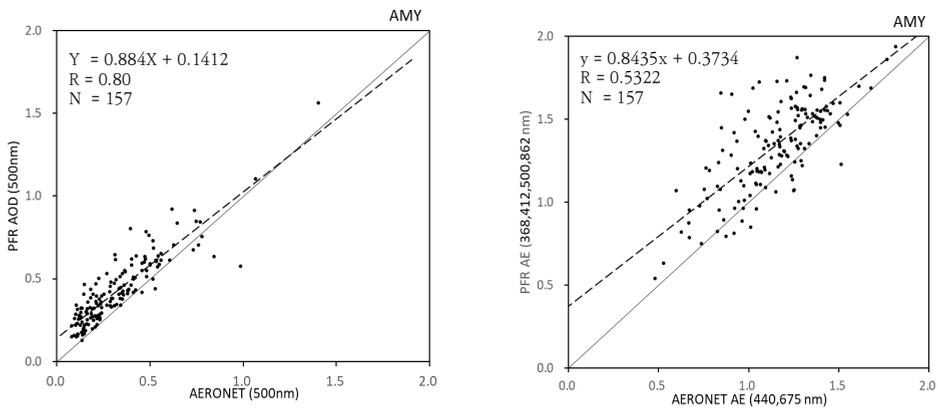


그림 6.3.15 2020년 태양광도계와 정밀필터복사계로 안면도에서 산출한 AOD(좌)와 옹스트롬 지수(우)의 비교.



그림 6.3.16은 2011년부터 2020년까지 고산에서 관측한 500 nm에서의 AOD를 보여주며, 그림 6.3.17은 2020년에 고산에서 관측한 AOD의 월변동성을 나타낸 것이다. 2020년에는 4월을 제외한 모든 달에서 최근 9년(2011~2019년) 평균보다 AOD가 낮게 나타났다. 또한 2020년 평년 대비 AOD가 낮고, 용스트롬 지수가 상승한 것은 큰 입자보다는 작은 입자의 영향을 나타낸다.

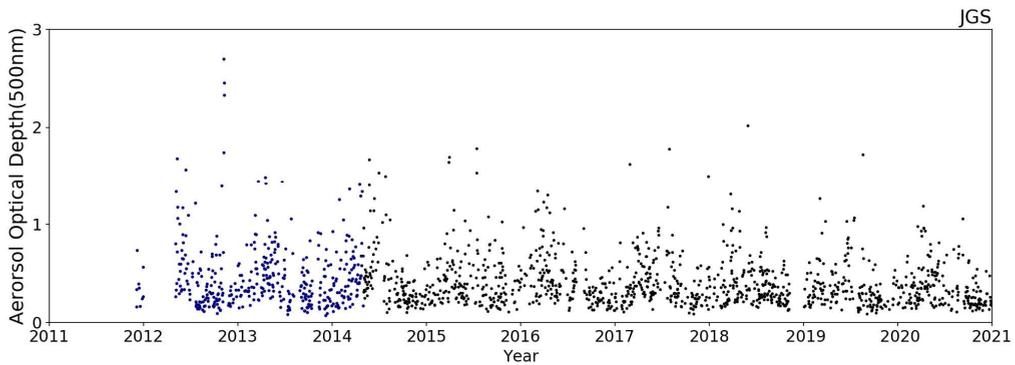


그림 6.3.16 고산의 AOD(2010~2020년).

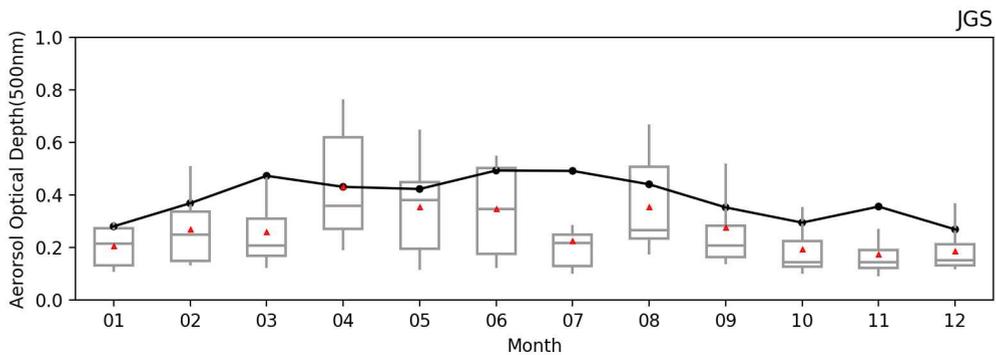


그림 6.3.17 2020년 고산의 AOD 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2019년 평균(점-선).

그림 6.3.18과 그림 6.3.19는 고산에서 관측한 2011~2020년 일변화와 월변화의 옹스트롬 지수이다. 옹스트롬 지수는 대체로 겨울 및 봄철에 낮고 여름, 가을에는 높았다. 고산의 최근 9년(2011~2019년) 평균 AOD 및 옹스트롬 지수가 안면도와 유사하게 나타났으며, 상반기에는 황사와 같은 조대입자의 영향, 하반기에 갈수록 상대적으로 미세입자의 영향을 받은 것으로 사료된다.

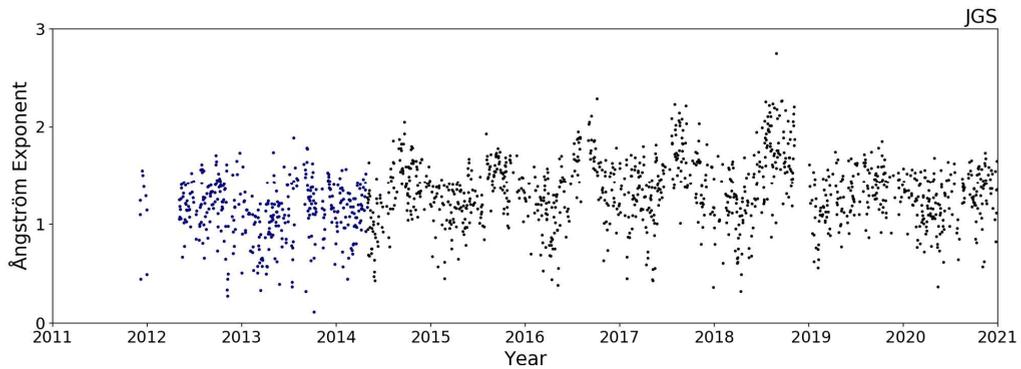


그림 6.3.18 고산의 에어로졸 옹스트롬 지수(2011~2020년).

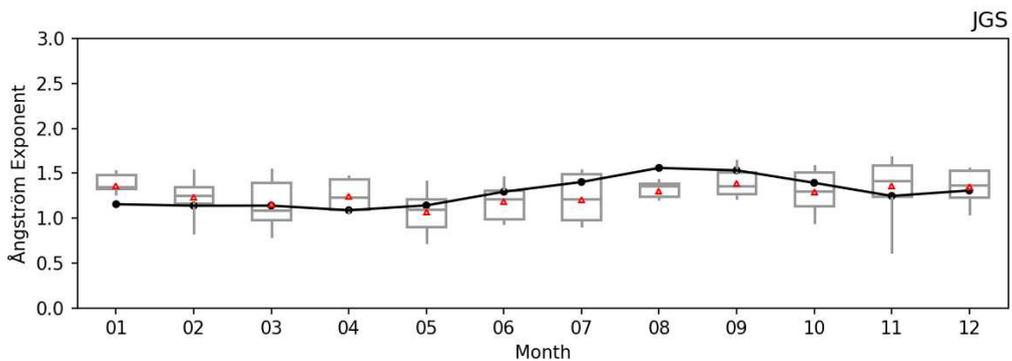


그림 6.3.19 2020년 고산(JGS)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2019년 평균(점-선).



그림 6.3.20과 6.3.22는 울릉도의 2011년부터 2020년까지의 500 nm에서의 AOD와 옹스트롬 지수를 보여주고 있으며, 그림 6.3.21과 6.3.23은 AOD와 옹스트롬 지수의 월변동성을 나타내고 있다. 상반기 봄철을 중심으로 AOD가 높았으며 그 중 4월에 가장 높았다. 이후 하반기에는 낮은 AOD를 나타내고 있으며 9월이 가장 낮았다. 옹스트롬 지수는 AOD가 가장 높은 4월에 최대였으며, 미세먼지의 영향을 상대적으로 많이 받았을 것으로 추정할 수 있다.

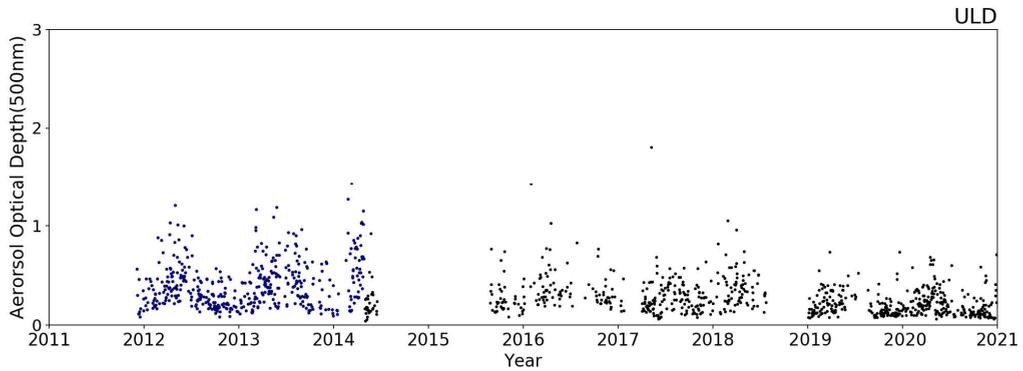


그림 6.3.20 울릉도의 AOD(2011~2020년).

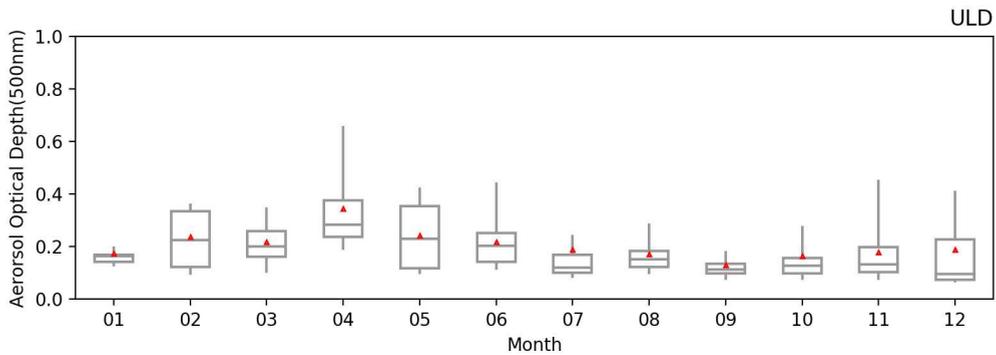


그림 6.3.21 2020년 울릉도의 AOD 월변화월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균).

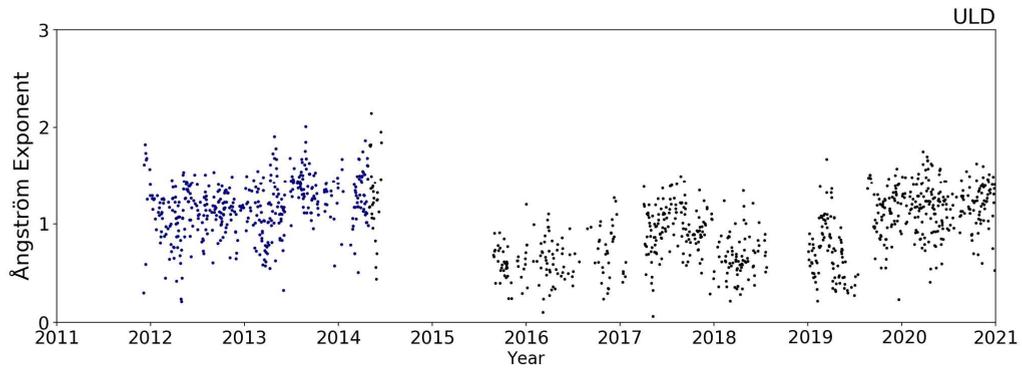


그림 6.3.22 울릉도의 에어로졸 옹스트롬 지수(2011~2020년).

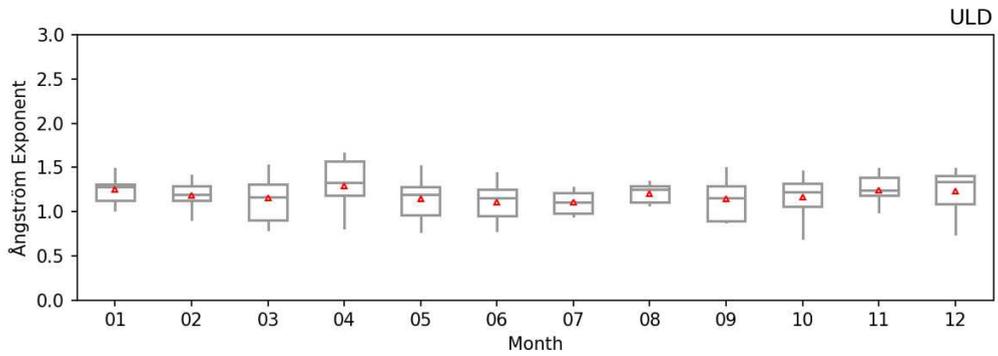


그림 6.3.23 2020년 울릉도(ULD)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균).



나. 광주(광주과학기술원) 위탁관측소

광주(광주과학기술원) 위탁관측소는 광주광역시 북구에 위치하며 광주과학기술원 내의 다산빌딩 건물 옥상(35.22828°N, 126.84314°E)에서 CIMEL 社の Multiband photometer CE318-N을 이용하여 에어로졸 광학깊이(Aerosol Optical Depth; AOD)를 산출하고 있다. 측정 기간과 파장은 2004년부터 2011년까지 4개의 파장(440, 675, 870, 1020 nm), 2011년부터 현재까지 8개의 파장(340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640 nm)으로 AOD를 산출하고 있다. 2019년 4월에 측정이 중단되었으나, 최근 2019년 10월부터 2020년 1월까지 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 Calibration을 수행하였으며 장비점검 및 보수 후 2020년 11월부터 다시 측정을 진행하고 있다. 측정된 정보는 NASA의 Aerosol robotic network(AERONET)에 전송되어 알고리즘을 통하여 Level 1.0, 1.5, 2.0의 AOD값으로 제공되고 있다.

그림 6.3.24은 2004년부터 2020년까지 광주 위탁관측소에서 관측한 440 nm에서의 AOD 값을 나타내고 있다. 2004년부터 2019년까지는 Level 2.0 값을 이용하였고, 2020년은 Level 1.5 값을 이용하여 나타내었다. 모든 데이터는 AERONET에서 산출한 AOD값을 이용하여 분석을 진행하였다.

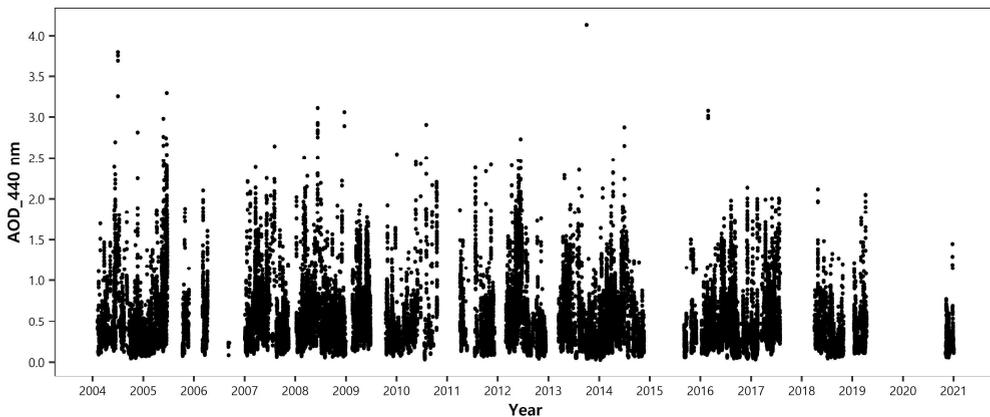


그림 6.3.24 2004~2020년 광주의 AOD(440 nm).

그림 6.3.25와 그림 6.3.27(a)는 2004년부터 2020년까지 광주의 440 nm에서의 AOD의 연도별 분포와 연도별 평균값 및 표준편차를 나타내고 있다. 측정 기간 중 기기교정 및 점검을 위해 측정이 이루어지지 않았던 기간을 고려하여 연도별 분포 및 평균값을 비교하였을 때 AOD의 값이 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 해들 거듭할수록 에어로졸의 영향이 점차 줄어들었음을 암시하고 있다.

그림 6.3.26와 그림 6.3.27(b)는 2004년부터 2020년까지 광주의 440 nm에서의 AOD의 월별분포와 월별 평균값 및 표준편차를 나타내고 있다. 연도별 분포 비교와 마찬가지로 측정이 이루어지지 않았던 기간을 고려하여 월별분포 및 평균값을 비교하였을 때 상반기(1~6월)가 하반기(7~12월)보다 높은 AOD의 값을 나타내었다. 이는 봄철에 있는 황사 및 미세먼지의 영향이 작용한 것으로 사료된다.

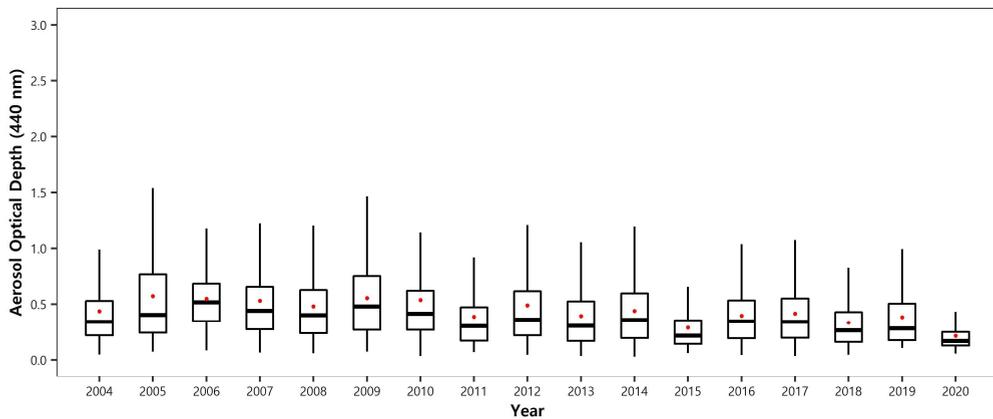


그림 6.3.25 2004~2020년 광주의 AOD(440 nm)의 연도별 분포(상자의 양 끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간 점은 평균값).

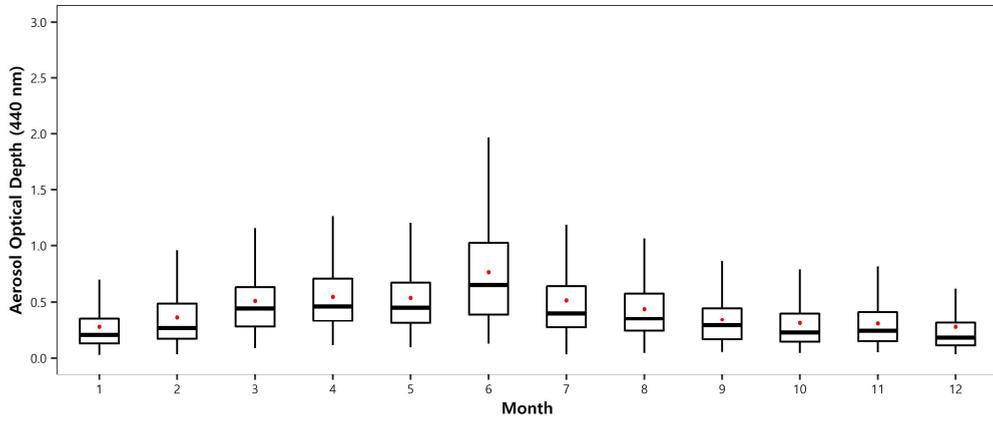


그림 6.3.26 2004~2020년 광주의 AOD(440 nm)의 월별분포(상자의 양 끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간 점은 평균값).

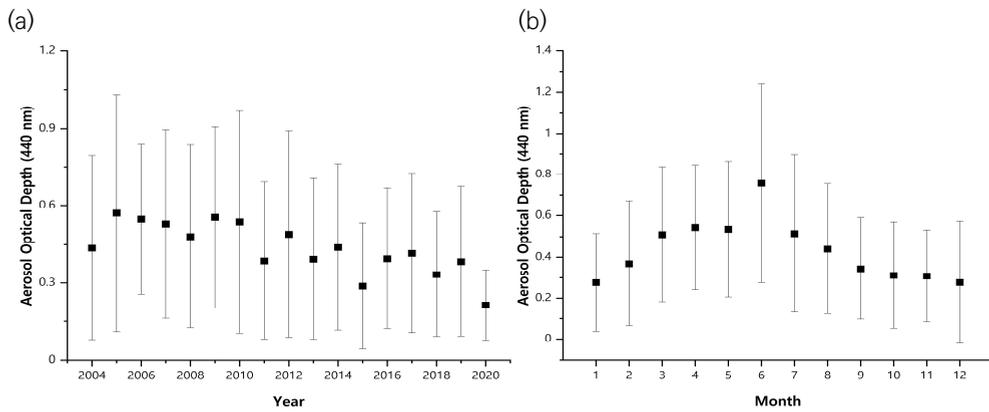


그림 6.3.27 2004~2020년 광주의 AOD(440 nm)의 (a) 연도별 평균값 및 표준편차, (b) 월별 평균값 및 표준편차.

6.3.4 에어로졸 연직분포

대기 중 부유물질의 연직 광학특성을 감시하기 위하여 안면도 기후변화감시소에서 에어로졸 라이다(Light Detection and Ranging; LIDAR)를 운영하고 있다. 에어로졸 라이다는 강수 시나, 정기 점검 또는 장애 시에도 관측을 중단하여 2020년의 자료 취득률은 약 83% 수준이다.

그림 6.3.28과 그림 6.3.29은 각각 2020년 안면도 에어로졸 라이다 원시자료로부터 생산한 후방산란신호, 편광소멸도의 연직 일평균 시계열이다. 후방산란신호는 대기 중에 부유물질이 많거나 구름이 있을 경우 큰 값으로 관측된다. 2020년 후반기에 지표부근(1 km 이하)에서 상대적으로 강한 신호가 관측되었다. 2020년 전반적으로 강한 신호가 나타나는 고농도 사례가 거의 없었다. 편광소멸도는 산출결과 자료해석이 어려워 7월부터 12월까지 자료를 보고서에 제시하였다.

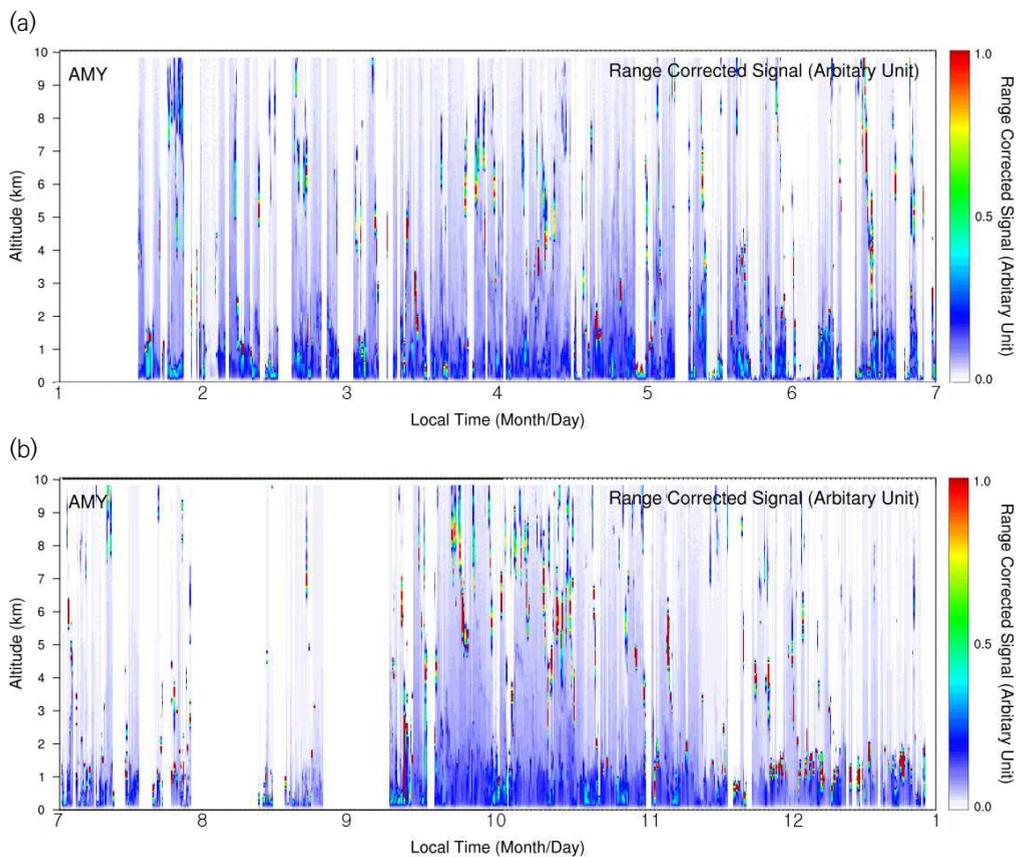


그림 6.3.28 2020년 안면도 에어로졸 라이다 후방산란강도((a) 상반기, (b) 하반기).

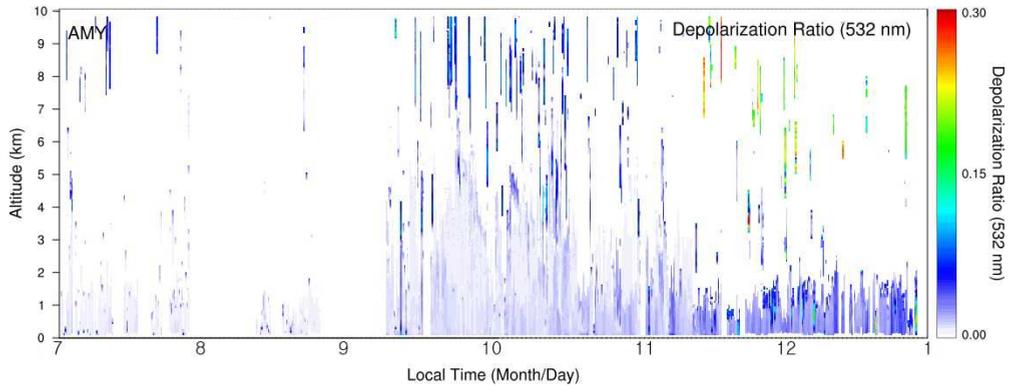


그림 6.3.29 2020년 안면도 에어로졸 라이더다 편광소멸도(7~12월).

6.4 에어로졸 화학 특성

6.4.1. PM10, PM2.5 수용성 이온성분 특성

가. 2020년 특성

2020년 1월부터 2020년 12월까지 안면도에서 PM10, PM2.5 시료를 채취하여 수용성 이온 9종(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})을 분석하였다. 이러한 결과를 가지고 PM10, PM2.5 시료의 수용성 이온성분을 살펴보았으며, 안면도에서 측정된 PM10, PM2.5의 이온성분에 대한 농도는 그림 6.4.1~6.4.2와 같다. 우선 수용성 이온성분 중 nss- SO_4^{2-} 는 비해염(non-sea salt) SO_4^{2-} 의 농도로, $[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Na}^+] \times 0.251$ 의 식에 의해 SO_4^{2-} 총 농도에서 해염으로부터 유입된 SO_4^{2-} 의 농도를 뺀 결과이다. nss- Ca^{2+} 역시 비해염 Ca^{2+} 의 농도로 nss- SO_4^{2-} 과 유사하게 $[\text{nss-Ca}^{2+}] = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Na}^+] \times 0.04$ 의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho et al, 2003).

PM10에서 일별 농도와 조성비는 그림 6.4.1, PM2.5의 일별 농도와 조성비는 그림 6.4.2에 나타내었다. 우리나라 대기환경권고기준이 연평균 PM10 질량농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2020년도 안면도에서 채취한 PM10 중 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 이온의 총합이 높은 시료는 없으나, $40\sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 이온의 총 농도값을 보인 자료는 2개(1월 2일, 2월 1일)의 시료이다. 또한 $35\sim 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 이온의 총 농도값을 보인 자료는 3개(2월 21일, 3월 17일, 12월 23일)로 총 5개(빨간 화살표)의 시료의 기상 현상을 확인해본 결과 연무와 박무현상이 발생하였고, 특히, 이 기간의 시료들은 모두 NO_3^- 성분이 다른 성분에 비해 높은 농도와 조성비를 보였다.

PM2.5의 일별농도 중 붉은색 화살표 표시된 자료는 PM10처럼 연무와 박무 현상 시 총 이온 농도의 합이 증가하였다. 또한, 대체로 1~4월까지는 NO_3^- 성분이 다른 성분에 비해 높은 농도와 조성비를 보였으나 5~10월은 nss- SO_4^{2-} 성분이 높은 값을 보였다. 이는 NO_3^- 성분은 연무의 영향에 의해 높고, nss- SO_4^{2-} 성분은 광화학반응에 의해 농도가 증가한 것으로 판단된다.

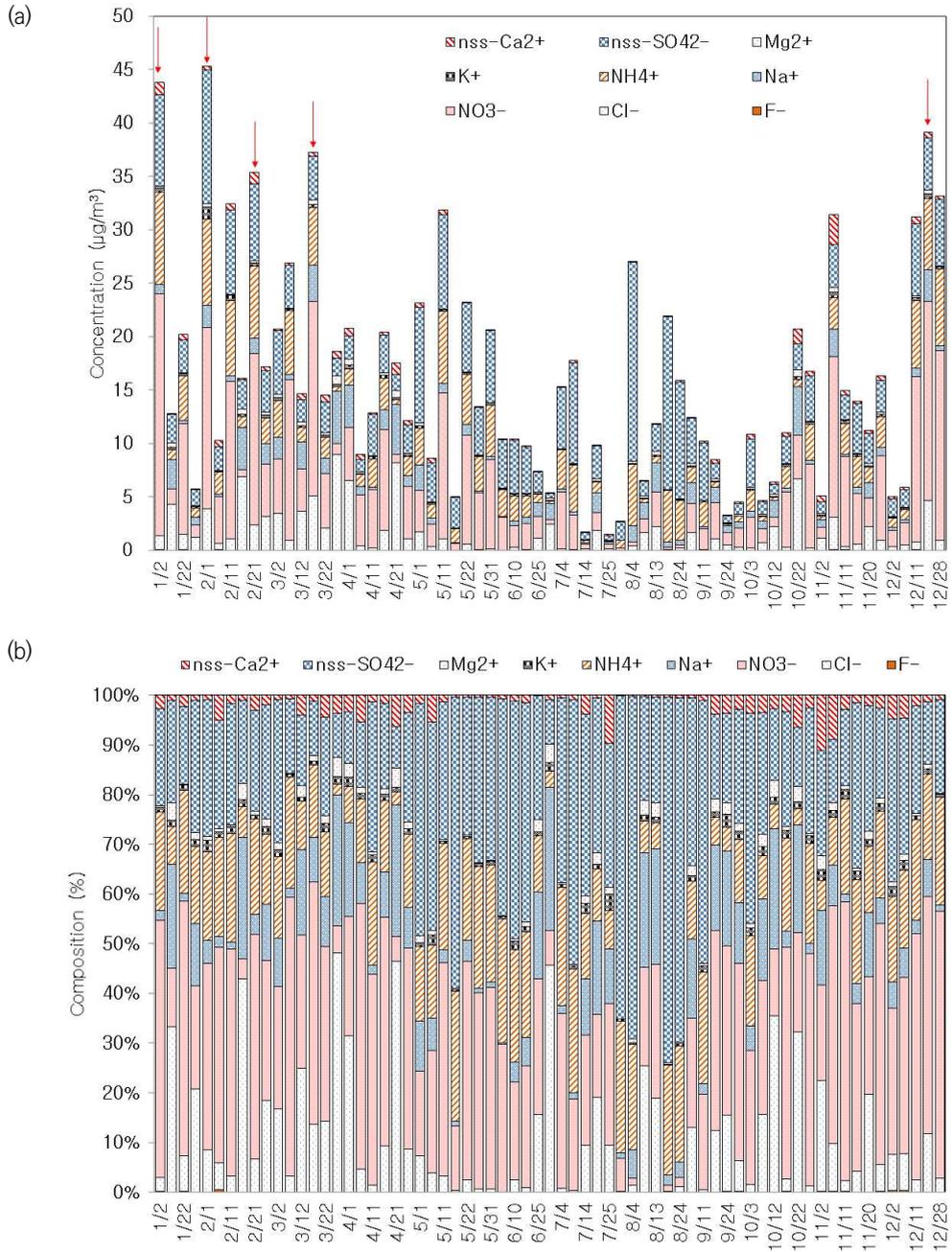


그림 6.4.1 안면도 2020년 PM10 수용성 이온성분의 (a) 농도, (b) 조성.

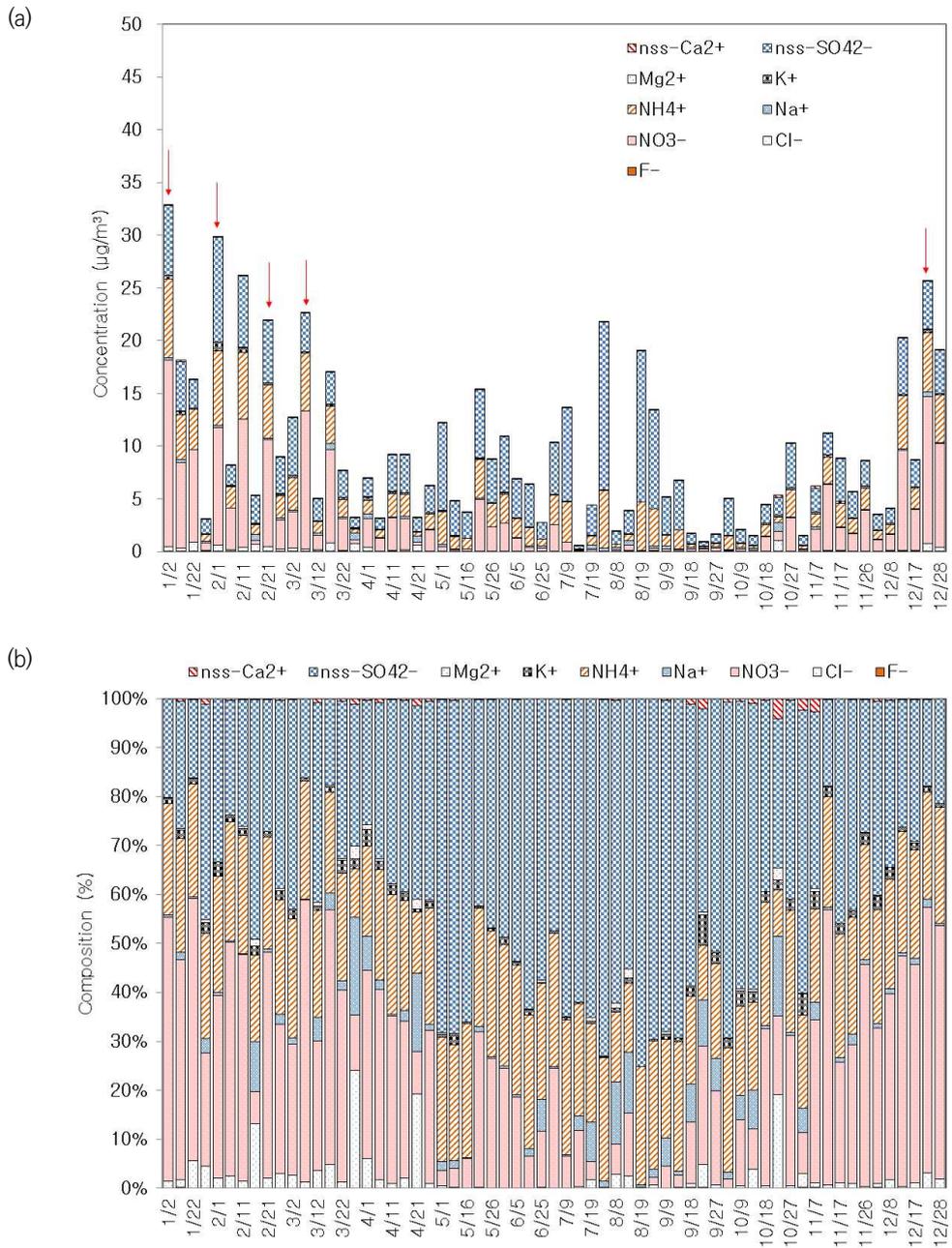


그림 6.4.2 안면도 2020년 PM_{2.5} 수용성 이온성분의 (a) 농도, (b) 조성.



나. PM10, PM2.5 수용성 이온성분 연평균 농도

안면도에서 측정한 PM10, PM2.5의 이온성분에 대한 전체 기간(2008~2020년)까지 총 13년간의 자료를 그림 6.4.3~6.4.4에 나타내었다. 이 중 2010년부터 2019년까지를 최근 10년 평균자료와 2020년 자료를 비교하였다.

PM10에서 이차오염물질들(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)중 nss-SO_4^{2-} 이 최근 10년간 평균농도는 $6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년은 $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균농도보다 약 1.4배 정도 낮은 값을 보였다. NO_3^- 의 농도를 보면, 최근 10년 평균과 2020년도는 각각 7.3 , $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NH_4^+ 성분은 각각 3.3 , $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 최근 10년 평균농도보다 이차오염물질들은 낮은 값을 보였다. 연도별로는 2014년도에 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분, 2008년도는 NO_3^- 성분이 높은 농도를 보였다. 반면에 상대적으로 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- 은 2020년, NH_4^+ 은 2016년에 낮은 경향을 보였다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 최근 10년간 평균 $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년은 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균농도보다는 1.7배 낮았다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 상대적으로 2018년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외의 Cl 성분은 최근 10년간 평균보다 약간 높은 농도 보였으나 나머지 성분은 최근 10년보다 낮은 농도를 보였다(그림 6.4.3(a)). 연도별 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과(그림 6.4.3(b)), 이차오염물질들(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)의 연도별 조성범위는 65.1%~86.0%이며, 2014년이 가장 높고, 2008년이 가장 낮은 조성비를 보였다. 최근 10년간과 2020년의 이차오염물질의 평균조성비는 각각 82.2%, 77.3%로 나타났다. 반면에 해양기원의 성분들(Na^+ , Cl^- , Mg^{2+})은 연도별 조성범위는 9.6%~27.4%이며, 이차오염물질과는 반대로 2008년이 가장 높고, 2014년이 가장 낮은 조성비를 보였다. 토양기원의 nss-Ca^{2+} 성분은 대체적은 1.3%~4.7%를 보였다.

PM2.5에서 이차오염물질들(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)중 nss-SO_4^{2-} 이 최근 10년 평균은 $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년은 $3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간의 자료가 약 1.4배 높은 농도를 보였다. 연도별로는 2011년이 가장 높고, 상대적으로 2012년에 낮은 경향을 보였다. NO_3^- 의 농도를 보면, 최근 10년 평균농도가 $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년은 $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균농도의 약 1.7배정도 높았다. 연도별로는 2008년에 가장 높고, 2017년에 가장 낮았다. NH_4^+ 성분은 최근 10년간의 평균농도와 2020년은 각각 3.1 , $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균농도보다 낮은 값을 보였다. 연도별로는 2014년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 경향을 보였다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 최근 10년간의 평균농도와 2020년은 각각 0.3 , $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균농도의 약 7.0배 낮았다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 상대적으로 2019년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외의 성분은 2020년 Na^+ , Cl^- , K^+ , F^- , Mg^{2+} 성분이 최근 10년 평균농도보다 낮은 값을 보였다(그림 6.4.4(a)). 연도별 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과(그림 6.4.4(b)), 연도별 이차오염물질들(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)의 조성범위는 73.0%~95.6%이며, 2019년이 가장 높고, 2008년이

가장 낮은 조성비를 보였다. 최근 10년과 2020년의 이차오염물질들의 조성비는 각각 91.4%, 94.3%로 나타났다. 반면에 해염기원 성분들(Na^+ , Cl^- , Mg^{2+})의 조성비는 2.8%~20.0%이며, 이차오염물질과는 반대로 2008년에 가장 높고, 2019년에 가장 낮았다. 토양기원의 nss-Ca^{2+} 성분은 0.2%~2.7%의 조성비를 보였다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 이온성분은 다른 성분들에 비해 이차오염물질들의 조성비가 다른 성분들에 비해 높은 것으로 확인되었다.

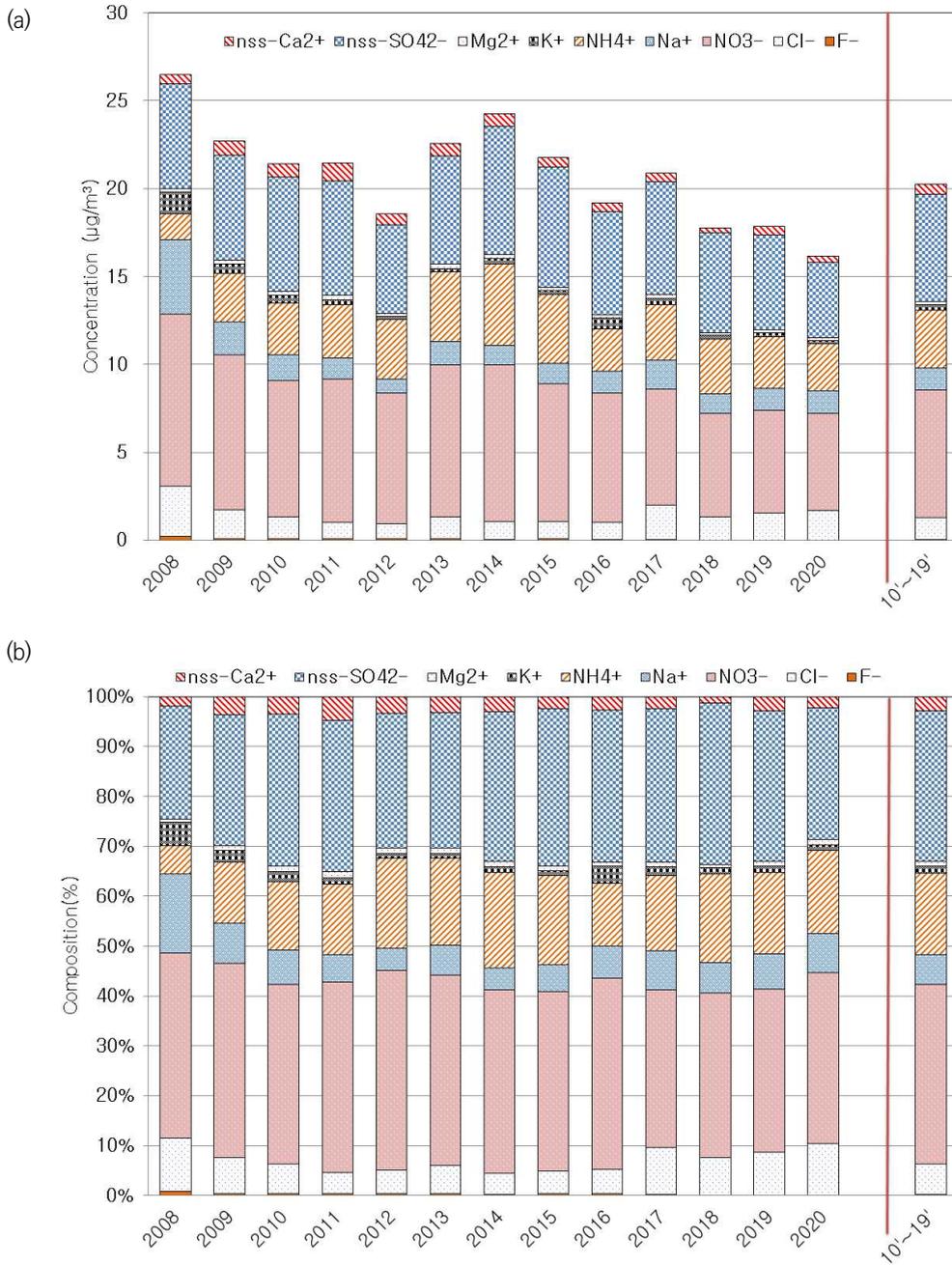


그림 6.4.3 2008~2020년도 안면도 PM10 수용성 이온성분의 연평균 (a) 농도, (b) 조성.

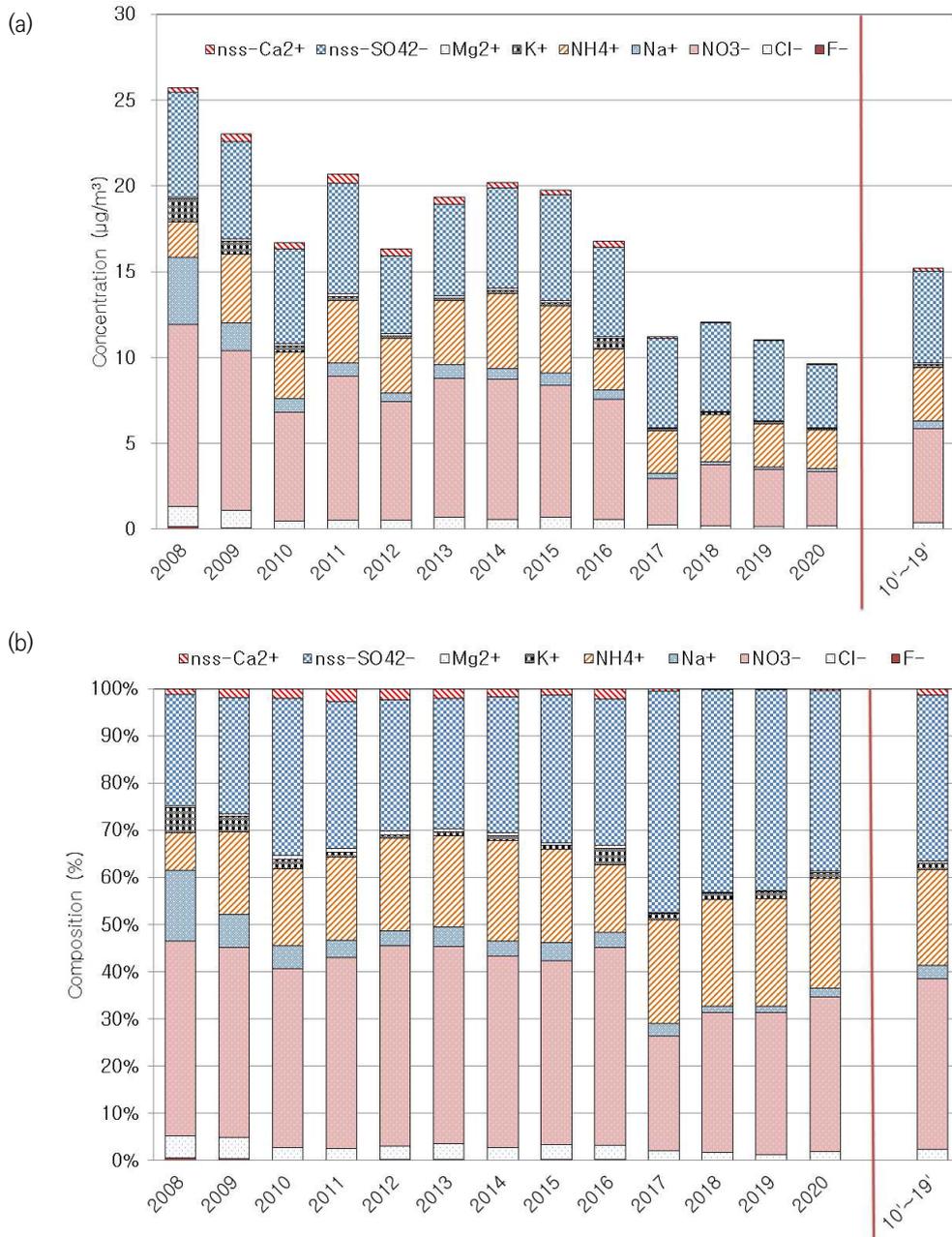


그림 6.4.4 2008~2020년도 안면도 PM2.5 수용성 이온성분의 연평균 (a) 농도, (b) 조성.



다. PM10, PM2.5 수용성 이온성분 계절별 농도

안면도에서 측정된 PM10, PM2.5의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 6.4.5~6.4.7과 같다. 여기서 PM10, PM2.5 이온성분의 계절별 평균농도는 2010년부터 2019년까지 최근 10년간 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해년도 1,2월의 데이터를 평균하였고, 당해년도 12월의 자료는 사용하지 않았다. 그림 6.4.5를 보면, PM10은 여름철에, PM2.5는 가을철에 가장 낮은 이온성분의 농도합을 보였다. 또한 PM10, PM2.5 모두 겨울철에 높은 농도합을 나타내었고, 특히 NO_3^- 성분에 대한 영향이 큰 것으로 확인되었다.

PM10에서 이차오염물질(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)의 최근 10년(2010~2019년)간과 2020년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 6.4.6(a)), nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분의 겨울, 봄, 여름, 가을철 농도범위는 각각 2.7~7.4, 1.7~9.0, 1.6~3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. nss-SO_4^{2-} 성분의 2020년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 5.3(n=14), 4.2(n=19), 5.4(n=16), 2.7(n=17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_3^- 의 2020년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 9.0(n=14), 6.5(n=19), 1.7(n=16), 4.3(n=17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NH_4^+ 의 2020년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 4.1(n=14), 2.9(n=19), 2.1(n=16), 1.6(n=17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 2020년에는 nss-SO_4^{2-} 성분은 여름철에 높은 농도를 보이며, NO_3^- , NH_4^+ 성분은 겨울철에 높은 것으로 조사되었다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 최근 10년간의 계절별 농도 범위는 0.3~0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년 계절별 농도 범위는 0.1~0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간은 봄철 2020년에는 가을철에 높은 농도를 보였다.

PM10의 이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과(그림 6.4.6(b)), 이차오염물질들(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 77.3%, 83.6%, 88.9%, 79.6%로, 여름철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다. 또한, 2020년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 78.6%, 73.2%, 83.8%, 72.4%로, 여름철에 가장 높고, 상대적으로 가을에 낮은 경향을 나타내었다. 그리고 해염기원 성분들 성분(Na^+ , Cl^- , Mg^{2+})들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 17.7%, 11.4%, 8.0%, 15.1%를 보였고, 2020년의 계절별 조성비는 각각 18.3%, 23.6%, 14.8%, 21.9%로 나타나, 오히려 겨울, 가을철이 높은 농도를 보인 것으로 조사되었다. 마지막으로 토양기원의 nss-Ca^{2+} 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 2.8%, 3.5%, 1.9%, 3.1%, 2020년 조성비는 1.7%, 2.1%, 0.7%, 4.1%를 보여 최근 10년간의 자료는 봄철이 높고, 2020년은 가을철이 높은 것으로 판단된다.

PM2.5에서 이차오염물질 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 최근 10년(2010~2019년)간과 2020년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 6.4.7(a)), 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도범위는 각각 2.2~6.2, 0.5~7.0, 1.1~3.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. nss-SO_4^{2-} 성분의 2020년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 4.5(n=15), 3.4(n=18), 5.8(n=12), 2.2(n=17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_3^- 의 2020년 겨울,

봄, 여름, 가을철은 각각 7.0(n=15), 2.9(n=18), 0.5(n=12), 1.4(n=17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NH_4^+ 의 2020년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 3.7(n=15), 2.1(n=18), 2.2(n=12), 1.1(n=17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. nss- SO_4^{2-} 성분은 여름에 높은 농도를 보이며, NO_3^- , NH_4^+ 성분은 겨울철에 높은 것으로 조사되었다. 토양성분인 nss- Ca^{2+} 은 최근 10년간과 2020년의 계절별 농도를 비교해 보면, 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.13~0.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2020년 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.02~0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년은 봄철에, 2020년에는 가을철에 가장 높았다. 특히 PM2.5에서 여름철 농도가 봄철보다 7월 초에 높은 농도를 보인 결과와 일치한다(그림 6.2.5 참조).

PM2.5의 이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과(그림 6.4.7(b)), 이차오염물질들(nss- SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 89.8%, 91.5%, 95.0%, 90.9%로, 여름철에 높은 경향을 나타내었다. 또한, 2020년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 94.8%, 93.3%, 97.0%, 91.9%로 나타내었다. 그리고 해양기원 성분들 성분(Na^+ , Cl^- , Mg^{2+})들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 7.5%, 5.7%, 3.2%, 5.5%를 보였고, 2020년의 계절별 조성비는 각각 3.5%, 5.2%, 2.5%, 5.1%로 나타내었다. 그리고 토양기원의 nss- Ca^{2+} 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 1.1%, 1.7%, 1.7%, 1.4%, 2020년 조성비는 0.2%, 0.3%, 0.1%, 0.8%를 보였다.

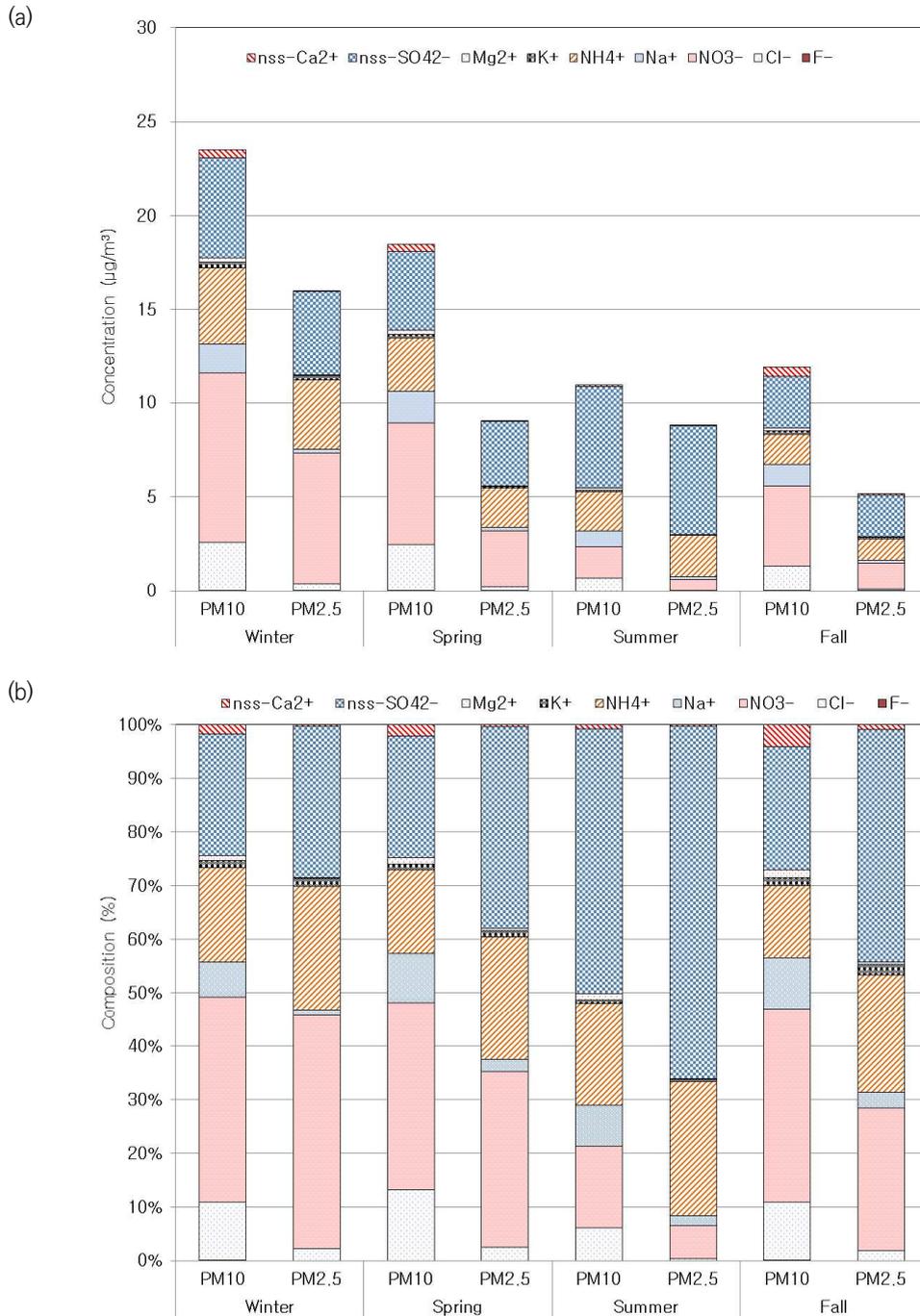


그림 6.4.5 안면도 2020년 PM10, PM2.5 이온성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성.

*Winter 인 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.

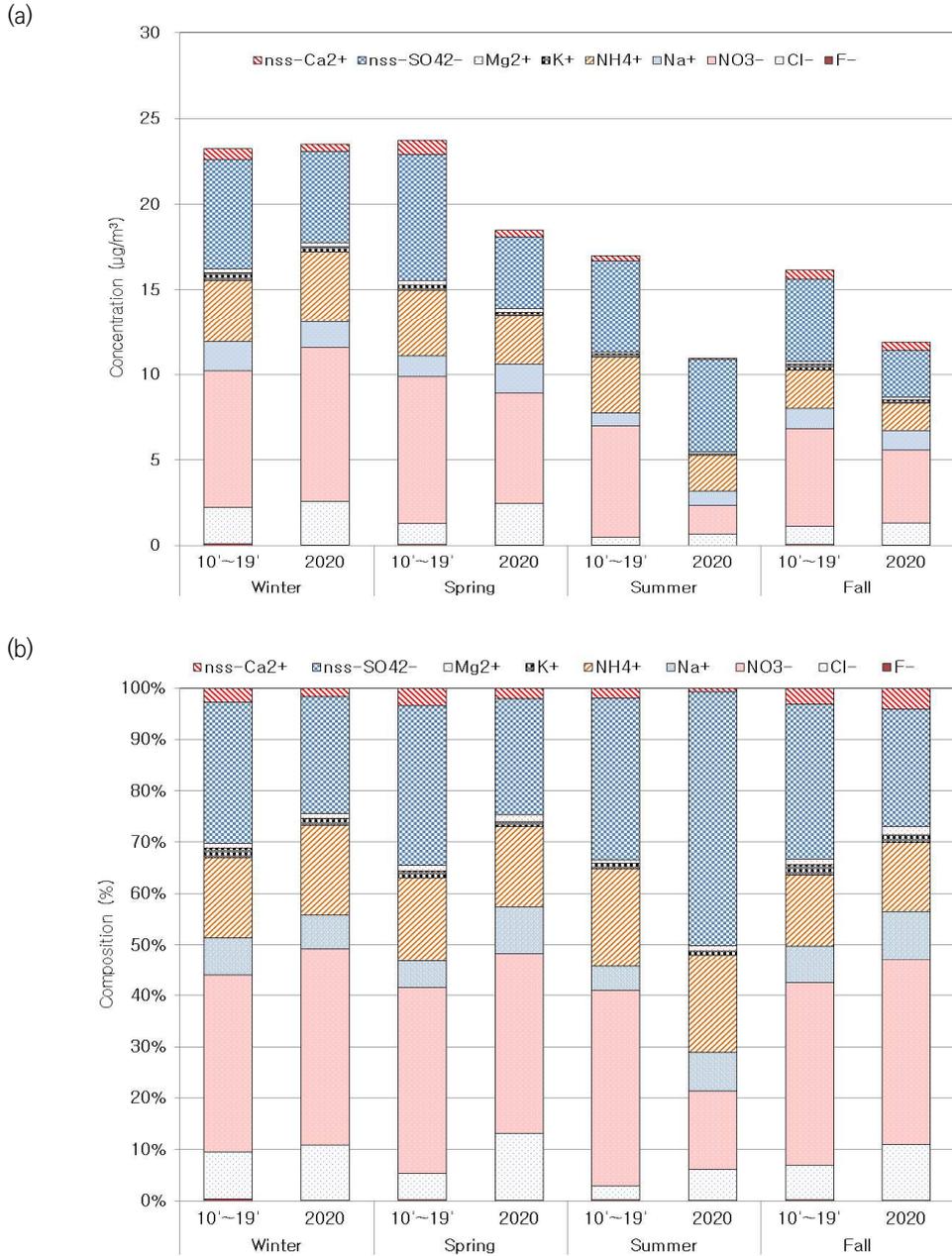


그림 6.4.6 안면도 최근 10년(2010~2019년)과 2020년 PM10 수용성 이온성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성.

*Winter 인 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.

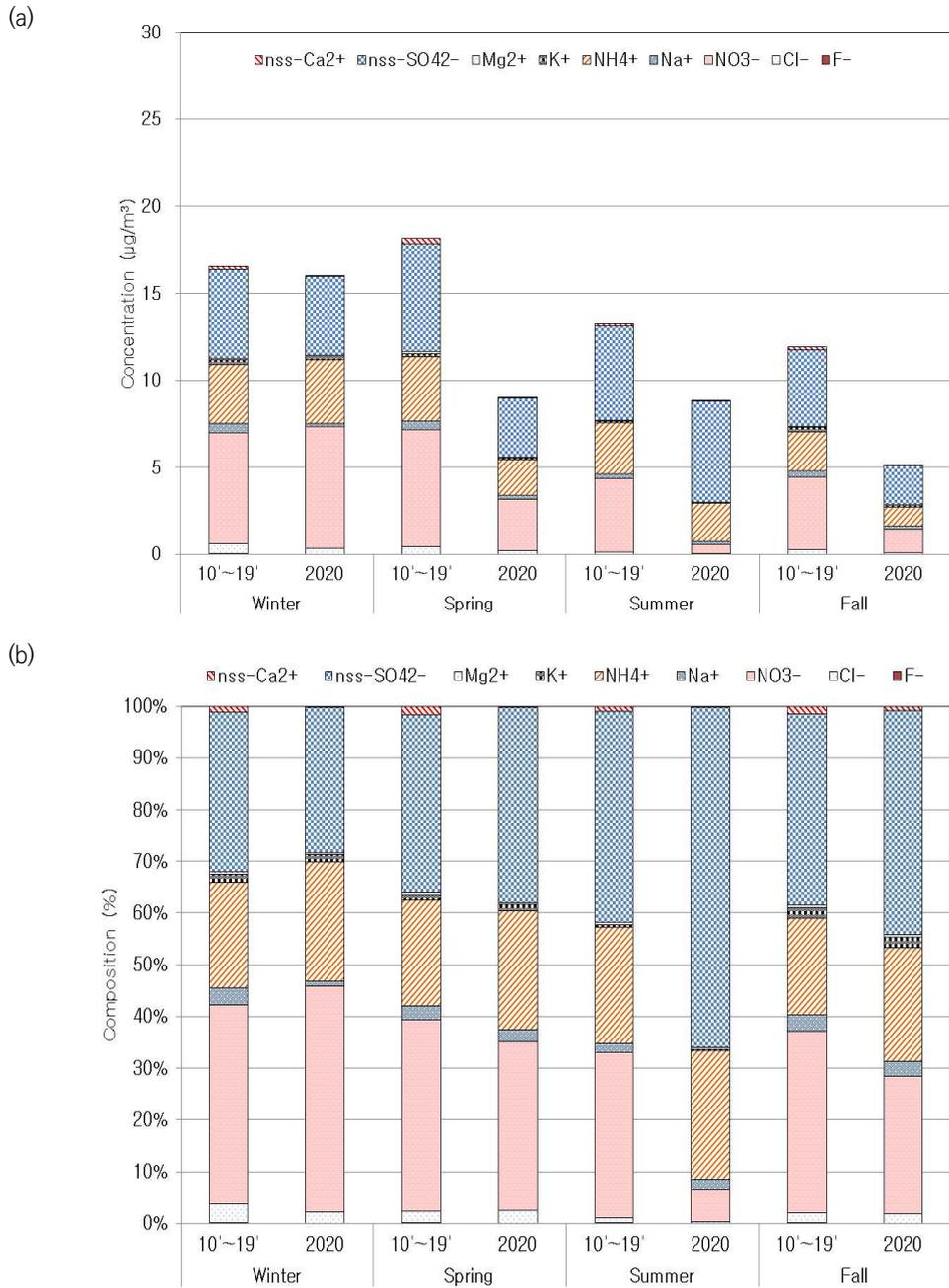


그림 6.4.7 안면도 최근 10년(2010~2019년)과 2020년 PM2.5 수용성 이온성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성.
*Winter 인 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.

6.4.2 PM10, PM2.5 원소성분 특성

2020년 1월부터 2020년 12월까지 안면도에서 PM10, PM2.5 시료를 채취하여 원소성분 13종(Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti, Mn, Zn, Cu, V, Cr, Co, Ni, Sr, Co, Ba, Pb, Mo)을 분석하였다. 이러한 결과를 가지고 PM10, PM2.5 원소성분의 연도 및 계절별 농도와 조성비는 그림 6.4.8~6.4.11과 같다.

그림 6.4.8은 2018년부터 2020년 약 3년간의 원소성분을 분석하여 연평균 자료로 나타내었다. 2018~2020년 PM10과 PM2.5 모두 S성분의 농도가 가장 높은 것으로 조사되었다. PM10과 PM2.5 모두 S, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na 성분의 조성비가 약 96.4%~98.0%를 차지하는 것으로 확인되었다. 특히 PM2.5에서 S의 조성비가 약 58.6%~68.2%를 차지하였다. PM10과 PM2.5의 계절별 원소성분을 그림 6.4.9에서 살펴보면, PM10, PM2.5 모두 S인 황성분이 가장 높은 농도를 보였다. PM10 원소성분 중 S 성분이 약 48.5%, PM2.5 원소성분 중 약 76.5%가 여름철에 높은 농도를 보였다. 특히 Al, Ca, Mg, Fe, Ti 등과 같은 토양에서 발생한 성분이 가을철에 높은 농도를 보여 이는 2020년 가을철에 발생한 황사의 영향으로 판단된다.

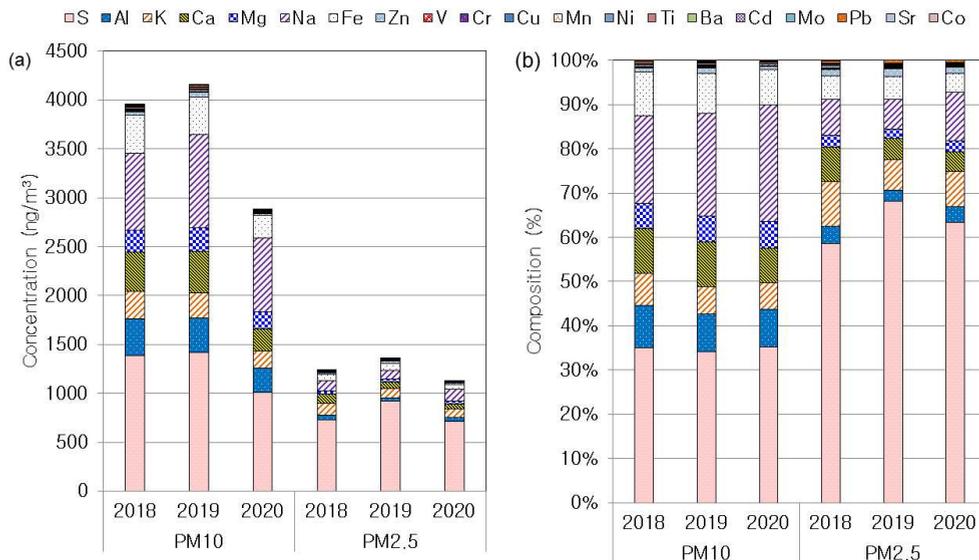
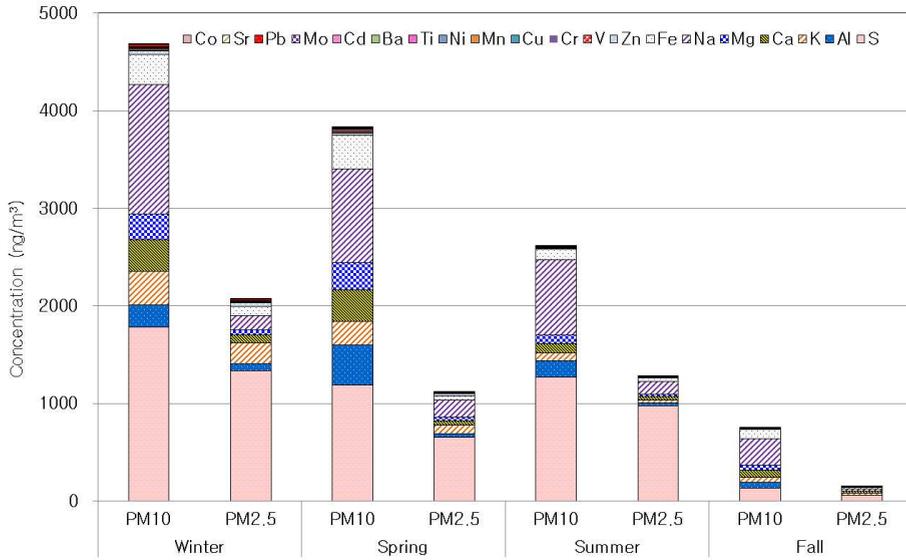


그림 6.4.8 2018~2020년 안면도에서 측정된 PM10, PM2.5 원소성분(a) 농도, (b) 조성.



(a)



(b)

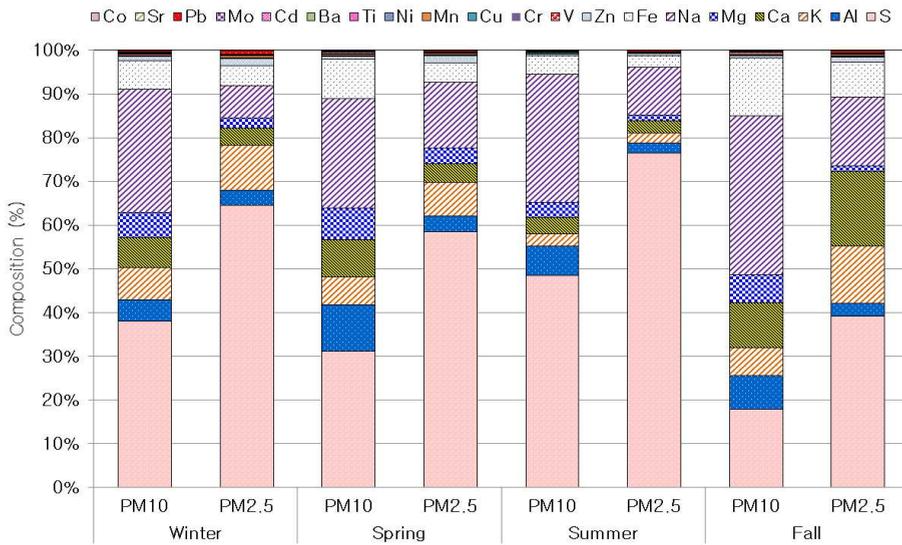
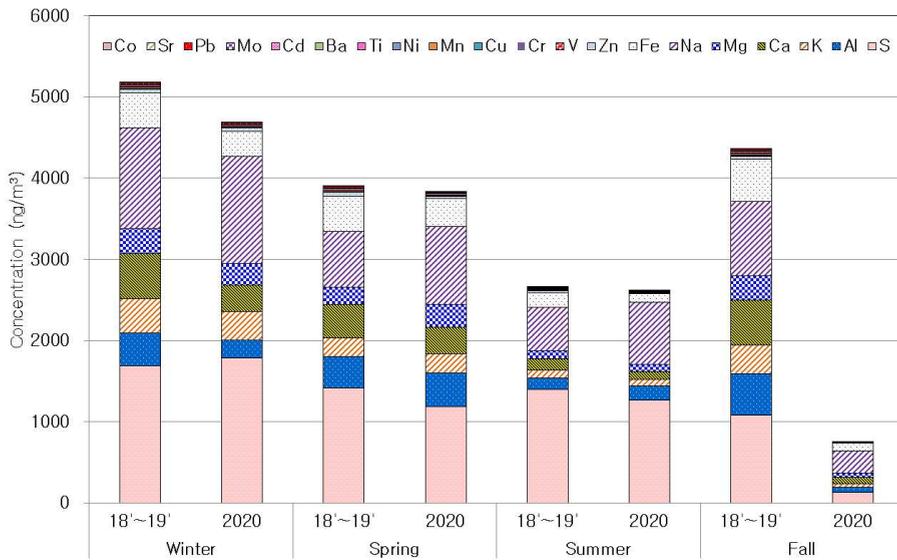


그림 6.4.9 안면도 2020년 PM10, PM2.5 원소성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성.

*Winter 인 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.

(a)



(b)

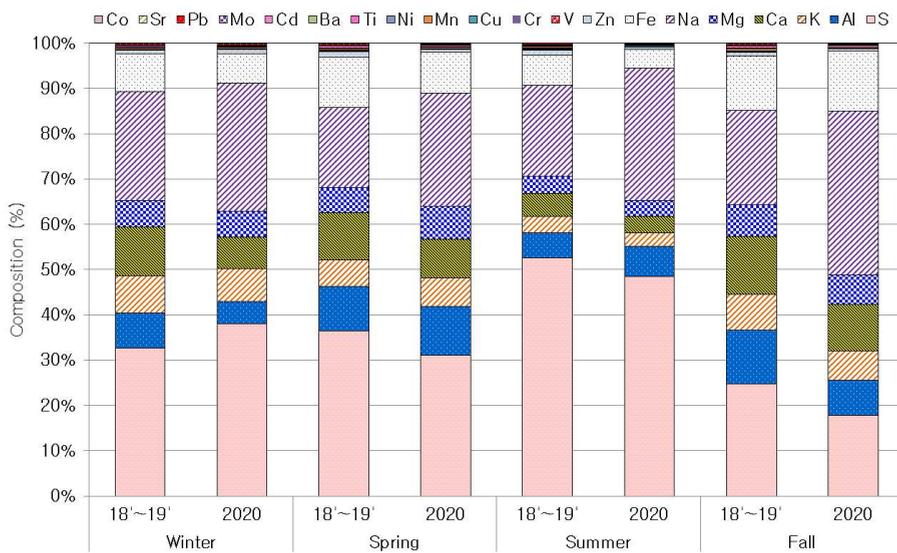
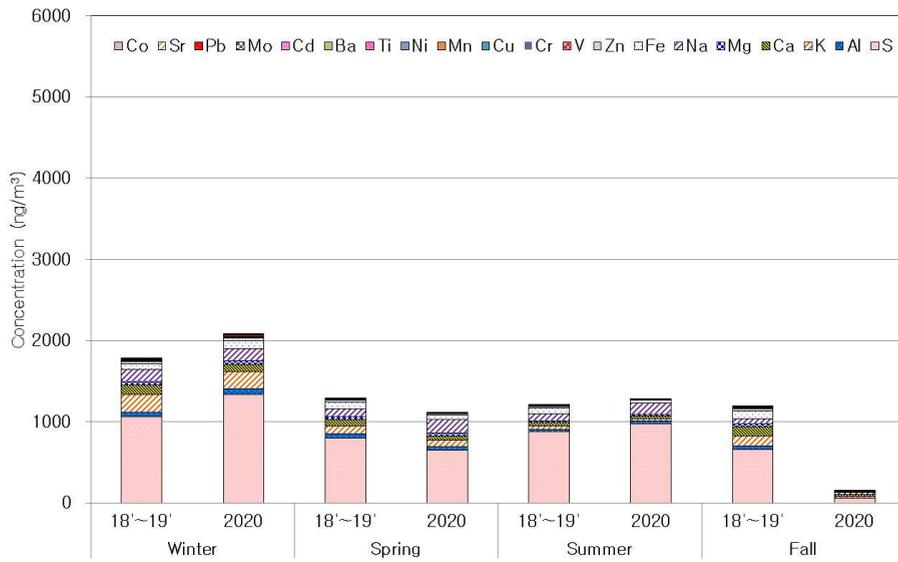


그림 6.4.10 안면도 2018~2020년 PM10 원소성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성.

*Winter 인 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.



(a)



(b)

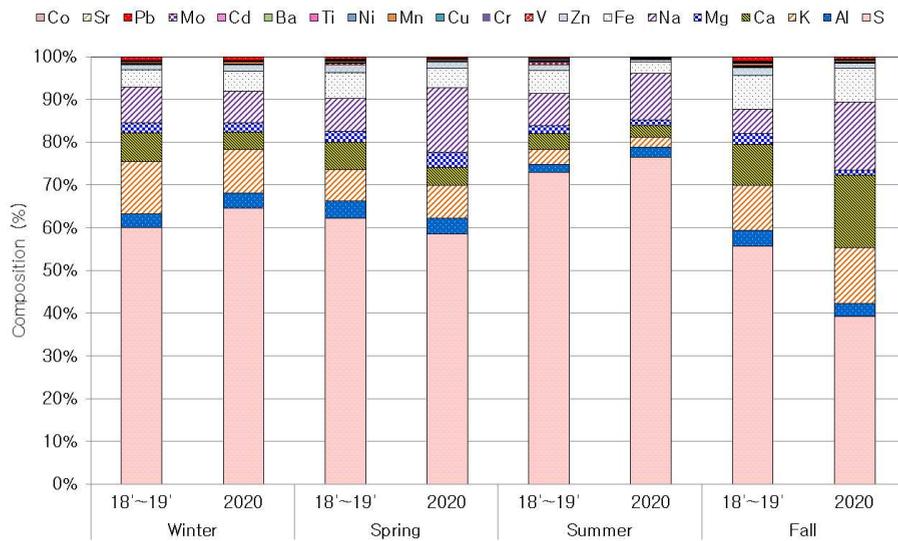


그림 6.4.11 안면도 2018~2020년 PM2.5 원소성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성.

*Winter 인 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.

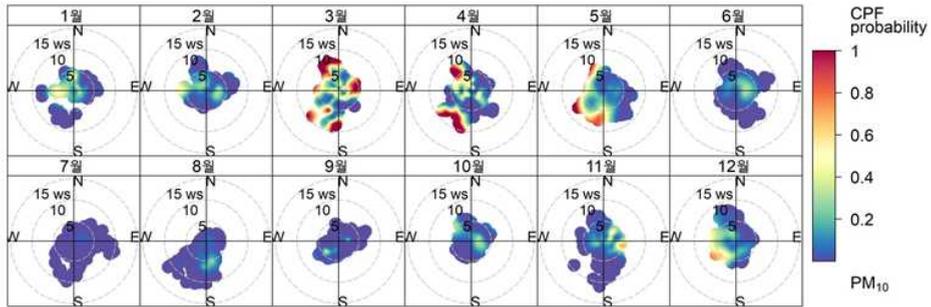
6.5 2020년 에어로졸 특성 분석

6.5.1 고농도 에어로졸

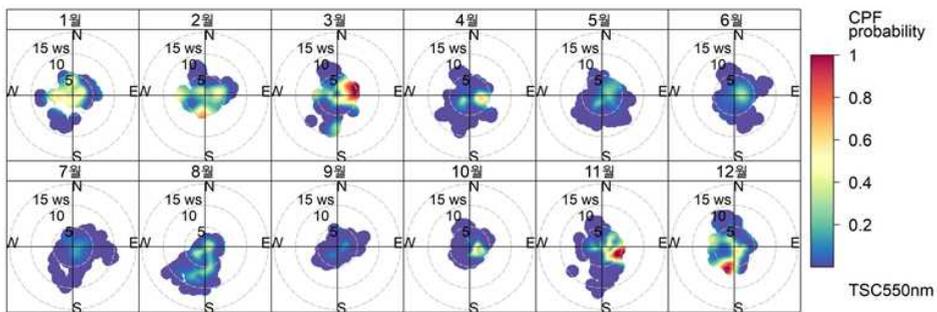
에어로졸 관측요소 중 PM10 질량농도, 광산란계수, 광흡수계수에 대하여 풍향, 풍속과의 관계로부터 고농도 오염 사례의 기원 가능성이 높은 방향을 보여주는 CBPF를 그림 6.5.1에 제시하였다. 각 요소의 2020년 자료 75 퍼센타일에 해당하는 값을 임계값으로 정하여 풍향, 풍속에 대해 그 이상의 값이 출현할 확률을 보여준다. PM10은 3~5월에 고농도 출현 빈도가 높았다. 3월에는 다양한 풍속과 풍향에서 PM10 고농도가 발생하였으며, 4월과 5월은 주로 서풍계열의 바람일 때 고농도가 관측되어 서해상을 통과한 장거리 오염물질(황사, 고농도 미세먼지 등)의 유입 가능성을 보여준다. 광산란계수와 광흡수계수의 고농도 출현 빈도는 비슷한 풍향 풍속 구간에서 나타났으며 대체로 풍속이 낮을 때 공기 정체로 인해 고농도 빈도가 높아졌다. 1~2월에는 시베리아 고기압이 약화되고 남풍기류의 유입이 잦아 기온이 높고 풍속이 낮은 경우가 많았는데, 풍속이 낮을 때 고농도 빈도가 높았다. 3~4월과 10~11월에는 동풍이 불 때 고농도 빈도가 높아 국내에서 기원한 에어로졸의 기여도가 높을 것으로 추정할 수 있다. 단, 8월에는 풍속이 낮거나 남풍이 불 때 고농도 광산란계수가 관측되었으나 광흡수계수는 그렇지 않았다. PM10 질량농도와 에어로졸 광학요소(광산란계수, 광흡수계수)의 고농도 출현 사례가 항상 일치하지는 않았으며, 이는 PM10 질량농도 증가에는 주로 조대입자가 기여하는 반면 광산란계수와 광흡수계수는 미세입자의 영향을 주로 받을 뿐 아니라 이들의 발생원이 서로 다르기 때문으로 생각된다.



(a) PM10 질량농도



(b) 광산란계수



(c) 광흡수계수

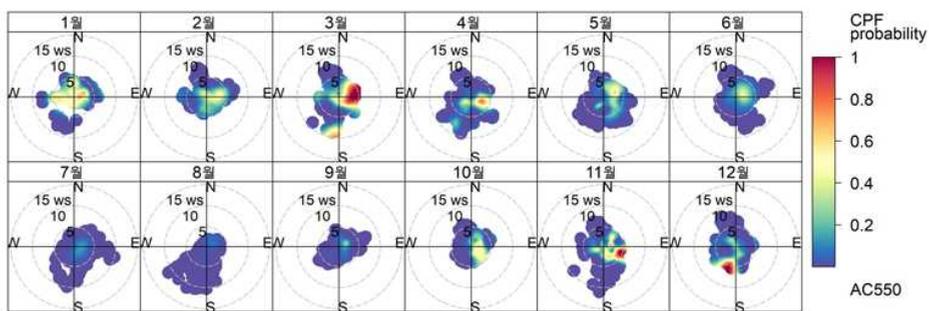


그림 6.5.1 2020년 안면도 월별 에어로졸 관측 요소의 고농도 확률 분포. (a) PM10 질량농도($>39 \mu\text{g}/\text{m}^3$), (b) 광산란계수($>97 \text{Mm}^{-1}$), (c) 광흡수계수($>11 \text{Mm}^{-1}$).

6.5.2 에어로졸 생성

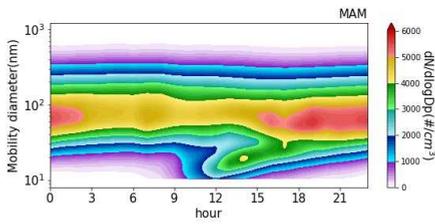
에어로졸은 건강뿐 아니라 기후에 영향을 주는 요소이다. 특히, 기후에 미치는 에어로졸의 효과는 물리 화학적 특성에 의해 결정되는데, 그중 가장 중요한 요소는 입자 크기 분포와 수농도이다. 입자 크기별 수농도 측정을 통해 에어로졸의 생성과 성장에 대한 정보를 얻을 수 있다. 2020년 안면도에서 관측된 미세입자 크기별 수농도 자료로부터 에어로졸의 생성과 성장 시기에 대해 분석하였다. 에어로졸은 일사량이 증가하여 광화학반응이 가능한 일출 이후부터 정오 사이에 빈번한 것으로 알려져 있다. 2020년 안면도의 미세입자 크기별 수농도 분포를 보면 계절별로 에어로졸 생성 시작시간이 다르며, 일출이 늦은 겨울철에는 평균적으로 정오 전후에 에어로졸이 주로 생성되기 시작하는 것을 알 수 있다(그림 6.5.2). 입자가 생성하기 시작하면 핵화모드(nucleation mode, $10 \text{ nm} < dp < 25 \text{ nm}$)의 수농도를 보면 계절별 입자 생성 시간 차이가 뚜렷한데, 여름에는 8시 무렵부터 핵화모드 농도가 증가하는 반면 겨울에는 정오 이후에 증가한다(그림 6.5.3). 또한 핵화모드 수농도는 가을철에 가장 높고, 여름과 겨울에 가장 낮다. 즉, 2020년 안면도 에어로졸 생성과 성장은 여름철과 겨울철에는 적고, 가을철에 가장 활발한 것으로 분석된다. 에어로졸 총수농도 역시 가을철에 가장 높고, 일변화도 뚜렷하였다(그림 6.5.4). 대기 중에 존재하는 에어로졸(pre-existing aerosol)의 농도가 높아지면, 에어로졸 전구물질(가스상)은 이들 입자들에 응축됨으로써 제거(condensation sink)되어 에어로졸이 생성(핵 형성, nucleation)되지 않는 것으로 알려져 있다(Wu et al., 2007). 즉, 대기 중 에어로졸 농도가 높다면 에어로졸 생성의 핵심이 되는 전구물질 기체가 기존 에어로졸에 응축, 제거되어 새로운 에어로졸이 생성되지 않을 가능성이 높다는 것을 의미한다. 가을철에 입자의 생성이 활발한 것은 대기 중 에어로졸 농도가 낮기 때문으로 해석할 수 있다.

한편, PM10 질량농도는 여름철에 더 낮은데도 불구하고 여름철의 입자 생성이 가을철에 비해 적게 관측되는데, 이는 대기 중 에어로졸 이외의 요소가 입자 생성에 영향을 주기 때문으로 볼 수 있다. 에어로졸 생성에 중요한 역할을 하는 요소는 대기 중 에어로졸에 의한 응축 제거 이외에도 이산화황(SO_2)의 농도, 기온, 상대습도 등으로 알려져 있다(Kulmala et al., 2004; Weber et al., 1997). 선행 연구들에 따르면 가스상의 황산(sulfuric acid)이 주간의 에어로졸을 생성시키는 주요인이며(Sipilä et al., 2010), 이산화황은 가스상 황산의 전구체이다. 안면도의 2020년 계절별 이산화황 농도는 겨울, 가을, 봄, 여름 순으로 높았는데(그림 6.5.5). 여름철에 에어로졸 생성의 전구물질인 이산화황의 농도가 가을철보다 낮았기 때문에 가을철에 비해 입자 생성이 적었을 것으로 해석된다. 또한, 기온이 낮을수록 입자의 생성과 성장이 촉진되므로(Tiszenkel et al., 2019) 가을철이 여름철에 비해 입자 생성에 더 유리한 조건이다. 또한,

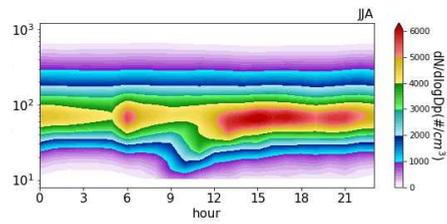


우리나라 여름철에는 상대습도가 높는데, 높은 상대습도로 인해 대기 중 에어로졸이 흡습성장 (hygroscopic growth)하여 입자 생성의 전구물질의 응축제거율이 높아지며, 태양광이 감소하고, 3 nm 이하 입자의 응집제거가 촉진될 수 있기 때문에(Hamed et al., 2011) 여름철은 가을철에 비해 입자의 생성이 불리한 계절이다.

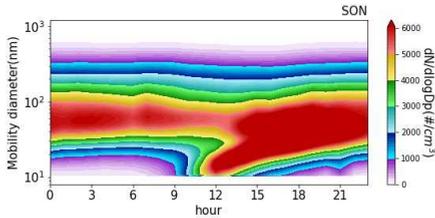
(a) 봄



(b) 여름



(c) 가을



(d) 겨울

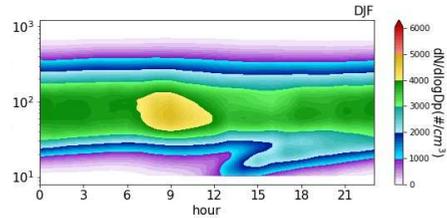


그림 6.5.2 2020년 안면도 미세먼지 크기별 수농도($\#/cm^3$) 분포의 계절별 일변화.

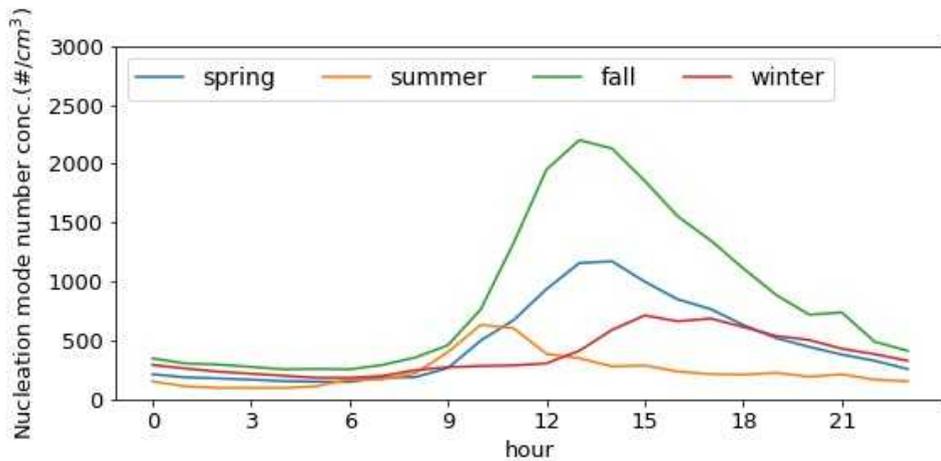


그림 6.5.3 2020년 안면도 핵화모드 수농도($\#/cm^3$)의 계절별 일변화.

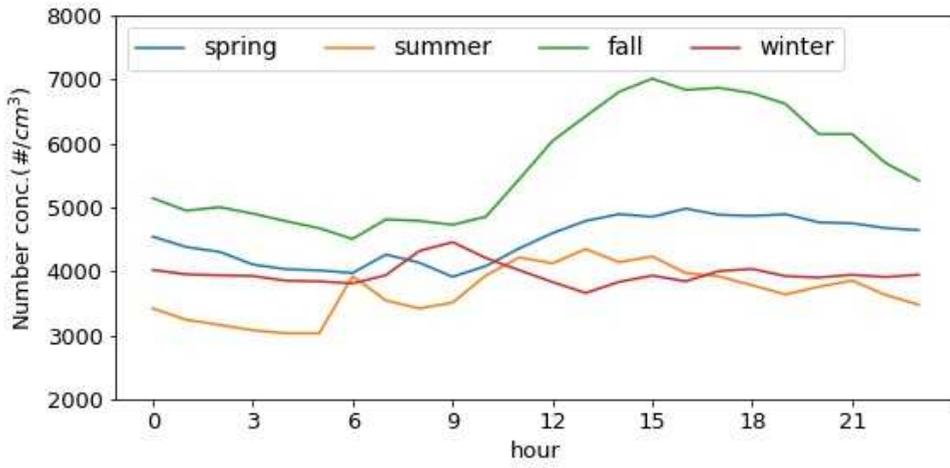


그림 6.5.4 2020년 안면도 총수농도(#/cm³)의 계절별 일변화.

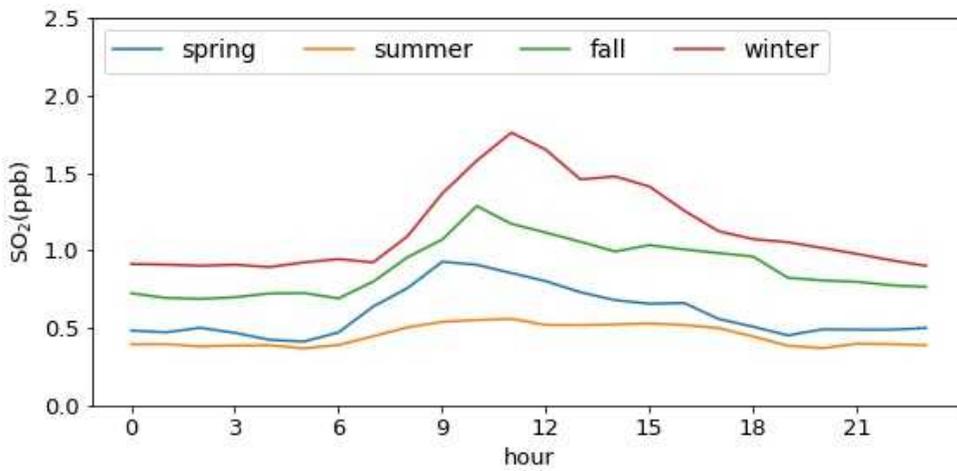


그림 6.5.5 2020년 안면도 이산화황(SO₂, ppb) 농도의 계절별 일변화.



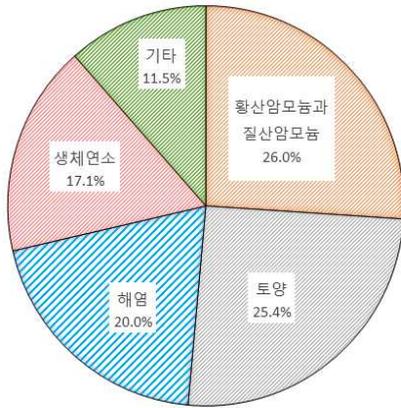
6.5.3 화학성분의 발생기원 분석

2020년 PM10과 PM2.5의 발생기원을 살펴보기 위하여 수용성 성분을 이용하여 주성분 분석(Principal component analysis; PCA)을 실시하였다. 주성분 분석이란 기본적으로 고차원의 다변량 자료를 저차원상에 표현하고자 하는 목표를 가진 기법으로서(Jolliffe, 2002), 수집한 다변량 데이터로부터 새로운 변수를 만드는 통계적 기법이다. 주성분 분석은 통계프로그램(SPSS 18.0)을 이용하여 최적인자의 수를 고유값 1 이상으로 정의하였고, 베리맥스(Varimax) 회전법으로 산출하였다. 안면도 기후변화감시소의 최근 12년(2008~2019년)의 PM10, PM2.5의 발생원 성분은 네 가지로 분류할 수 있으며, 2020년의 발생기원은 PM10은 다섯 가지, PM2.5는 네 가지로 분류할 수 있다(그림 6.5.6, 그림 6.5.7).

PM10의 최근 12년(2008~2019년)에서의 황산암모늄과 질산암모늄이 26.0%, 토양이 25.4%로 황산암모늄과 질산암모늄, 토양에 의한 발생원 영향이 비슷하게 나타났다. 그다음으로 해염, 생체연소 순으로 나타났다. PM2.5의 최근 12년(2008~2019년)에서는 토양과 황산암모늄과 질산암모늄, 해염 및 생체연소 부분이 각각 25% 이상으로 나타났다. 약 9%가 쓰레기 소각으로 발생원이 구분되었다는 점이 특이한 점으로 보인다.

2020년의 PM10과 PM2.5는 해염의 영향이 약 36%로 가장 크게 받은 것으로 분석되었다. 그다음 순으로는 PM10은 토양 > 질산암모늄 > 황산암모늄 > 생체연소 순이며, PM2.5의 발생원은 황산암모늄과 질산암모늄 > 토양 > 쓰레기 소각 순으로 나타났다. 2020년 분석에서도 최근 12년 자료와 마찬가지로 쓰레기 소각 기원의 발생원(6.8%)이 구분되었다.

(a) 2008~2019년



(b) 2020년

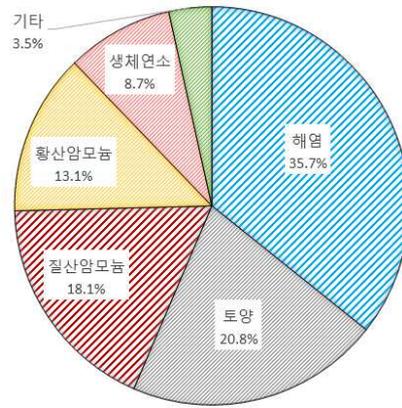
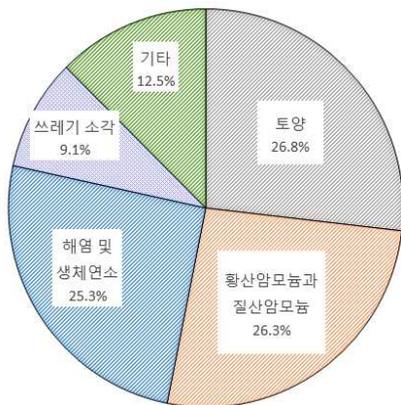


그림 6.5.6 안면도 PM10 이온성분 농도를 이용한 발생원 분석. (a) 최근 12년(2008~2019년), (b) 2020년.

(a) 2008~2019년



(b) 2020년

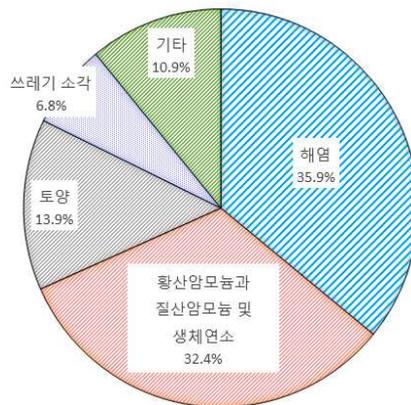


그림 6.5.7 안면도 PM2.5 이온성분 농도를 이용한 발생원 분석. (a) 최근 12년(2008~2019년), (b) 2020년.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

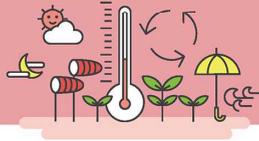
제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타



2020 지구대기감시 보고서



제7장 대기복사

7.1 대기복사 감시의 목적	188
7.2 직달일사, 산란일사	189
7.3 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)	191
7.4 지구상향복사, 지구하향복사	193
7.5 순복사	194
7.6 2020년 대기복사 특성 분석	195



제7장 대기복사

- 태양하향복사(전천일사) : 안면도 165.8 W/m² (최근 10년 대비 -1.2%)
- 지구하향복사 : 안면도 320 W/m² (최근 10년 대비 +6.9%)
- 안면도의 태양하향복사는 여름철 긴 장마의 영향으로 감소, 지구하향복사는 겨울철 높은 기온과 여름철 폭염으로 인해 증가

7.1 대기복사 감시의 목적

태양에너지는 지구상에 살아가는 생명체들의 필수 에너지원이자 지구 대기를 움직이는 1차 원동력이다. 모든 물체는 물체가 가진 온도에 따른 복사에너지를 방출하는데 빈의 변위법칙에 의해 온도가 높은 물체일수록 파장이 짧은 복사에너지를 방출한다. 이로 인해 표면온도가 약 6000K에 이르는 고온의 태양은 단파장의 에너지를, 약 300K 전후인 지구는 장파 에너지를 방출하게 된다. 태양에서 방출된 에너지는 지구 대기를 통과하면서 구름 또는 대기 구성 성분들에 의해 산란 및 반사되거나 흡수되고 나머지는 지표에 도달한다. 이러한 과정을 통해 지구에 전달된 에너지는 지구표면과 대기를 가열시켜 지구 복사에너지를 방출하게 되며, 장기적으로 지구 전체가 방출하는 에너지량은 태양으로부터 받은 에너지의 총량과 균형을 이룬다.

한편, 인간활동은 지구 대기의 구성 성분에 변화를 일으키게 되었고 이는 지구 복사 평형에 영향을 미쳐 기후변화를 발생시키게 되었다. 특히 산업화에 따른 인위적 오염물질의 배출은 과거와는 비교할 수 없는 속도로 지구대기 조성물질에 급격한 변화를 일으키게 되었고 이에 따른 기후변화는 인류의 생존을 위협하고 있다. 따라서, 이 같은 기후변화에 대응하기 위한 목적으로 지구복사와 태양복사 성분을 각각 관측하는 대기복사성분의 감시가 수행되고 있다.

복사자료는 크게 태양복사와 지구복사로 나뉘며, 각각의 상향·하향복사(총 4개 요소), 태양하향복사의 두 요소인 직달일사와 산란일사, 지표면의 에너지 수지를 관측하는 순복사까지 총 7가지 요소로 구분된다. 안면도에서는 현재 7가지 요소 모두를 관측하고 있으며, 고산에서는 태양복사의 3개 요소(태양하향, 직달, 산란)를 관측하고 있다. 관측 자료는 1분 간격으로 관측되어 품질검사 과정을 거쳐 시간 단위부터 분석이 수행되고 있으며 자료의 단위는 W/m²이다.



7.2 직달일사, 산란일사

직달일사는 대기 중에서 산란 또는 흡수되지 않고 태양으로부터 직접 입사되는 복사량을 말한다. 직달일사는 태양추적장치를 사용하여 일 중 센서가 태양을 바라보고 직달광을 관측하게 되며, 일사계에 도달하는 광경로 상의 구름 및 대기 구성성분 등의 영향을 받는다. 산란일사는 태양 복사가 지표면에 도달하기 전에 최소 한 번 이상 산란된 복사를 말하며, 차폐 판을 이용해 직달 일사를 차단하여 관측한다. 산란일사 역시 마찬가지로 구름과 대기 구성성분 등의 영향을 받지만 직달일사와는 달리 광선의 경로보다는 주변 입자 분포 특성에 따라 강도가 달라진다.

그림 7.2.1은 안면도와 고산의 2020년 직달일사, 산란일사 월평균을 최근 10년 평균(2010~2019년)과 비교한 것이다. 안면도의 직달일사 월평균 최대는 4월의 235.5 W/m²으로 과거 10년 평균보다 31% 높았고, 최소는 7월의 79.5 W/m²으로 과거 10년 평균보다 40% 낮았다. 고산의 경우에는 월평균 최대는 4월의 205.3 W/m²으로 과거 10년 평균보다 32% 높았고, 최소는 1월의 48.6 W/m²으로 과거 10년 평균보다 30% 낮았다. 2020년의 직달일사는 봄철에 과거 10년 평균보다 크게 높았고, 여름철에는 크게 낮아 평년에 비해 계절차가 매우 컸다.

산란일사의 경우 안면도는 6월에 117.4 W/m²으로 가장 높은 값을 보였고, 고산은 8월에 121.6 W/m²의 최댓값이 관측되었다. 한편, 산란일사의 최솟값은 안면도와 고산 모두 11월에 각각 41.3 W/m², 50.5 W/m²으로 나타났다. 안면도의 경우, 장비 점검정리로 인해 7월에서 9월까지 산란일사의 관측공백이 발생하였다.

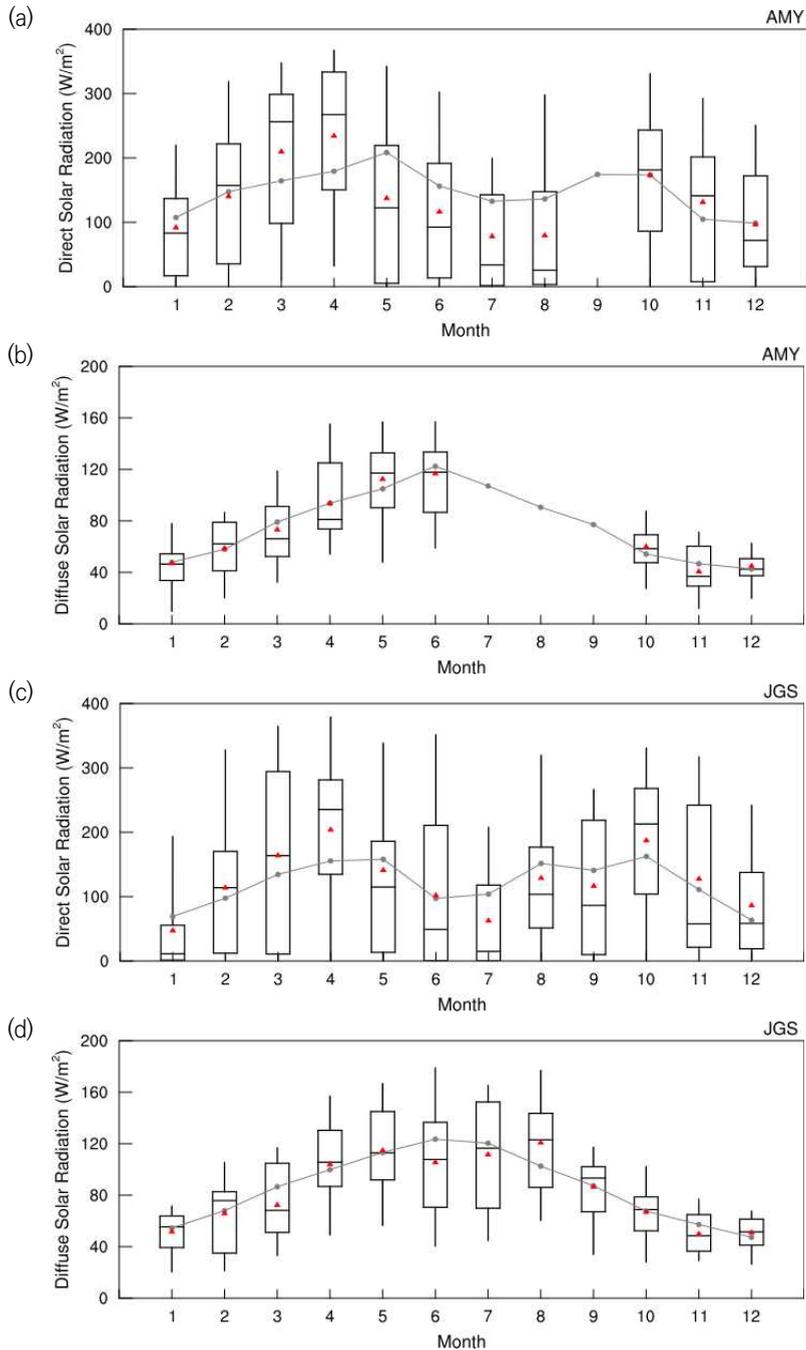


그림 7.2.1 2020년 안면도(AMY)의 (a) 직달일사, (b) 산란일사와 고산(JGS)의 (c) 직달일사, (d) 산란일사 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균). 회색 점과 선은 2010~2019년 평균을 나타냄.



7.3 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)

태양하향복사는 지표에 도달하는 모든 일사량의 총합을 뜻하며, 전천일사라고도 부른다. 태양하향복사는 수평면에 도달하는 직달일사와 산란일사를 더한 것과 같기 때문에 직달일사와 산란일사 관측값으로부터 간접적으로 계산하여 상호비교가 가능하다. 한편, 태양상향복사는 태양으로부터 유입된 단파복사에너지 중 지면에 의해 다시 반사되어 나가는 복사량을 의미한다. 태양상향복사와 태양하향복사 또한 직달일사나 산란일사와 같이 구름 및 대기 구성성분의 영향을 크게 받는다.

그림 7.3.1은 2020년 안면도의 태양상향복사와 태양하향복사 월평균과 고산의 태양하향복사의 월평균을 나타낸 것이다. 안면도의 태양상향복사 월평균 최대는 4월의 51.3 W/m^2 , 최소는 1월의 20.2 W/m^2 이었고, 태양하향복사의 월평균 최대는 4월에 256.2 W/m^2 , 최소는 12월에 82.7 W/m^2 이었다.

고산의 2020년 태양하향복사 최대와 최소는 안면도와 마찬가지로 각각 4월과 1월 나타났으며, 그 값은 249.1 W/m^2 와 71.7 W/m^2 이었다. 2020년 태양상향복사와 태양하향복사는 안면도의 경우 직달일사와 마찬가지로 봄철에 높고 여름철에 낮은 모습을 보였다. 고산에서도 봄철에는 태양하향복사가 높은 특성을 확인할 수 있었으며, 7월에서 10월까지 장비 점검정으로 인해 발생한 관측공백으로 인해 여름철의 특성은 확인할 수 없었다.

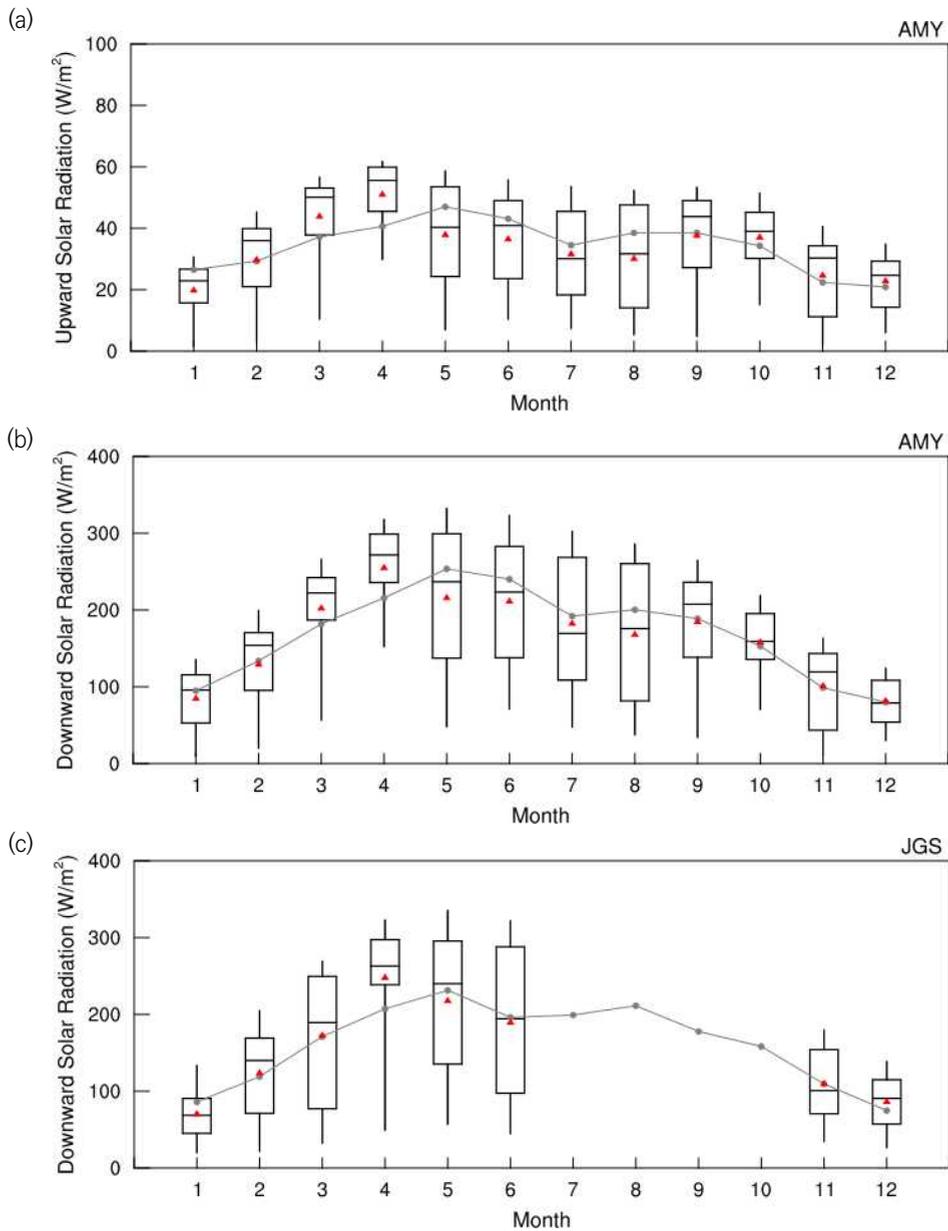


그림 7.3.1 2020년 안면도(AMY)의 (a) 태양상향복사, (b) 태양하향복사와 고산(JGS)의 (c) 태양하향복사 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균). 회색 점과 선은 2010~2019년 평균을 나타냄.



7.4 지구상향복사, 지구하향복사

지구상향복사와 지구하향복사는 각각 지표에서 대기로, 대기에서 지표로 방출되는 장파복사 에너지를 의미한다. 지구상향복사는 지면온도의 영향을 크게 받는 반면, 지구하향복사는 기온과 습도의 연직분포, 운량 등 다양한 대기 특성들의 영향을 받는다. 지구복사는 태양복사에 비해 일변화 폭이 적고, 하층운이 지속적으로 있는 경우나, 기온 역전현상이 있을 시를 제외하고는 지구상향복사량이 하향복사량보다 큰 특성을 갖는다. 지구복사 요소들은 현재 안면도에서만 관측하고 있으며, 2020년 안면도의 지구상향복사 연평균은 지구하향복사보다 약 57 W/m^2 정도 높았다. 그림 7.4.1은 2020년 안면도 지구복사의 월평균 분포를 나타내며, 월평균 지구상향복사의 최대는 8월에 445.4 W/m^2 , 최소는 12월에 313.9 W/m^2 이었다. 지구하향복사의 경우 최대는 8월에 398.2 W/m^2 , 최소는 12월에 262.8 W/m^2 이었다. 2020년 지구복사 요소들은 겨울철인 1월과 2월에 최근 평균대비 상당히 높은 값을 보였다.

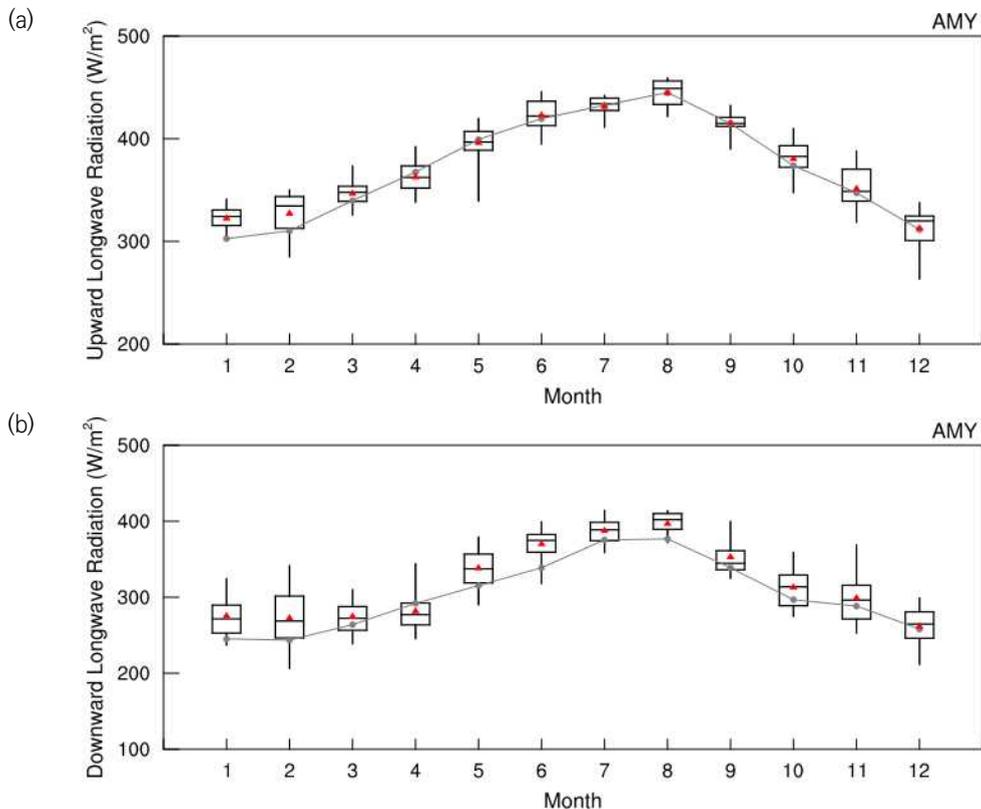


그림 7.4.1 2020년 안면도(AMY)의 (a) 지구상향복사, (b) 지구하향복사의 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균)와 2010~2019년 평균(회색 점-선).

7.5 순복사

순복사는 태양과 지구사이의 복사에너지 수지를 뜻하며, 직접 관측 또는 태양복사와 지구복사 사이의 관계식(태양하향복사 - 태양상향 복사 + 지구하향 복사 - 지구상향복사)으로부터 간접적으로 계산할 수 있다. 기상청에서는 태양복사와 지구복사 관측값으로부터 간접적으로 계산된 순복사값을 관측된 값과 상호비교하여 고품질의 순복사 자료를 얻는데 활용하고 있다. 일반적으로 순복사는 봄과 여름에 높고, 겨울에 낮은 특성을 갖는다. 또한 열대 및 아열대 지역과 적도 부근에서의 일별 순복사는 일 년 내내 양의 값을 가지지만, 그 외의 지역에서는 양의 값과 음의 값이 계절에 따라 다양하게 나타난다. 맑은 날의 일 중 순복사량의 변화는 태양 고도각이 증가함에 따라 서서히 증가하여, 정오에 최대가 된다. 그림 7.5.1은 2020년 안면도 순복사의 월평균 분포를 나타내며, 월평균 최대는 6월에 134.7 W/m^2 , 최소는 12월에 7.1 W/m^2 로 나타났다. 한편, 7월에서 9월까지의 장비 검교정으로 인해 관측공백이 발생하였다.

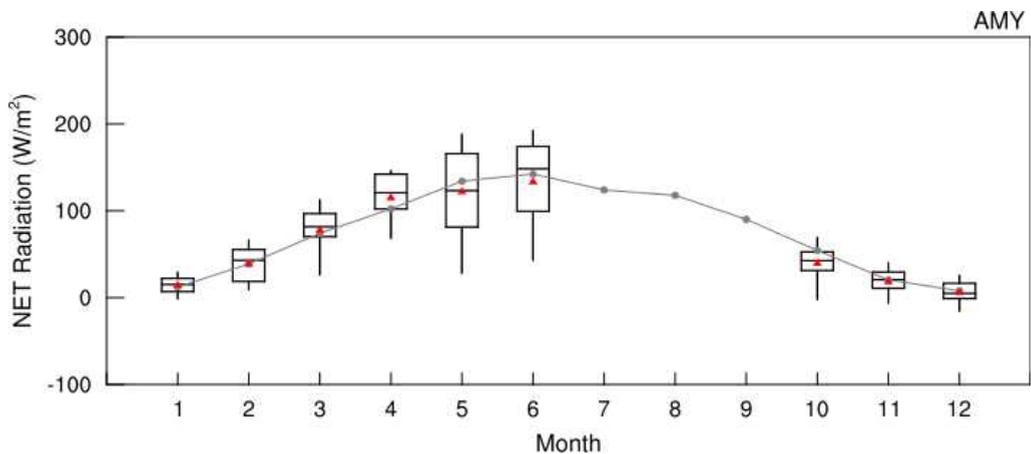


그림 7.5.1 2020년 안면도(AMY) 순복사의 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균)와 2010~2019년 평균(회색 점-선).



7.6 2020년 대기복사 특성 분석

안면도의 태양상향복사, 태양하향복사, 직달일사, 지구상향복사, 지구하향복사(산란일사와 순복사는 결측으로 연평균 미산출) 평균값은 각각 33.9 W/m², 165.8 W/m², 136.7 W/m², 377.2 W/m², 320.0 W/m²으로 최근 10년(2010~2019년) 대비 -1.4%, -1.2%, -10.6%, 2.0%, 6.9%, 2019년 대비 -1.0%, -4.3%, -7.3%, 0.0%, 2.0%의 차이를 보였다. 고산의 경우에는 직달일사, 산란일사(태양하향복사는 결측으로 연평균 미산출) 평균값이 124.8 W/m², 84.1 W/m²으로 최근 10년 대비 4.2%, -1.5%, 2019년 대비 -5.1%, -1.9%의 차이를 나타냈다.

대기복사자료는 구름, 강수량과 일조시간 등의 영향을 크게 받기 때문에 2020년의 강수량과 일조시간의 월변화를 살펴보았다(그림 7.6.1). 강수량과 일조시간은 안면도와 고산 기후변화 감시소에서 가장 가까운 종관기상 관측소의 자료를 활용하였다. 안면도의 경우 기후변화감시소에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129) 자료를 이용하였고, 고산은 감시소에서 약 4 km 떨어져 있는 고산(185) 자료를 이용하였다.

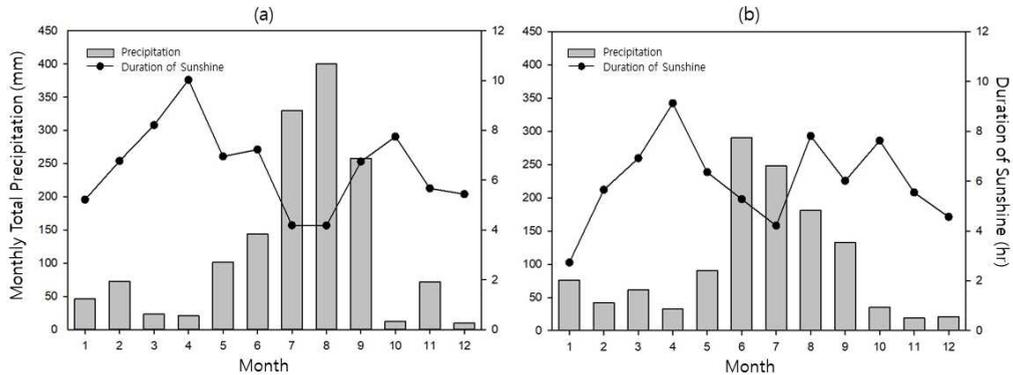


그림 7.6.1 2020년 (a) 서산, (b) 고산(JGS)의 월 강수량과 월별 일평균 일조시간.

2020년 서산의 연 강수량은 1488.7 mm로 최근 10년 대비 22.0%(2019년 대비 65.6%) 증가하였고, 일조시간은 일평균 6.5 시간으로 최근 10년 대비 1.2% 증가(2019년 대비 5.4% 감소)하였다. 안면도의 최근 10년 대비 낮았던 태양복사 요소 관측값들은 같은 기간 대비 상당히 높았던 강수량과 관련이 있는 것으로 볼 수 있으며, 특히 직사광의 강도와 관련된 직달일사가 크게 영향을 받은 것으로 사료된다. 또한 전체적으로 안면도는 과거 평균보다 높은 기온을 나타냈고(그림 3.2.4), 지구복사(지구상향, 지구하향)의 경우 기온의 영향을 주로 받기 때문에 기온과 마찬가지로 과거 평균보다 높았다.

고산의 경우 연 강수량은 1228.9 mm로 최근 10년 평균과 거의 동일(2019년 대비 19.8% 감소)하였고 일조시간은 일평균 5.6 시간으로 최근 10년 대비 7.0% 증가(2019년 대비 5.5% 감소)하였다. 즉, 2020년 고산은 최근 10년 평균 대비 증가한 일조시간의 영향으로 태양복사 요소들의 연평균값이 대체로 높게 관측된 것으로 보인다.

계절별로 살펴보면, 2020년에는 봄철 바이칼호 북서쪽의 강한 기압능이 정체하여 북서쪽으로부터 차고 건조한 공기의 유입이 잦아 평년에 비해 쌀쌀하고 많은 바람이 분 반면(본문 3.1.2), 강수량은 적고 일조시간은 많은 특성을 보였다(그림 7.6.1). 이에 따라 봄철 안면도의 직달일사, 태양상향복사, 태양하향복사가 높은 값을 나타냈고, 고산도 마찬가지로 직달일사, 태양하향복사가 높았다. 한편, 여름철에는 북태평양고기압의 확장이 지연되고, 한반도 북쪽에 찬 공기 정체가 자주 발생하면서, 전국적으로 장마가 상당히 길었고 강수가 많았다(본문 3.1.3). 특히, 중부지방에서 평년보다 매우 많은 비가 내렸는데 안면도에서도 여름철 강수량이 최근 10년 평균보다 35% 가량 많았고, 일조시간 역시 18% 가량 적었다. 이로 인해 안면도 직달일사의 연평균 관측값은 과거에 비해 매우 낮았다. 또한 많은 비에도 불구하고 비교적 높게 유지된 기온(그림 3.2.4)은 구름에서 방출되는 적외복사량을 증가시켜 지구하향복사가 여름철 내내 최근 10년 평균보다 높았다. 고산의 경우에도 장마의 영향으로 안면도와 마찬가지로 여름철 낮은 직달일사 관측값을 나타냈으나 안면도에 비해 최근 10년 평균과의 편차는 적었다. 겨울철에는 약한 시베리아 고기압의 영향과 강한 극 소용돌이로 인해 기온이 매우 높아(이상기후보고서 2020) 안면도에서 관측된 지구복사요소들이 모두 겨울철에 유독 최근 10년 평균보다 높은 모습을 보였다.

안면도와 고산에서 관측된 대기복사 요소들의 전 기간 변화추세를 살펴보면 그림 7.6.2와 같다. 대기복사 요소들의 장기적인 경향성은 연 별 관측값 변화의 기울기가 표준편차 2배수 오차범위(95% 신뢰구간)를 초과하지 않으면서, p -value가 0.05보다 작은 경우 통계적으로 유의미한 변화로 간주하였고, 전체 기간 평균에 대한 변화율로 분석하였다. 태양복사 요소들의 경우, 안면도에서는 태양상향복사가 $0.86 \pm 0.58\%/year$ (p -value < 0.05)로 유일하게 통계적으로 유의미한 변화를 보였다. 그 외에 직달일사가 $0.75 \pm 0.74\%/year$ (p -value: 0.07), 산란일사가 $-0.64 \pm 0.67\%/year$ (p -value: 0.08), 태양하향복사가 $0.25 \pm 0.30\%/year$ (p -value: 0.13)로 산란일사를 제외하면 모두 약한 증가세를 보이긴 했지만 통계적으로 유의미한 수준은 아니었다. 안면도의 대기복사 관측기간 동안의 강수와 일조시간 변화를 살펴보면(그림 7.6.3), 전체적으로 강수는 일부 감소하였고 일조시간은 증가하는 모습을 나타냈다. 산란일사를 제외한 태양복사 요소들의 증가세는 일조시간의 증가와 관련이 있어 보이며, 산란일사는 구름이 일부 존재할 경우 더욱 큰 값을 나타내기 때문에 다른 태양복사요소들과는 달리 오히려 약한 감소세가 나타난 것으로 사료된다.



고산에서는 모든 대기복사요소들이 통계적으로 유의미한 경향은 보이지 못했지만 직달일사가 $1.10 \pm 1.49\%/year$ (p -value: 0.17), 태양하향복사가 $0.36 \pm 0.66\%/year$ (p -value: 0.30)로 약한 증가세를 보였고, 산란일사는 $-0.11 \pm 0.37\%/year$ (p -value: 0.56)로 안면도와 마찬가지로 약한 감소세를 나타냈다. 고산 역시 관측기간 동안 일조시간이 증가하는 모습을 보였으며, 강수량 또한 약하게 증가했다(그림 7.6.3). 이 같은 일조시간의 변화가 고산의 태양복사 성분에도 영향을 미치고 있는 것으로 사료되며, 산란일사의 경우구름의 영향으로 다른 태양복사 요소들과 반대의 경향성을 나타낸 것으로 보인다.

지구복사 요소들의 경우, 지구상향복사가 $-0.30 \pm 0.26\%/year$ (p -value < 0.05), 지구하향복사가 $-0.61 \pm 0.33\%/year$ (p -value < 0.01)로 통계적으로 유의미한 감소세를 보였다. 그러나, 유독 값이 높아 불확실성이 큰 2001년 이전 자료를 제외할 경우 지구상향복사는 유의미한 경향성이 사라지고, 지구하향복사는 $-0.41\%/year$ 로 변화폭이 줄어든다. 지구복사 요소는 지면온도 또는 기온의 영향을 크게 받는데 안면도에서는 2012년 전후로 겨울철 유의미한 온도증가 특성이 나타나고 있다(그림 3.2.3). 2012년 이후의 경향성만을 살펴보면 지구하향복사는 증가세로 돌아서게 되고, 지구상향복사의 변화는 0에 가까워지지만 기간이 너무 짧아 온도증가의 영향을 받은 것으로 판단하기는 어렵다. 한편, 안면도에서 관측되는 순복사 요소는 $0.60 \pm 0.66\%/year$ (p -value: 0.09)로 약한 증가세를 보였으나 마찬가지로 증가폭이 크지 않아 지구온난화의 영향을 뚜렷하게 확인하기 어려웠다.

현재까지의 분석 자료 내에서 대기복사요소들은 아직까지 표본이 충분하지 않기 때문에 어떠한 경향성을 명확하게 결론 내리기 어려운 상황이다. 따라서 지속적인 관측을 통한 추가 자료의 확보가 중요할 것으로 판단된다.

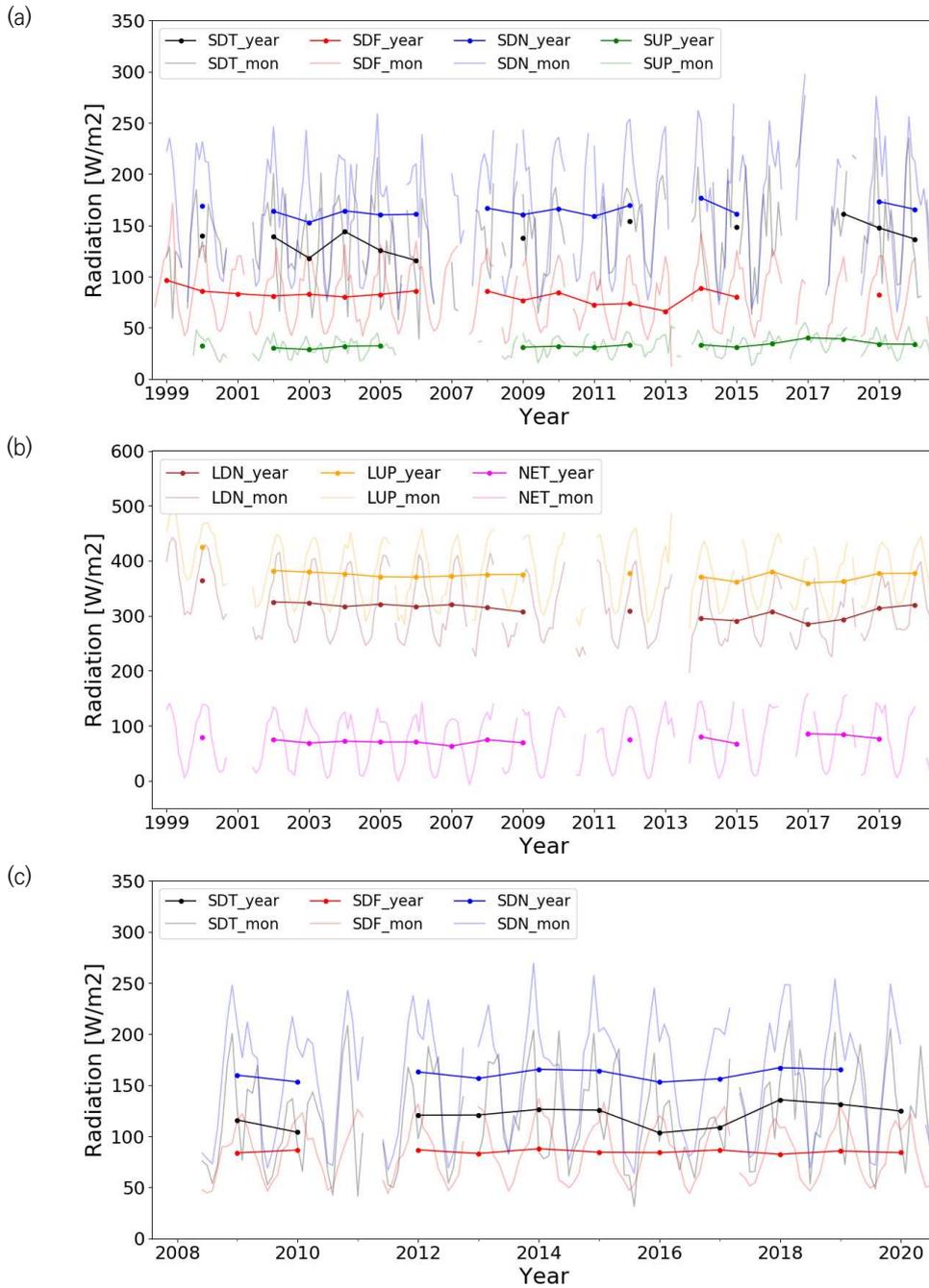


그림 7.6.2 대기복사 관측기간 동안의 (a, b) 안면도(AMY)와 (c) 고산(JGS) 복사량 변화(SDT:직달일사, SDF:산란일사, SUP:태양상향복사, SDN:태양하향복사, NET:순복사, LUP:지구상향복사, LDN:지구하향복사).

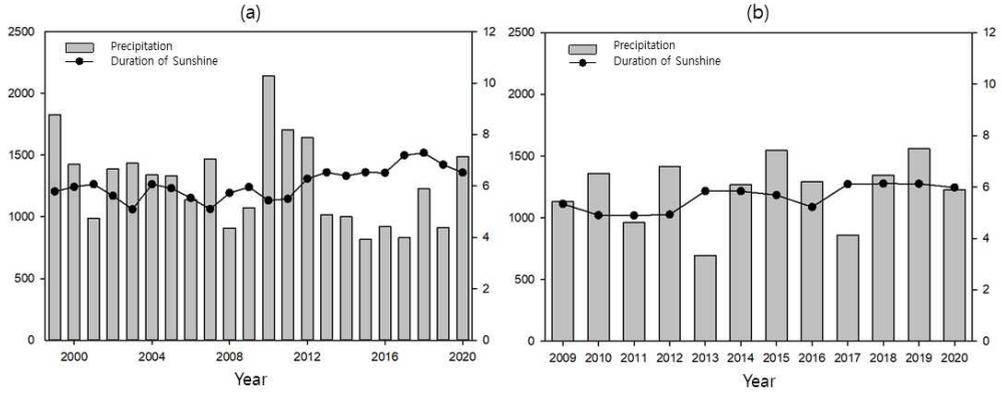


그림 7.6.3 대기복사 관측 기간 동안 (a) 서산, (b) 고산의 연 강수량과 일평균 일조시간 변화.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총 대기침적지구대기감시자료 분석

제11장 기타





제8장 성층권오존

8.1 성층권오존 감시의 목적	202
8.2 오존전량	203
8.3 오존연직분포	220
8.4 남극오존홀	236
8.5 2020년 성층권오존 특성 분석	243



제8장 성층권오존

- 오존전량 : 안면도 324 DU (최근 7년 대비 +0.5%)
고 산 308 DU (최근 9년 대비 +2.0%)
- 봄철 바이칼호 북서쪽에 정체한 강한 기압능의 영향으로 남북 흐름이 강화되어 고위도의 고농도 오존 유입 증가

8.1 성층권오존 감시의 목적

대기 중의 오존은 연직적으로 성층권과 대류권오존으로 구분되며, 각기 다른 성격으로 생태계에 영향을 미친다. 성층권에서 오존은 6~8 ppm으로 대기 중 가장 높은 농도로 분포하여 오존층을 형성하며, 태양으로부터 유입되는 유해 자외선을 차단해 생태계를 보호한다. 또한, 오존은 상당량의 태양에너지를 흡수하여 지구 대기의 복사에너지 균형 및 대기대순환과도 직접적인 연관성을 갖기 때문에 기후변화 감시를 위해 필수적으로 살펴야 할 인자이다(Williamson et al., 2014; WMO 2018). 한편 대류권에 분포하는 오존은 성층권과는 달리 주로 배기가스에서 배출되는 질소산화물이나 휘발성 유기화합물의 광화학반응에 의해 생성되며, 산화제로 작용하여 인간뿐만 아니라 식물과 건물 등에도 악영향을 미친다. 오존은 전체 대기 중 성층권에 90% 가량이 존재하여 전 지구적인 오존 변화를 주도하고 있지만 연직적으로 대류권과 상호 영향을 미치기 때문에 연직적인 분포 또한 중요하게 여겨지고 있다.

태양 자외선 복사에 의한 성층권오존의 생성 비율은 열대지방에서 평균적으로 최고치를 보인다. 그러나, Brewer-Dobson 순환이라 불리는 전 지구적 오존 순환을 통해 열대지방의 오존이 극지방으로 서서히 수송되어 오존층의 두께는 중위도와 고위도에서 두껍고, 저위도에서는 상대적으로 얇다(Butchart., 2014; Hu et al., 2017).

성층권의 오존은 산업화 과정에서 인위적으로 발생하는 염화불화탄소(CFCs)와 오존을 파괴시키는 기타 할로젠화 물질들을 일컫는 오존고갈물질(Ozone Depleting Substances, ODS)들로 인해 심각하게 파괴될 수 있다. 1985년에는 남극 상공에서 대기 중의 오존이 최대 70%까지 감소한 사실이 보고되었고, 이에 따라 전 세계적인 오존변화 대응협의체가 구성되어 오존층을



보존하기 위한 몬트리올 의정서가 1987년 채택되었다. 이를 통해 전 세계적으로 오존고갈물질의 사용이 제한되었고, 그 결과 오존은 현재 점차 회복되는 추세를 보이고 있다(WMO 2018; SPARC/IO3C/GAW, 2019). 그러나 여전히 남극과 북극에서는 오존홀이 나타나고 있으며, 이것은 대기대순환을 통해 전 지구적으로 영향을 미치고 있다. 또한 그 밖의 지역에서도 오존고갈물질들로 인한 오존 파괴가 발생하고 있고, 종관적인 기상특성에 따른 오존농도의 급변은 이를 더욱 악화시킬 수 있다. 이처럼 인류 생존과 직결되는 유해 자외선의 위협에 대응하기 위해 성층권 오존농도의 지속적인 감시는 기후변화 감시의 필수 항목으로 여겨지고 있으며, 지상 관측망 또는 위성을 통한 전 지구적인 관측이 수행되고 있다.

기상청에서는 성층권오존의 감시를 위해 단위면적 상공에 분포하는 오존의 전체 양을 관측하는 오존전량 관측과 오존의 연직 분포를 관측하는 연직오존을 관측하고 있다.

8.2 오존전량

오존전량은 브루어 오존분광광도계(Brewer spectrophotometer, MkIII)를 이용하여 해당 감시소 상공에 존재하는 오존의 총량을 관측하고 있으며, 관측값은 돕슨 단위(Dobson Unit, DU)로 기록된다. 기후변화감시를 위한 오존전량 관측은 1994년 포항에서 처음 시작되었으나, 2017년 12월 장비 노후화로 인해 관측이 중단되었고, 안면도와 고산에서 각각 2013년과 2011년부터 관측이 이어지고 있다. 서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 돕슨 오존분광광도계(Beck #124)와 브루어 오존분광광도계(SCI-TEC, #148)를 통해 1984년부터 오존전량을 관측 중이며 안면도 기후변화감시소와 서울(연세대학교) 위탁관측소의 자료는 WMO/GAW의 세계 오존 및 자외선 자료센터(World Ozone and Ultraviolet Data Center; WOUDC)를 통해 전 세계 오존관측소들과 공유하고 있다.

8.2.1 안면도, 고산

안면도와 고산에서 관측한 2020년의 오존전량은 그림 8.2.1에 나타난 바와 같다. 그림에 표시된 붉은색과 회색 점은 각각 안면도, 고산에서 관측한 2020년 오존전량 월평균과 최근 평균(안면도: 2013~2019년, 고산: 2011~2019년)을 의미한다. 북반구의 오존전량은 봄에 뚜렷한 최댓값을 갖고 여름부터 가을까지 값이 낮아지는 계절변동을 보인다. 2020년 안면도와 고산의 월 변동성을 살펴보면, 안면도의 월평균 최댓값은 4월(383 DU), 최솟값은 10월(280 DU)에,

고산의 최댓값은 4월(361 DU), 최솟값은 10월(275 DU)에 각각 나타났다. 2020년에는 안면도와 고산 모두 전체적으로 최근 평균과 비슷한 수준의 관측값을 나타냈으나 4월에 평균값 대비 가장 큰 차이를 보이며 높았다.

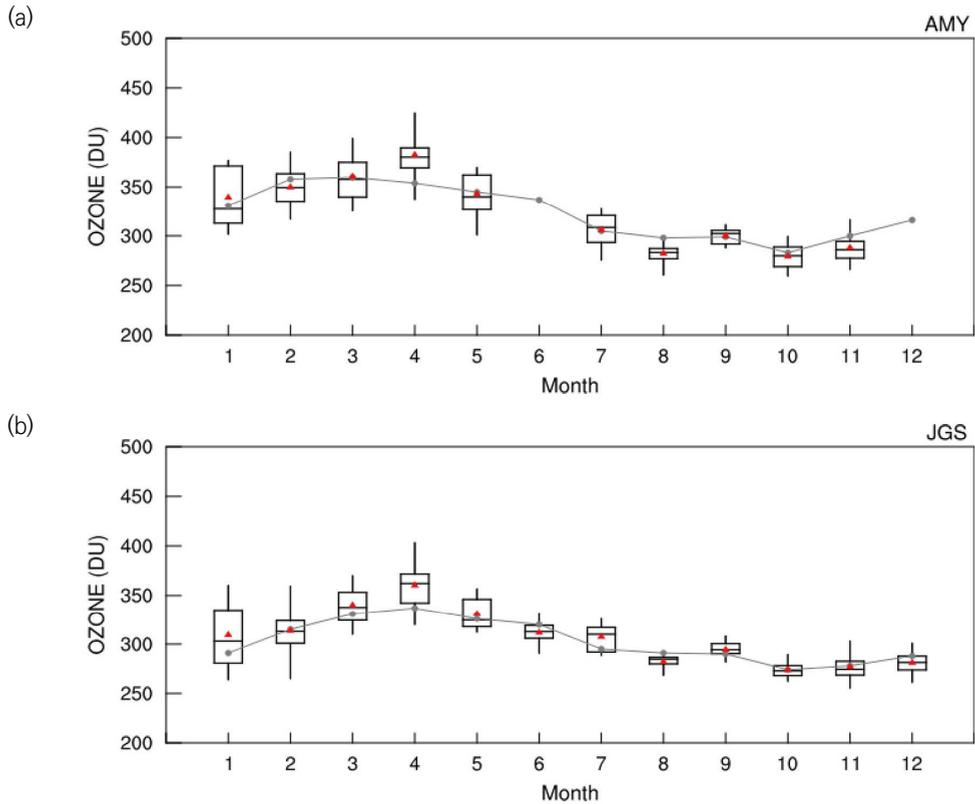


그림 8.2.1 2020년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS) 오존전량의 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 붉은색 점은 월평균)와 2013~2019년(안면도), 2011~2019년(고산)의 평균(회색 점-선).



그림 8.2.2(a), (c)는 각각 안면도와 고산의 일 오존전량을 시계열로 나타낸 것으로서 오존 전량이 매년 규칙적인 계절변동을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 2020년 안면도와 고산의 오존 전량 최댓값은 각각 433 DU(3월 11일), 415 DU(4월 12일)이며, 최솟값은 각각 260 DU(10월 11일), 255 DU(11월 18일)이었다.

오존전량의 단기 일변화는 주로 종관기상장의 일변화에 의해서 나타난다. 그림 8.2.2(b), (d)는 각각 안면도와 고산의 일일차 변화율을 나타낸 것으로서, 일일차 변화율은 일일 자료를 근거로 당일과 바로 전 날짜의 일 오존전량 차이값의 비율(%)을 의미한다. 안면도, 고산의 증가율 최댓값은 각각 30%, 18%, 감소율 최댓값은 각각 15%, 23%로 나타났으며, 이는 일 종관기상장의 변화가 오존전량의 변화에 크게 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

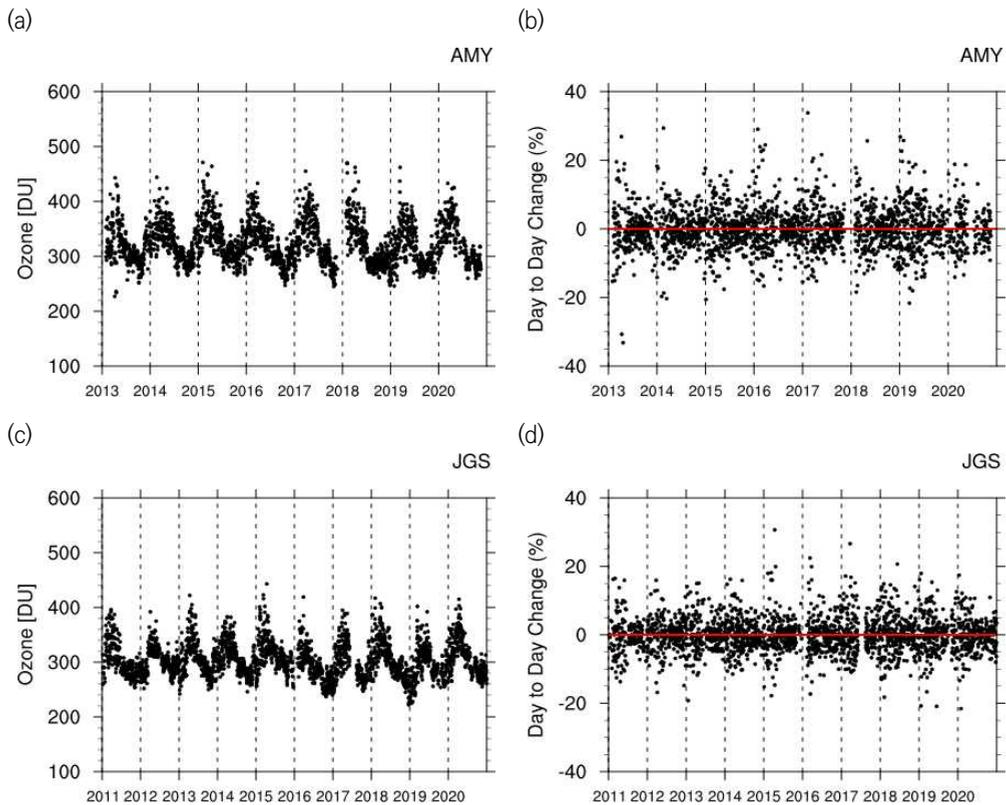


그림 8.2.2 안면도(AMY)의 (a) 오존전량, (b)일 일차변화율과 고산(JGS)의 (c) 오존전량, (d) 일일차변화율 시계열.

표 8.2.1은 오존전량의 일일차 변화율 절댓값의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 안면도의 일일차 변화율 절댓값은 주로 4월에 가장 높은 값을 나타낸다. 2020년에는 2월에 9.0%로 가장 높았으며, 같은 기간 표준편차도 7.1%로 가장 크게 나타났다. 고산의 경우에는 안면도보다 조금 이른 3월에 주로 최댓값이 나타나는데 2020년에는 1월에 6.3%로 가장 높았으며, 표준편차도 같은 기간 6.5%로 가장 컸다. 일일차 증가율의 연평균 값은 안면도 5.9%, 고산 3.6%, 감소율은 안면도 -4.2%, 고산 -3.7%로 안면도의 경우 증가율이 감소율보다 다소 크게 나타났으나 고산의 경우에는 큰 차이가 없었다. 결과적으로, 안면도는 고산보다 종관기상장의 변화가 크게 나타나며, 2020년에는 두 감시소 모두 유독 1월과 2월 종관기상장의 일변화가 컸음을 추정할 수 있다.

표 8.2.1 안면도(AMY), 고산(JGS)지역의 오존전량 일일차 변화율 월 평균값

	Difference (%)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
안 면 도	Absolute (Stddev) (2020년)	6.9 (5.8)	9.0 (7.1)	4.9 (3.8)	4.7 (3.3)	6.0 (4.5)	5.7 (7.0)	3.9 (2.6)	3.2 (3.5)	3.0 (2.2)	2.4 (2.0)	3.3 (2.3)	-	4.8 (4.0)
	Absolute (Stddev.) (2013-2019년)	6.1 (5.7)	7.1 (5.6)	6.7 (5.1)	8.1 (7.2)	5.0 (4.0)	4.7 (3.3)	4.0 (3.3)	2.4 (2.0)	2.4 (1.9)	2.7 (2.1)	4.3 (2.9)	4.8 (3.8)	4.8 (3.9)
	Increase (2020년)	9.7	12.4	4.7	4.6	6.9	8.0	3.1	5.1	3.7	2.9	4.1	-	5.9
	Decrease (2020년)	-4.3	-7.1	-5.8	-5.1	-5.1	-3.8	-4.3	-2.4	-2.7	-2.9	-2.7	-	-4.2
	Absolute (Stddev) (2020년)	6.3 (6.5)	5.9 (4.3)	4.2 (3.1)	3.7 (2.9)	3.8 (2.8)	4.2 (2.9)	2.2 (1.6)	2.0 (1.6)	2.4 (1.4)	2.3 (2.4)	2.4 (1.9)	3.4 (2.2)	3.6 (2.8)
	Absolute (Stddev.) (2011-2019년)	4.9 (3.7)	5.0 (3.9)	5.5 (4.5)	5.0 (4.3)	4.1 (3.2)	4.4 (3.4)	2.3 (1.8)	2.2 (1.8)	2.3 (1.8)	2.8 (1.9)	2.9 (2.1)	4.1 (3.1)	3.8 (3.0)
고 산	Increase (2020년)	6.3	6.6	4.7	3.9	4.6	3.6	1.8	1.9	2.6	2.3	2.1	3.2	3.6
	Decrease (2020년)	-6.5	-5.3	-4.4	-3.7	-3.4	-5.5	-2.7	-2.0	-2.6	-2.5	-2.8	-3.6	-3.7



8.2.2 서울(연세대학교) 위탁관측소

연세대학교 오존관측소는 2004년부터 오존 관측 시스템의 자동화를 통해 객관적인 관측 방법을 구축하여, 더욱 정확한 관측자료를 생산하고 있다. 1997년 Brewer 분광광도계(SCI-TEC, #148)가 설치되어 자외선과 오존전량을 동시에 관측하고 있고, 2012년에 오존과 이산화질소(NO_2)를 중점으로 관측하는 Pandora가 설치되었다. 이들 자료는 Dobson 오존 분광광도계에서 관측된 오존전량과의 비교, 검증 자료로 사용되어 한반도 상공의 오존전량 관측의 정확도 향상에 기여하고 있다. 이 관측소는 2004년부터 기상청 지구대기 감시위탁관측소로 지정되어 운영되고 있다. 대기 중의 연직오존전량의 90% 이상이 성층권 오존층에 분포되어 있기에 오존전량의 변화는 오존층의 변화를 의미한다. 여기에서는 2020년도 한반도 상공의 오존층 변화를 과거 장기간 참조 값(1984~2019년)과 비교 및 분석을 수행하였다.

그림 8.2.3(a)는 2020년도 서울 상공의 일 오존전량의 시계열, 그림 8.2.3(b)는 서울 상공 오존전량의 장기평균 연변화(1984~2020년)를 나타낸 것이다. 기상 및 장비 보정으로 인한 결측 날짜 동안의 관측 자료는 OMI-TOMS 오존전량 관측자료로 재구성하였다. 2020년의 일 최댓값은 3월 19일에 460 DU, 일 최솟값은 11월 18일에 256 DU로 나타났으며, 이 최솟값은 기존 1월 최솟값(261.5 DU; 2002년 1월 12일, 15일)을 갱신하였다. 6월과 10, 11월에는 평년보다 낮은 오존전량을 나타냈으며 그 외의 기간에는 평년보다 높은 오존전량을 보이는 등 기존 패턴과는 다른 모습을 보였다. 특히 2020년 5월 평균 오존전량은 434 DU로 평년 6월 오존전량 347.9 DU 비해 90 DU 가량 큰 차이를 보였다.

오존전량의 연(계절) 변화를 보게 될 경우, 그림 8.2.3(b)와 표 8.2.2에서 보는 바와 같이 서울 상공의 1984~2019년까지의 연평균 오존전량은 324.5 DU로 나타났으며, 3월에 최대인 361.6 DU, 10월에 최소인 291.2 DU로 월평균 기준으로 연교차가 70 DU이며 연평균 오존전량 기준으로 22%의 변동폭을 보였다. 그리고 오존량의 변동은 5월에 표준편차가 19.6 DU로 가장 심하고, 9월에 10.7 DU로 가장 안정한 변동을 나타내었으며, 계절 변화의 폭이 5월을 중심으로 봄에 가장 많고, 9월을 중심으로 가을철에 적은 변화가 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 6~7월에 걸쳐 여름에 오존의 감소가 급격히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

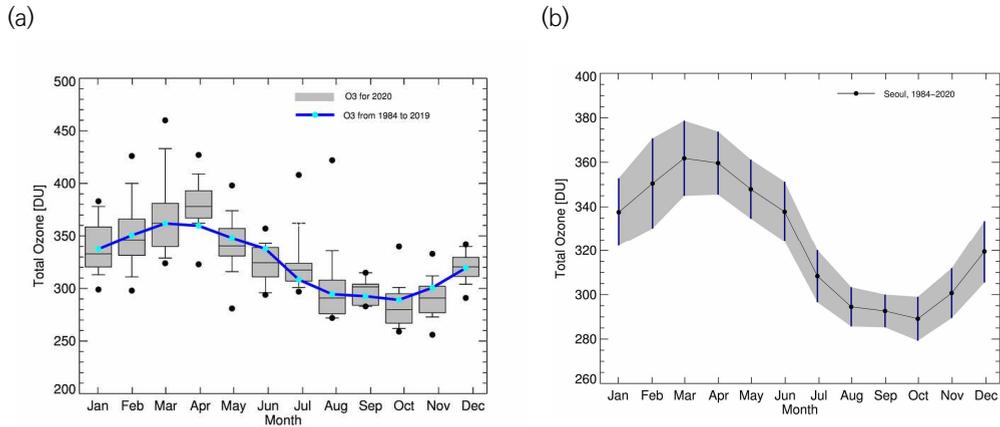


그림 8.2.3 서울 상공 오존전량의 (a) 2020년 연변화(회색 박스 플롯 2020년의 오존전량; 상자 선의 양끝 10%, 90% 상자 양끝 25%, 75% 상자가운데 선은 중앙값 검은 점은 최댓값 및 최솟값) 및 (b) 장기월평균 연변화(1984~2020).

표 8.2.2 서울 상공의 장기 오존전량 및 참조값(1984~2019년)과 2020년 값과의 비교, 장기기후 평균값 (1984~2020년) 및 극값(최대와 최소) (단위 : DU)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
참조값 (Ref. 84~19)	337.5	349.7	361.6	359.0	347.9	338.3	309.2	295.9	294.4	291.2	301.7	320.3	324.5
2020	339	350	368	381	434	323	324	301	298	282	290	320	327
Diff (%)	0.4	0.1	1.8	6.1	24.7	-4.5	4.8	1.7	1.2	-3.2	-3.9	-0.1	0.8
기후값 (Avg. 84~20)	337.5	349.7	361.7	359.6	350.3	337.9	309.6	296.1	294.5	290.9	301.4	320.3	324.6
Stdev	15.4	18.3	17.6	15.2	19.6	13.6	13.1	11.3	10.7	12.2	12.2	13.2	9.1
Max	451	498	499	516	518	449	411	422	354	398	383	434	518
(Date, YY/DD)	(03/4)	(87/27)	(04/6)	(10/30)	(10/11)	(98/3)	(10/14)	(20/16)	(11/12)	(11/5)	(99/26)	(04/31)	(10/ May/11)
Min	256	264	252	283	267	231	225	240	234	231	242	241	225
(Date, YY/DD)	(20/29)	(99/25)	(97/1)	(02/5)	(88/9)	(16/15)	(04/29)	(04/1)	(07/19)	(07/12)	(86/14)	(03/1)	(04/Jul/29)

2020년의 연평균 오존전량은 324.6 DU로 나타났다. 이는 과거 참조값(1984~2019년)의 324.5 DU에 비해서 약 0.03% 증가하였으며, 월별로는 5월에 최대 증가 24.7%를 보이고, 6월에 -4.5%로 최대 감소를 보였다. 2020년의 연교차는 5월의 434 DU와 9월의 282 DU로 152 DU의 연교차를 보이고 있다. 이는 과거 참조값의 연교차인 86.5 DU보다 높게 나타났다.

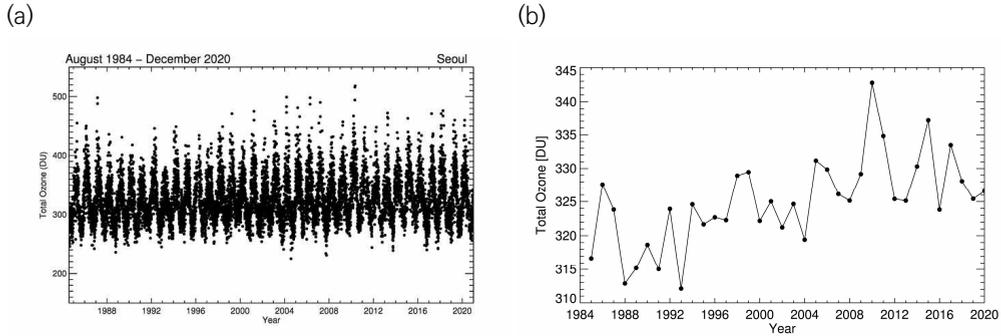
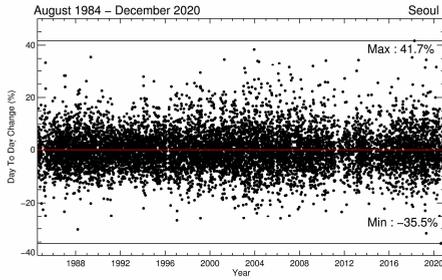


그림 8.2.4 1984년부터 2020년까지 일 오존전량의 장기 시계열 및 (b) 1985년부터 2020년까지 연평균 값의 경년변화.

그림 8.2.4(a)는 1984년부터 2020년까지의 일 오존전량의 장기간의 시계열을 나타낸 그림이다. 서울 지역의 오존은 매년 규칙적인 계절변동이 나타나며, 최대극값은 2010년 5월 11일의 518 DU이며, 최소극값은 2004년 7월 29일의 225 DU로 나타나 그 차이는 293 DU로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 주로 중관기상장의 변화에 의해서 나타나고 있으며, 연변화는 대기대순환의 영향을 받고 있다. 그림 8.2.4(b)의 연평균 오존전량의 경년변화를 볼 때, 과거 관측 기간(1985~2019년)동안 연평균 오존전량이 가장 높았던 시기는 2010년도로 343 DU이었으며, 최솟값은 1993년에 나타난 312 DU이었다. 경년변화 수준의 오존전량의 장기변화는 태양 활동도(solar cycle), 준 2년 주기(QBO)에 의한 요인이 가장 강하며, 그 외에 북극진동(arctic oscillation) 등의 자연 진동과 인위적인 요인의 복합적인 작용에 의해 변화가 일어나게 됨이 보고된 바 있다(조희구 등, 2003; 김준 등, 2005).

그림 8.2.4(a)에서 보인 일 오존전량으로 일일차 변화율(Day To Day Change: DTDC)을 계산하여 그림 8.3.5에 나타내었다. DTDC는 전일 오존량에 대한 그 다음 날 오존량의 차이에 대한 변화율로 정의하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 오존전량의 일일차 변화율은 -35.5~41.7%의 범위에서 나타났다. 오존전량은 $\pm 10\%$ 이내에서 변화하는 것으로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 중관 기상장의 일변화에 기인한 것으로 생각된다. 표 8.2.2은 서울 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 증가 및 감소율, 절대값의 월평균 변화량이다. 이 표에서 오존전량의 변동은 겨울과 봄철에 5.3% 이상의 변화를 보이면서 상대적으로 변화가 크게 나타나고 있으며, 여름과 가을에는 그 변화가 5% 미만으로 상대적으로 변화가 작게 나타났다. 전 기간의 일일차 변화율은 평균 5.3% 변화하는 것으로 나타났다. 그리고 일일차 변화율의 증감 경향에서 증가 경향의 평균은 5.5%, 감소 경향의 평균은 -5.0%로, 오존전량의 일일차 변화는 감소 경향보다는 증가 경향이 더 큼을 알 수 있다.

(a)



(b)

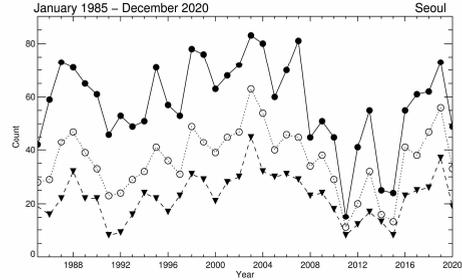


그림 8.2.5 서울 지역 오존전량의 일일차 변화율의 (a) 시계열 및 (b) 증가 경향의 일일차 변화율에 대한 관측횟수.

표 8.2.3 서울 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 월평균, 평균(1984~2020년)

Difference (%)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Absolute	6.4	6.6	7.0	6.2	5.8	5.2	4.9	4.2	3.7	3.8	4.6	5.6	5.3
Stddev.	5.2	5.5	5.7	5.4	4.9	4.2	4.4	4.0	3.4	3.5	3.9	4.8	4.7
Increase	6.6	6.8	7.4	6.4	6.2	5.3	4.7	4.2	3.7	3.7	4.7	5.9	5.5
Stddev.	5.7	6.1	6.2	6.1	5.9	4.6	4.6	4.4	3.9	3.6	4.2	5.4	5.3
Decrease	-5.9	-6.2	-6.4	-5.8	-5.3	-4.9	-4.9	-4.0	-3.5	-3.7	-4.3	-5.1	-5.0
Stddev.	4.7	4.9	5.2	4.6	3.9	3.7	4.3	3.7	3.0	3.4	3.6	4.2	4.2

종관 규모 기상장은 매년 여러 자연 진동에 의해서 그 기상장의 패턴이 변화하게 되므로 오존 전량의 변화에도 이러한 영향을 미치게 된다. 따라서 오존전량이 급변하는 경우에 대해서 경년 변화가 다르게 나타날 수 있으며, 이는 오존전량의 장기 변화경향을 분석하는 데에 영향을 미칠 수 있다. 특히 오존전량의 급증은 오존층의 시간적인 변화 뿐 아니라 오존층보다 하층에 위치한 고도에서의 오존량의 변화, 2차 오존피크 등에 의해서도 민감하게 변화하기 때문에(Park et al., 2012) 증가 경향을 보이는 일일차 변화율의 경년변화는 오존전량의 경년 변화 및 장기 변화 경향을 파악하는 데 있어서 매우 중요한 분석이다. 그림 8.2.5(b)는 일일차 변화율에 대한 관측 횟수를 나타낸 것이다. 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측횟수를 볼 경우, 2011년에 15회로 최소로 나타났으며, 2003년에 84회로 최대로 나타났다. 10% 이상 증가한 관측횟수의 경우에는 1991년과 2011년에 8회로 최소로 나타났으며, 2003년에 46회로 최대로 나타났다. 2020년도의 경우, 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측횟수는 49회, 7.5% 이상 증가한 관측횟수는 33회, 10% 이상 증가한 관측횟수는 20회이다. 그림 8.2.4(b)의 오존전량의 연평균 경년변화와 비교할



경우, 오존전량의 증가를 나타내는 일일차 변화율의 관측횟수는 대체적으로 오존전량의 연평균 경년변화와 유사한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 오존전량의 연변화 경향은 오존층의 장기적인 회복경향의 영향 뿐 아니라 단기적인 오존량의 급변에도 영향을 일부 받는 것으로 보인다.

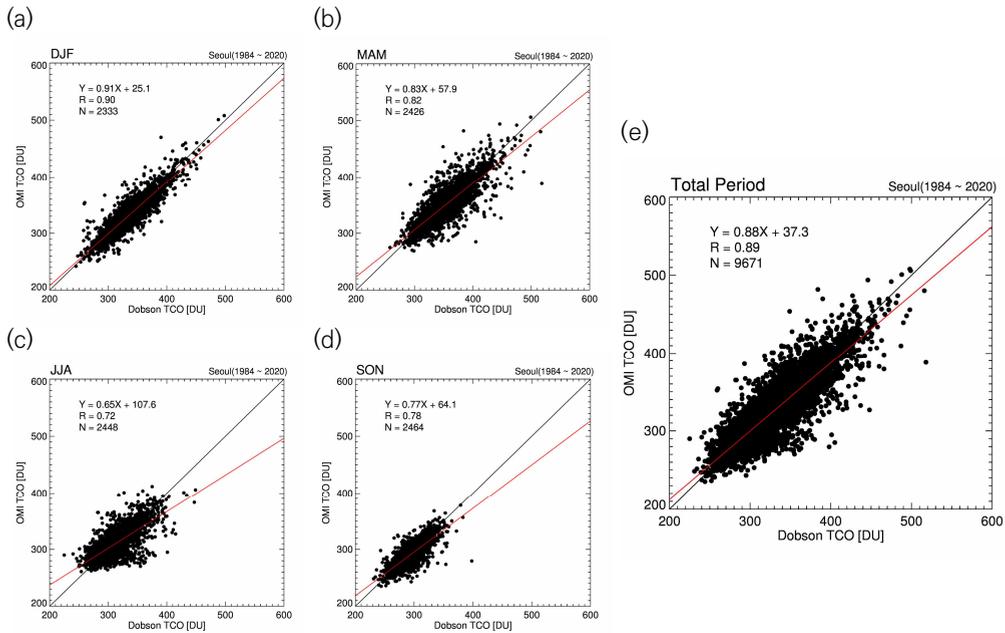


그림 8.2.6 Dobson 분광광도계로 관측한 서울 지역 오존전량과 AURA위성에 탑재된 OMI(Ozone Monitoring Instrument) 센서로 관측한 오존전량과의 비교를 수행. (a) 12월, 1월, 2월, (b) 3~5월, (c) 6~8월, (d) 9~11월, (e) 전체 기간.

그림 8.2.6은 1984년도부터 관측을 수행한 연세대학교 돛슨 분광광도계와 AURA 위성에 탑재된 OMI(Ozone Monitoring Instrument) 센서로 관측한 오존전량을 서로 비교, 분석한 산포도를 나타낸 그림이다. 지상관측결과와 위성관측간의 비교 결과로써 12월, 1~2월(DJF 기간)이 $R = 0.9$ 의 상관계수를 가지면서 겨울철 기간에 둘 간의 상관성이 가장 높았고, 6~8월(JJA 기간)이 $R = 0.72$ 로써 여름철 기간에 가장 낮은 상관성을 보였다. 전체 기간에 대하여 비교한 상관계수는 $R = 0.89$ 로써 매우 높은 상관성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 두 관측결과 간의 비교에 대한 추가적인 결과는 표 8.2.4에 정리되었다.

표 8.2.4 두 관측값을 비교한 그림 8.3.5에서 산출된 결과에 대한 상관관계(R), 선형화된 결과의 Linear Coefficient와 Offset, 각각의 기간에 대해 비교된 전체 자료의 수(N)

Correlation	DJF(12, 1~2)	MAM(3~5)	JJA(6~8)	SON(9~11)	Total Period
R	0.90	0.82	0.72	0.78	0.89
Linear Coefficient	0.91	0.83	0.65	0.77	0.88
Offset	25.1	57.9	107.6	64.1	37.3
Total Data N	2333	2426	2448	2464	9671

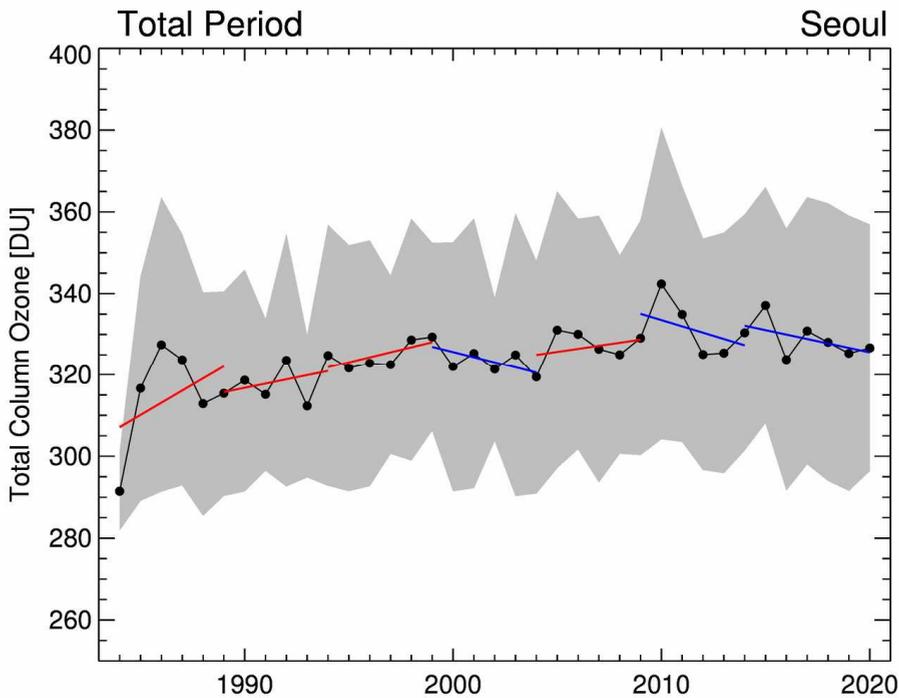


그림 8.2.7 서울 지역에서 관측한 오존전량에 대하여 전체 기간(1984~2020년)의 연평균 값과 5년간의 트렌드를 상향 기울기: 빨간색, 하향 기울기: 파란색 나타낸 그림, 각 연도의 연평균을 중심으로 한 표준편차를 회색으로 표현.

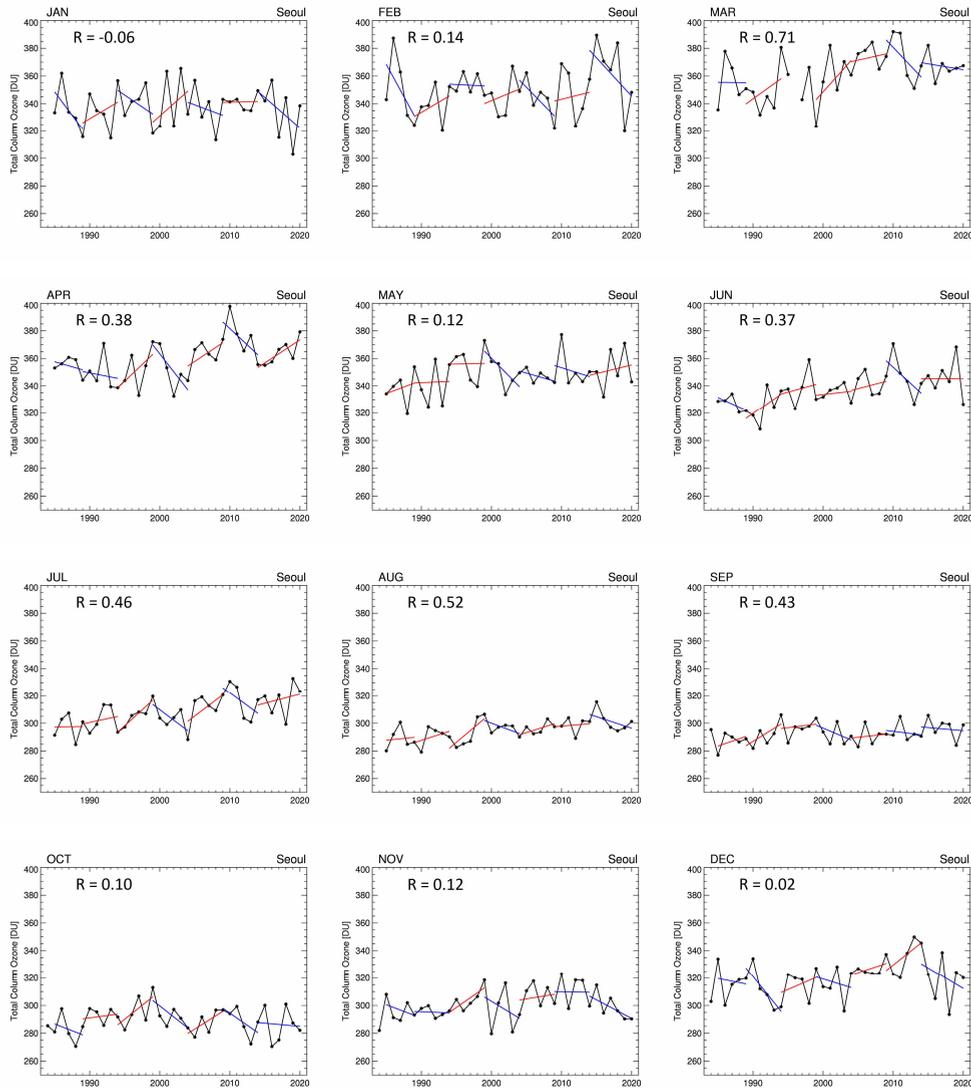


그림 8.2.8 서울지역 오존전량을 전체 기간(1984~2020년)에 대하여 각각의 연도에 대한 월평균을 계산한 결과. 그림 8.3.8과 같은 형식으로 5년간의 트렌드를 표현하였음. 상관관계 (R)은 전체 기간 연평균 오존전량 값과 월평균 값의 비교를 통해 계산한 값.

그림 8.2.7은 1984~2020년 기간 동안 관측한 오존전량의 연평균 결과를 시계열 자료로 표현하였고, 동시에 5년 간격으로 나누어 그 트렌드를 나타낸 그림이다. 1984년부터 2000년까지 서울 상공의 오존전량은 꾸준히 상승하는 트렌드를 보여주었으나, 2000년 이후 5년간은 약간의 하향세를 보였다. 2010년까지 큰 폭의 상승세를 다시 보여줌으로써 다시금 오존량의 상승세를

가지는 듯하였으나, 이후 기간 동안 다시 하향세를 가지면서 연평균의 트렌드가 주기적으로 변하는 것과 같은 모습을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 해당 그림에서 보여주는 각 년도의 기간에 대하여 월평균을 계산해 시계열로 나타낸 것을 그림 8.3.8에서 보여주고 있다. 또한 연평균 시계열 그림과 같은 방법으로 5년간의 트렌드를 나타내었다. 두 그림을 통해서 연평균의 트렌드와 연도별 월평균의 트렌드가 항상 일치하는 것이 아닌 것으로 보인다. 두 그림 간의 비교 및 분석의 결과로써, 전체 12개월 중 3월의 상관계수 $R = 0.71$ 으로 연평균과 가장 유사한 경향을 가지고, 1월의 상관계수 $R = -0.06$ 으로 연평균의 흐름과 가장 상관성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그 외 기간에도 연평균 시계열 흐름과 큰 상관성을 가지지 못하는 경향을 보여준과 동시에 전 기간 오존전량 평균에 대한 표준편차가 평균 약 60 DU 정도를 가지기 때문에 월별 간 트렌드의 차이가 크게 난다는 것을 해당 자료를 통해서 확인할 수 있다.

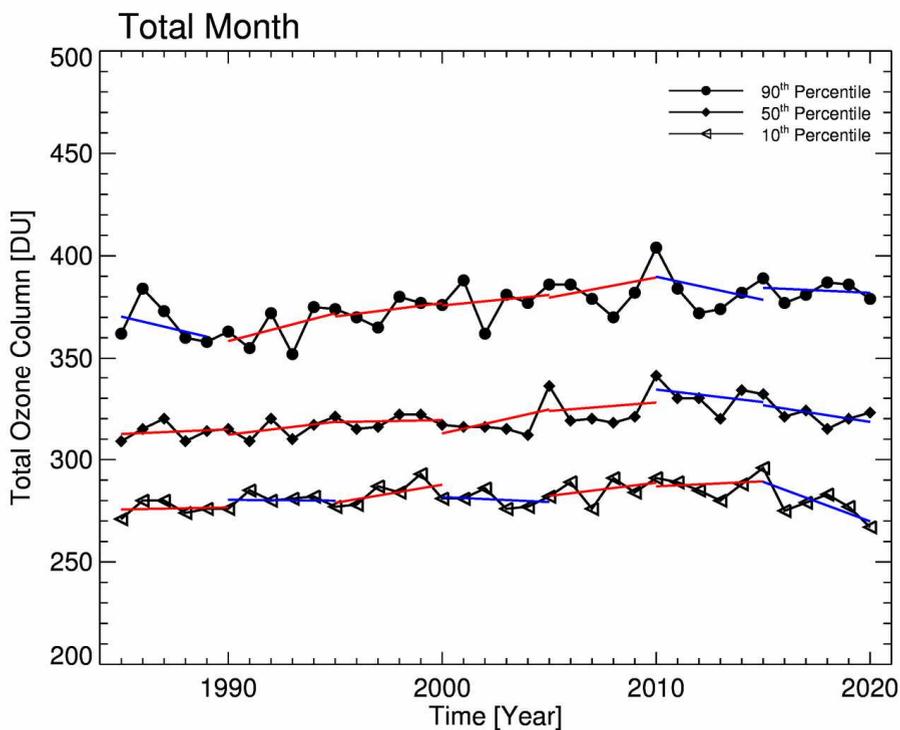


그림 8.2.9 서울 오존전량 관측결과를 사용하여 연간 결과의 90%, 50%, 10% 구간에 해당하는 값을 시계열로 표현하고, 5년씩의 트렌드를 나타냄.

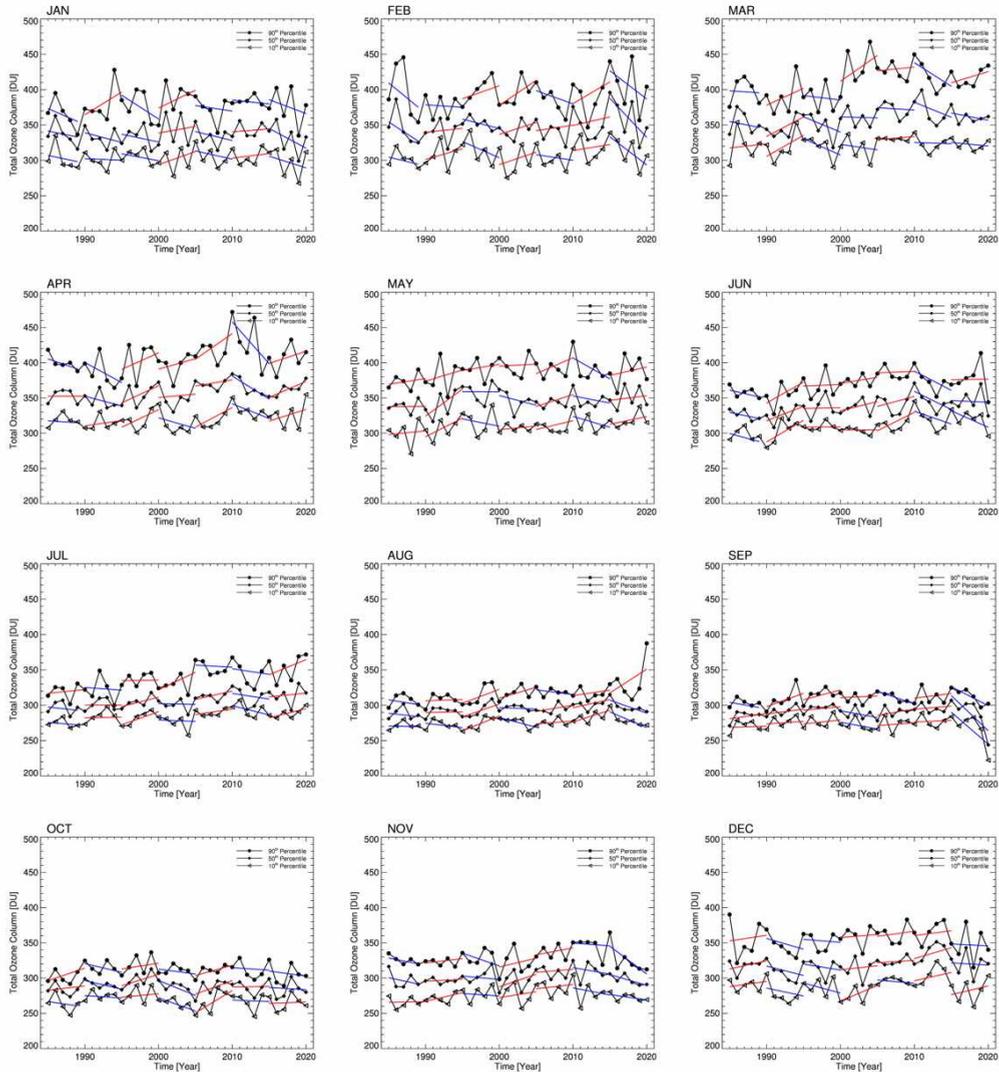


그림 8.2.10 서울 오존전량 관측결과를 사용하여 월별 결과에 대한 90%, 50%, 10% 구간에 해당하는 값을 시계열로 표현하고 5년씩의 트렌드를 나타냄.

그림 8.2.9과 그림 8.2.10은 1984~2020년 기간 동안 관측한 오존전량의 중간값과 10, 90 percentile을 연과 월로 각각 계산하여 그림으로 표현한 그림이다. 그리고 앞서 그린 그림 8.2.7와 그림 8.2.8과 같이 5년간의 트렌트를 계산하여 동시에 나타내었다. 연간 전체 월 기간에 대하여 계산한 10%, 50%, 90%의 트렌트는 대체로 비슷한 트렌드를 가지는 것을 확인할 수 있다. 오존의 변동성이 큰 1~5월 기간의 트렌드는 전체 월 기간 동안 계산한 그림 8.2.9의 트렌드에 비해 변동

성이 크게 나타나는 경향을 보이나, 그림 8.2.10의 그 외 월 기간 동안 관측한 자료의 10%, 50%, 90% 값의 트렌드는 비교적 안정하며 전체 월 관측값의 계산 결과 트렌드와 비슷한 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 앞서 나타낸 평균값의 트렌드 뿐만 아니라 중간값 외 다른 경계값을 확인하는 이유는 평균의 트렌드가 모든 값의 트렌드를 보여주는 것이 아님을 시사하기 때문이다. 중간값과 평균값은 비슷한 속성을 가지는 것처럼 보이나, 만약 전체 데이터가 가지는 분포의 경향이 특정 값에 치우친 모습을 보여준다면 중간값과 평균값의 차이는 크게 난다. 따라서 중간값과 평균값을 비교하여 그 차이를 확인하는 것은 해당 연 혹은 월의 전체 데이터 분포가 어떠한 경향을 가지고 있는지 확인할 수 있는 중요한 과정이다. 그림 8.2.11, 그림 8.2.12에서 중간값과 평균값 두 결과를 시계열로 표현하고, 그림 8.2.13, 그림 8.2.14에서 두 값의 차이를 계산하여 시계열로 표현하였다.

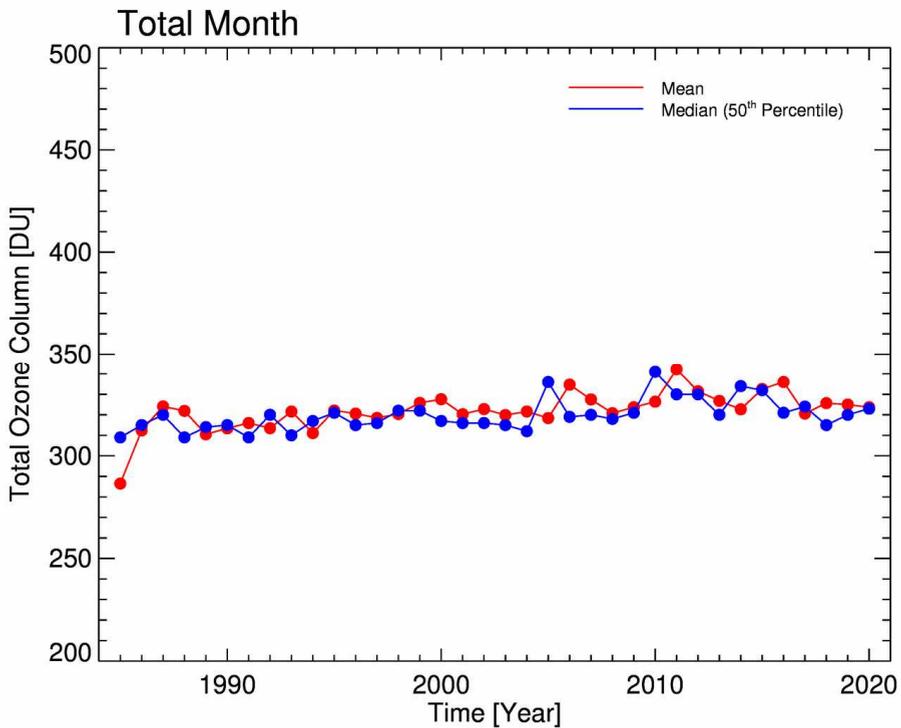


그림 8.2.11 서울 오존전량 관측을 수행한 결과에 대하여 연평균(빨강)과 연 중간값(파랑)을 각각 시계열로 표현.

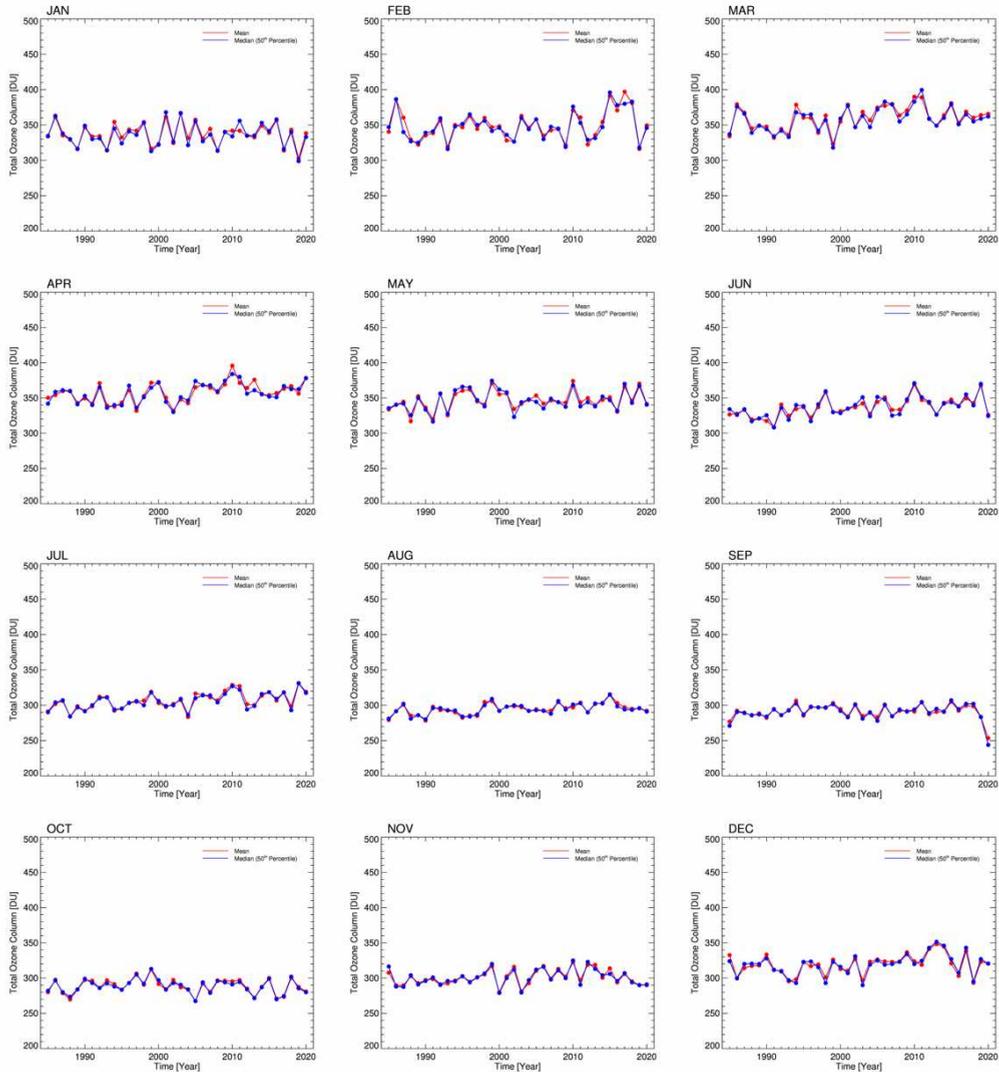


그림 8.2.12 서울 오존전량 관측을 수행한 각 연마다의 결과에 대하여 중간값(파랑)을 각각 시계열로 표현.

그림 8.2.11와 그림 8.2.12은 1985~2020년 기간 동안 관측한 오존전량의 평균값(빨강)과 중간값(파랑)을 각각 연과 월에 대하여 비교하여 시계열 자료로 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 대체로 두 결과는 비슷한 경향을 가지고, 몇몇 구간에 대해서만 조금의 차이를 보이는 것으로 나타난다. 두 값의 차이가 얼마나 나타나는지에 대한 결과는 그림 8.2.13과 그림 8.2.14에서 확인할 수 있다.

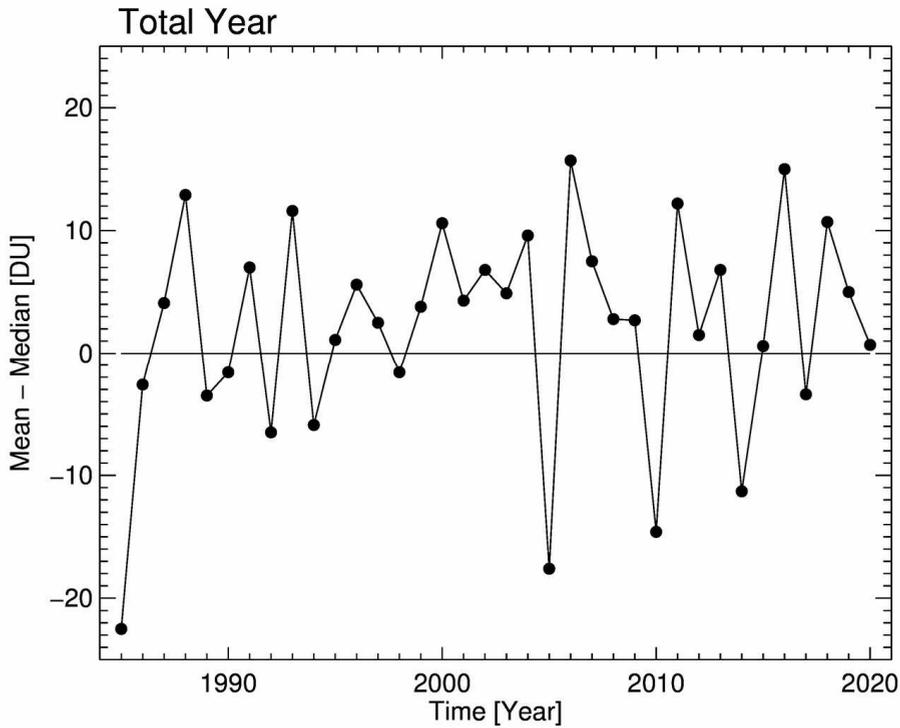


그림 8.3.13 서울 지역 오존의 1984~2020년 기간 동안 관측한 연평균과 연 중간값 간의 차이를 계산하여 시계열로 표현.

그림 8.2.13은 1984~2020년 기간 동안 관측한 오존전량의 연평균과 연 중간값의 차이를 계산한 결과이다. 그림 8.2.14는 그림 8.3.13과 비슷하게 월평균과 월 중간의 차이를 각 년마다 계산하여 시계열로 표현한 결과이다. 두 차이의 결과에 대하여 연평균과 연 중간값 차이 중 가장 큰 값을 가지는 시기는 2006년(17 DU)이고 가장 작은 값을 가지는 시기는 1985년 연평균과 연 중간값의 차이(-23 DU)이다. 월평균과 월 중간값 차이 중 가장 큰 값을 가지는 시기는 1987년 2월(20 DU)이고, 가장 작은 값을 가지는 시기는 2011년 1월(-17 DU)이다. 대체로 겨울철에 평균값과 중간값 차이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있고, 그 외 계절에는 두 관측결과 간의 차이가 크게 나지 않는 것을 통하여 겨울기간 외의 계절엔 관측결과가 한쪽으로 치우치는 결과가 비교적 작게 나타나는 것을 그림을 통해 확인할 수 있다.

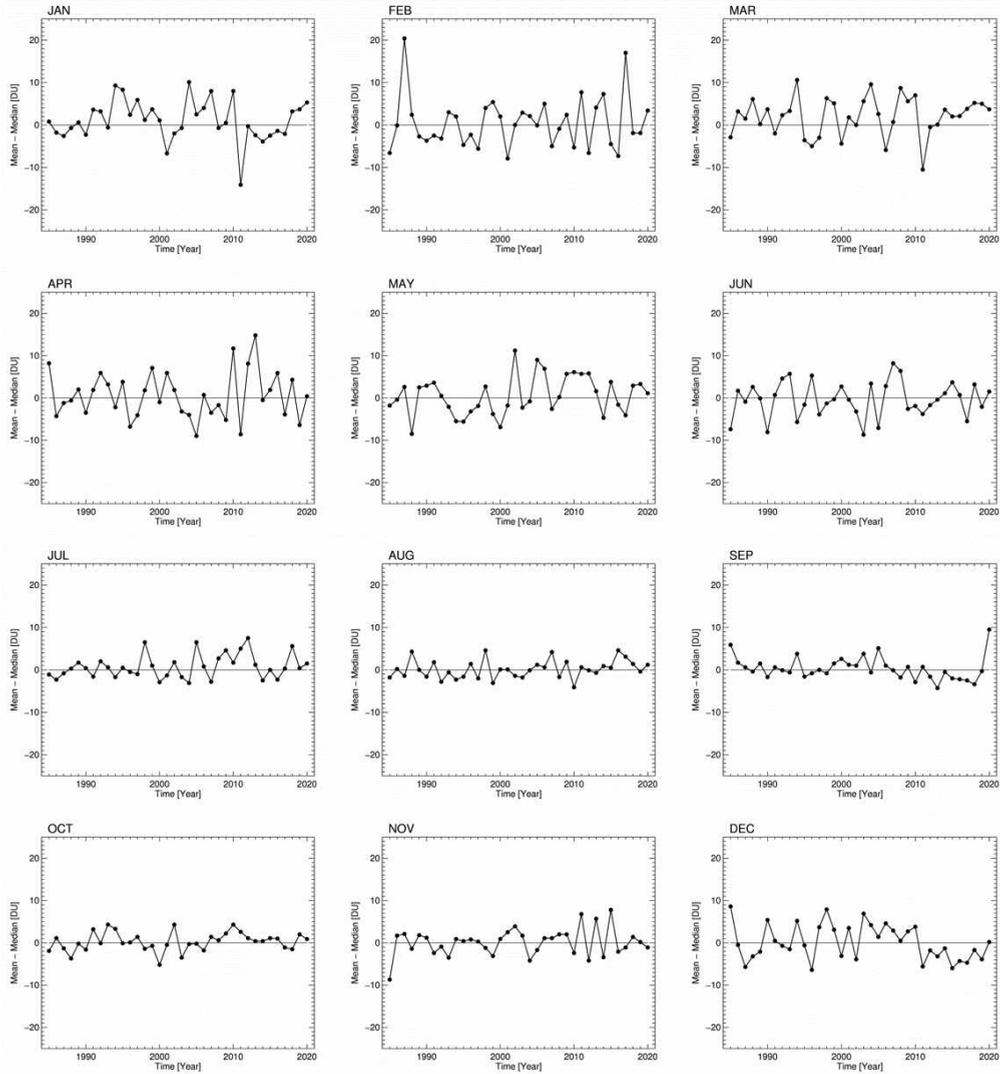


그림 8.2.14 서울 지역 오존의 1984~2020년 기간 동안 관측한 각 연의 월평균과 월 중간값 간의 차이를 계산하여 시계열로 각각 표현.

8.3 오존연직분포

오존의 수평, 연직적 이동을 추정하고 각 대기권의 오존량이 상호 미치는 영향을 이해하기 위해서는 오존의 연직분포에 관한 연구가 대단히 중요하다(Kim et al., 2000). 오존 연직분포는 연직 공기기둥에 존재하는 각 층의 오존량을 의미하며 오존의 광화학 반응 및 대기 수송 등에 의해 결정된다. 오존은 강한 자외선에 의한 광화학 작용으로 인해 성층권 중·하부(20~30 km)에서 최고 농도대를 형성하며, 성층권하부·대류권상부(9~16 km)에서 성층권-대류권 상호교환이 발생한다. 그 과정에서 성층권의 고농도 오존이 대류권으로 유입되어 Second Ozone Peak을 생성하며, 때때로 지표까지 영향을 주기도 한다(Hocking et al., 2007). 포항 기상관측소에서는 ECC(Electrochemical Concentration Cell Ozonesonde) 오존존데를 이용해서 1995년 처음 관측을 시작한 이래로 현재까지 오존의 연직분포 관측을 이어오고 있다. 서울(숙명여자대학교) 위탁관측소에서는 마이크로파 수신기를 이용하여 2008년부터 연직오존을 관측하고 있으며, 서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 오존분광광도계에서 Umkehr 방법(Petropavlovskikh et al., 2011)을 통해 연직오존 자료를 생산하고 있다.

8.3.1 포항

오존존데 관측은 WMO 권고에 따라 주 1회의 관측주기로 매주 수요일 실시하는 것을 원칙으로 하며, 기상 상황이 좋지 않을 경우에는 수요일 전후의 날을 택하여 관측을 실시하고 있다. ECC 오존존데는 1200~2000 g 정도로 무게가 가볍고 부피가 작아 일반적으로 30 km 이상까지 관측이 가능하며, 오존존데의 관측 원리는 오존과 요오드화칼륨(KI) 용액의 화학 반응을 활용한다. 사전준비절차를 통해 센서에 투입된 KI(potassium iodide) 용액은 존데가 비양하면서 흡입되는 공기 중의 오존 분자와 반응하여 전류를 발생시키는데, 이때 발생하는 전류를 측정하여 오존량을 추정한다(Komhyt and Harris, 1971, Kivi et al., 2007, Smit et al., 2007). 2020년에는 총 51회의 오존존데 관측이 실시되었고, 이 중 30 km까지 관측을 성공한 50회를 분석에 이용하였다. 그림 8.3.1은 2020년 포항 상공의 월평균 연직 오존 분포를 오존분압(mPa)으로 나타낸 그림이다. 고농도 오존은 주로 20~26 km에 분포하며, 2~5월에 가장 높게 나타났다. 특히, 3월에서 4월 동안 약 20~24 km 고도에서 최대 농도 값이 나타났으며, 8월에 가장 높은 고도에서 최대 농도가 나타났다. 대류권에 해당하는 9 km 이하의 고도에서는 6월에 최대 농도가 나타났으며, 이는 초여름의 강한 태양복사에 기인한 것으로 보인다. 계절에 따른 고도별 농도변화는 성층권 하층과 대류권 상부(9~16 km)에서 가장 뚜렷하게 나타났다. 이 고도에서는 대류권-



성층권 상호교환으로 인해 봄철에 Second Ozone Peak라는 오존전량 급증 현상이 발생하는데 최근 연구에 의하면, 이러한 대류권-성층권의 상호교환이 활발해지고 있다고 보고되고 있다 (Park et al., 2012; Shin et al., 2020).

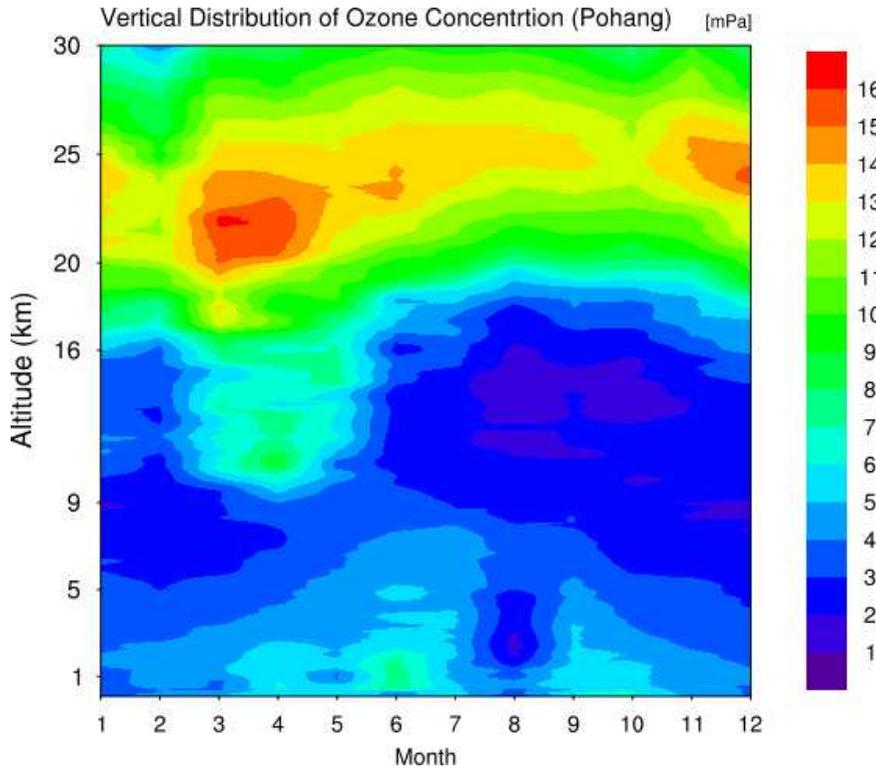


그림 8.3.1 2020년 포항지역의 오존농도 연직분포.

8.3.2 서울(숙명여자대학교) 위탁관측소

성층권에 집중적으로 분포하고 있는 오존은 광화학반응에 따라 농도 영향을 받으며, 지구로 유입되는 자외선을 차단하는 보호막의 역할을 하기 때문에 인류를 비롯한 지구 생태계에 미치는 영향이 크다. 성층권 오존의 농도 측정은 일정 면적에서의 대기에 분포하는 오존의 총량을 측정하는 방법과 고도별 분포를 측정하는 방법으로 나눌 수 있다. 서울의 숙명여자대학교 지구환경연구소에서는 성층권 오존의 고도별 분포도를 측정하는데, 성층권 오존이 방출하는 마이크로파를 지상에서 수신하여 오존의 스펙트럼을 관측하고, 스펙트럼의 모양 분석을 통해 농도를 산출한다. 마이크로파 수신기는 24시간 운영되므로, 고도별 오존 분포 변화를 연속적으로 추적할 수 있고, 실내에서 운영되기 때문에 외부 환경에 의한 기기의 오염과 관측 방해 요소를 최소화할 수 있다.

(a)



(b)

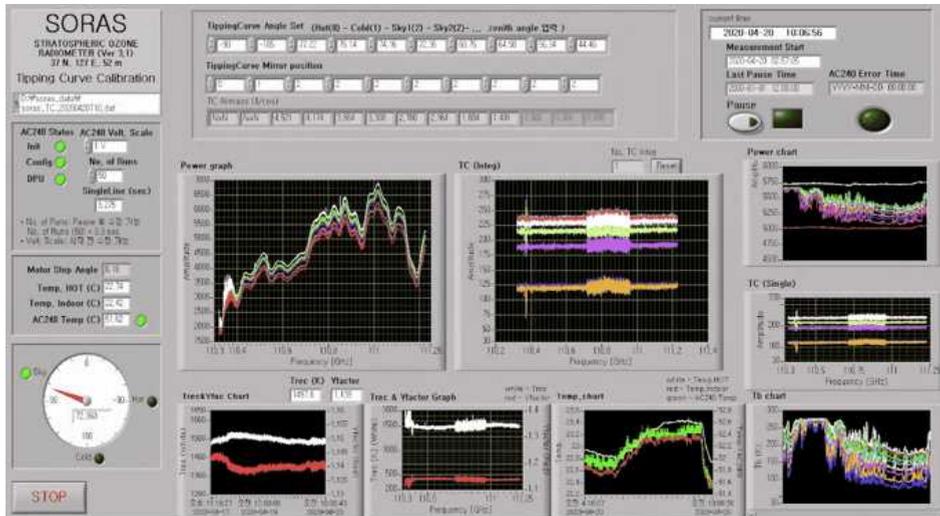


그림 8.3.2 (a) 숙명여대 지구환경연구소의 110 GHz 성층권 오존 관측용 마이크로파 수신기(SORAS). (b) SORAS 구동 소프트웨어 화면.



속명여대에서는 2013년부터 단측파대 수신 방법을 통해 현재까지 성층권 오존을 관측하였으며, 그 동안의 관측자료를 이용하여 지표 부근의 절대습도 변동에 따른 스펙트럼의 변동과 대류권 광학두께의 변동을 나타내었으며, 관측한 성층권 오존의 고도별 분포를 부피혼합비(ppmv)와 분압(mPa) 단위로 나타내었다. 또한 이렇게 관측한 오존농도를 포항의 오존존테의 관측값 및 AURA위성의 MLS 관측값과 비교하여 결과의 정확도를 나타내었다.

지상에서 관측한 110 GHz 오존 전파는 오존이 방출하는 110.836 GHz를 중심으로 신호가 퍼져있는 스펙트럼의 형태로 나타낼 수 있다. 성층권에서 방출된 오존 전파가 지상으로 전달되는 과정에서 전파가 대류권을 통과하므로 스펙트럼관측값에는 대류권의 온습도 및 구름 변동으로 인한 영향이 포함되어 있다. 다음 그림과 같이 2020년 4월 16일 16시 30분부터 17시 30분까지의 관측한 스펙트럼에서는 구름의 영향으로 인해 스펙트럼의 관측 레벨(밝기온도)이 순간적으로 높아졌다가 다시 회복된 것을 보여준다.

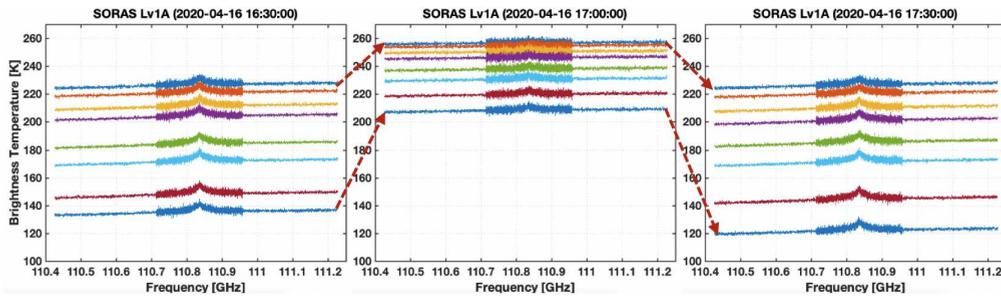


그림 8.3.3 2020년 4월 16일 16시 30분부터 30분 간격으로 관측한 SORAS 스펙트럼의 변동성. 대류권 온습도 변동에 따라 스펙트럼의 반응이 즉시 나타남(8개의 스펙트럼은 위에서부터 천정기준 77.2, 76.1, 74.2, 72.4, 68.7, 65.0, 56.3, 44.5°의 관측각을 나타냄).

계절별 온습도의 차이가 큰 우리나라에서는 스펙트럼 내에 포함된 대류권의 영향이 매우 다르게 나타난다. 대류권의 온습도 영향은 광학깊이(Optical Depth)라는 변수로 나타낼 수 있으며, 관측 스펙트럼 분석을 통해 유도할 수 있다. 2013년부터 2020년까지 측정된 광학깊이의 변동을 다음 그림에 나타내었다. 광학깊이는 겨울철에는 낮은 수준을, 여름철에는 높은 수준의 값이 관측된다.

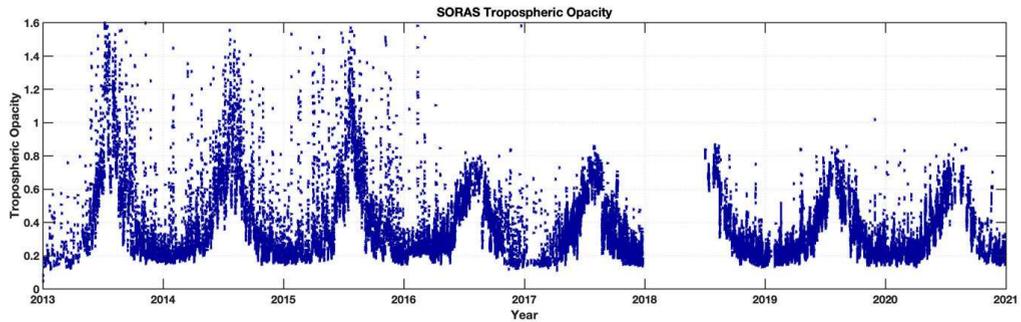


그림 8.3.4 2013년부터 2020년까지 SORAS 관측 스펙트럼으로부터 측정된 대류권 광학깊이. 2016년 이후 상시 Tipping Curve 보정법을 이용한 고도의 데이터 품질검사 기법으로 높은 광학깊이의 값은 제외됨.

낮은 광학깊이는 성층권의 전파가 지상으로 높은 투과율로 전달되었다는 것을 의미하며, 이는 곧 낮은 온습도 분포를 의미한다. 즉, 겨울철에는 0.14 수준의 광학깊이로 성층권 오존의 전파 신호가 85% 이상의 효율로 지상으로 전달되었음을 의미하며, 여름철에는 허용 광학깊이의 한계선이 0.85 수준으로 나타나고 있어 약 43%의 전파신호가 전달되었음을 의미한다. 즉, 겨울철일수록 좋은 품질의 오존전파 신호를 수신할 수 있다. 2013~2015년의 광학깊이와 2016년 이후의 광학깊이의 패턴 차이는 관측 방법 및 자료 품질검사 방법의 차이로 인해 허용 최댓값의 크기가 달라진 것으로, 대기 상황의 변동을 의미하지는 않는다.

대류권의 기상 요소와 광학깊이, 관측 스펙트럼의 변동 경향을 비교하기 위해 2019~2020년 2년간 관측된 광학깊이와 스펙트럼의 밝기온도를 동일 관측지점에 설치된 기상센서로부터의 절대 습도 측정값과 비교하였다. 관측지인 서울 숙명여자대학교에서의 절대습도는 겨울철 0.1 g/m^3 의 최솟값과 여름철 19.2 g/m^3 의 최댓값을 보여 약 190배가 넘는 연중 습도 차이를 보이고 있다. 지표 부근의 기상센서에서 측정된 절대습도가 대류권의 전체 습도량을 대표할 수는 없으나, 아래 그림에서 보면 절대습도 변동에 따라 대류권의 광학깊이와 관측 스펙트럼의 밝기온도가 같이 변동하는 것을 볼 수 있어 마이크로파 수신기의 밝기온도가 습도에 매우 민감하게 반응하고 있는 것을 확인할 수 있다.

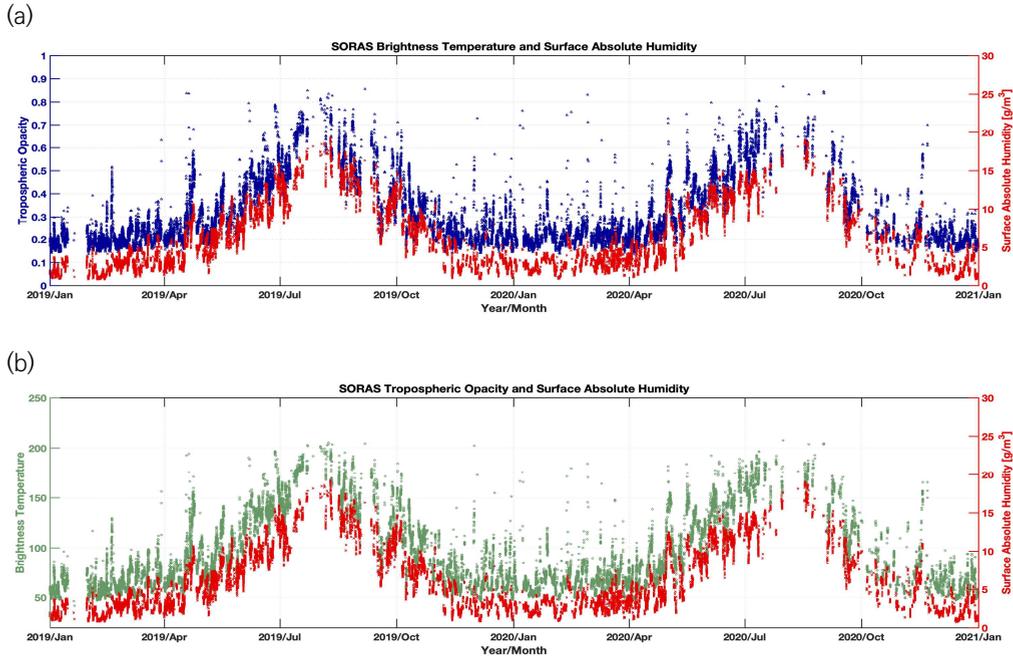


그림 8.3.5 (a) 2019~2020년 SORAS로 관측한 대류권 광학깊이와 기상센서로 측정된 절대습도값의 비교. (b) 2019~2020년 SORAS로 관측한 밝기온도(관측각 44.5도)와 기상센서로 측정된 절대습도값의 비교.

성층권 오존의 연직분포는 관측 스펙트럼에서 대류권의 영향을 나타내는 광학깊이의 크기를 보정한 후에 통계 분석방법을 통해 유도할 수 있다. 아래 그림에서는 마이크로파 수신기(SORAS)로 관측한 16~60 km의 성층권 오존 연직분포를 부피혼합비(ppmv)와 분압(mPa)의 단위로 나타내었다. 부피혼합비는 각 고도에 분포하는 공기에 대한 오존의 상대적 비율을 나타낸 것이며, 분압은 오존이 차지하는 기압 크기를 나타낸 것으로 절대량이라 볼 수 있다. 마이크로파 수신기를 이용한 스펙트럼 분석 방법은 부피혼합비의 단위를 갖는 오존연직분포를 산출하고 있으며, 오존 분압은 각 고도별 산출된 부피혼합비에 고도별 기압을 곱하여 계산하였다. 여기에서는 오존존대의 관측 단위와 통일을 위해 주로 오존분압을 사용하여 나타내었다.

오존층은 20~26 km에 12 mPa 이상의 농도로 집중분포하고 있으며, 1~2월에 최대 농도를 보인 후 점차 농도가 감소하면서 고도가 상승한다.

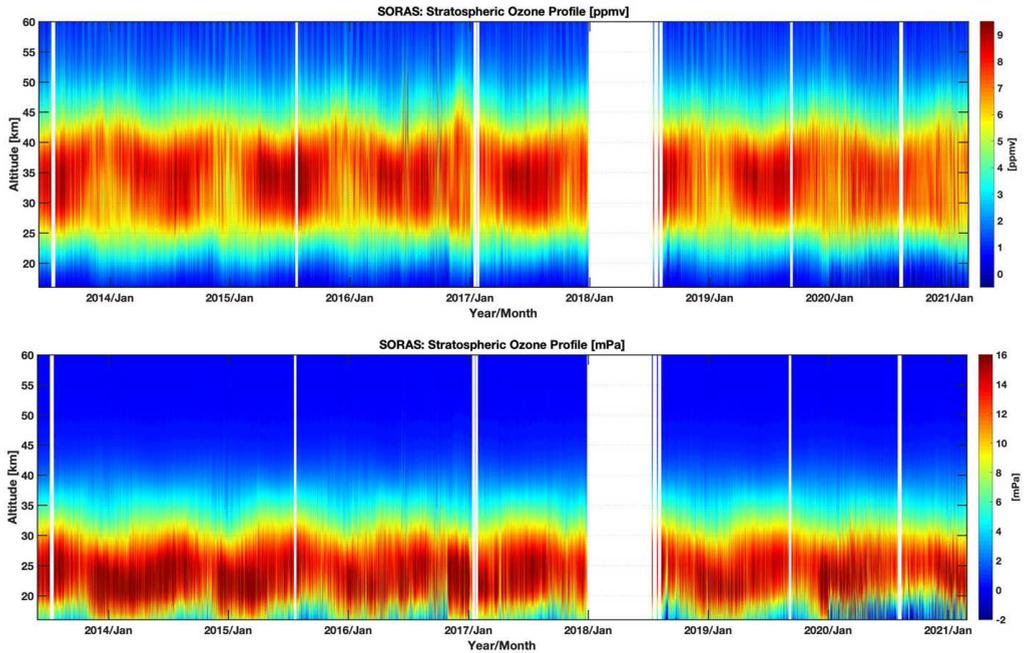


그림 8.3.6 2013~2020년 한반도 상공의 오존층 연직분포 변동 관측값. 위에서부터 SORAS로 관측한 오존부피혼합비(ppmv)와 오존분압(mPa).

아래 그림에서는 오존 연직 분포 중 최대 분압의 변동을 나타내었다. 오존의 최대 농도는 연중 12~19 mPa의 변동 범위를 나타내고 있으며, 2019년에 1월의 연중 최대 농도가 예년에 비해 2 mPa 정도 낮게 관측되었으나, 2020년에는 다시 회복된 것으로 나타났다.

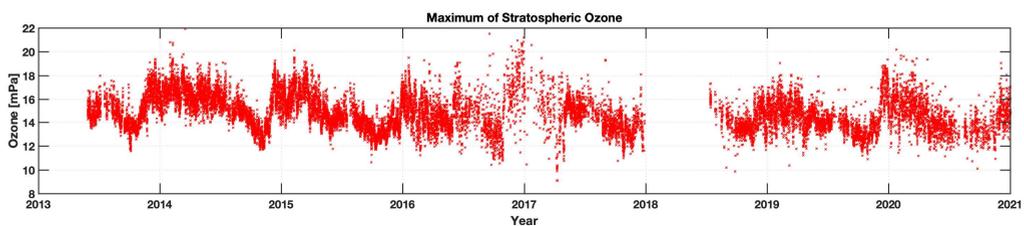


그림 8.3.7 2013~2020년 오존 최대 농도(mPa) 변동.

각 고도별 오존 분압 변동을 살펴보면, 계절적 변동이 우세하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며, 고도별로 연중 최대 농도가 나타나는 시기의 차이를 확인할 수 있어 대기 순환에 대한 정보를 확인할 수 있다. 특히 16~24 km 구간에서는 오존의 최솟값과 최댓값의 차이가 2배 이상 나타나고 있어 매우 역동적인 변동이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

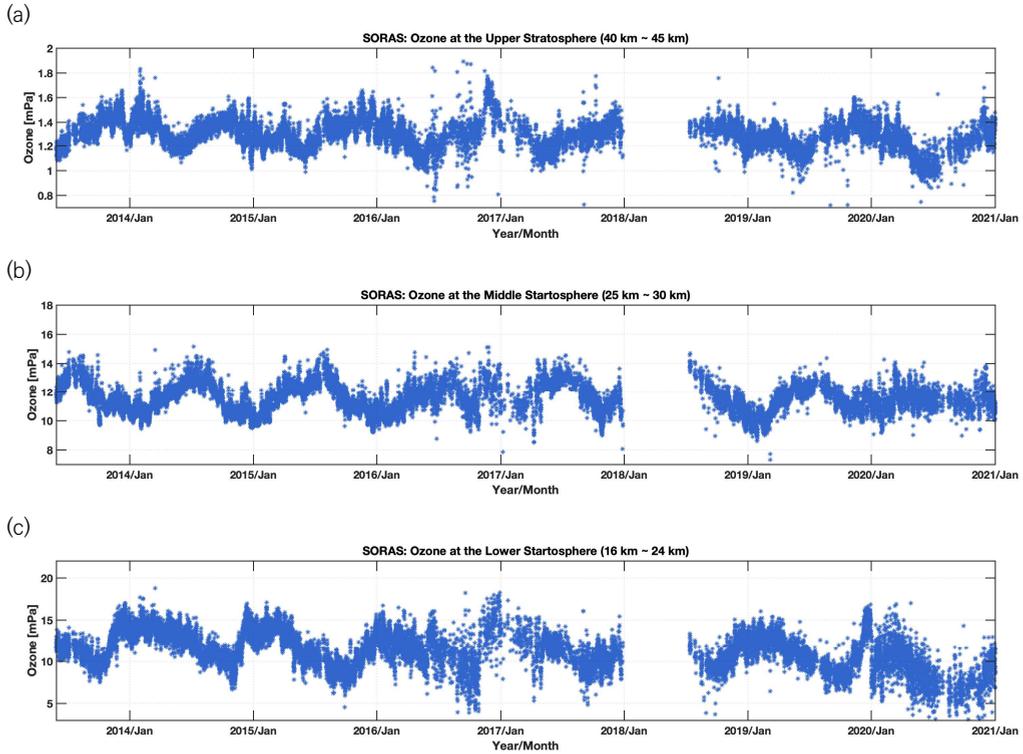


그림 8.3.8 2013~2020년 고도별 성층권 오존 변동 경향(mPa). (a) 40~45 km, (b) 25~30 km, (c) 16~24 km.

마이크로파 수신기로 측정된 오존 분압을 AURA위성의 MLS 관측값과 포항 기상대에서 오존존데로 관측한 오존 분압과 비교하였다. 비교 기간은 2013~2019년이며, 비교 고도는 20~30 km 범위로 한정하였다. 시간 범위는 존데 비양 시간을 기준으로 2시간 이내에 관측된 자료만을 선택하였다. MLS 자료는 속명여대로부터 500 km 이내의 관측값을 선택하였으며, 위경도의 범위를 보면 북위 37.05° 또는 38.53°, 동경 120~132°에서의 자료가 사용되었다.

MLS 관측값과의 비교 결과, 경우의 차이는 있으나 대략적으로 10% 이내의 오차범위를 갖는 것으로 나타났으며, 2014년에는 양의 오차가 우세하게 나타났으나, 2019년 이후에는 그 편중성이 거의 없어진 것으로 나타났다. 포항의 오존존데 관측 자료와의 비교를 하면 서울 속명여대에서 관측한 오존농도값이 2016년 초와 2017년 초를 제외하고 서울의 오존농도가 포항보다 높게 나온 것으로 나타났다. 농도 차이의 가장 큰 원인은 위도 차이로써, 속명여대의 위도는 37.32°, 포항기상대의 위도는 36.03°에서 관측하여 고위도인 속명여대 위치에서의 오존량이 더 크게 나타난다. 세 관측자료에서 연중 변동 경향성은 매우 유사하게 나타나고 있어 성층권 오존의 연직분포 관측이 신뢰성을 갖고 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

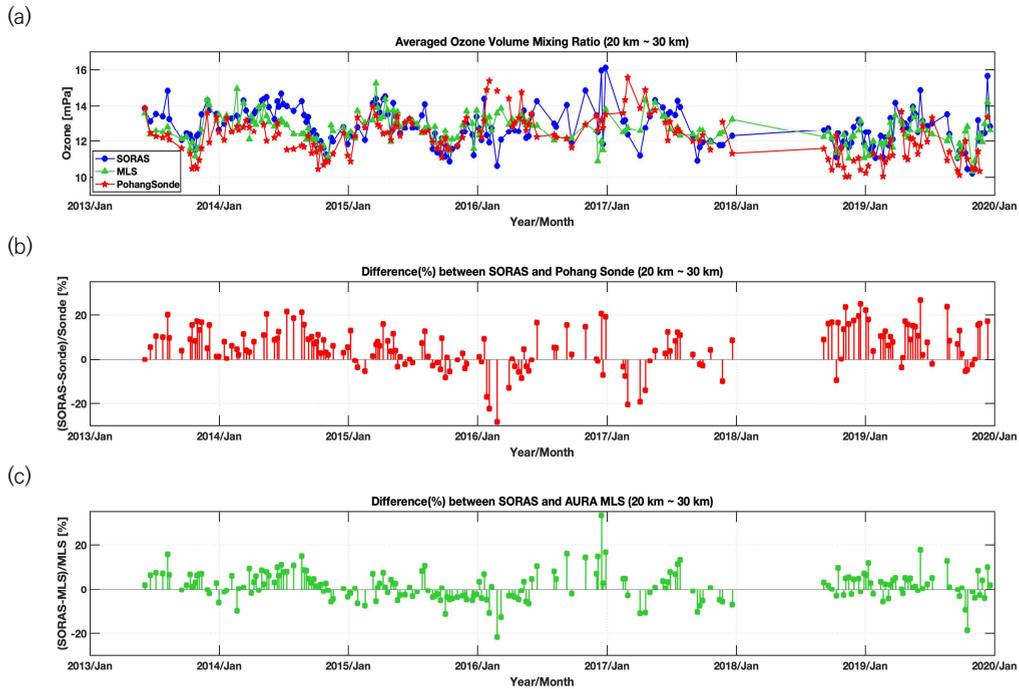


그림 8.3.9 2013~2020년 20~30 km 상공에서의 SORAS와 AURA위성의 MLS, 포항 오존존데 관측값의 비교. (a) 각 관측장비로부터의 관측값. (b) SORAS와 MLS관측값 차이 비교. (c) SORAS와 포항 오존존데 관측값 차이 비교.

8.3.3 서울(연세대학교) 위탁관측소

서울(연세대학교) 오존관측소에서는 1986년부터 Umkehr 방법으로 Dobson 및 Brewer 분광광도계를 이용하여 연직 오존분포를 관측하고 있다. 날씨가 맑을 때, 오전에는 해가 뜨기 직전부터 태양 천정각이 60°이하가 될 때까지, 그리고 오후에는 태양 천정각이 60°일 때부터 일몰 무렵 태양 천정각 90° 부근이 될 때까지 관측하여 0~60 km 까지 총 10개의 층에 대한 오존량을 산출한다. 이 때, 태양 천정각 별 관측값이 기후값과 비교하여 큰 차이를 보일 경우 에어로졸 또는 구름 등의 영향을 받았다고 판단하여 이후 분석에서 제외시켰다. 2020년 한 해 동안 Dobson 분광광도계를 통해 총 90번의 Umkehr 관측이 있었다. 표 8.3.1은 1986년부터 2020년까지 각 층 별 월평균 오존량을 나타낸 것이다. 표 하단의 연평균 값을 보면 19~28 km(Umkehr 4, 5번 층) 고도의 성층권에서 약 135.3 DU의 오존량을 함유하고 있는데, 이는 평균 오존전량의 약 47.5%로 전체 고도 중 가장 많은 오존을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 표 8.3.2는 Umkehr로 관측한 오존연직 분포 값을 사용하여 계산한 오존전량이다. 대류권 오존량(1번 층, 0~10 km)은 Umkehr 관측을 시작한 이래로 2010년까지 오존전량의 약 10% 이하를 차지하고 있었으나, 2011년 이후로는



꾸준히 10% 이상의 값을 보이고 있는데 이는 최근 20여 년간 꾸준히 증가하고 있는 지표면 오존 농도와 연관 지어 생각해 볼 수 있다(대기환경연보, 2018).

표 8.3.1 서울 오존 연직분포 월평균 자료(1986~2020년) [단위 : DU]

연도	Ozone Layers (km)										오존전량 (DU)
	1 (0~10)	2 (10~15)	3 (15~19)	4 (19~24)	5 (24~28)	6 (28~33)	7 (33~38)	8 (38~43)	9 (43~48)	10 (48~60)	
1986	30.7	27.5	48.4	76.1	66.8	45.9	26.2	10.2	3.4	1.4	336.6
1987	30.5	26.4	47.7	77.8	69.8	47.3	20.8	7.6	2.8	1.3	332.0
1988	29.8	20.8	38.6	73.4	70.7	44.3	18.4	7.0	2.8	1.3	307.1
1989	28.9	22.8	42.2	74.9	72.6	46.8	22.5	8.8	3.1	1.3	323.9
1990	29.7	25.2	46.7	77.7	65.8	42.7	25.3	11.3	3.7	1.4	329.5
1991	31.5	21.6	38.8	69.8	68.7	49.0	19.6	6.9	2.7	1.3	309.9
1992	33.9	28.3	50.5	76.6	63.4	43.2	21.1	7.8	2.9	1.3	329.0
1993	30.2	18.0	35.2	72.6	66.6	41.4	19.8	8.0	3.0	1.3	296.1
1994	31.5	26.7	48.5	77.4	64.9	42.7	23.8	9.9	3.4	1.4	330.2
1995	31.4	21.2	40.0	73.7	62.1	41.1	23.2	10.0	3.7	1.4	307.8
1996	32.9	25.4	46.0	76.7	62.5	42.7	22.5	8.9	3.2	1.4	322.2
1997	32.7	25.6	46.6	77.9	61.4	41.6	22.4	9.1	3.3	1.4	322.0
1998	33.9	30.5	53.5	77.8	62.8	43.1	23.8	9.1	3.1	1.3	338.9
1999	31.5	25.8	47.0	83.4	68.3	37.2	20.8	9.5	3.5	1.4	328.4
2000	34.3	33.1	56.8	78.8	64.2	47.3	26.2	9.0	2.8	1.3	353.8
2001	32.4	32.0	54.9	78.7	69.0	47.7	25.2	9.9	3.3	1.3	354.4
2002	33.1	24.1	44.6	79.8	61.6	40.6	21.9	9.3	3.3	1.4	319.7
2003	32.6	25.4	46.2	75.3	63.2	45.6	23.5	9.2	3.2	1.3	325.5
2004	30.6	24.2	43.9	78.4	79.0	41.3	17.0	7.0	2.8	1.3	325.5
2005	30.1	25.1	46.6	79.1	62.5	39.5	22.5	10.1	3.9	1.7	321.1
2006	30.9	25.7	46.5	75.3	65.3	44.8	25.9	10.5	3.5	1.4	328.2
2007	31.2	24.8	45.7	76.1	63.7	41.7	24.1	10.2	3.5	1.4	322.3
2008	31.5	25.3	47.8	83.1	66.2	39.0	19.2	8.1	3.1	1.3	324.4
2009	31.8	28.3	52.5	84.8	65.3	39.5	20.3	8.4	3.1	1.3	335.3
2010	31.7	35.6	61.4	89.0	70.1	41.6	21.0	8.9	3.3	1.4	363.9
2011	38.2	14.2	34.9	74.9	75.0	42.1	18.7	7.8	2.7	1.4	309.9
2012	42.5	29.7	44.8	77.1	70.7	44.1	19.9	7.3	2.5	1.3	340.1
2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	40.1	20.2	35.1	66.9	65.8	46.4	27.2	12.0	3.8	1.6	319.1
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	44.8	16.6	31.7	60.0	61.5	45.3	25.4	10.7	3.4	1.5	300.9
2017	49.9	25.4	40.2	70.1	63.6	44.3	24.4	9.8	3.2	1.5	332.4
2018	44.2	24.8	40.9	72.0	65.7	44.3	23.2	9.3	3.1	1.4	328.9
2019	45.5	24.1	39.6	71.9	65.3	43.9	24.0	9.9	3.2	1.5	328.9
2020	43.8	21.1	35.9	68.3	67.0	45.5	24.2	10.2	3.4	1.5	322.5
평균	34.5	25.0	44.8	75.9	66.4	43.4	22.5	9.1	3.2	1.4	326.4
(%)	10.5	7.7	13.8	23.3	20.3	13.3	6.9	2.8	1.0	0.4	100

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 자료임.

표 8.3.2 서울지역 오존의 연직 분포 관측 결과 값 [단위 : DU]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균	표준편차
1985	334	344	336	353	334	330	291	280	276	281	308	334	317	27.8
1986	362	386	380	358	340	330	303	292	293	298	291	300	328	36.3
1987	334	360	369	362	344	335	307	301	290	280	288	315	324	31.2
1988	330	331	347	360	320	322	285	285	287	271	301	319	313	27.4
1989	316	325	350	344	354	321	301	286	288	285	292	320	315	25.0
1990	347	337	348	351	337	319	293	279	282	298	298	334	319	27.2
1991	335	337	333	343	325	309	299	298	295	295	300	312	315	18.2
1992	333	358	345	371	360	341	314	295	286	286	292	308	324	31.0
1993	315	318	337	341	326	324	313	293	293	297	293	321	314	17.5
1994	357	350	380	339	356	337	294	290	307	292	296	299	325	31.7
1995	332	349	361	344	361	338	297	283	286	283	305	323	322	30.2
1996	342	363	-	364	363	323	306	285	298	294	294	320	323	30.5
1997	343	350	340	334	344	338	308	287	296	307	302	319	322	21.7
1998	355	363	365	357	340	359	307	305	299	290	307	302	329	29.7
1999	318	349	324	372	373	330	320	307	302	313	318	327	329	23.4
2000	320	349	366	375	363	336	303	292	304	294	283	319	325	30.6
2001	364	330	381	353	354	338	299	297	284	284	301	312	325	33.0
2002	324	331	349	333	334	339	304	299	301	297	316	328	321	17.4
2003	366	366	372	348	344	342	310	297	283	291	282	297	325	34.6
2004	332	347	361	345	350	328	288	290	291	284	294	324	320	28.4
2005	357	361	376	368	354	347	316	297	282	277	311	327	331	34.1
2006	330	336	379	373	342	352	319	292	301	292	318	325	330	28.4
2007	342	349	382	381	351	333	313	294	286	281	299	324	328	32.3
2008	314	345	365	360	346	335	309	303	293	297	313	324	325	24.5
2009	343	322	372	376	343	349	321	298	293	297	301	337	329	28.8
2010	341	372	392	396	377	372	331	298	292	294	324	323	343	38.1
2011	343	361	391	(378)	(342)	(351)	(327)	(304)	(305)	299	296	320	335	31.6
2012	336	336	337	337	338	340	339	337	338	337	336	334	337	28.6
2013	335	336	350	376	343	327	301	302	293	272	316	350	325	29.3
2014	350	358	365	356	350	345	317	301	291	288	300	346	331	28.6
2015	342	389	382	358	350	348	320	316	306	300	313	323	337	29.2
2016	356	372	355	358	332	339	308	304	292	275	293	305	324	32.3
2017	315	355	376	368	367	352	328	305	306	281	310	339	333	37.1
2018	345	386	361	371	347	343	299	295	299	301	297	294	328	34.1
2019	303	319	366	361	371	370	333	297	284	287	290	324	325	34.0
2020	339	350	368	381	434	323	324	301	298	282	290	320	327	29.0
평균	338	350	362	360	350	338	310	297	294	291	302	321	326	
표준편차	15.6	18.5	17.8	14.9	13.6	13.5	13.1	10.7	11.0	12.4	11.9	13.2	6.8	

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄
 ※ 괄호()안의 값은 결측으로 인하여 OMI결과를 사용하여 환산한 자료임.

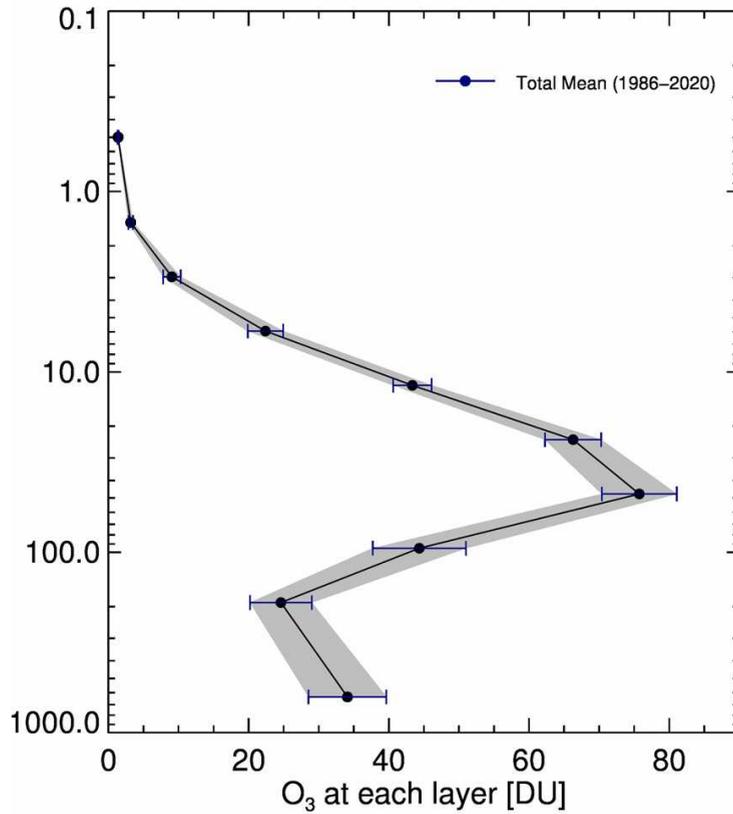
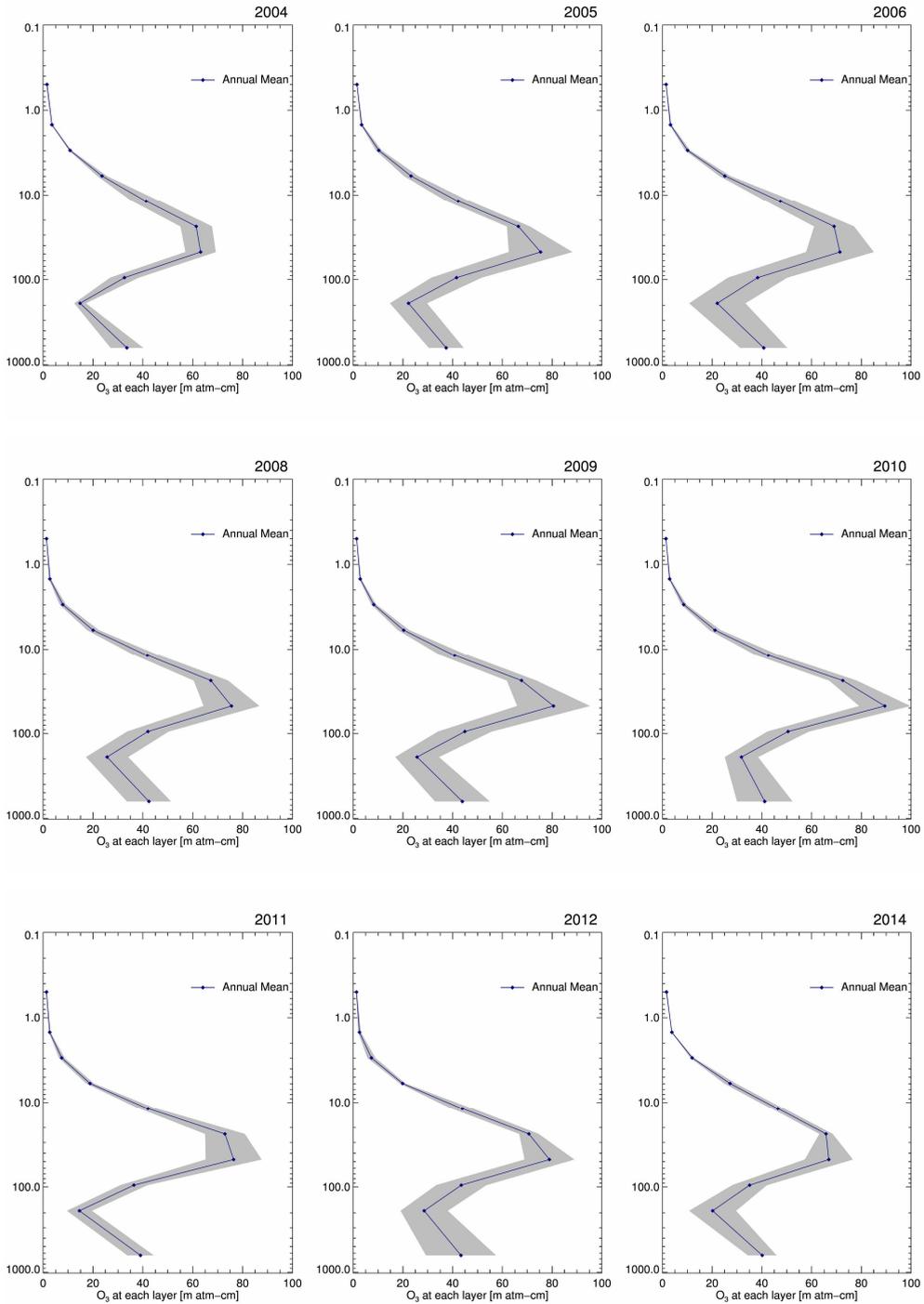


그림 8.3.10 움케어(Umkehr)로 관측한 오존 연직분포의 전체 기간 (1986~2020년)에 대한 평균값과 표준편차.

그림 8.3.10은 전체 기간(1986~2020년)의 오존 연직 분포 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 고도 19~28 km(Umkehr 4, 5층)에서 가장 높은 값을 가졌으며 4층과 5층 각각 75.9 DU, 66.4 DU이고, 이들의 표준편차는 각각 약 7 DU, 5 DU이다.



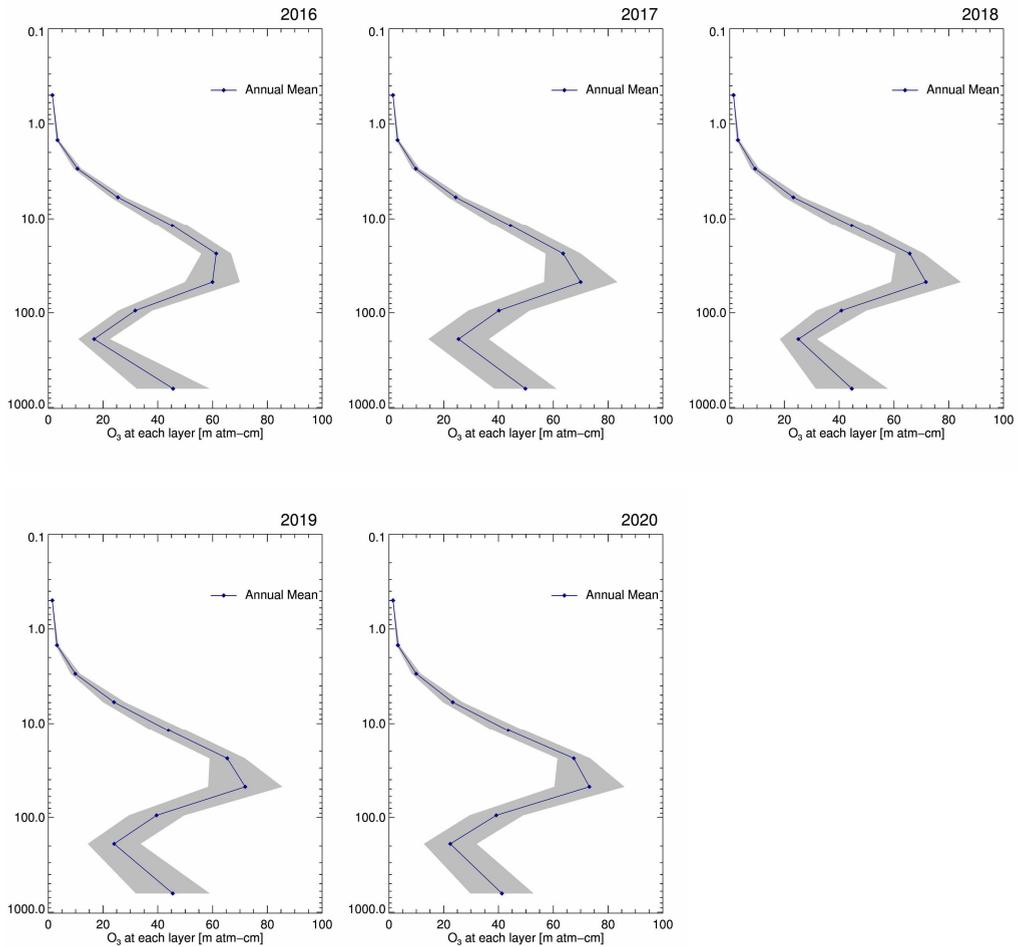


그림 8.3.11 2004~2020년 연직분포의 연평균과 표준편차.

그림 8.3.11은 2004년부터 2020년 기간의 연평균 연직 분포를 각각의 연도마다 나타낸 그림이다. 성층권이 위치한 19~24 km(Umkehr 4층) 고도에서 모든 기간에 오존량이 가장 높게 나타나고 있으며, 평균 75.9 DU를 기록하는 해당 고도에서 가장 높은 오존량을 가진 시기는 2010년(89.0 DU)이고, 가장 낮은 오존량을 가진 시기는 2014년(66.9 DU)이다.

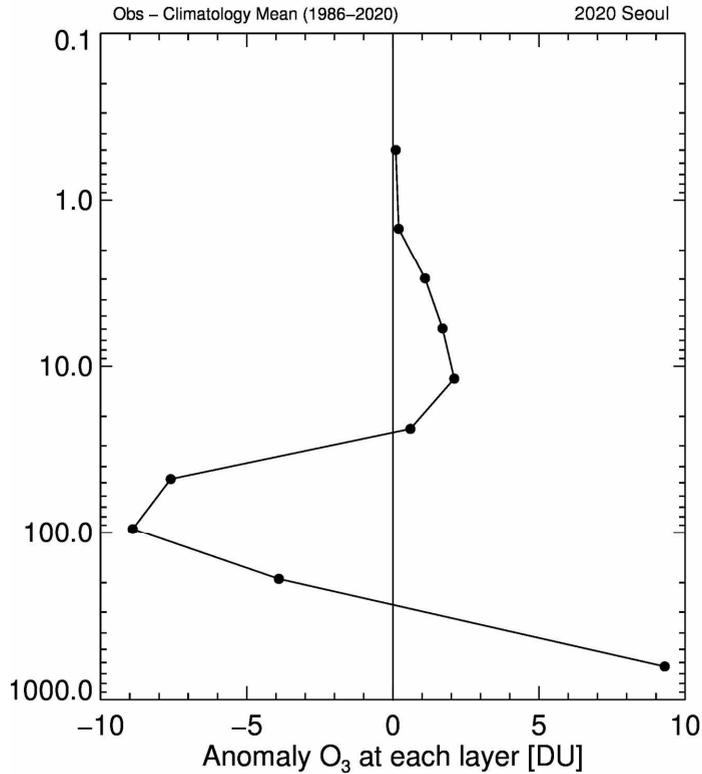


그림 8.3.12 전체 기간(1986~2020년)의 Climatology mean에 대한 2020년 오존 연직 분포의 Anomaly.

그림 8.3.12은 전체 기간(1986~2020년)동안 관측한 오존 연직분포의 기후평균(Climatology Mean)으로부터 2020년에 관측한 각 층의 오존량 차이를 계산한 Anomaly 결과를 나타낸 그림이다. 지상층(고도 0~10 km)은 평년에 비해 약 10 DU 큰 값을 가지지만, 대류권 상부와 성층권 고도영역에서는 Umkehr 2, 3, 4층 각각 -6, -9, -8 DU 씩 낮게 나타났고, 해당 고도보다 더 높은 고도에서는 다시금 평년보다 최대~2.5 DU 정도 높은 경향을 보이는 것을 해당 그림을 통해서 확인할 수 있다.

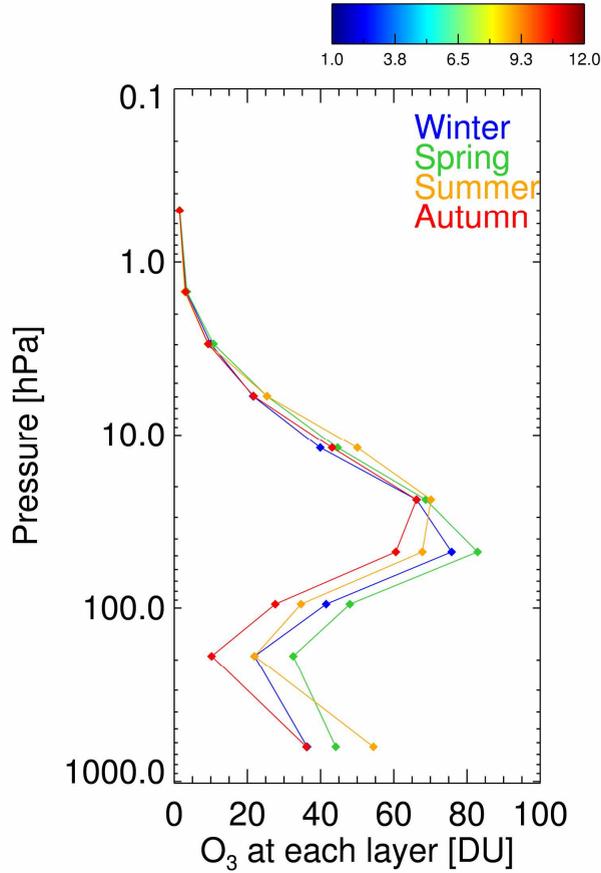


그림 8.3.13 2020년 서울 오존 연직분포의 계절 평균.

그림 8.3.13은 2020년 오존 연직 분포의 사계절 분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 여름철의 19~28 km(Umkehr 4, 5번 층)에서 최대의 오존분포를 보이고 있다. 한편 하부 성층권과 상부 대류권(Umkehr 2, 3번 층)에서는 봄에 가장 큰 오존분포를 보이며 가을로 가면서 오존량이 감소하고 있는 패턴을 보이고 있고, 그 변동폭도 상부 성층권에 비해 더 컸다.

8.4 남극오존홀

1980년대 초기부터 매년 남극 봄철에 생성되는 오존홀 내 오존전량은 대략 반 정도까지 줄어 든다(Solomon et al., 1999). 남극 성층권 오존홀은 지구환경보호 측면뿐만 아니라 남극진동을 통해 남극의 봄과 여름 기온에 영향을 미치기 때문에 중요한 감시의 대상이 된다. 여러 연구결과 들은 남극오존홀이 회복되고 있음을 보여주고 있으며(예, Koo et al., 2018, Weber et al., 2018), 21세기 내에 오존홀은 사라질 것으로 기대된다(WMO, 2018). 하지만, 최근 유엔 환경 계획(UNEP)에 보고되지 않는 새로운 CFC-11의 방출이 있는 것으로 추정되며(Montzka et al., 2018), 그 방출이 계속된다면 성층권 오존 회복이 지체될 수 있음을 Dhomse et al.(2019)은 보고하였다.

남극장보고과학기지(74° 37.4'S, 164° 12.0'E, 이하 '장보고기지')에서는 2015년부터 남극 대륙 성층권의 오존농도의 연직분포 변화를 감시하기 위해 오존존데를 이용한 관측을 수행해 오고 있다(그림 8.4.1). 오존센서(ECC6AB, Science Pump Corporation, USA)는 라디오 존데(RS92/RS41, Vaisala, Finland)와 연결, 기상관측용 풍선(1200 g)에 결속하여 관측 당일 2300 UTC 비양된다. 관측 자료는 라디오존데를 통해 1초마다 지상 수신장치로 자료가 보내져 약 100분 동안 기록된다. 관측 목표 고도는 약 32 km이나, 상층 최저 기온이 풍선의 최저 운영 기온(-80℃)보다 낮아지는 시기에는 이 고도에 도달하지 않는 경우도 있다. 이에 매년 5월부터 8월까지의 풍선에 기름피막 처리를 한 후 비양이 실시된다. 장보고기지는 5월 8일부터 8월 7일까지 태양이 뜨지 않는 극야가 지속되며, 극야 중 극성층권 구름이 형성된다(그림 8.4.2). 장보고기지는 극야가 끝나면 생성되는 오존홀(ozone hole) 가장 자리에 대체로 위치한다. 2020년에는 1월부터 12월까지 총 23회의 오존존데 관측을 수행하였다. 월별 비양횟수는 1월~7월에는 월 1회, 8월에는 2회 관측을 수행하였고, 오존홀 생성 기간을 포함하는 9월 5회, 10월 6회 관측을 하였으며, 11월과 12월에는 월 2회 관측을 수행하였다(그림 8.4.3). 오존존데가 도달한 고도는 대부분 30 km 이상이었지만 2회는 약 20 km 이었다. 오존존데가 관측 중 이동 거리는 2월 약 20 km 에서 10월의 250 km 이상이었고, 이동 방향은 이동거리가 짧았던 1월의 북쪽을 제외하면 모두 상층 편서풍의 영향으로 동쪽이었다(그림 8.4.4).



그림 8.4.1 오존존데를 비양하는 장보고기지 제7차 월동대 (이재영 기상대원).



그림 8.4.2 남극장보고과학기지에서 촬영된 극성총권 구름 (2020년 7월 28일).

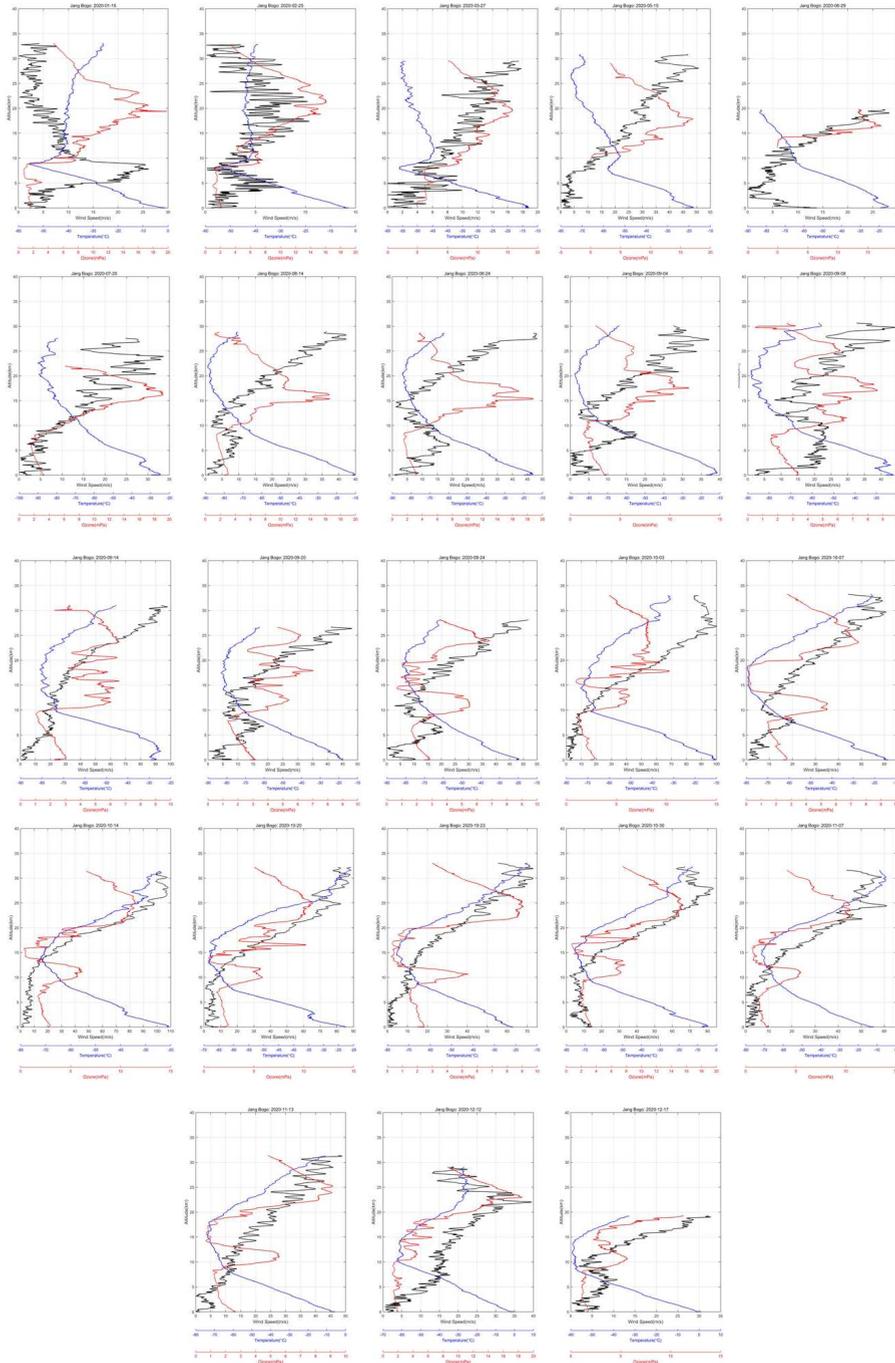
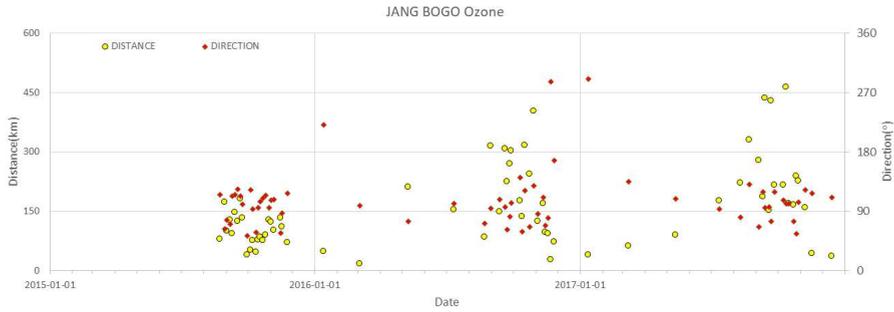


그림 8.4.3 2020년 1~12월 장보고기지에서 오존존데로 관측된 오존 농도(빨간색), 기온(파란색) 및 풍속(검은색) 연직 분포.



(a)



(b)

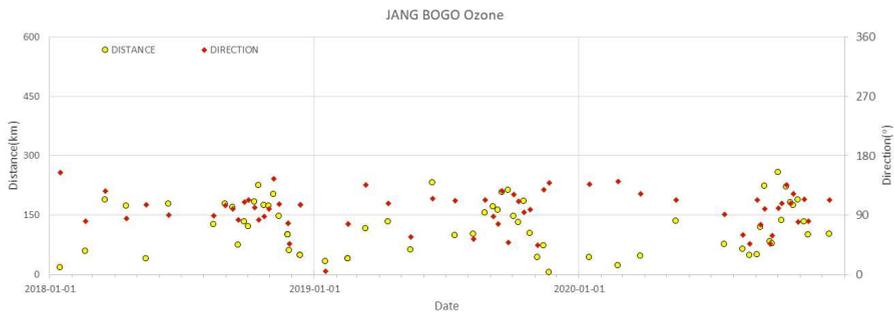
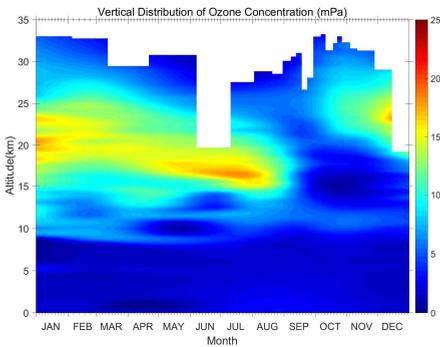


그림 8.4.4 2015~2020년 장보고기지에서 비양된 오존존데의 관측시작 지점에서 최종 관측 지점까지의 (a) 이동거리와 (b) 방향.

(a)



(b)

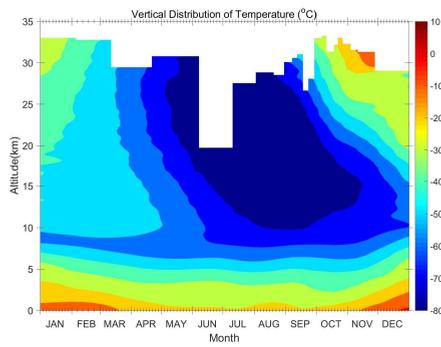


그림 8.4.5 2020년 남극장보고과학기지에서 관측된 (a) 오존농도와 (b) 기온프로파일의 연변동.

그림 8.4.5은 2020년 1월부터 12월까지 총 23회의 관측결과를 이용하여 남극장보고과학기지에서부터 성층권까지 고도에 따라 관측된 오존 농도와 기온 프로파일의 연변동이다. 6월과 12월 관측(각 월 1회)을 제외하면 대략 30 km 고도까지 측정이 되었다. 오존 농도가 최대가 되는 고도는 하계 기간은 20~25 km 인데 반해 3월부터 8월까지 최대 농도가 나타나는 고도가 약 15 km

까지 낮아지다가 9월에 뚜렷한 최대 농도 고도가 나타나지 않았다. 장보고기지에서 극야가 시작 되는 5월 초 이후 약 -80 °C 전후의 극저온이 25~30 km 고도에서 나타나기 시작하여 오존홀이 나타나는 9월은 약 10 km 고도까지 극저온이 내려온 후 다시 고도가 증가하다 11월 중순 15 km 고도를 끝으로 극저온은 사라졌다.

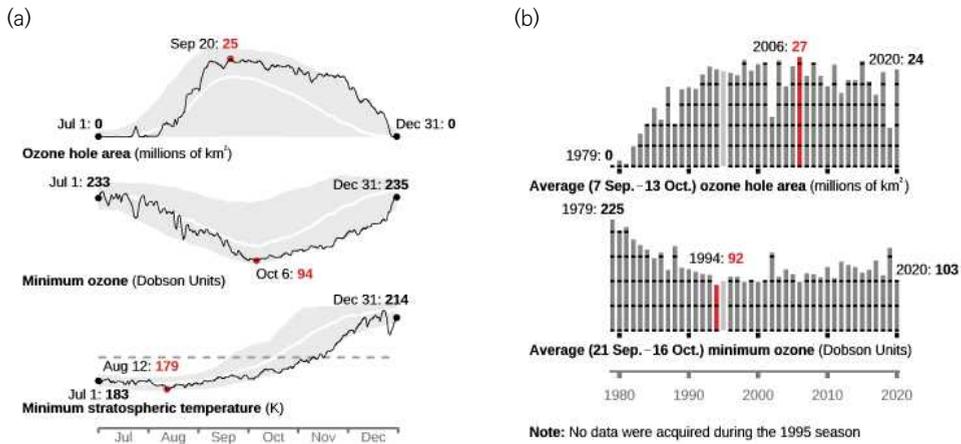


그림 8.4.6 2020년 7~12월 오존홀의 면적, 최저 오존전량 및 성층권 최저 기온 변동과 1979~2020년 오존홀 평균 면적(9월 7일~10월 13일 기준), 최소 오존전량의 변동(9월 21일~10월 16일 기준)의 (a) 월 평균 및 (b) 연 평균 변화(출처: NASA Ozone Watch).

그림 8.4.6은 미국 NASA Ozone Watch에서 제공한 2020년 남극 오존홀의 면적과 최소 오존 전량 농도 및 성층권 최저기온의 변동 그리고 1979년부터 2020년까지 오존홀 면적과 최저 오존 농도의 변동이다. 2020년 오존홀은 8월 중순부터 빠르게 성장하여 최대 면적이 나타난 날은 9월 20일(2천5백만 km²)이며, 최저농도가 기록된 날은 10월 6일(94 DU)이다. 오존홀 면적은 1992년 2천만 km²를 넘어선 이래 2006년 최대 면적 2천7백만 km²을 기록하였으며, 최근까지 2천만 km² 이상을 유지하였다. 다만, 특정 해 특히, 2019년 9백3십만 km²로 1984년 이래 최소 면적이 나타나기도 하는 등 변동이 심하였다. 그에 반해 2020년 오존홀은 최근 몇 년 동안 가장 넓은 편에 속하였다. 그림 8.4.5는 장보고기지에서 2015~2020년 측정된 오존전량의 변동이다. 이 기간 중 가장 강한 오존홀은 2015년에 발생(220 DU보다 낮은 경우가 8~11월 관측 횟수의 87%)하였으며, 2020년은 53%로 2018년(47%)과 비슷하여 그림 8.4.4의 결과와 잘 일치한다. 2020년 오존홀 변동의 특징은 다른 해에 비해 늦게 오존홀이 관측되었지만(8월말~9월 초보다 늦은 9월 8일) 11월까지 오존홀이 지속되었다. 2015년을 제외하면 오존홀은 10월 중순부터는 더 이상 관측되지 않았던 결과와 대비된다. 비록 2020년 오존홀은 11월 중순까지 나타났지만



10월은 오존전량이 157.4 DU에서 322.3 DU로 큰 변동을 보였으며, 이는 장보고기지가 오존홀의 가장자리에 위치하여 플라볼텍스의 위치에 큰 영향을 받는 것으로 보인다. 11월까지 지속된 오존홀은 향후 11월 관측 횟수를 늘일 필요가 있을 것으로 보이나 비용 및 환경적인 측면을 고려하면 NASA 등에서 제공하는 위성 관측 자료를 꾸준히 감시하여 추가 관측 여부를 결정하는 것이 효과적인 것으로 보인다.

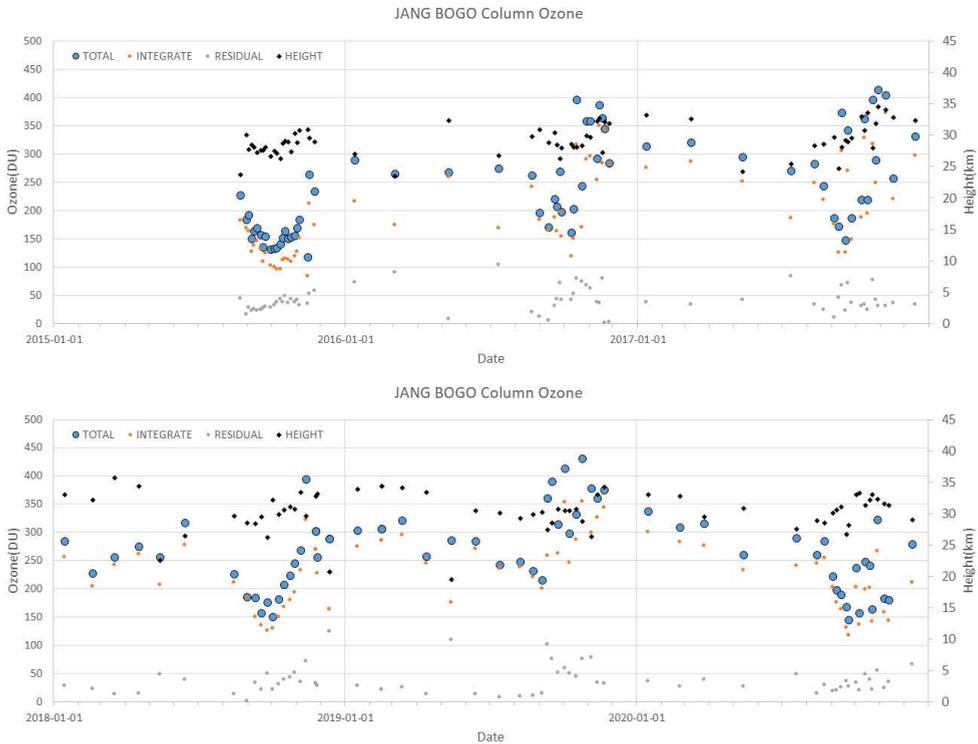


그림 8.4.7 2015~2020년 장보고기지에서 오존전량(Total, 파란색), 관측된 오존전량(Integrate, 오렌지색), 추정 오존전량(Residual, 회색) 및 관측 높이(검은색)의 변동. 오존전량=관측된 오존전량(지상에서부터 관측 높이까지 적분된 오존량)+ 추정 오존전량(관측 종료 고도로부터 대기 Top까지 추정되는 오존전량).

그림 8.4.7. 오존전량(Integrate, 오렌지색), 추정 오존전량(Residual, 회색) 및 관측 높이(검은색)의 변동. 오존전량=관측된 오존전량(지상에서부터 관측 높이까지 적분된 오존량)+추정 오존전량(관측 종료 고도로부터 대기 Top까지 추정되는 오존전량).

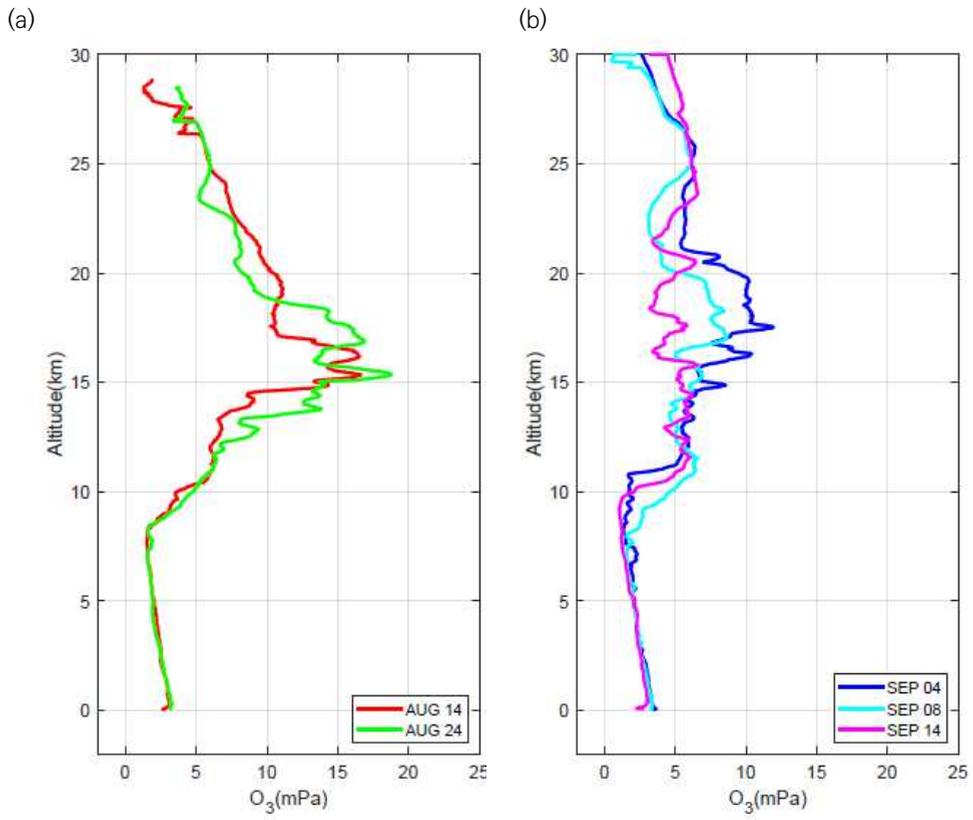


그림 8.4.8 2020년 오존홀 (a) 발생 전 및 (b) 발생 중 오존농도 프로파일.



8.5 2020년 성층권오존 특성 분석

안면도와 고산의 2020년 오존전량 연평균은 324 DU와 308 DU으로, 각각 최근 평균(안면도: 2013~2019년, 고산: 2011~2019년) 대비 0.5%, 2.0% 높았고, 2019년에 비해서는 3.0%, 4.6% 높은 값을 보였다. 또한 두 지점 모두 4월에 최근 평균과 가장 큰 차이를 보이며 높은 값을 보였다.

오존은 고도별로 발생 특성에 차이가 있기 때문에 오존 농도변화의 원인을 분석하기 위해서는 연직적인 분포를 함께 살펴볼 필요가 있다. 그림 8.5.1은 2020년 관측된 연평균, 그리고 월별 연직 오존을 최근 10년 평균(2010~2019년)과 비교하여 나타낸 것이다. 2020년의 오존 연직분포의 연평균은 10~15 km 고도에서 과거 10년 평균보다 눈에 띄게 낮은 값을 보였고, 대류권에서는 거의 비슷한 수준의 농도분포를 나타냈다. 최근 10년 대비 2020년 월별 관측값 차이를 살펴보면 1월, 2월, 6월, 그리고 12월의 연직오존이 10~15 km에서 최근 10년 평균보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 실제 연평균 값에는 이들 중 해당 고도의 절대 농도가 큰 1월과 2월이 주로 기여하고 있다. 한편, 포항과 비슷한 위도대인 안면도의 오존전량(그림 8.2.1(a))에서는 1월에 최근 평균보다 오히려 조금 높은 관측값을 나타내며, 포항의 연직오존과는 다른 양상을 보였다. 여기에는 해당 기간 안면도 오존전량 결측일이 많았던 것과(1월에 13일 결측) 상당히 컸던 오존 변동성이 영향을 준 것으로 추정된다. 실제 1월 포항에서 오존존데 관측이 수행됐던 날들에 안면도에서 관측된 오존전량을 평균해 보면 과거 평균과 거의 비슷한 수준이었다. 한편, 한반도 지역에서는 200 hPa 지위고도와 50 hPa 기온이 단기적인 오존변동과 상당히 높은 상관성을 가지며, 이는 각각 대류권 상부와 성층권 하부의 대기 연직운동과 관련된다. 오존전량은 대기의 하강류가 강해질 경우 오존농도가 높은 성층권 공기를 확장시켜 높은 값을 나타내며, 하강류가 약해질 경우에는 반대로 성층권 공기가 축소해 낮은 값을 나타낸다. ERA5 재분석 자료로 살펴본 1월과 2월의 온도와 지위고도는 오존전량에 각각 서로 상반되는 영향을 주었다. 당해 겨울 약했던 시베리아 고기압은 대류권의 하강기류를 약화시켜 평상시보다 높은 200 hPa 지위고도를 형성한 반면, 50 hPa 고도에서는 평상시보다 높은 기온을 보이며 하강류가 오히려 강해진 특성을 보였다. 이 같은 두 고도 사이의 상반되는 기류 특성이 안면도와 포항의 겨울 오존의 변동성을 크게 만들어 서로 다른 양상의 관측값에 기여한 것으로 판단된다.

안면도와 고산의 오존전량에서 최근 10년 대비 가장 큰 차이를 보였던 4월에는 포항의 7~13 km 고도에서 과거 평균보다 크게 높은 값을 보였는데 이 고도는 대류권계면과 봄철 오존이차피크가 주로 발생하는 고도에 해당한다. 2020년 4월에는 바이칼호 북서쪽에 정체한 강한 기압능의

영향으로 남북 흐름이 강화되어 고위도의 차고 건조한 공기가 자주 유입되었고, 쌀쌀하고 강풍이 많이 불었다. 봄철 고위도의 공기가 유입될 경우 오존이차피크가 발생할 가능성이 크며(Park et al., 2012; Shin et al., 2020), 실제 4월의 오존존데 관측자료에서도 뚜렷한 오존이차피크를 확인할 수 있다(그림 8.3.1). 오존이차피크의 발생은 성층권 공기를 확장을 의미하기 때문에 오존전량 농도의 증가와 연관된다. 이와 함께 200 hPa 지위고도는 감소, 50 hPa 기온은 증가하여 모두 하강류 강화 또는 성층권기류가 확장되는 특성을 나타내며 이러한 요인들이 안면도와 고산의 4월 고농도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 한편, 오존전량이 최근 평균보다 낮았던 8월의 경우에는 과거 평균 대비 3 km 고도의 농도 저하가 뚜렷하게 나타났는데 이 고도는 여름철 중국 대규모 산업지역의 소스 기여도가 가장 크게 나타나는 고도이다(Kim et al., 2007; Itahashi et al., 2013). 2020년은 전체적으로 코로나19로 인해 동아시아 지역의 질소산화물 배출량이 과거에 비해 낮았고, 8월 중순부터는 폭염이 이어졌다. 이로 인한 오존 또는 전구물질의 수송량 감소 또는 한반도 자체적인 전구물질의 감소가 8월의 오존농도 저하에 기여했을 가능성이 있어 보이며, 더 정확한 원인을 이해하기 위해서는 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

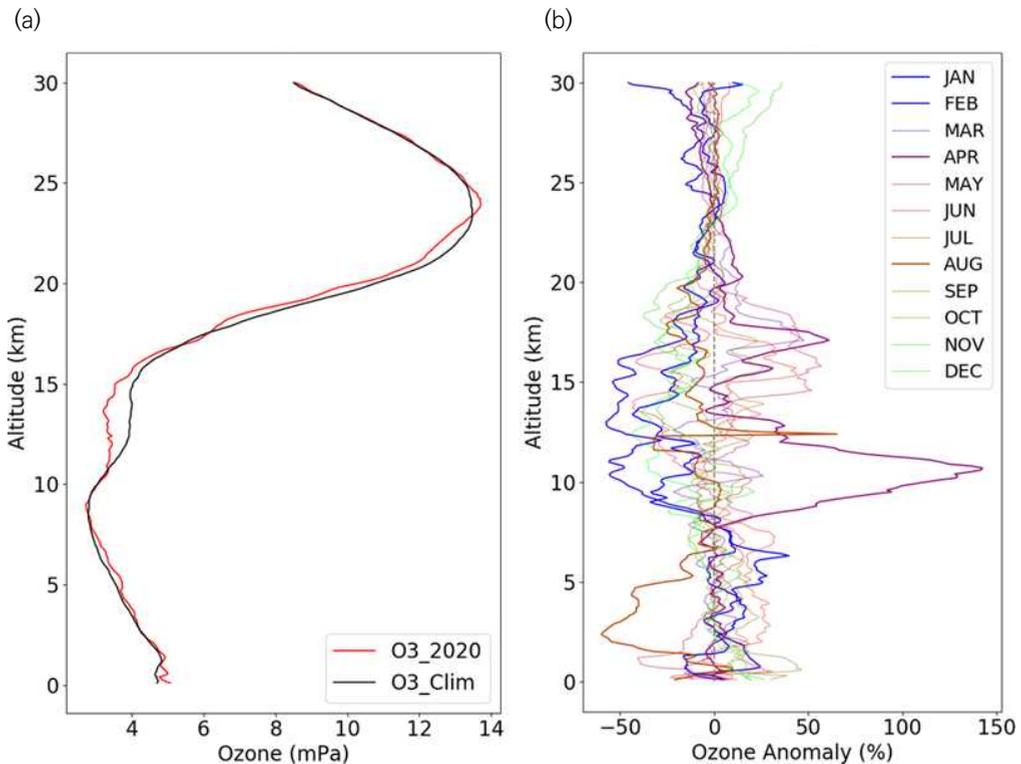


그림 8.5.1 최근 10년 (2010~2019년)과 2020년 포항지역 연직 오존농도의 (a) 연평균과 (b) 월별 편차.



오존전량의 관측은 1994년부터 2017년까지 포항에서 관측되었으며, 안면도와 고산에서 각각 2013년과 2011년부터 관측을 이어오고 있다. 그림 8.5.2는 현재까지 각 지점에서 관측된 연평균 오존전량을 TOMS/EP-TOMS, OMI/Aura, OMPS/Suomi-NPP 위성에서 관측된 북위 30~40° 평균값과 비교하여 나타낸 것이다. 대체로 포항과 안면도, 고산 지점 모두 위성에서 관측된 위도 평균값보다 높은 관측값을 나타낸다.

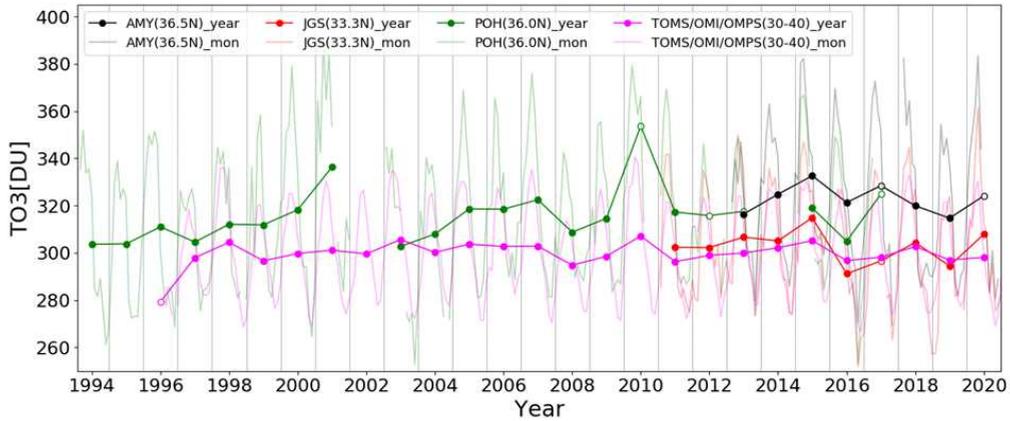


그림 8.5.2 포항, 안면도, 고산 지점과 TOMS/EP-TOMS, OMI/Aura, OMPS/Suomi-NPP 위성에서 관측된 북위 30~40° 지역의 연평균 오존 시계열. 점으로 표시된 연 평균 값 중 흰색으로 채워진 점은 두 달 이상의 결측이 존재하는 연도를 나타냄.

전 지구 오존 평가보고서(WMO, 2018)와 성층권오존 장기경향 분석 보고서(SPARC/IO3C/GAW, 2019)에 의하면, 1989년 몬트리올 의정서 발효 이후 1997년을 전후하여 오존전량은 약한 회복세를 보이곤 있지만 일부 지역을 제외하면 통계적으로 유의미한 수준의 변화는 나타나지 않는다. 그러나, 상층의 오존에서 확인되는 뚜렷한 회복 경향을 통해 오존의 회복이 진행되고 있다는 결론을 내리고 있다. 한편, 성층권하부의 오존 변화는 지역과 고도별로 큰 차이를 나타내고 있으며, 여전히 많은 불확실성을 갖고 있다. 또한 기후변화와 맞물려 최근의 오존 변화는 더욱 복잡한 양상을 나타내고 있다.

성층권 오존은 장기적으로는 태양활동주기, 적도지역 상층 바람의 준-경년변동(Quasi-biennial oscillation), 성층권 에어로졸, 엘니뇨-남방진동(ENSO) 등의 자연변동성분들과 인위적으로 배출되는 오존파괴물질 등의 영향을 받는다. 그러나 단기적으로는 종관적인 기상특성의 영향을 크게 받기 때문에 오존의 변동을 이해하기 위해서는 단기적인 요인들과 장기적인 요인들을 함께 고려하여 분석할 필요가 있다. 그림 8.5.3은 포항과 안면도, 고산 지점에서 2020년까지 관측된 오존전량 자료를 바탕으로 다중선형회귀(Multi Linear Regression) 모형을 활용하여 오존의

장기 변동에 영향을 주는 자연변동성분들(태양활동주기, 적도 상층바람의 준-경년변동, 성층권 에어로졸, 엘니뇨-남방진동, 대류권계면고도, 극진동, 에디열속)과 단기적인 기상변동성분들(지오폠펜셀고도, 온도, 잠재와도)을 제거한 선형적인 변화 경향을 나타낸다. 장기적인 성층권 오존의 변동에서 자연적인 변동성분을 제거하고 남은 선형적인 경향성은 오존파괴물질에 의한 오존농도 변화와 유사한 것으로 알려져 있다(Weber et al., 2018). 포항의 경우 몬트리올 의정서 발효 이후, 20년에 가까운 관측자료가 확보되어 대략 1%/decade 전후의 증가 경향을 나타내며, 이는 오존 평가 보고서(WMO, 2018)나 성층권오존 장기경향 분석 보고서(SPARC/IO3C/GAW, 2019)에 제시한 1997년 이후 북반구 중위도 지역의 오존전량 변화 경향과 비슷한 수준에 해당한다. 안면도와 고산의 경우에도 각각 $2.29 \pm 4.79\%/decade$ 와 $1.87 \pm 6.03\%/decade$ 의 성층권 오존의 회복세가 나타나곤 있지만 관측기간이 짧아 추세의 불확실성이 크기 때문에 장기적인 변화 특성분석을 위해서는 추가적인 자료 확보가 필요해 보인다.

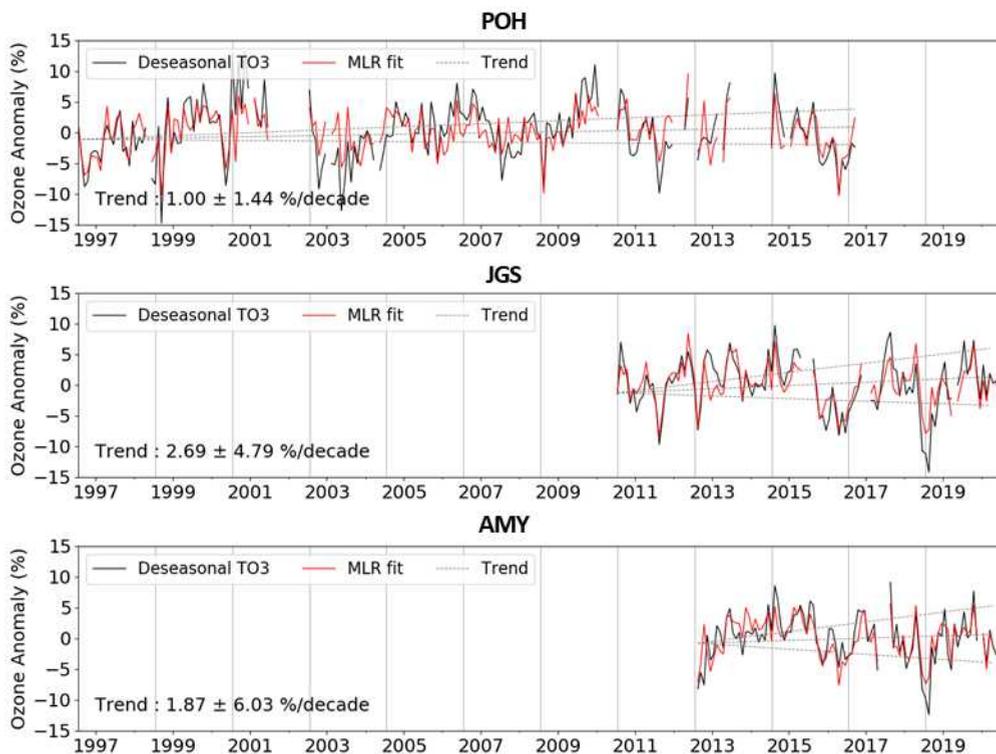


그림 8.5.3 다중선형회귀 모형을 이용한 포항(POH), 안면도(AMY), 고산(JGS) 지점 오존전량 변화 경향.



연직오존의 장기적인 특성을 살펴보기 위해 포항에서 1995년부터 2019년까지 오존존데로 관측된 오존 분포를 살펴보면 그림 8.5.4와 같다. 연직적으로 오존은 주로 봄철 16~25 km 고도에서 농도의 피크가 나타나며, 같은 기간 9~16 km 고도에서도 오존이 높은 농도로 분포하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 봄철에 대류권계면 근처에서 나타나는 고농도 오존을 오존이차피크(Second Ozond Peak)라 하며 남북 또는 연직 공기혼합으로 인해 발생한다. 이는 성층권 오존이 폴딩(folding) 현상을 통해 대류권 상층으로 유입된 것으로 강할 경우 대류권 하부까지 영향을 미치기도 한다. 봄철 오존이차피크가 뚜렷하게 나타나는 경우에 그 경로를 역추적하면 그 기원지가 극 지역으로 치우치고 있다고 보고되고 있다(Park et al., 2012; Shin et al., 2020). 연직 분포의 장기적인 변화를 살펴보면, 동아시아 산업화에 따라 대류권오존 농도의 증가가 두드러지게 나타난다. 또한, 오존농도가 가장 높은 20~25 km 고도에서는 2017년 유독 높고, 2019년에 낮은 모습을 확인할 수 있다. 한반도가 위치하는 중위도의 성층권오존은 전 지구 오존순환(Dobson-Brewer Circulation)과 관련이 깊으며, 단기적으로는 종관적인 기상특성의 영향을 크게 받는다. 오존존데 관측값에서 2017년은 2월에서 4월까지 20~25 km 고도에서 매우 높은 농도를 보였는데 봄철 고위도 공기 유입 또는 대기의 하강운동으로 인한 성층권공기의 확장이 영향을 주었을 가능성이 있다. NOAA의 대류권계면 자료와 ERA5 재분석자료로 분석한 결과 2017년 겨울철에는 대류권계면이 평년보다 낮게 위치했고 봄철에는 200 hPa 지위고도는 낮고 100 hPa 잠재와도는 큰 모습을 보였다. 낮은 200 hPa 지위고도는 대기 하강운동과 관련되며 큰 잠재와도는 성층권공기의 특성을 나타내기 때문에 성층권공기의 확장과 오존이차피크 형성을 통해 오존농도 증가에 기여할 수 있다. 반면, 2019년은 같은 고도에서 1~2월 상당히 낮은 오존 농도를 보였는데, 해당 기간 시베리아 고기압의 세력이 한반도에 비교적 약하게 작용하면서, 200 hPa 지위고도가 상당히 높게 나타났다. 또한, 성층권 하부(50 hPa)에서는 낮은 온도를, 중상부(10 hPa)에서는 높은 온도를 보였는데 성층권 하부의 저온은 대기의 상승운동과 관련되며, 성층권 상부의 고온은 오존 파괴반응을 강화시켜 오존농도 감소에 각각 기여할 수 있다. 또한 이 밖에도 최근 중국 동안 지역을 중심으로 오존 파괴물질인 CFC-11의 배출이 증가하고 있다는 보고가 있는데(Rigby et al., 2019), 장기적으로는 CFC-11의 배출량 변화가 오존농도 변화에 영향을 줄 수 있다. 그러나 오존농도의 경우 매우 다양한 요인들에 의해 직, 간접적으로 영향을 받기 때문에 농도 변화의 정확한 원인을 이해하기 위해서는 추가적인 관측자료의 확보와 지속적인 연구가 중요할 것으로 판단된다.

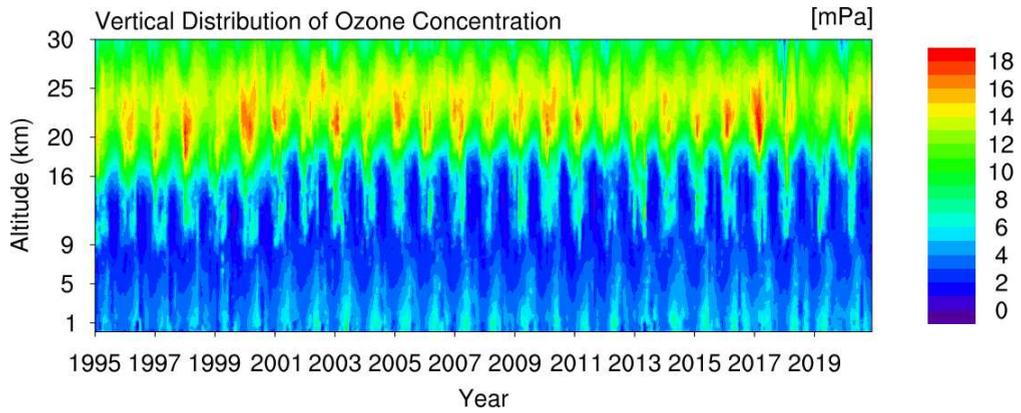


그림 8.5.4 포항 지점에서 관측된 연직오존 시계열.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

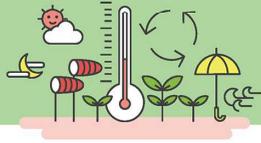
제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제9장 자외선

9.1 자외선 감시의 목적	252
9.2 자외선A	253
9.3 자외선B	254
9.4 서울 자외선 복사량	255
9.5 2020년 자외선 특성 분석	259



제9장 자외선

- 자외선A 일누적 복사량 : 안면도 0.72 MJ/m² (최근 10년 대비 +1.4%)
고 산 0.74 MJ/m² (최근 8년 대비 +3.9%)
- 자외선B 일최대 복사량 : 안면도 0.114 W/m² (최근 10년 대비 -8.0%)
고 산 0.113 W/m² (최근 8년 대비 -18.1%)
- 자외선A는 연 전체적으로 최근 평균보다 높은 일조시간으로 인해 다소 증가, 자외선B는 여름철에 긴 장마로 인해 유독 짧았던 일조시간의 영향으로 크게 감소

9.1 자외선 감시의 목적

자외선은 파장에 따라 자외선A(320~400 nm), 자외선B(280~320 nm), 자외선C(100~280 nm)로 분류된다. 파장이 짧은 자외선C는 대기 상층에서 모두 흡수되거나 산란되기 때문에 지표에 도달하는 자외선은 자외선A와 자외선B가 대부분을 차지한다. 자외선A는 인체 피부조직에 가장 깊숙이 침투하여 피부노화나 색소침착과 같은 피부 손상을 일으킬 수 있다. 한편, 자외선B는 피부암, 면역성 감퇴, 백내장, DNA 손상 등의 피해를 일으키며 가축, 물고기, 농작물의 생육에도 크게 피해를 준다. 이와 동시에 자외선B는 인체에 적당히 노출시켰을 경우 인체의 비타민D 합성에 도움을 주는 긍정적인 효과도 있다(곽민경과 김재환, 2011).

자외선 복사는 태양 천정각, 고도, 지구와 태양 간 거리 등의 기하학적 요인과 오존 및 기타 미량 가스, 구름, 에어로졸, 지표 알베도 등과 같은 대기 및 지표 구성성분에 의해서도 크게 영향을 받는다. 따라서 자외선 복사는 계절과 지역에 따라 차이를 보이며, 그 변화폭이 매우 크다.

자외선은 UVA-Detector(Solar Light Co. Model #501)와 UV-Biometer(Solar Light Co. Model #501) 자외선 측정기를 이용하여 자외선A와 자외선B를 각각 관측하고 있으며, 지구 대기감시를 목적으로 국내 4개 지점(안면도, 고산, 울릉도, 포항)에서 자외선 관측기를 운영하고 있다. 이와 함께 서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 Brewer 분광광도계를 이용해 자외선 복사를 관측하고 있다.



9.2 자외선A

자외선A는 인체의 피부 조직 깊숙히 침투하여 피부노화 등의 장기적인 피부 손상을 일으킬 수 있기 때문에 일 누적값의 분석이 중요하다. 따라서, 자외선A는 MJ/m² 단위의 일평균 누적값으로 자료가 분석하였다. 2020년도 자외선A 일 누적 복사량의 최댓값은 울릉도 1.57 MJ/m²(7월 2일), 안면도 1.49 MJ/m²(6월 22일), 포항 1.66 MJ/m²(7월 17일), 고산 1.58 MJ/m²(6월 26일) 이었다. 그림 9.2.1은 2020년 자외선A의 일 누적 복사량 월 변화를 최근 평균값과 같이 비교하여 나타낸 것이며, 최근 평균은 관측 시작년도의 차이로 인해 지점마다 상이한 평균 기간을 갖는다(고산, 울릉도 : 2012~2019년, 안면도, 포항: 2010~2019년). 각 지역별 최근 평균값 대비 2020년 월 평균 값은 전체적으로 봄철에 최근 평균보다 높았으며, 이러한 특성은 포항과 울릉도에서 가장 두드러졌다. 일 누적 복사량의 월평균 최댓값은 울릉도 1.17 MJ/m², 고산 1.11 MJ/m², 안면도 1.04 MJ/m², 포항 1.25 MJ/m² 고산을 제외한 모든 지역에서 6월에 가장 높았다. 여름철인 7~8월에는 일사는 강하지만 강수의 영향으로 최근 평균과 마찬가지로 낮은 경향을 보였다.

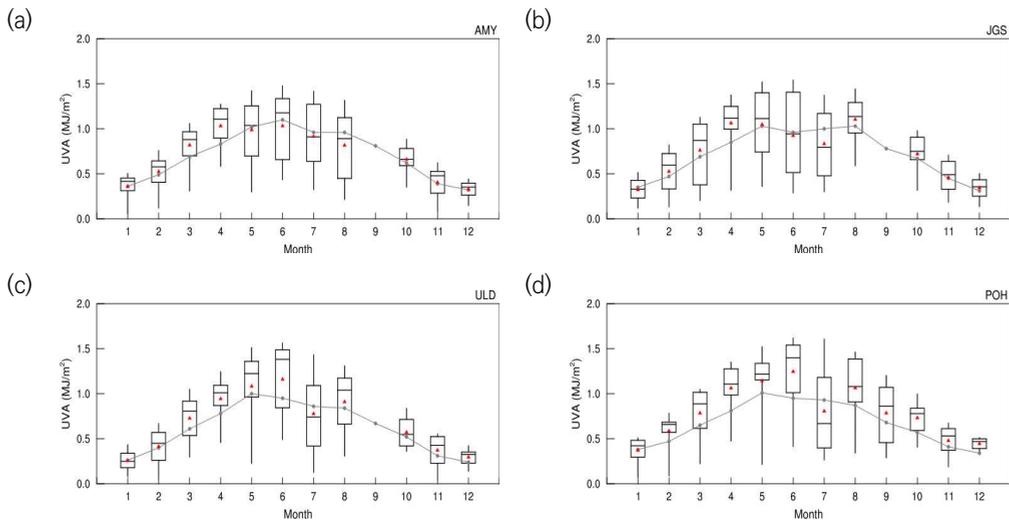


그림 9.2.1 2020년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD), (d) 포항(POH) 자외선A 일 누적 복사량의 월 변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 붉은색 점은 평균, 회색 점-선은 최근 평균값을 나타냄).

9.3 자외선B

UV-Biometer를 이용해 관측하는 자외선B는 홍반에 대한 가중함수가 적용된 홍반자외선(Erythemal ultraviolet, EUV-B) 복사량이다. 자외선B의 관측단위는 MED이며, MED는 유해 자외선 파장영역(280~320 nm)의 최소 홍반점 조사(Minimum Erythemal Dose)를 나타내는 값으로 1 MED는 210 J/m²의 복사량 값으로 환산된다. 자외선B는 지속시간도 중요하지만 높은 자외선 값일수록 인체에 미치는 영향이 크기 때문에 일 최대값 분석이 중요하다. 2020년 자외선B 일 최대 복사량의 최대값은 울릉도 0.266 W/m²(5월 8일), 안면도 0.243 W/m²(6월 10일), 포항 0.290 W/m²(8월 9일), 고산 0.239 W/m²(5월 27일)으로 나타났다. 그림 9.3.1은 자외선B 일 최대 복사량의 월변화를 최근 평균값과 비교하여 나타낸 그림이다. 최근 평균값은 관측 기간의 차이로 인해 안면도, 포항은 2010~2019년, 고산, 울릉도는 2012~2019년을 평균하였다. 최근 평균에 의하면 자외선B는 겨울에 낮고, 여름에 높은 계절변화를 뚜렷하게 보이고 있으며, 일 최대복사 월평균은 주로 7~8월에 가장 높게 나타난다. 2020년의 경우 자외선B 일 최대복사의 월평균은 울릉도와 포항은 봄철에 최근 평균보다 높았고, 안면도와 고산은 여름에 낮은 모습을 나타냈다. 지점별로는 안면도(0.176 W/m²)와 울릉도(0.206 W/m²)는 6월에, 고산(0.167 W/m²)은 5월에, 포항(0.220 W/m²)은 8월에 가장 높았다.

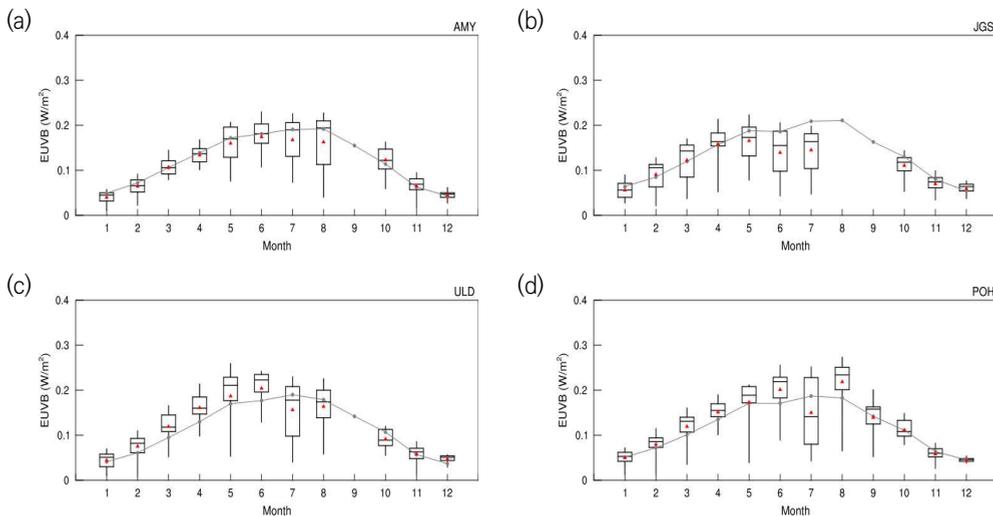


그림 9.3.1 2020년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD), (d) 포항(POH) 자외선B 복사량의 일 최대값 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 붉은색 점은 평균과 회색 점-선은 최근 평균값을 나타냄).



9.4 서울 자외선 복사량(연세대학교 위탁관측소)

연세대학교(서울)는 2004년부터 위탁감시망에 등록되어 현재까지 Brewer 분광광도계(SCI-TEC #148)로 자외선 복사(290~363 nm)를 0.5 nm 간격으로 측정하고 있다. 하지만 표준원기와의 검보정 이후 장기간이 경과하여 2019년 기준 Dobson 분광광도계와의 오존전량 비교 결과 상관계수가 0.81로 나타나는 등 관측 자료의 품질에 대한 신뢰도가 낮다. 따라서 본 보고서에서는 Brewer 분광광도계의 자외선 복사량 관측 자료 대신 OMI(Ozone Monitoring Instrument)의 자외선 복사량 관측자료를 이용해 2020년의 자외선 복사량 변동성을 분석하려 한다.

Brewer 분광광도계에서는 측정된 자외선 복사 중 290~363 nm 파장역의 적분을 총자외선(Total ultraviolet radiation; TUV)이라고 하며, 290~320 nm의 영역에 피부 홍반에 대한 가중함수를 적용하여 홍반 자외선(Erythemal ultraviolet; EUV) 복사량을 계산한다. OMI는 관측된 오존전량 값을 이용하여 clear-sky 조건에서 지표 자외선 복사조도를 lookup table로부터 추정한다. 추정된 지표 자외선 복사조도에 360 nm 파장대로부터 계산된 cloud modification factor를 곱하여 구름과 비흡수성 에어로졸의 영향을 고려한다(OMI OMUVBd, Krotkov et al., 2002). 이후, Brewer 분광광도계와 마찬가지로 피부 홍반에 대한 가중함수를 적용하여 EUV와 자외선 지수를 계산한다. 자외선 복사량의 변화는 태양천정각과 일조시간의 천문학적 원인과 날씨에 의해 영향을 주로 받아 뚜렷한 계절변화를 보이고 있어서, 여름에 높고 겨울에 낮은 특징을 보인다. 그림 9.4.1은 일 적산된 EUV의 시계열이다. EUV의 연 최댓값은 주로 7~8월에 나타났다(2013년과 2020년은 6월에 연 최댓값이 나타남).

그림 9.4.2은 EUV의 2020년 월 평균값과 장기평균값(2004~2019년)을 각각 나타낸 것이다. 장기평균값은 6월에 최댓값(3.24 kJ/m²)을 가지며, 12월에 최솟값(0.61 kJ/m²)을 가지며, 이는 2020년 6월에 월평균 최댓값이 나타난 것(3.67 kJ/m²)과 12월에 최솟값이 나타난(0.69 kJ/m²) 경향과 일치한다. 이와 같은 수치로 보았을 때, 평년 대비 변동의 폭이 더 커진 것으로 보인다.

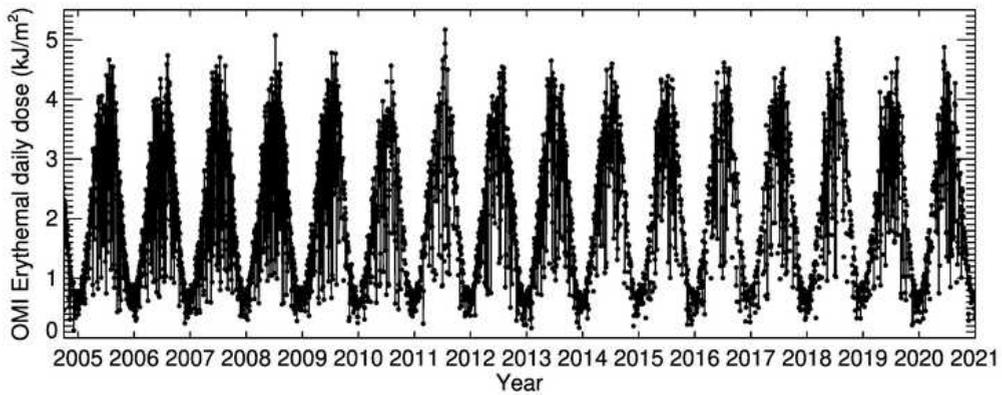


그림 9.4.1 서울 상공 일 적산된 홍반 자외선의 시계열(2004.10~2020.12).

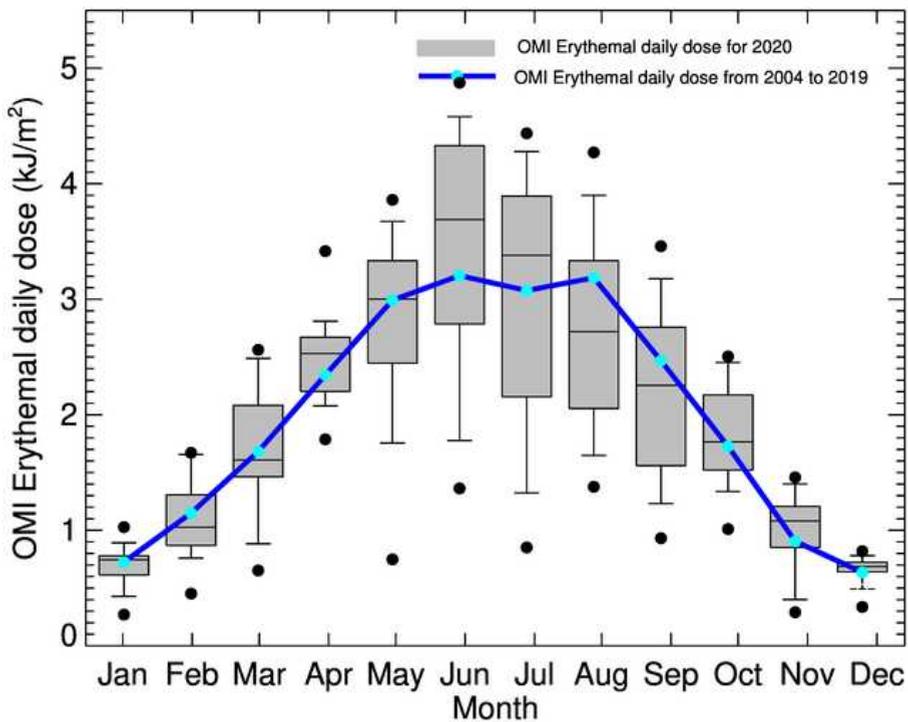


그림 9.4.2 서울 상공 일 적산된 홍반 자외선의 2020년 월 변화(회색 수염 상자; 회색 상자 양 끝은 25th, 75th percentile 값, 수염은 각각 10th, 90th percentile 값, 상자 가운데 선은 월별 중앙값, 검은 점은 월별 최댓값 및 최솟값) 및 장기월평균 연변화(1984~2019년).



그림 9.4.3은 2004년 10월부터 2020년 12월까지 일별 자외선 지수(UVI)의 값을 시계열로 나타내었고, 기상청 생활기상정보의 자외선 지수의 등급에 따라서 나누었다. 연도별 최댓값은 주로 7~8월에 나타나고 있으며, 7~8월에 나타나지 않았던 2013년의 경우에도 극댓값의 시기가 6월 10일로 여름철에 높은 관측값이 나오고 있음을 알 수 있다. 관측 기록 중 최댓값은 2011년 7월 20일에 관측된 9.18로 UVI 중, '매우 높음'에 해당하는 값이 관측되었다. 또한, 2020년의 극댓값도 6월 13일에 관측한 8.49로 '매우 높음'에 해당하는 관측값이었고, '매우 높음'은 비상 대비가 필요하고 한낮 시간에는 외출 자제를 권고하는 수준이다.

그림 9.4.4는 UVI의 2004년부터 2019년까지의 장기월평균을 나타낸 그림이다. 8월에 최댓값(5.98)을 보였으며, 12월에 최솟값(1.50)을 보였다. 가장 높은 자외선 지수를 보이는 8월은 월평균 값 모두, '보통'에서 '높음' 사이에 해당하고 있고, 겨울철에는 '낮음'에 해당하는 자외선 강도가 관측되었다. 봄과 가을의 최댓값의 변동성은 '높음'의 강도가 관측되었기 때문에, 자외선에 의한 주의는 여름철뿐만 아니라 높은 변동성을 보이는 봄과 가을철에도 주의해야 한다.

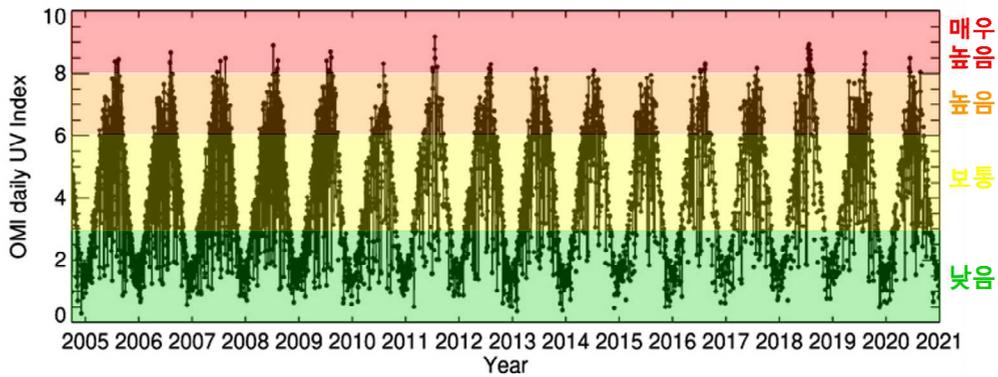


그림 9.4.3 서울 상공 일 평균 자외선 지수(UV-Index)의 시계열(2004.10~2020.12).

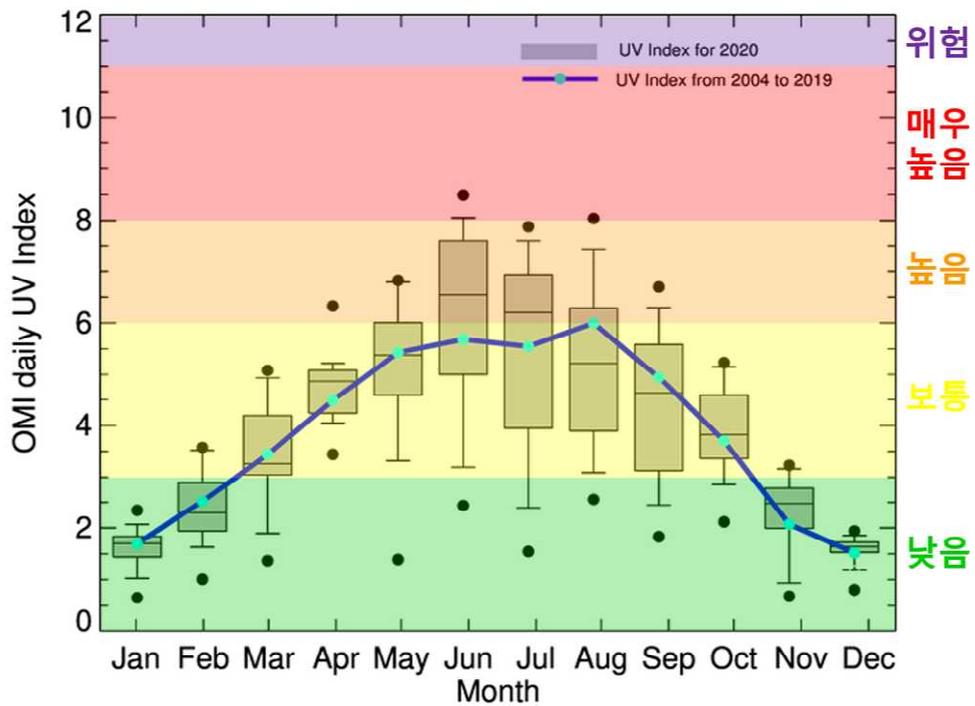


그림 9.4.4 서울 상공 일 평균 자외선 지수(UV-Index)의 2020년 연 변화(회색 수염 상자; 회색 상자 양 끝은 25th, 75th percentile 값, 수염은 각각 10th, 90th percentile 값, 상자 가운데 선은 월별 중앙값, 검은 점은 월별 최댓값 및 최솟값) 및 장기월평균 연변화(1984~2019년).



9.5 2020년 자외선 특성 분석

자외선A 일 누적 복사량의 연 평균값은 울릉도 0.69 MJ/m², 안면도 0.72 MJ/m², 포항 0.80 MJ/m², 고산 0.74 MJ/m²으로 각각 최근 평균(안면도, 포항: 2010~2019년, 고산, 울릉도: 2012~2019년) 대비 10.1%, 1.4%, 18.9%, 3.9%, 2019년 대비 -3.5%, -7.1%, 8.9%, -3.1%의 변화를 보였다.

자외선B 일 최대 복사량의 연 평균값은 울릉도 0.120 W/m², 안면도 0.114 W/m², 포항 0.126 W/m², 고산 0.113 W/m²였으며, 각각 최근 평균(안면도, 포항: 2010~2019년, 고산, 울릉도: 2012~2019년) 대비 2.4%, -8.0%, 5.3%, -18.1%, 2019년 대비 -6.2%, -8.9%, -9.9%, -19.5%의 변화를 보였다.

자외선A와 자외선B는 각각 일 누적값과 일 최대값으로 분석이 수행되며, 일 누적값으로 분석되는 자외선A의 경우, 일조시간에 의해 크게 영향을 받는다. 반면, 일 최대값으로 분석되는 자외선B의 경우 일조시간과 함께 태양광의 강도도 상당히 중요하게 작용하며 대기 중 오존 농도 또한 크게 영향을 미칠 수 있다. 종관기상관측자료를 통해 다양한 기상 특성을 함께 살펴보기 위해 안면도의 경우 기후변화감시소에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129)의 기상자료를, 고산은 감시소에서 약 4 km 떨어져 있는 고산(185)의 기상자료를 이용하였다. 포항과 울릉도는 기후변화감시소와 같이 위치한 포항(138)과 울릉도(115)에서 관측된 기상자료를 이용하여 자외선 관측값과 비교하였다.

2020년의 자외선A 일누적 복사량은 전 지점에서 최근 평균대비 높은 관측값을 보였으며, 지난해인 2019년보다는 포항을 제외한 전 지점에서 낮았다. 월별로 봤을 때 안면도와 고산은 4월에 최근 평균보다 높은 관측값을 보였고, 포항과 울릉도는 6월에 더 높은 값을 보였다. 2020년 4월은 바이칼호 북서쪽에 위치한 기압능의 영향으로 평년보다 쌀쌀하고 강한 바람이 자주 불었으나 전체적으로 평년보다 일조시간이 길었다(안면도 40.3%, 고산 42.6%, 울릉도 8.1%, 포항 29.1%). 6월에는 전국적으로 폭염이 발생했으며, 특히, 울릉도와 포항에서는 일조시간이 평년 대비 각각 32.9%와 17.7%로 연중 가장 길었다.

자외선B의 경우, 지점별로 최근 평균대비 변화량에 있어 다소 차이를 보였으며 7월은 전 지점에서 공통적으로 낮은 관측값을 보였다. 2020년 7월에는 북태평양고기압의 북상하지 않고 서쪽으로 확장하면서 장마가 길어져 평년보다 유독 기온이 낮고 강수가 많았다. 이에 따라 전 지점에서 일조시간이 유독 낮은 특성을 보였다. 일 최대값으로 분석되는 자외선B의 경우, 계절적으로 태양광이 강한 여름철의 짧은 일조시간은 일 최대값의 월평균을 크게 감소시킬 수 있으며 2020년 7월의 낮은 자외선B 분석값은 해당기간 유독 짧았던 일조시간에 기인한 것으로 사료된다. 이와 함께 안면도의 경우 8월까지도 낮게 지속된 일조시간이, 고산의 경우에는 8월 태풍과 장비이상

으로 인해 발생한 관측공백이 과거 평균보다 크게 낮은 자외선B 일 최댓값의 연 평균에 각각 기여한 것으로 보인다(그림 9.5.1).

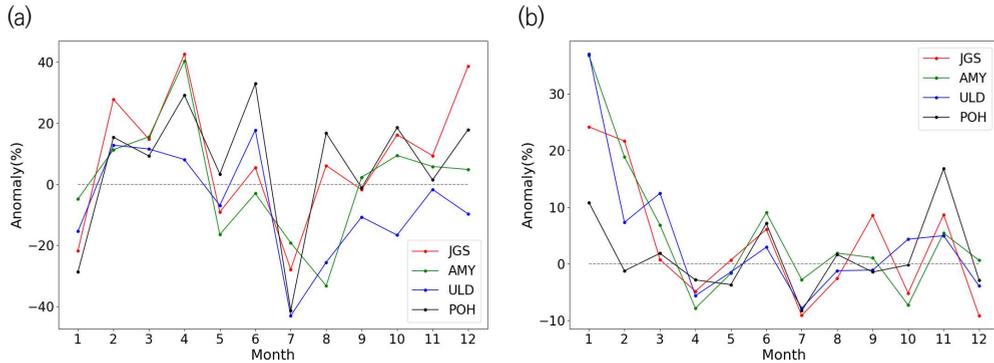


그림 9.5.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 포항(POH) 네 지점의 최근 평균(2010~2019년) 대비 2020년 (a) 일조시간 및 (b) 강수량의 월별 변화량.

자외선은 장기적인 기후변화감시를 목적으로 현재 안면도, 고산, 울릉도, 포항 네 개의 기후변화 감시소에서 자외선A와 자외선B를 동시에 관측하고 있지만, 초기에는 단기간의 노출에도 유해한 영향을 주는 자외선B만을 안면도와 포항에서 관측했다. 이후 자외선A의 유해성이 주목받아 추가 되었기 때문에 자외선A는 자외선B에 비해 상대적으로 짧은 관측기간을 갖는다. 그림 9.5.2는 각 기후변화감시소에서 관측된 자외선A와 자외선B의 변화를 나타낸다. 지점별로 비교해 봤을 때, 태양천정각이 가장 낮은 저위도에 위치한 고산에서 자외선A와 자외선B 모두 전체적으로 높은 관측값이 나타났으며, 이러한 경향은 특히 일 최댓값으로 분석한 자외선B에서 뚜렷했다. 자외선의 장기적인 경향성은 연별 관측값 변화의 기울기가 표준편차 2배수 오차범위(95% 신뢰구간)를 초과하지 않으면서, p -value가 0.05보다 작은 경우 통계적으로 유의미한 변화로 간주하였고, 전체 기간 평균에 대한 변화율로 분석하였다. 관측이 시작된 이후 현재까지의 연평균 변화율은 자외선A에 대해서 고산이 $2.90 \pm 1.51\%/year$ (p -value<0.01), 울릉도가 $2.53 \pm 1.21\%/year$ (p -value<0.01), 포항이 $1.83 \pm 1.14\%/year$ (p -value<0.05)의 유의미한 증가세를 보였고, 안면도는 $0.05 \pm 0.67\%/year$ (p -value: 0.89)로 통계적으로 유의미하지 않은 변화를 보였다. 자외선A의 증가 추세는 주로 2012년 전후부터 뚜렷한 모습을 나타냈으며, 전 지점의 관측자료가 모두 존재하는 2013년 이후의 전 지점 평균 증가율을 살펴보면 $2.44 \pm 0.55\%/year$ (p -value<0.01)의 뚜렷한 증가세를 보였다. 자외선A의 경우, 일 누적값으로 분석함에 따라 일조시간의 영향을 크게 받으며, 최근 일조시간의 증가 추세가 자외선A의 증가에 기여했을 것으로 추정된다(그림 7.6.3).

자외선B의 경우, 울릉도만이 유일하게 $2.08 \pm 1.03\%/year$ (p -value<0.01)의 통계적으로



유의미한 변화를 보였고, 나머지 지점들은 안면도가 $-0.01 \pm 0.59\%/year$ (p -value: 0.96), 고산이 $-0.49 \pm 2.23\%/year$ (p -value: 0.67), 포항이 $0.31 \pm 0.77\%/year$ (p -value: 0.44)로 유의미한 변화를 나타내지 않았다. 자외선B는 파장이 짧아 레일리 산란의 영향을 크게 받기 때문에 지표에 도달하는 에너지량이 많지 않고 관측값의 불확실성이 크다. 뿐만 아니라 일 최댓값으로 분석하기 때문에 날씨의 영향을 크게 받으며 오존 농도 변화를 포함한 기타 요인들이 서로 복합적으로 작용한다. 따라서, 현재까지 장기적으로 유의미한 변화가 나타나지 않고 있는 것이 같은 특성들에 기인한 것으로 사료되며, 지속적인 관측과 철저한 품질관리를 통한 고품질의 자료를 지속적으로 확보하는 것이 중요할 것으로 보인다.

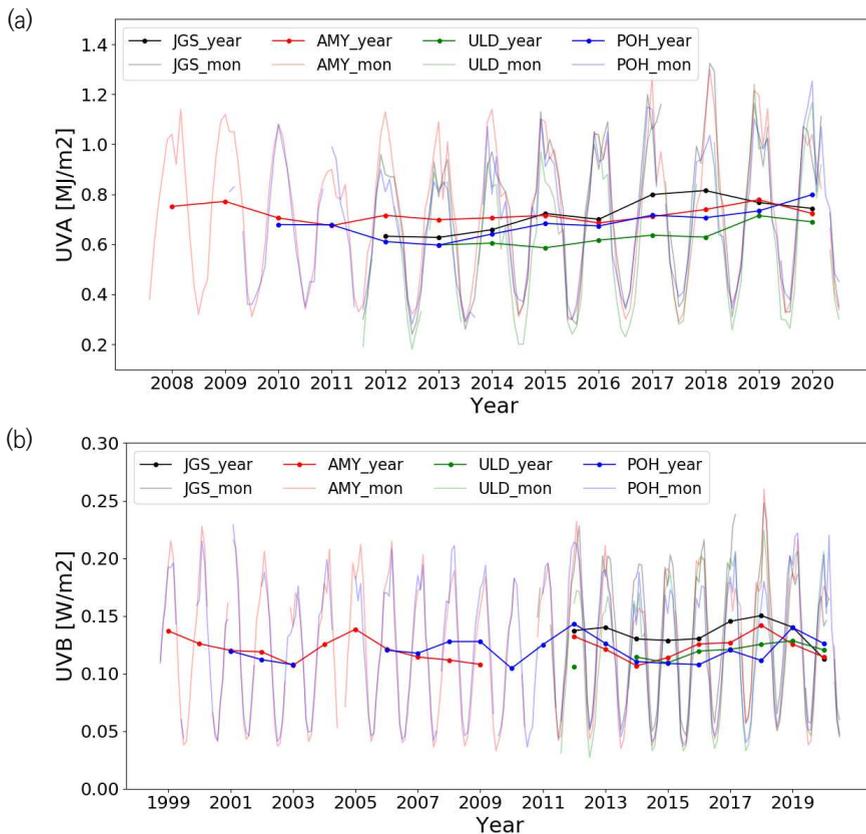


그림 9.5.2 지점별 (a) 자외선A와 (b) 자외선B 월별/연별 관측값의 변화(AMY:안면도, JGS:고산, ULD:울릉도, POH:포항).

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기질적

제11장 기타

2020 지구대기감시 보고서





제10장 총대기침적

10.1 총대기침적 감시의 목적	264
10.2 2020년 강수채취율	266
10.3 pH(산성도)	269
10.4 전기전도도	272
10.5 강수이온성분	274
10.6 총대기침적량	285
10.7 2020년 강수성분 발생원 분석	290



제10장 총대기침적

- 습성침적: 안면도 5994.0 mg/m²/year (최근 10년 대비 -21.2%)
고 산 17310.2 mg/m²/year (최근 10년 대비 +62.9%)
울릉도 17358.3 mg/m²/year (최근 10년 대비 -34.2%)
- 해염 및 생체연소, 황산암모늄과 질산암모늄의 영향을 대부분 받음.

10.1 총대기침적 감시의 목적

10.1.1 총대기침적 감시의 목적

대기 중에 부유하는 오염물질은 습성침적과 건성침적의 형태로 지면에 도달하게 된다. 습성침적은 오염물질이 강수(눈, 비, 우박 등)에 의해 지면에 도달하는 것을 의미하며, 건성침적은 입자상 또는 가스상 물질이 중력에 의해 지면에 떨어지는 것을 말한다. 특히 습성침적은 가스상과 입자상 물질의 용해 또는 혼합하여 대기 중에 부유하는 오염물을 제거 시키거나 이동시키는 역할을 한다. 이 중 강수는 지표면에 오염물질을 이동시켜 토양이나 호수를 오염시키거나 생태계에 피해를 준다(NADP, 1999; 방소영, 2003). 특히 대기 중 SO₂, NO_x 성분은 습성침적 중 산성비를 유발하고, 가스상이기 때문에 확산에 의한 국지오염이 광역오염으로 확대될 수 있다고 알려져 있다(Bu et al., 2016). 또한 강수의 산도를 결정하는 것은 대기중의 수용성이온(F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)의 양이라 할 수 있으며, 이 수용성 이온의 변화 특성을 통해 산성비의 영향을 분석할 수 있다(Chung et al., 2003). 이를 위해 기상청은 1997년부터 한반도 청정지역인 안면도, 울릉도, 1998년부터는 고산, 울진 총 4개 지점으로 구성된 총대기침적 관련 관측망을 구축·운영하였으나, 울진지역은 2017년에 운영을 중지하였다. 따라서 현재 세 개의 기후변화감시소를 운영하고 있으며, 이때의 총대기침적은 대기의 습성침적(강수)과 건성침적을 포함한다. 특히 고산과 울릉도 감시소는 습성침적 자료만 제공하나, 안면도 감시소는 습성침적과 건성침적의 자료도 제공한다.



10.1.2 채취 및 분석 방법

강수는 전일 09시부터 당일 09시까지 채수한 시료를 분석하며, 강수량이 0.5 mm 이하의 시료를 제거한 후 나머지 시료를 유효시료로 판단한다. 각 지점에서 채취된 강수시료는 여과지로 시료에 포함된 불순물을 제거한 후 전기전도도(EC)와 산성도(pH)를 즉시 측정하고, 이온크로마토그래피를 이용하여 수용성 이온성분인 양이온 5개 성분(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})과 음이온 4개 성분(F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})을 분석한다. 분석된 자료는 품질관리(QA/QC)를 거쳐 강수화학 세계자료센터 등 국내·외로 자료를 공유하고 있다. 또한 건성침적(강하분진)을 분석하기 위해 자유낙하하는 강하분진을 한 달 동안 누적·채취하여 이온크로마토그래피를 이용하여 강수시료와 같은 수용성 이온성분(양이온 5개 성분, 음이온 4개 성분)을 분석한다.

Olsen et al.(1990)에 의하면, 습성적의 농도는 강수량에 영향을 받는다. 따라서 월, 계절, 년, 혹은 다년간의 평균을 할 때, 강수량이 가중된 평균(the precipitation-weighted mean concentration) 즉 부피가중평균을 고려해야하며, 계산식은 다음과 같다.

$$C_{pw} = \sum_{i=1}^m (C_i \cdot P_i) / P$$

C_{pw} : 강수량이 가중 평균된 농도

C_i : i 번째 강수시료의 분석된 농도

P_i : i 번째 강수시료의 강수량

m: 평균하려는 기간의 강수시료들의 총 개수

P: 평균하려는 기간 동안 강수량 총합

10.2 2020년 강수채취율

강수채취율이란 총강수량 중 채취한 강수량의 비율을 의미하며, 2020년 강수채취율은 안면도 93.0%, 고산 90.3%, 울릉도 88.5%로, 세계기상기구 지구대기감시프로그램의(WMO) 강수화학 분야에서 강수채취율의 품질목표인 70%보다 높았다(WMO, 2004). 그림 10.2.1은 감시소별, 연도별 총 강수량이다. 연도별 강수량은 감시소에 따라 증가와 감소를 반복하는 등 서로 다른 양상을 보인다. 이 중 세 감시소 모두 강수량 변화를 보였으며, 특히 안면도 감시소에서는 2019년 이전에는 감소하다가 다시 증가하는 경향으로 강수의 변화폭이 크게 나타났다.

그림 10.2.2는 강수화학의 품질관리를 통과한 전체 강수량을 지역별로 최근 10년(2010~2019년)과 2020년의 단순평균강수량 그래프이다. 최근 10년간의 평균강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 940.4, 1386.1, 1539.0 mm이며, 2020년 세 감시소의 강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 1211.0, 1492.5, 1462.1 mm로 최근 10년의 약 128.8%, 107.7%, 95.0%이며, 울릉도를 제외한 나머지 감시소는 최근 10년보다는 많은 강수량을 보였다.

또한, 2020년 강수량과 최근 10년 강수량을 단순 평균한 값을 계절별로 비교하였다(그림 10.2.3). 고산, 울릉도 감시소는 여름철에 최대 강수량을 나타냈으나, 안면도 감시소는 평년보다 낮은 강수량을 보였다. 세 감시소 모두 여름철에 최대 강수량을 나타냈으나, 울릉도 감시소는 최근 10년보다 여름철에 적은 강수량을 보였다. 안면도, 고산 감시소는 봄철을 제외한 나머지 계절에 높은 강수량을 보였다. 그러나 울릉도 감시소는 최근 10년보다 다 감소하는 경향을 나타냈다.

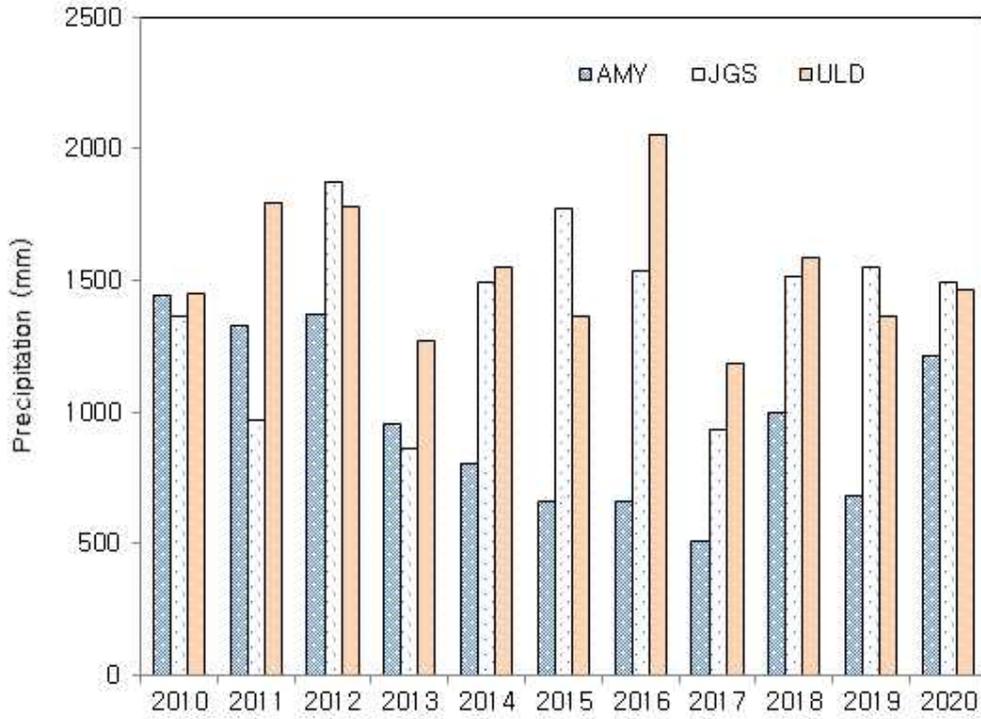


그림 10.2.1 2010~2020년까지 연도별 총 강수량(mm)(안면도:AMY, 고산:JGS, 울릉도:ULD).
*고산: 2020년 4월 일부 고산기상대 AWS자료 사용

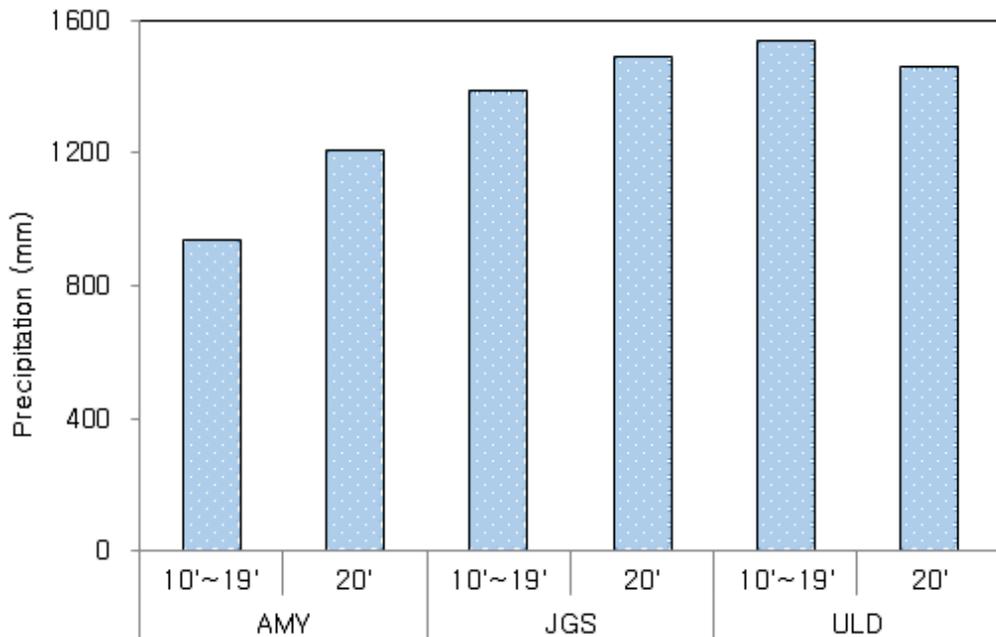


그림 10.2.2 감시소별 최근 10년(2010~2019년) 평균 강수량(mm)과 2020년 총 강수량(mm) 비교.
(안면도:AMY, 고산:JGS, 울릉도:ULD)

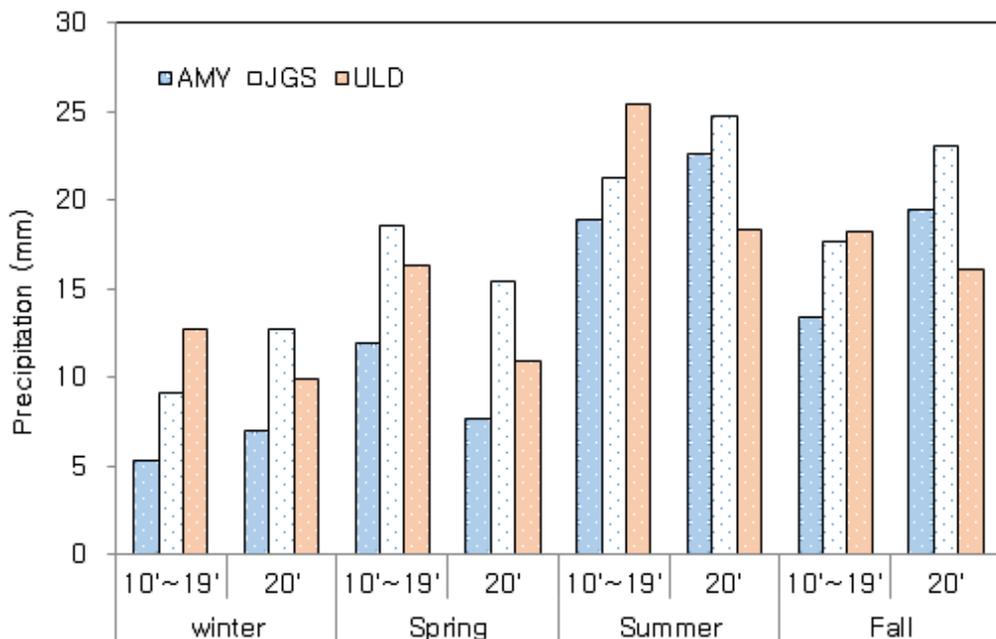


그림 10.2.3 계절별 최근 10년(2010~2019년) 강수량과 당해년도 단순평균강수량(mm).
(안면도:AMY, 고산:JGS, 울릉도:ULD)



10.3 pH(산성도)

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료를 전체 기간(안면도 & 울릉도 1997~2019년, 고산 1998~2019년)과 최근 10년(2010~2019년), 2020년의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 pH와 1998년부터 2016년까지 채취한 울진 자료도 함께 비교하였다.

안면도, 고산, 울릉도 강수의 부피가중평균 pH를 최근 10년(전체 기간) 자료를 확인한 결과 각각 4.74(4.70), 4.93(4.88), 4.80(4.84)이며, 2020년도 강수의 부피가중평균 pH는 안면도 5.23, 고산 5.07, 울릉도 4.93으로 나타났다(표10.3.1, 그림10.3.1(a)). 각 감시소에서 2020년도 부피가중평균 pH가 최근 10년과 전체평균농도보다 약간 높은 것으로 조사되었다. 울진은 1998년부터 2016년 전체평균농도는 4.85로 다른 지역의 최근 10년 자료와 비슷한 값을 보인다. 또한, 최근 10년간의 계절별 부피가중평균의 pH와 2020년의 계절별 pH를 비교해 본 결과를 그림 10.3.1(b)에 나타내었다. 최근 10년간의 계절별 부피가중평균의 pH는 안면도, 고산, 울릉도 세 감시소 모두 겨울철 산성도가 낮은 값을 보였으며, 특히 다른 감시소에 비해 안면도가 4.39로 가장 낮은 값을 나타냈다. 반면에 가을철의 2020년 안면도와 고산 강수의 pH가 5.55, 5.20, 울릉도 강수 pH는 여름철에 5.26으로 가장 높은 값을 보였다. 안면도, 고산, 울릉도 감시소의 전체 간 강수 pH와 울진(1998~2016년) 강수 pH 비교해 본 결과, 안면도는 4.39~4.77, 고산은 4.69~4.94, 울릉도는 4.56~5.03, 울진은 4.62~4.94의 강수 pH를 보였다. 안면도 감시소가 다른 감시소에 비해 pH가 낮은 값을 보였고, 다른 감시소는 큰 차이를 보이지 않았다.

감시소별 강수에 대한 pH 구간별 발생빈도는 그림 10.3.2와 같다. 최근 10년(2010~2019년) 강수 pH분포와 전체 기간 자료에서, 모든 지역인 안면도, 고산, 울릉도, 울진에서 pH 4.5~5.0 구간에서 최대빈도가 나타났다. 반면에 2020년은 다른 감시소와는 다르게 안면도에서 pH 5.0~5.5 구간에서 최대빈도가 나타났다. 2020년에는 고산, 울릉도는 최근 10년(2010~2019년) 분포와 유사한 경향을 보였으나, 안면도는 pH 5.0~5.5 구간에서 빈도가 증가하는 결과를 보였다. 일반적으로 pH가 5.0 미만인 강수 시료는 황산과 질산염에 의한 영향이라 보이며, pH가 6.0 이상의 강수 시료는 알칼리물질에 의한 영향 때문이라고 알려져 있다. 따라서 안면도 지역은 최근 10년보다 알칼리물질인 NH_4^+ , Ca^{2+} 성분의 농도에 의해 pH가 높아진 것이라 판단된다.

표 10.3.1 2020년 안면도, 고산, 울릉도 강수의 부피가중평균 pH(산성도)

기 간	감시소	안면도	고 산	울릉도
2020년		5.23	5.07	4.98
최근 10년 (2010~2019년)		4.74	4.93	4.80
전체 기간 (관측기간)		4.70 (1997~2019년)	4.88 (1998~2019년)	4.84 (1997~2019년)

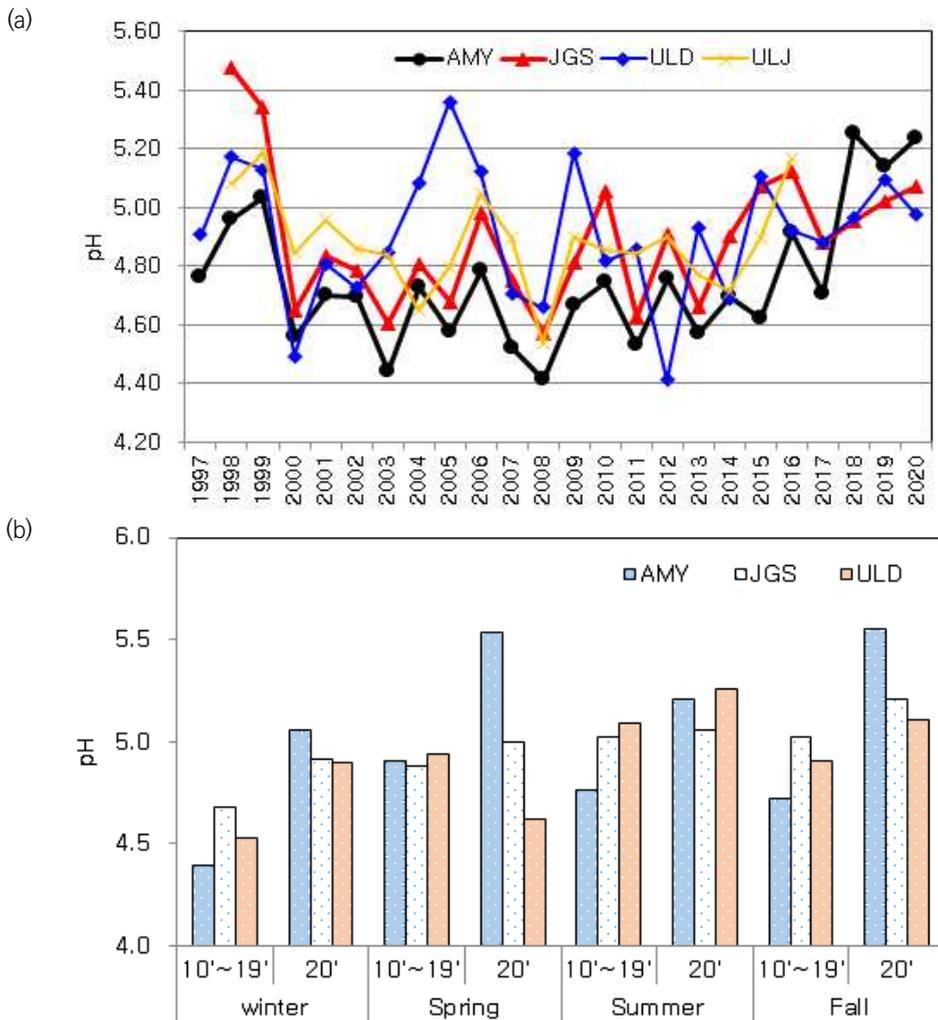
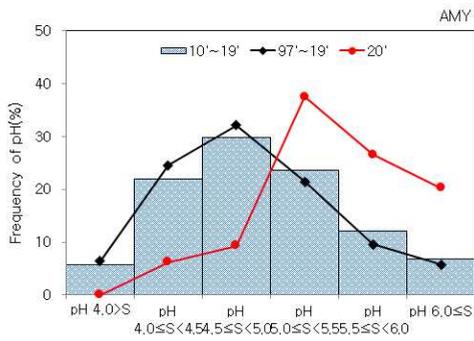
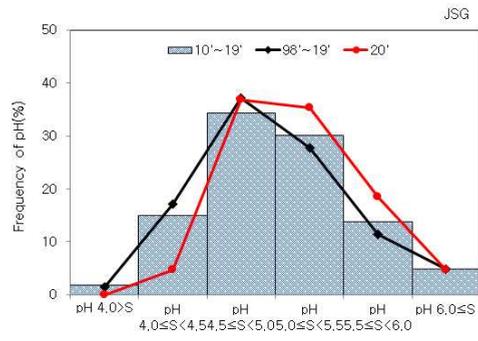


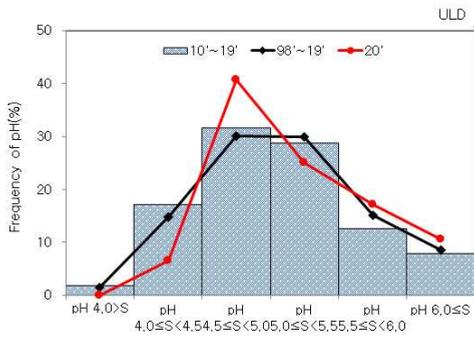
그림 10.3.1 (a) 연도별, (b) 계절별 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 부피가중평균의 산성도 변화.
(a) 연도별 울진(ULJ): 자료 추가



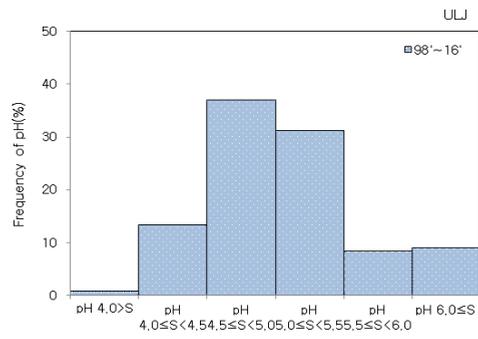
(a) 안면도(AMY)



(b) 고산(JGS)



(c) 울릉도(ULD)



(d) 울진(ULJ)

그림 10.3.2 감시소별 강수의 pH 발생 빈도((a) 안면도:AMY, (b) 고산:JGS, (c) 울릉도:ULD, (d) 울진:ULJ).

10.4 전기전도도

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료를 전체 기간(안면도 & 울릉도 1997~2019년, 고산 1998~2019년)과 최근 10년(2010~2019년), 2020년의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 전기전도도와 1998년부터 2016년까지 채취한 울진 자료도 함께 비교하였다.

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 최근 10년(2010~2019년)의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도를 확인해본 결과(표 10.4.1, 그림 10.4.2), 최근 10년간의 전기전도도의 값은 각각 25.4, 22.3, 49.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났다. 그리고 2020년도의 부피가중평균의 전기전도도는 안면도 14.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 고산 34.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 울릉도 37.3 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 안면도 지역이 가장 낮았다. 또한 세 감시소 부피가중평균 전기전도도의 장기평균자료와 울진 자료와 비교한 결과, 안면도는 26.7 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 고산은 24.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 울릉도 46.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 울진은 24.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 으로 울릉도가 가장 높은 값을 보였다.

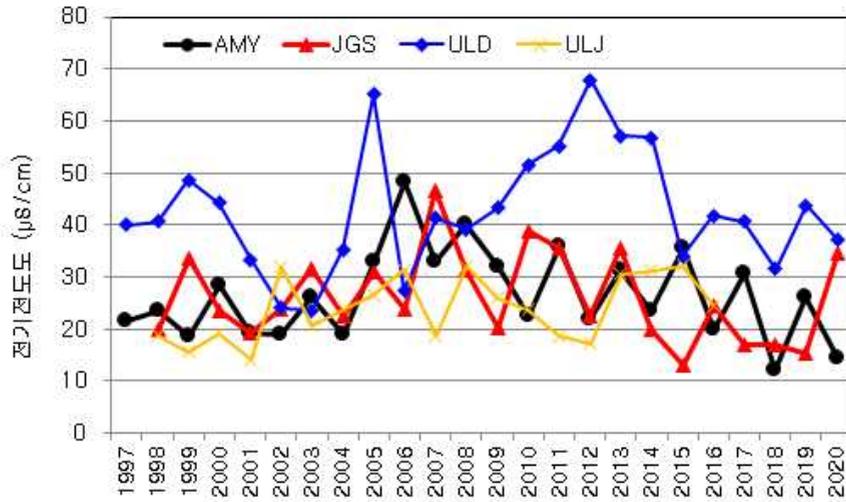
최근 10년과 2020년의 안면도, 고산, 울릉도 강수의 부피가중평균 전기전도도인 경우, 겨울철에 높고, 여름철에는 낮은 값을 나타냈다. 또한, 2020년도는 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도가 평년과 마찬가지로 겨울에 높고, 여름에 낮았다. 낮았다.

표 10.4.1 2020년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 강수의 부피가중평균 전기전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)

기간	감시소	안면도	고산	울릉도
2020년		14.5	34.5	37.3
최근 10년 (2010~2019년)		25.4	22.3	49.8
전체 기간 (관측기간)		26.7 (1997~2019년)	24.8 (1997~2019년)	46.1 (1998~2019년)



(a)



(b)

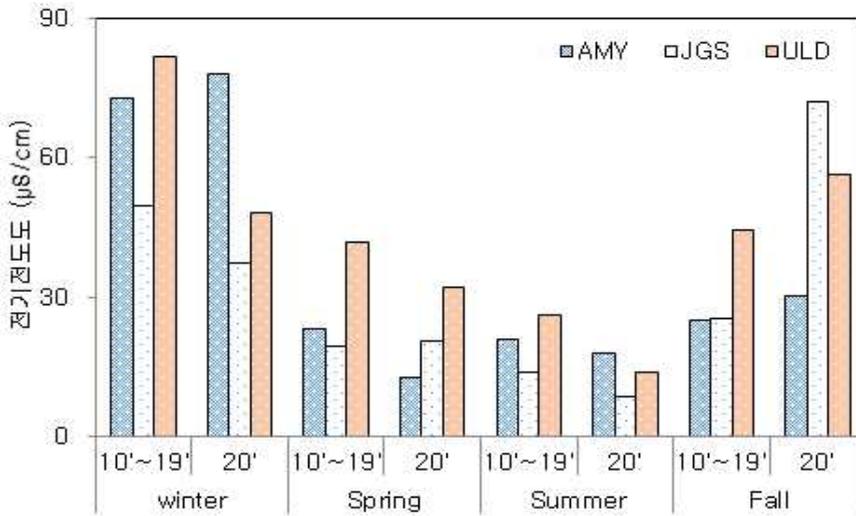


그림 10.4.1 감시소별 전기전도도의 (a) 부피가중평균변화, (b) 연도별 부피가중평균 계절별 부피가중평균 (안면도:AMY, 고산:JGS, 울릉도:ULD, 울진:ULJ).

(a) 연도별 울진(ULJ): 자료 추가

10.5 강수이온성분

10.5.1 강수성분의 일별 농도

강수화학분야는 자료 해석에 앞서 분석 자료의 신뢰도를 검증해야 한다. 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 강수화학 QA/QC 지침은 이온차 허용범위 오류, 전기전도도차 허용범위 오류의 정량화된 기준을 사용하여 강수화학 분석 자료를 검증하도록 권고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 “WMO GAW Report No. 160”의 지침과 “지구대기감시 업무매뉴얼(II)-에어로졸 및 총대기 침적-, 2017”을 따라 강수화학 분석 자료를 검증하였다.

그림 10.5.1~10.5.3은 2020년의 안면도, 고산, 울릉도 세 감시소 강수일의 자료를 그래프로 나타낸 것이다.

세 감시소 모두 대체적으로 강수량이 많을 때 강수화학성분의 농도가 낮게 나타나고, 강수량이 적을 때 화학성분의 농도가 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 강수량에 따른 이온성분의 농도변화는 초기 빗방울이 비교적 건조한 대기 중으로 떨어지면서 일어나는 증발효과(evaporation effect), 강수 초기에 대기 중에 고농도로 존재하는 에어로졸의 포획(aerosol capture) 그리고 다량의 강수 시 일어나는 강수 중 오염물질이 희석(dilution of chemical species)으로 설명할 수 있다(Bleeker et al., 1966). 또한, 지표면에서 포집된 강수 중 오염물질의 농도는 대개 처음에 높고 점차 낮아진 후 일정한 값을 유지하게 되는데 초기의 고농도는 주로 wash out의 작용에 의한 것이고 점차 낮아지게 되는 농도는 rainout에 의한 작용이라고 알려져 있다. 전자는 생성된 빗방울이 지표면으로 떨어지면서 대기 중에 존재하는 오염물질을 흡수 및 흡착하여 제거하는 것으로, 이는 국지적인 요인에 의한 영향을 더 많이 받으며, 후자는 대기 중의 입자상 또는 가스상 오염물질이 구름응결핵으로 작용함으로써 제거되는 것으로 대기오염물질의 장거리 이동과 밀접한 관련이 있다고 한다(Kang et al., 2004).

세 감시소 모두 해염성분의 비중이 높은 것으로 보이며, 특히 울릉도 해염의 영향을 가장 많이 받는 것으로 분석되었다. 해염성분(Na^+ , Cl^-)을 제외하고는 안면도, 고산은 특히 황산염(SO_4^{2-}), 질산염(NO_3^-)과 암모늄(NH_4^+) 중 질산염 및 암모늄이온의 영향이 큰 것으로 보인다.

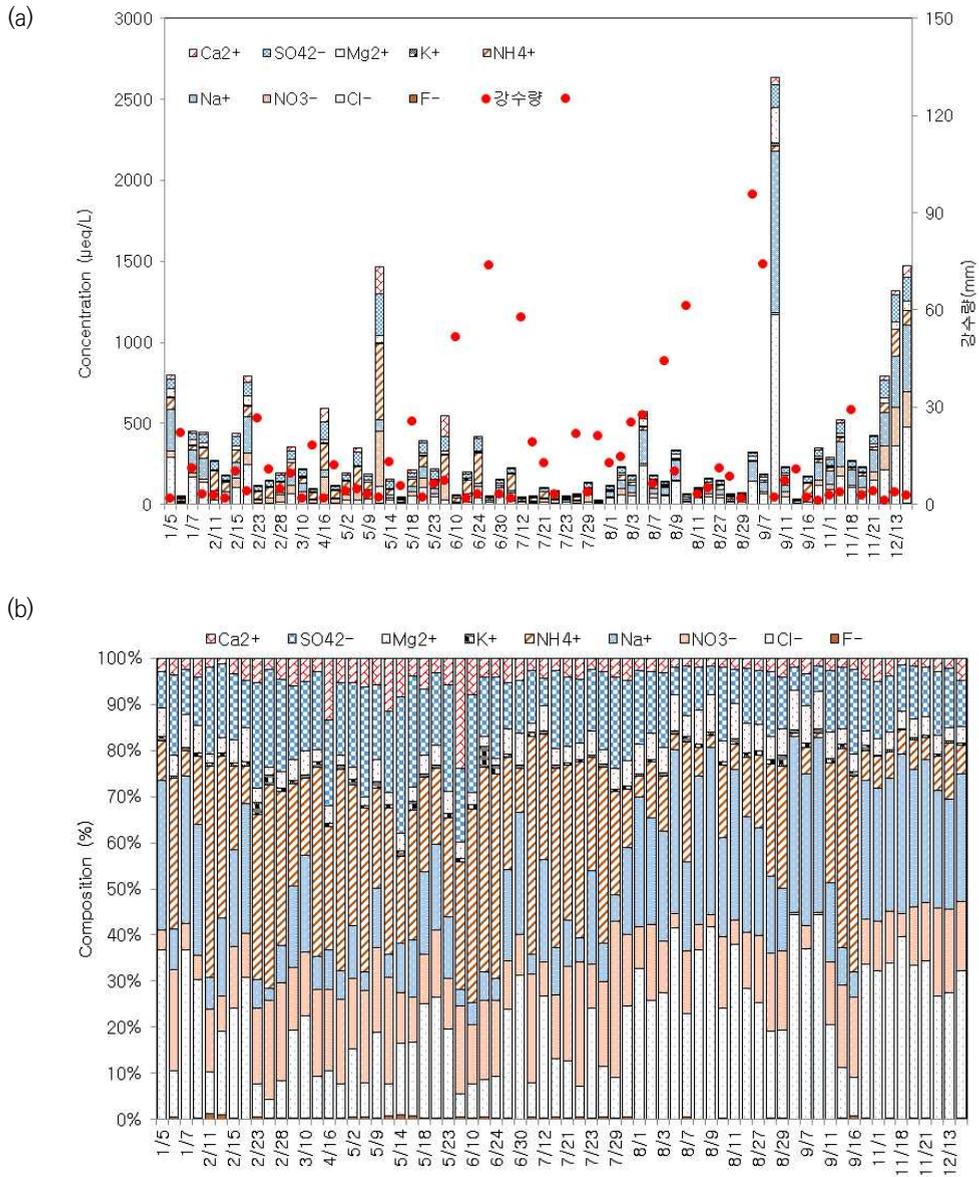


그림 10.5.1 2020년 안면도 감시소의 강수성분 (a) 농도, (b) 조성비.

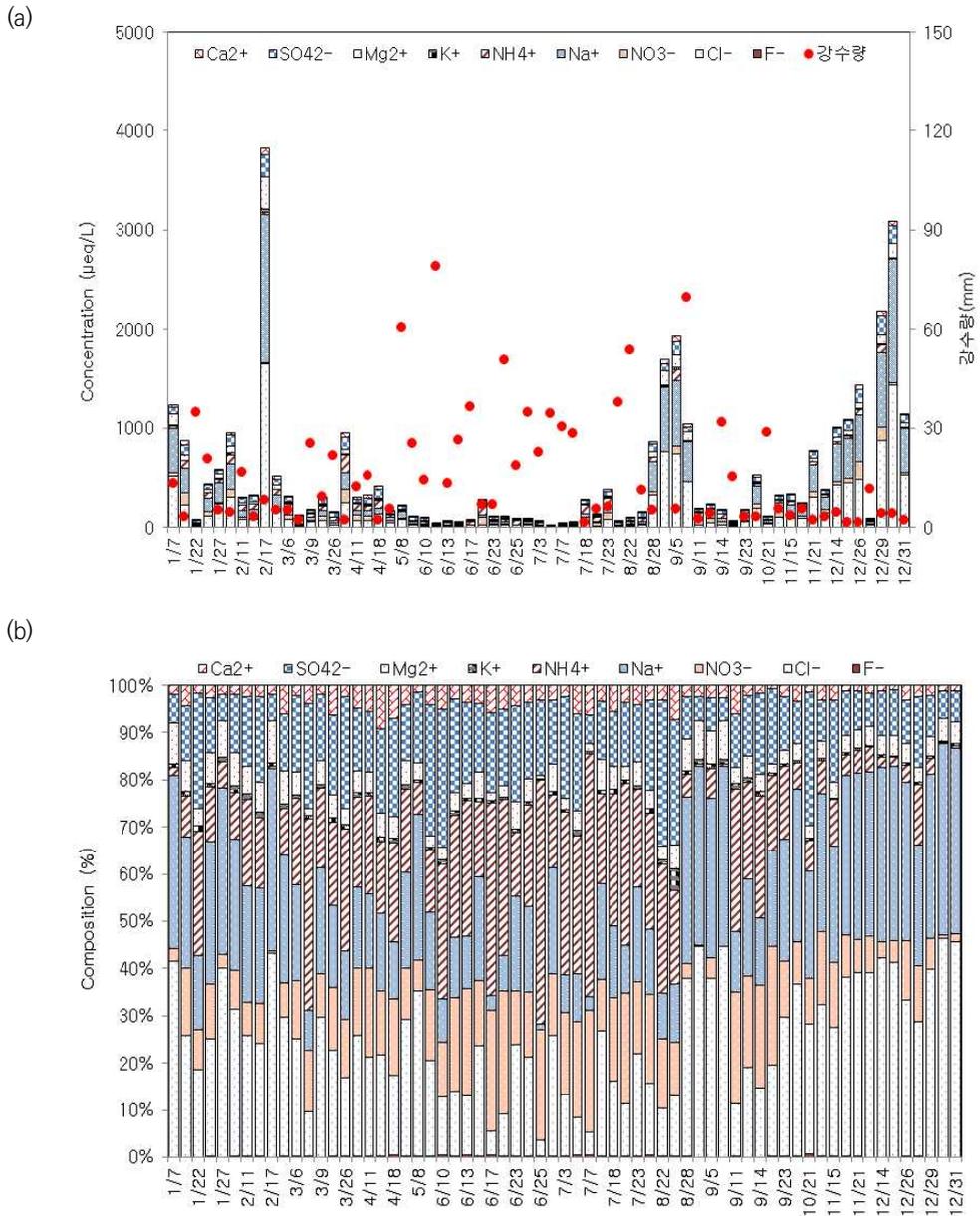


그림 10.5.2 2020년 고산 감시소의 강수성분 (a) 농도, (b) 조성비.

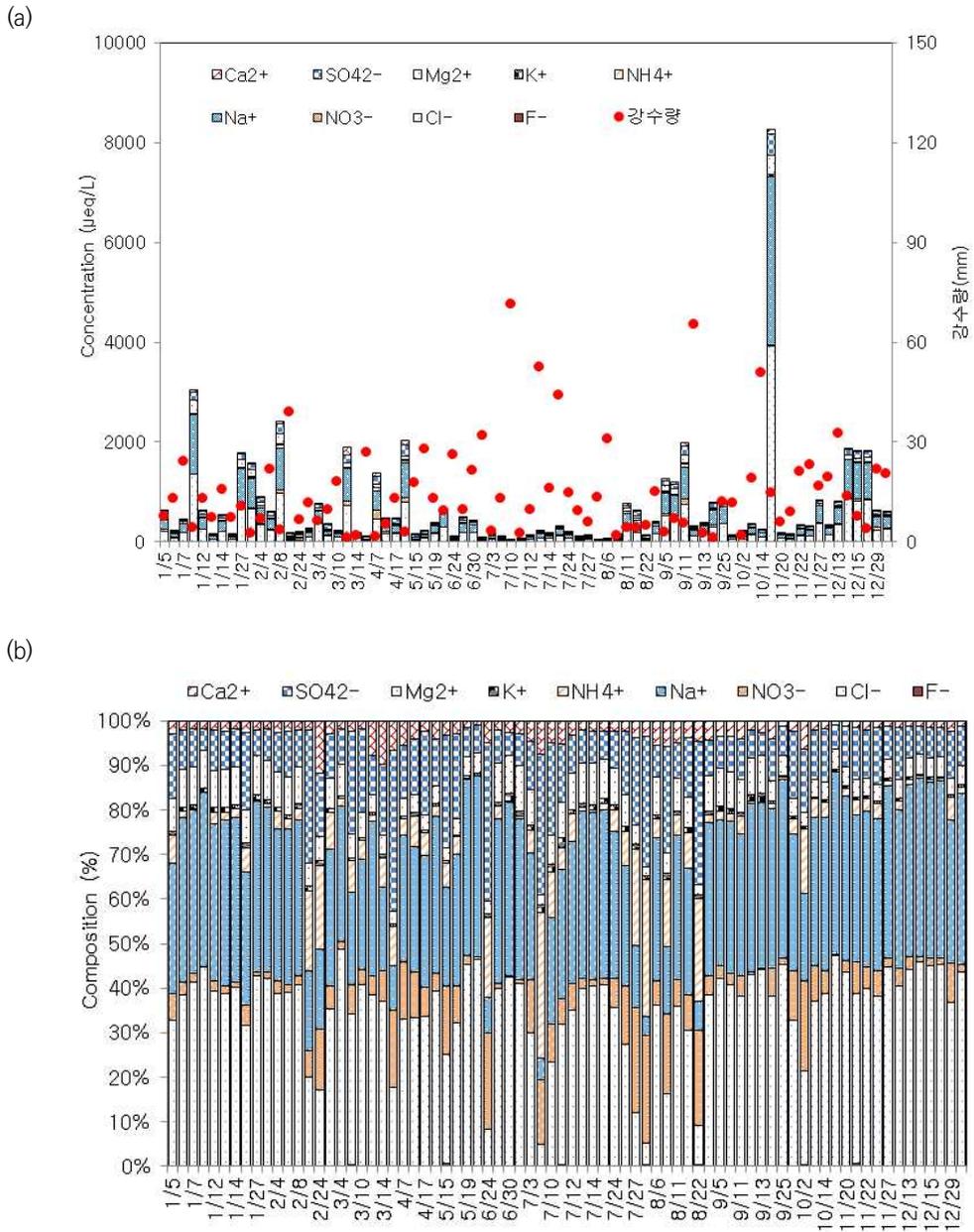


그림 10.5.3 2020년 울릉도 감시소의 강수성분 (a) 농도, (b) 조성비.

10.5.2 강수성분의 연도별 농도

표 10.5.1과 그림 10.5.4는 최근 10년(2010~2019년)의 평균값과 당해 연도인 2020년의 평균 값이며, 이때의 평균은 각각 채취된 강수량이 가중되어 계산되었다. 또한, 1998년부터 2016년까지 채취한 울진 자료와 최재천 등(1997)이 발표한 1991~1995년에 소백산에서 채취 및 분석한 강수 자료를 비교해 보았다. 안면도, 고산, 울릉도의 모든 감시소는 해안가에 위치하여 있으므로, 해염성분인 Na^+ , Cl^- 성분의 농도가 가장 높았다. 또한 울진지역도 해염성분이 높은 것으로 조사 되었으며, 소백산지역의 강수는 해발고도 1,340 m에 위치한 곳에서 채취하였기 때문에 해염 성분이 적게 나타났다.

2020년도 해염성분인 Na^+ , Cl^- 성분 다음으로 안면도 감시소에서는 NH_4^+ , 고산, 울릉도 감시소에서는 SO_4^{2-} 성분농도가 가장 높았다. 울진과 소백산 역시 SO_4^{2-} 성분이 가장 높은 농도를 보였다. 안면도, 고산, 울릉도 각 감시소의 강수 성분 중 이차반응물질인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분을 비교해 보았다.

2020년도 안면도, 고산, 울릉도 감시소 강수 SO_4^{2-} 성분의 부피가중평균농도는 각각 19.3, 37.1, 42.9 $\mu\text{eq/L}$ 이며, 최근 10년(2001~2019년)은 각각 46.5, 31.5, 65.6 $\mu\text{eq/L}$ 로 나타났다. 전체 기간(안면도 & 울릉도: 1997~2019년, 고산: 1998~2019년)의 각각 51.0, 36.3, 62.7 $\mu\text{eq/L}$ 로 나타났다. 안면도, 고산, 울릉도 NH_4^+ 성분의 부피가중평균농도는 2020년 각각 23.0, 21.6, 10.4 $\mu\text{eq/L}$, 최근 10년은 41.6, 17.3, 26.4 $\mu\text{eq/L}$, 전체 기간은 37.4, 16.5, 23.6 $\mu\text{eq/L}$ 의 값을 보였다. 또한, NO_3^- 성분의 2020년은 각각 15.4, 16.2, 13.9 $\mu\text{eq/L}$, 최근 10년은 31.7, 18.2, 28.6 $\mu\text{eq/L}$, 전체 기간은 31.2, 18.8, 27.7 $\mu\text{eq/L}$ 의 값을 보였다 (표 10.5.1).

따라서 안면도 강수의 최근 10년, 전체 기간 평균농도와 비교한 결과 2020년은 SO_4^{2-} 성분 농도가 대체적으로 각각 2.4, 2.6배, NO_3^- 성분은 각각 2.1, 2.0배, NH_4^+ 성분은 각각 1.8, 1.4배 감소하였다. 고산은 2020년의 SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분은 소폭 증가하였으나, NO_3^- 성분은 약 1.1, 1.2배 감소하였다. 울릉도 강수는 최근 10년, 전체 기간 평균농도와 비교한 결과 2020년은 SO_4^{2-} 성분 1.5, 1.5배, NO_3^- 성분 2.1, 2.0배, NH_4^+ 성분 2.5, 2.3배 정도 감소하였다. 고산 SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분을 제외하고는 모든 감시소에서 이차반응물질이 감소하는 결과를 보였다. 울진과 소백산 이차반응물질을 비교해 보면, SO_4^{2-} 성분은 2020년도 안면도, 고산 감시소보다는 농도가 높고, 울릉도 감시소와 비슷한 것으로 보인다. 또한 NO_3^- 성분은 2020년 안면도, 고산, 울릉도보다는 높은 농도를 보이며, 최근 10년과 전체 기간 평균농도와는 비슷한 값을 나타내었다. NH_4^+ 성분인 경우, 안면도 최근 10년과 전체 기간 평균 부피가중평균농도가 가장 높은 농도를 보였다. 토양



성분인 Ca^{2+} 은 안면도, 고산 감시소가 울릉도, 울진, 소백산 지역보다는 낮은 농도를 보였다. 안면도, 고산, 울릉도 모든 감시소에서 2020년에 최근 10년보다 해염성분(Na^+ , Cl^-)의 조성이 증가하였다.

표 10.5.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 울진(ULJ), 소백산 지점 강수의 부피가중평균 이온농도($\mu\text{eq/L}$).

지 점	요 소	F^-	Cl^-	NO_3^-	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	SO_4^{2-} (nss- SO_4^{2-})	Ca^{2+} (nss- Ca^{2+})
		안면도	2020년	0.3	52.3	15.4	44.9	23.0	1.4	10.2
	최근 10년	1.1	58.7	31.7	50.4	41.6	2.3	13.8	46.5 (40.4)	17.4 (15.1)
	전체 기간 (1997~2019년)	1.6	60.9	31.2	54.5	37.4	2.9	14.3	51.0 (44.4)	19.7 (17.3)
고산	2020년	0.3	188.9	16.2	162.8	21.6	4.2	34.6	37.1 (17.4)	12.3 (5.1)
	최근 10년	0.6	87.3	18.2	76.0	17.3	3.1	18.4	31.5 (22.3)	13.1 (9.8)
	전체 기간 (1998~2019년)	0.7	97.0	18.8	87.7	16.5	3.6	20.4	36.3 (25.7)	15.2 (11.3)
울릉도	2020년	0.3	204.6	13.9	179.3	10.4	3.6	29.0	42.9 (21.2)	10.1 (2.2)
	최근 10년	0.8	235.4	28.6	200.7	26.4	16.6	46.8	65.6 (41.4)	32.1 (23.3)
	전체 기간 (1997~2019년)	0.9	214.4	27.7	181.0	23.6	19.5	41.7	62.7 (40.8)	33.7 (25.7)
울진	전체 기간 (1998~2016년)	0.8	91.0	18.9	80.1	17.5	3.7	20.0	40.2 (30.5)	20.5 (17.0)
소백산 ⁵⁾	1991~1995년	2.5	10.4	18.4	11.2	31.6	3.8	3.8	45.7	20.8

5) 최재천, 이민영, 김산, 김성균, 1997: 1991~1995년 소백산 지역에 내린 강수의 화학 조성에 관한 연구, 한국기상학회지 33(3), 477~486.

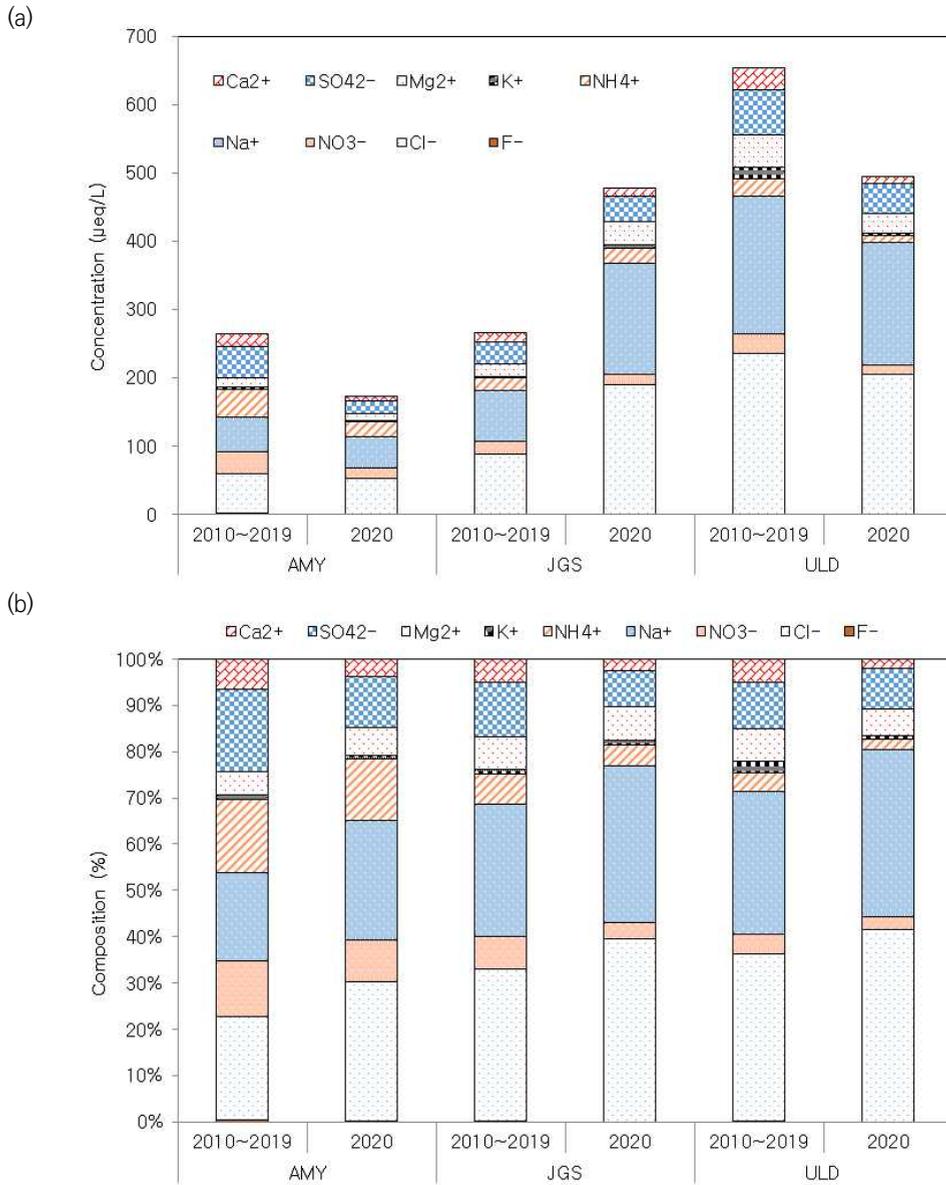


그림 10.5.4 2010~2020년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 감시소의 강수성분 연도별 부피가 중평균 (a) 농도, (b) 조성비.



10.5.3 강수성분의 계절별 농도

안면도, 고산, 울릉도에서 채취한 강수의 이온성분에 대한 계절별 평균농도는 그림 10.5.5~10.5.7과 같다. 여기서 강수이온성분의 계절별 평균농도는 최근 10년(2010~2019년) 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해년도 1, 2월의 자료를 평균하고, 당해 연도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

안면도 강수에서 최근 10년(2010~2019년)간과 2020년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분 농도 범위는 각각 12.3~114.2, 9.3~84.2, 10.5~79.9 $\mu\text{eq/L}$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분들의 조성비는 최근 10년간 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 48.4%, 46.5%, 47.3%, 46.4%로, 겨울철에 높고, 상대적으로 봄, 가을에 낮은 경향이 나타났었다. 그러나 반대로 2020년은 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 44.5%, 44.2%, 42.4%, 41.1%로 겨울철이 가장 높고, 가을철이 가장 낮은 경향을 보였다. 해염성분 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 인 경우 부피가중평균농도 합의 범위는 61.0~509.4 $\mu\text{eq/L}$ 이며, 이들의 조성비는 35.2%~48.1%의 범위를 보였다. 또한, Ca^{2+} 성분의 조성은 2.3%~13.3%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였고, 특히, 최근 10년에서 높은 조성을 나타내는데 이는 황사의 영향으로 판단된다.

고산 강수 중 이차오염물질의 최근 10년(2010~2019년)간과 2020년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분 농도 범위는 각각 14.0~63.2, 11.7~34.0, 12.2~31.4 $\mu\text{eq/L}$ 로 분석되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 47.6%, 48.5%, 47.3%, 46.3%이며, 2020년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 47.1%, 49.8%, 48.8%, 43.7%로 봄철 두 기간 모두 높은 조성비를 보였다. 해염성분 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 인 경우 조성비는 36.2%~50.1%의 범위를 보였다. Ca^{2+} 성분의 조성은 2.4%~7.5%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였다.

마지막으로 울릉도 감시소 강수 중 이차오염물질의 최근 10년(2010~2019년)간과 2020년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분 농도 범위는 각각 17.1~107.1, 8.0~49.4, 7.3~40.2 $\mu\text{eq/L}$ 로 분석되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 46.5%, 44.5%, 42.7%, 44.4%이며, 2020년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 46.3%, 51.1%, 47.6%, 47.3%로 울릉도 강수의 최근 10년은 겨울철이 높고 반면에 2020년도는 봄철이 높은 조성비를 보였다. 해염성분 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 인 경우 조성비는 46.7%~52.7%의 범위를 보였다. 또한, Ca^{2+} 성분의 조성은 1.6%~8.2%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였고, 특히, 최근 10년에 8.2%로 황사 영향에 의해 높은 조성비를 보이는 것으로 판단된다.

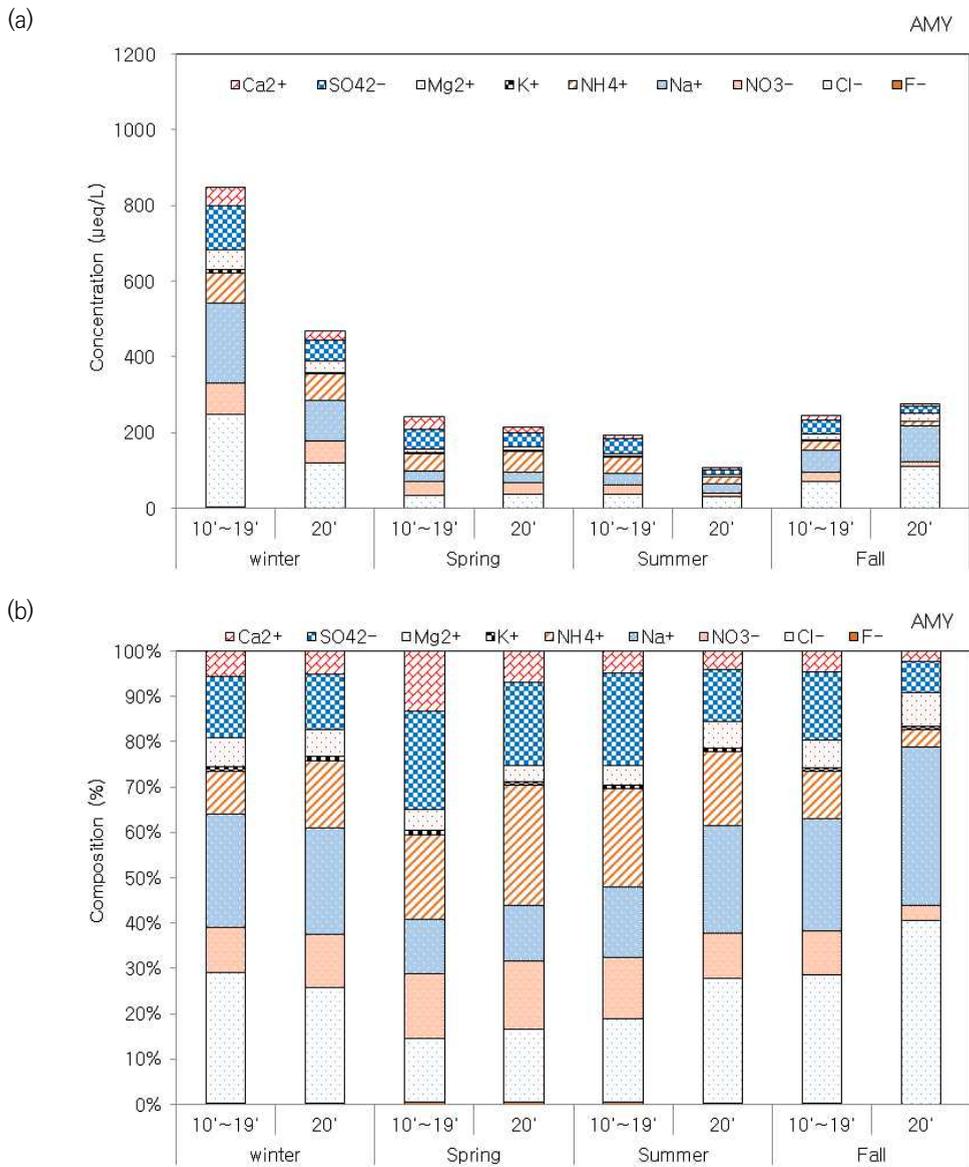


그림 10.5.5 최근 10년(2010~2019년)과 2020년 안면도 감시소 강수성분 계절별 부피가중평균 (a) 농도, (b) 조성비.

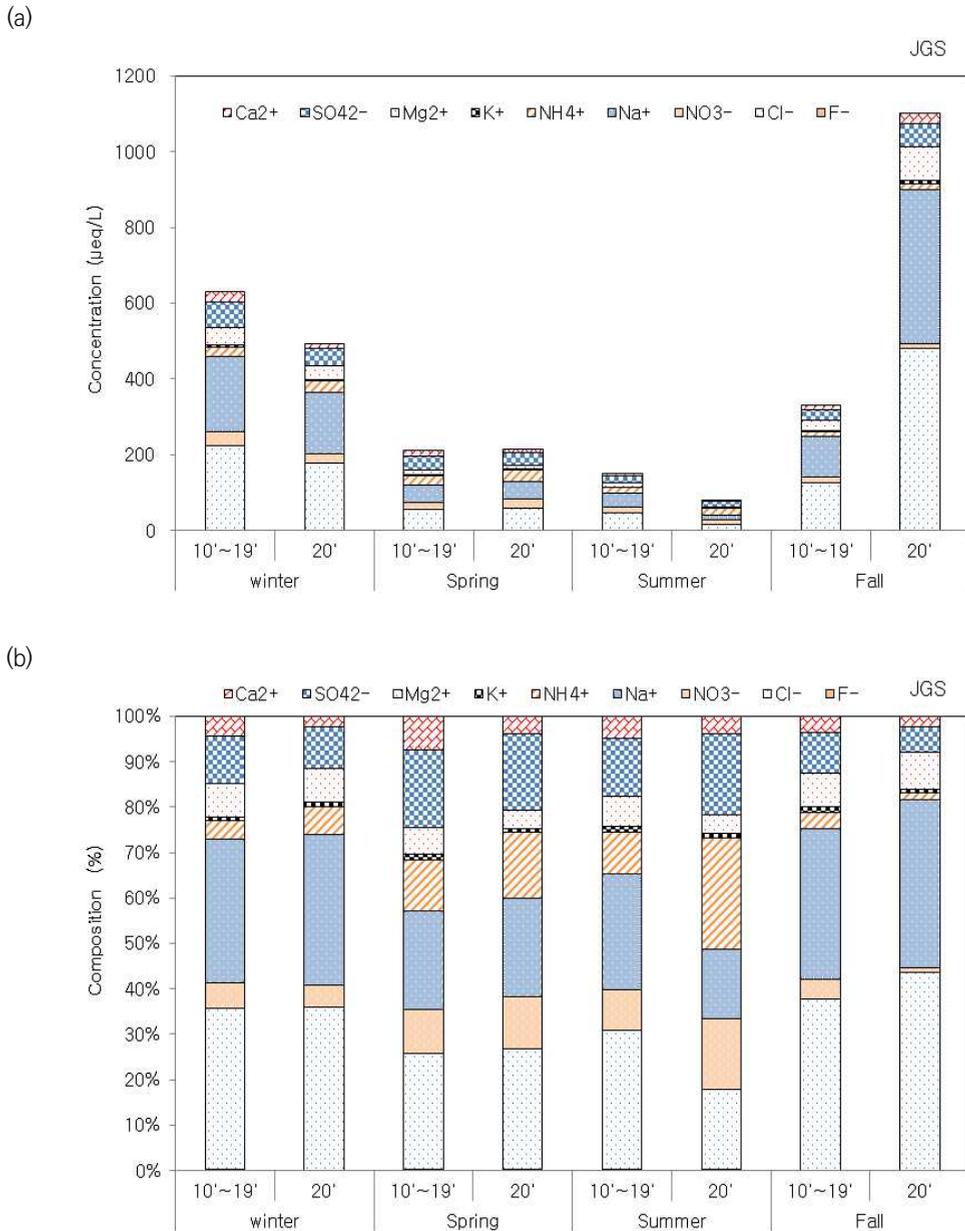


그림 10.5.6 최근 10년(2010~2019년)과 2020년 고산 감시소 강수성분 계절별 부피가중평균
(a) 농도, (b) 조성비.

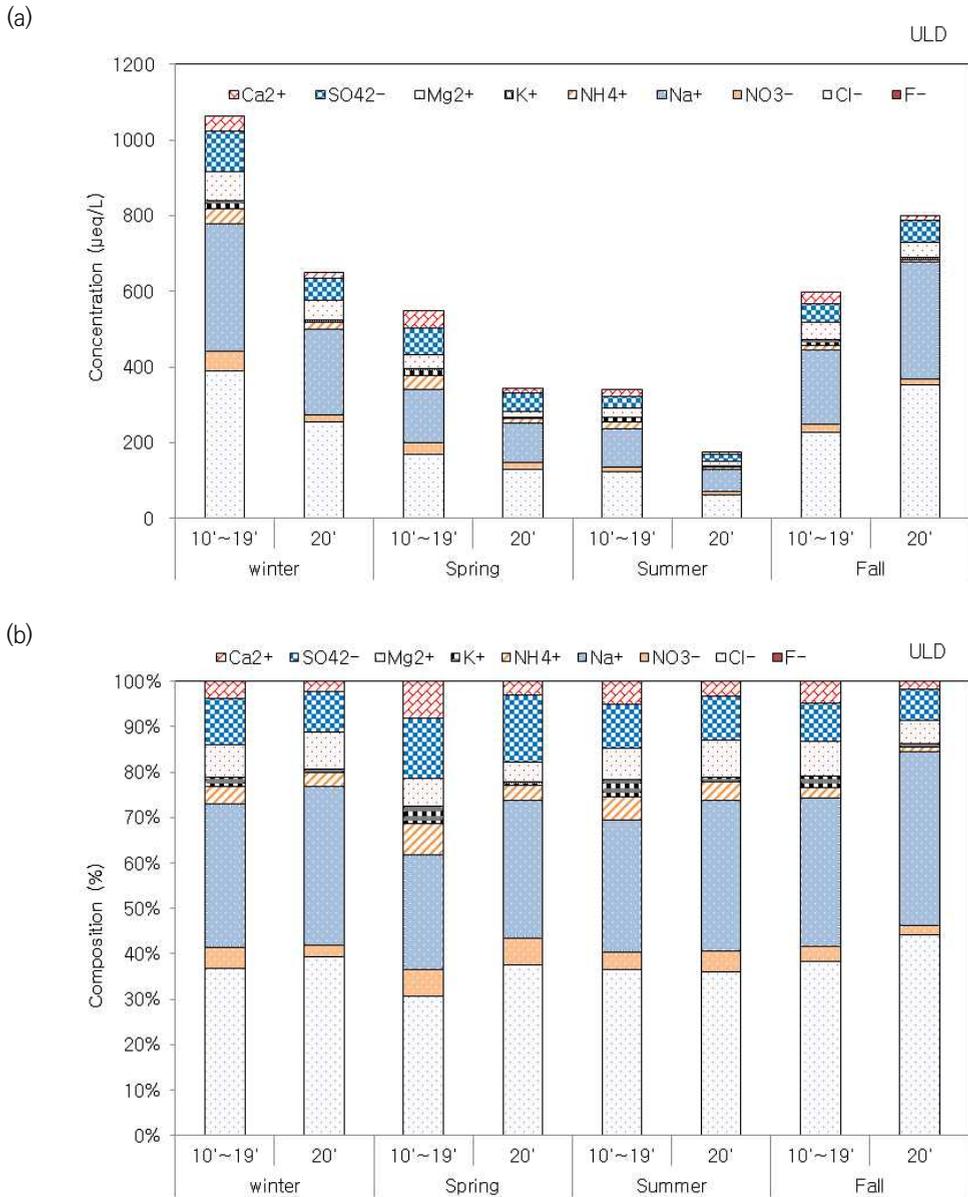


그림 10.5.7 최근 10년(2010~2019년)과 2020년 울릉도 감시소 강수성분 계절별 부피기준평균
(a) 농도, (b) 조성비.



10.6 총대기침적량

안면도에서 채취한 최근 10년(2010~2019년)과 2020년 건성 및 습성침적량을 보면(그림 10.6.1), 2013년 이후 대체로 감소하다 2019년도에 다시 소폭 증가하는 경향을 보였다. 2020년도의 전체 침적량은 8875.0 mg/m^2 이며, 2019년보다 약 0.9배 정도 적은 침적량을 보였고, 이는 건성침적량은 크게 변화가 없으나 습성침적량에서의 차이 때문으로 판단된다. 또한, 전체 기간 자료인 2003년부터 2020년까지 건성침적량이 차지하는 비율은 약 19.3%~52.9%를 차지하였으며, 2007년이 건성 침적량이 가장 적은 비율을 보였고, 2003년이 가장 높은 비율을 차지하였다. 또한, 습성침적량은 대부분 50% 이상의 비율을 차지하였다. 건성 및 습성의 월별 침적량은 그림 10.6.2와 같다. 여기서 건성 및 습성의 월별 평균농도는 2003년부터 2020년까지 평균한 값이다. 습성침적은 7, 8월에 가장 높은 농도를 보였으나, 1월에 가장 적은 값을 나타내었다. 또한, 12월에 건성침적과 습성침적이 비슷한 비율을 보였다.

건성 및 습성의 계절별 침적량은 그림 10.6.3~10.6.6이다. 여기서 건성 및 습성의 계절별 평균 농도는 2010년부터 2020년까지 평균한 값이며, 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해년도 1,2월의 데이터를 평균하였고, 당해년도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

최근 10년간 자료와 2020년 침적량 자료는 NO_3^- 와 SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분별 농도는 대체적으로 건성침적량보다 습성침적량이 더 높은 농도를 보였다. 그러나 Ca^{2+} 인 경우 2020년 자료는 건성 침적보다 습성침적이 더 높았으나 최근 10년간 자료는 여름철을 제외하고는 습성보다는 건성 침적량이 많은 결과를 보였고, 나머지 계절에는 비슷하거나 습성침적량이 많게 나타났다.

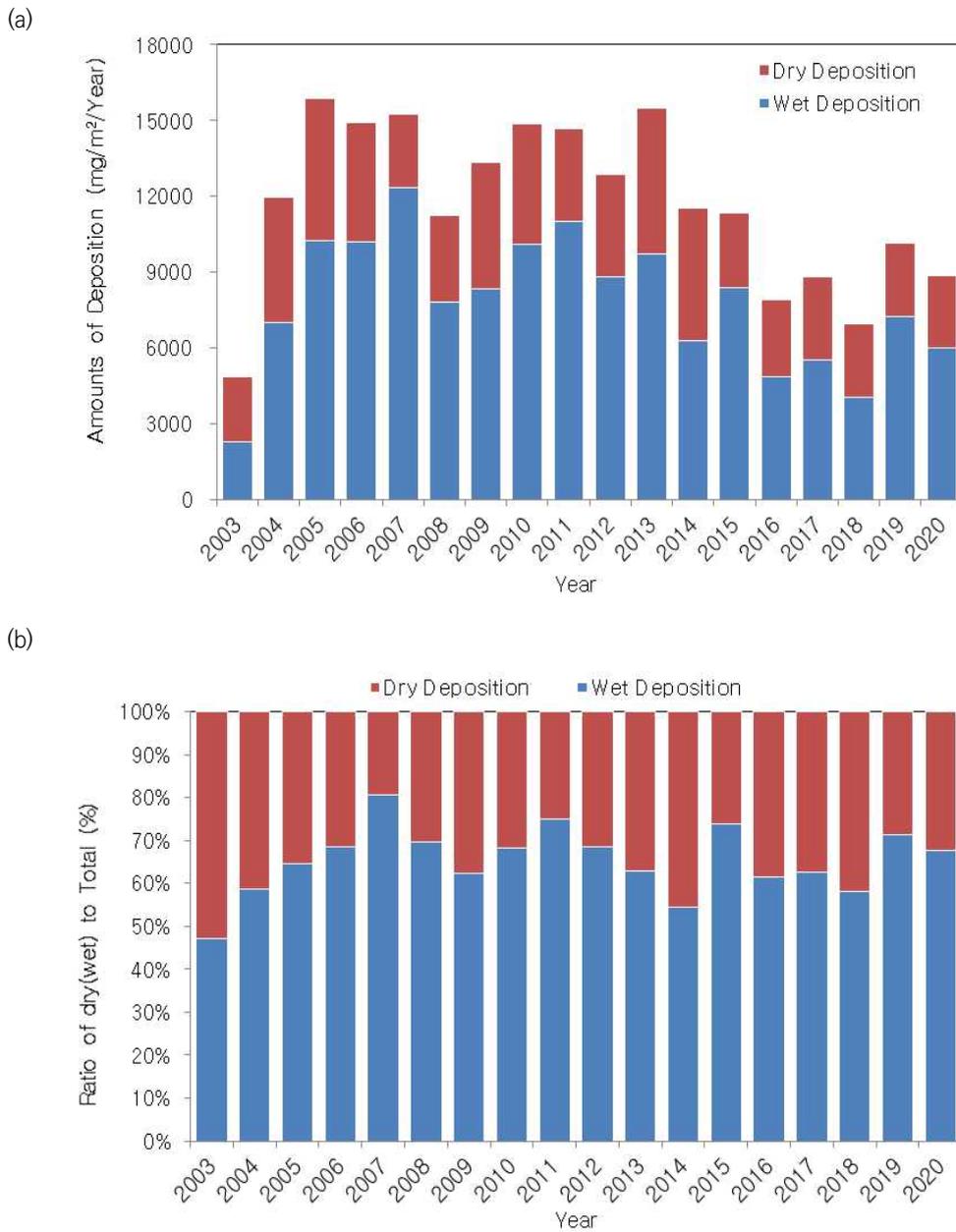


그림 10.6.1 안면도 감시소의 연도별 건성 및 습성 침적량의 (a) 농도와 (b) 비율.

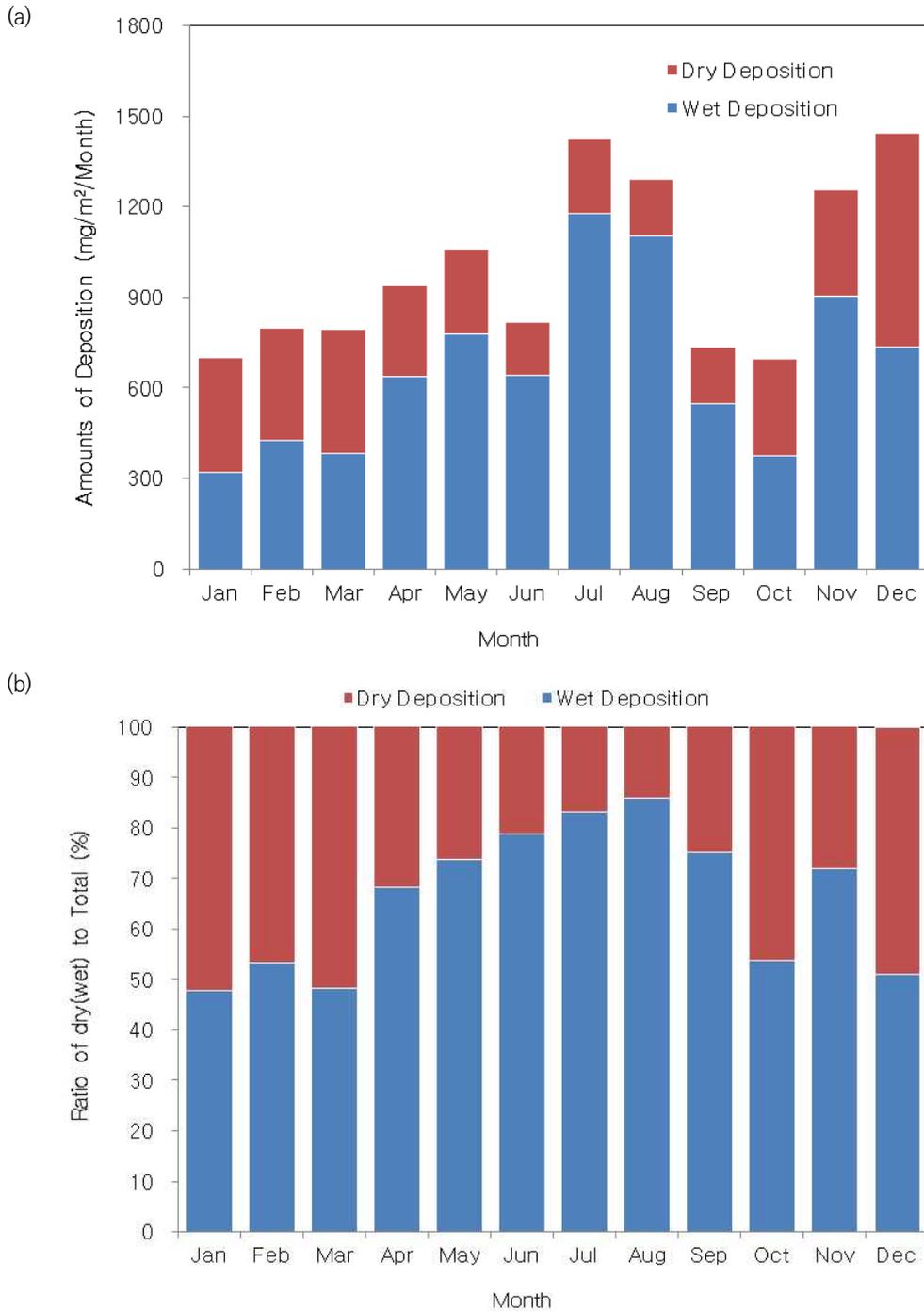


그림 10.6.2 2003~2020년 안면도 감시소의 월별 건성 및 습성 침적량의 (a) 농도와 (b) 비율.

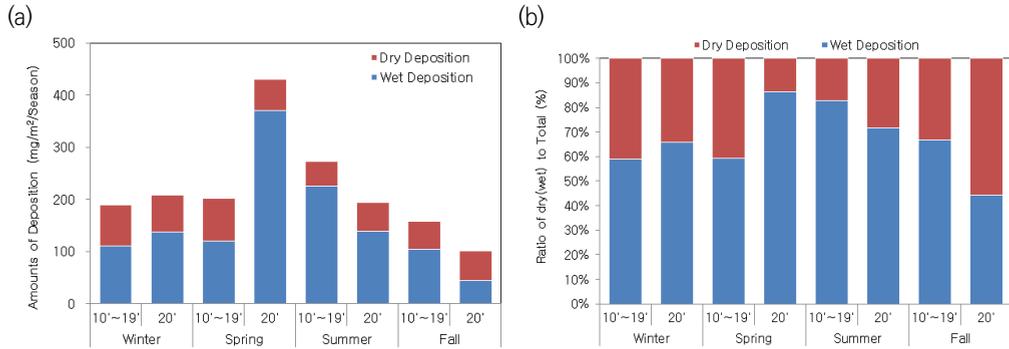


표 10.6.3 계절별 NO₃⁻의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

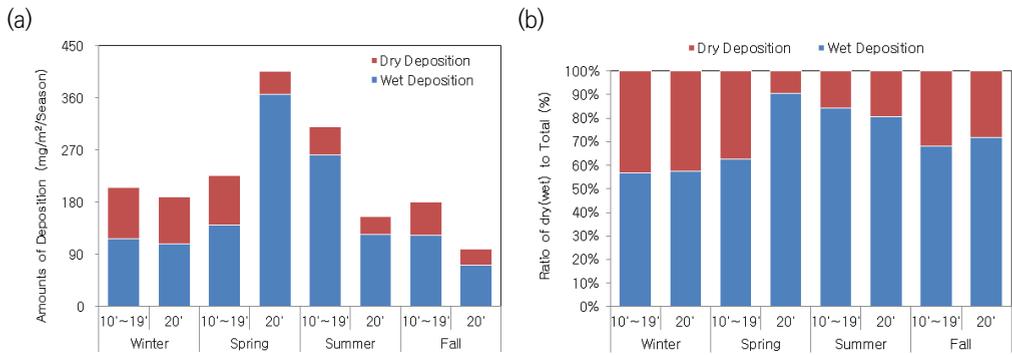


그림 10.6.4 계절별 SO₄²⁻의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

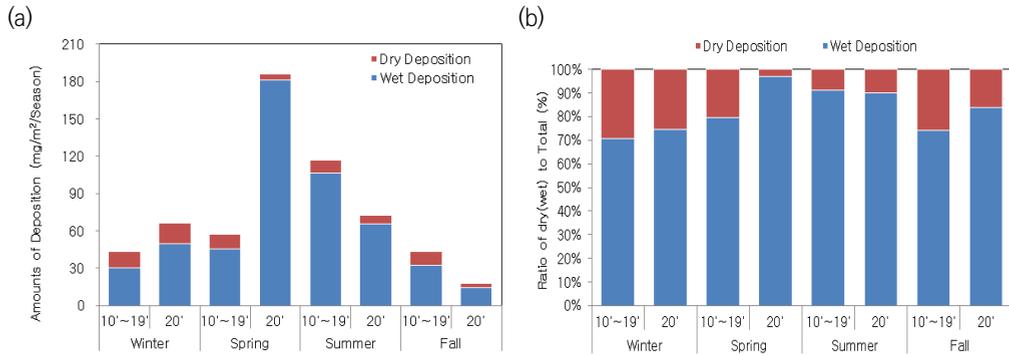


그림 10.6.5 계절별 NH₄⁺의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

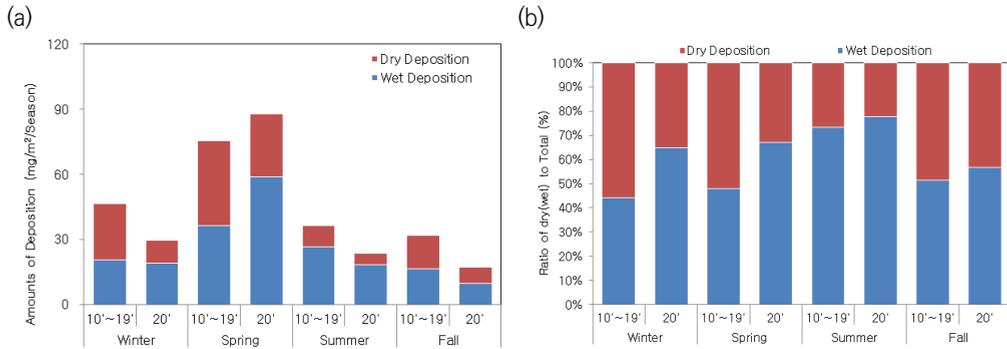


그림 10.6.6 계절별 Ca²⁺의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

10.7 2020년 강수성분 발생원 분석

안면도, 고산, 울릉도 세 감시소 강수성분의 발생기원을 살펴보기 위하여 수용성 성분을 이용하여 주성분 분석(Principal component analysis; PCA)을 하였다. 안면도, 고산, 울릉도 세 감시소 모두 전체 기간(안면도 & 울릉도: 1997년~2019년, 고산: 1998년~2019년)과 2019년, 2020년의 자료를 사용하였고, 울진지역은 1998년부터 2016년까지의 자료를 가지고 발생원 분석을 하였다 (그림 10.7.1~10.7.4). 주성분 분석은 통계프로그램(SPSS 18.0)을 이용하여 최적인자의 수를 고유값 1 이상으로 정의하였고, 베리맥스(Varimax) 회전법으로 산출하였다.

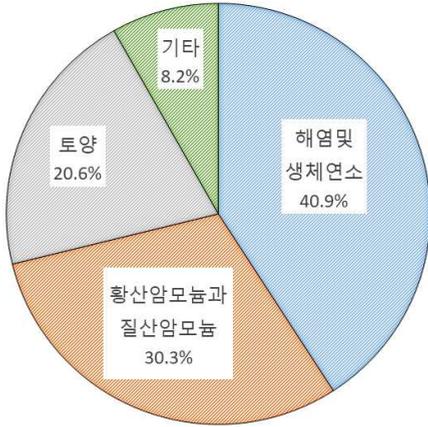
안면도의 전체 기간과 2019년, 2020년 강수 자료의 발생원을 확인해 본 결과는 그림 10.7.1에 나타내었다. 전체 기간에서 가장 영향을 많이 받는 발생원으로는 해염 및 생체연소가 약 40.9%로, 2019년엔 해염/생체 및 자동차의 영향이 47.2%, 2020년에는 황산암모늄과 질산암모늄 및 토양이 49.5%로 다른 기간과는 다르게 토양이 혼재된 이차반응물에 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 그다음으로 전체 기간과 2019년에는 황산암모늄과 질산암모늄, 토양 순이나 2020년에는 해염 및 생체연소에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 2020년에는 안면도 감시소의 강수는 대부분의 발생원이 뚜렷하게 나타나지 않고, 다양한 오염원이 혼재되어 나타난 것으로 보인다.

고산에서 전체 기간과 2019년, 2020년 강수 자료의 발생원을 확인해 본 결과는 그림 10.7.2에 나타내었다. 전체 기간에 가장 영향을 많이 받는 발생원으로는 해염 및 생체연소가 약 40.1%, 2019년엔 황산암모늄, 질산암모늄 및 토양의 영향이 47.3%, 2020년에는 해염 및 생체연소가 43.7%로 나타났다. 그다음으로 전체 기간과 2020년에는 황산암모늄과 질산암모늄 순이었다. 고산 강수의 전체 기간에는 토양과 자동차 연소 부분이 17.2%를 차지하였고, 2019년도에서는 황산암모늄, 질산암모늄 및 토양/ 해염 및 생체연소가 각각 44% 이상을 차지하여 발생원에 영향이 대부분 혼재된 상태였다. 그러나 2020년에는 해염 및 생체연소, 황산암모늄과 질산암모늄, 토양, 비료 순으로 특히 토양과 비료는 각각 6% 정도의 비율을 보여 전체 기간에서 분리되지 않는 고산 감시소의 또 다른 발생원인 것으로 판단된다.

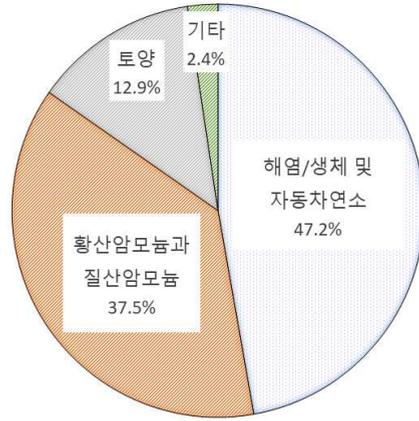
울릉도에서 전체 기간과 2019년, 2020년 강수 자료의 발생원을 확인해 본 결과는 그림 10.7.3에 나타내었다. 전체 기간에서 가장 영향을 많이 받는 발생원으로는 해염이 약 33.5%, 2019년엔 해염 및 생체연소의 영향이 44.8%, 2020년에도 해염 43.5%로 나타났다. 그다음으로 전체 기간과 2019년에는 황산암모늄과 질산암모늄 순이었으나 2020년에는 인위적 오염(자동차 및 석탄 연소/비료 등)으로 인간의 활동에 의한 발생하는 오염물질이 혼재된 상태로 약 33.7%로 나타났다. 그다음으로 황산암모늄과 질산암모늄 순이다.



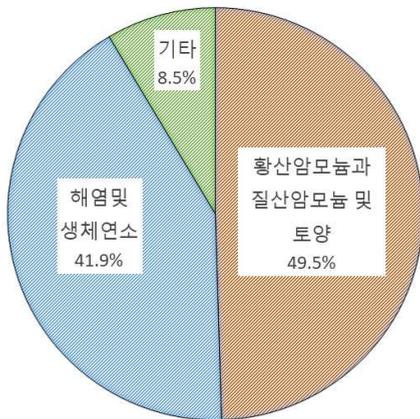
안면도, 고산, 울릉도, 울진지역의 전체 기간에 대한 발생원을 비교해 보면, 안면도, 고산에서 가장 영향을 많이 받는 발생원으로는 해염 및 생체연소에 의한 발생원이 가장 크고, 울릉도와 울진은 해염에 영향이 가장 큰 것으로 확인되었다. 그다음 영향을 주는 발생원은 안면도, 고산, 울릉도는 황산암모늄과 질산암모늄에 의한 영향이 크고, 울진은 토양 및 생체연소에 대한 영향으로 확인되었다. 안면도, 고산, 울릉도는 세 번째로 영향을 주는 이유를 토양의 영향으로 봤으며 울진만 황산암모늄과 질산암모늄에 의한 영향으로 조사되었다. 그러나 울릉도 전체 기간에서는 네 번째로 생체연소에 영향으로 보이며 다른 지역과는 다르게 좀 더 세분된 발생원 영향을 판단할 수 있었다. 최재천 등 1997년에 나온 1991~1995년까지 소백산 지역의 발생원과 비교했을 때 첫 번째 발생원은 해염 및 토양 > 이차오염물질로 해석하였고, 본연구에서 전체 기간 연구결과에서와 비슷하게 해염 / 해염 및 생체연소에 대한 영향이 가장 큰 것으로 보아 장기간에 지역 별로 강수의 발생원은 해염의 영향이 우세한 것으로 판단된다. 특히 해염과 토양 또는 생체연소가 혼재된 상태로 지역에 영향을 크게 주는 것으로 확인되어 추후 강수시 풍향과 풍속, 또한 공기 이동경로를 파악하여 발생원 분석을 할 필요성이 있다.



(a) 안면도 전체 기간(1997~2019년)

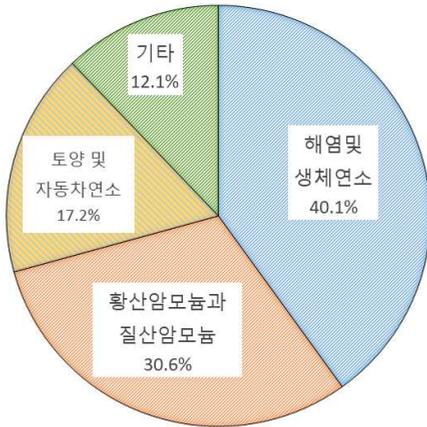


(b) 안면도 2019년

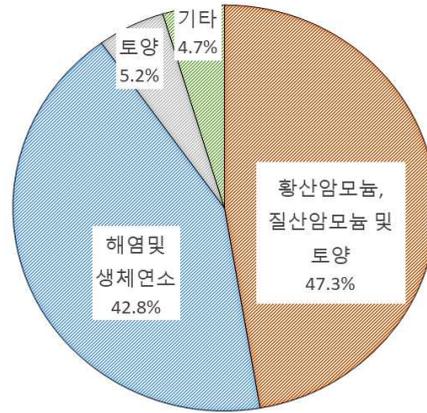


(c) 안면도 2020년

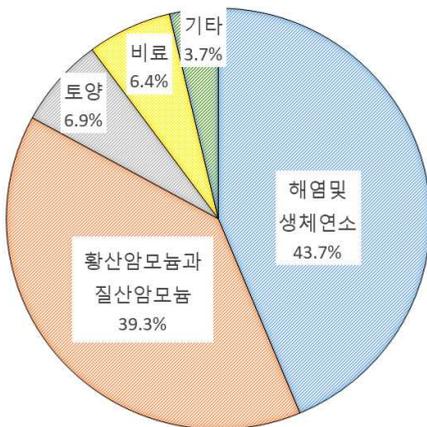
그림 10.7.1 안면도 감시소 (a) 전체 기간(1997~2019년), (b) 2019년, (c) 2020년의 강수성분의 발생원 분석 결과.



(a) 고산 전체 기간(1998~2019년)

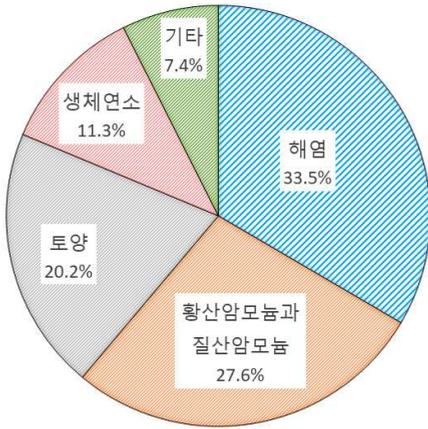


(b) 고산 2019년

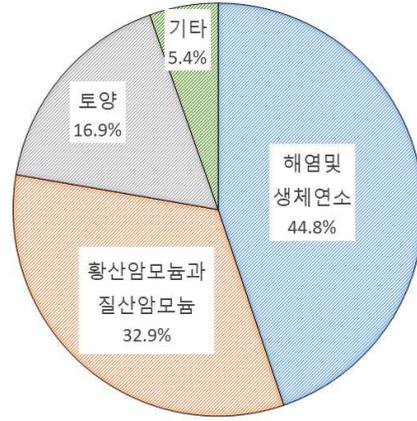


(c) 고산 2020년

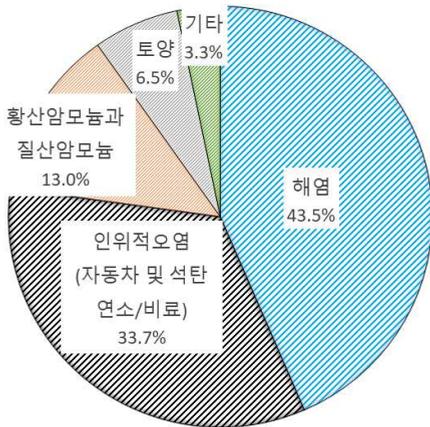
그림 10.7.2 고산 감시소 (a) 전체 기간(1997~2019년) (b) 2019년, (c) 2020년의 강수성분의 발생원 분석 결과.



(a) 울릉도 전체 기간(1997~2019년)

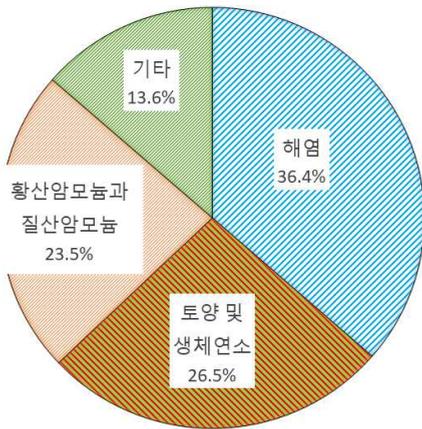


(b) 울릉도 2019년



(c) 울릉도 2020년

그림 10.7.3 울릉도 감시소 ((a) 전체 기간(1997~2019년) (b) 2019년, (c) 2020년 지역의 강수성분의 발생원 분석 결과.



울진 전체 기간(1998~2016년)

그림 10.7.4 울진(ULJ)지역 전체 기간(1998~2016)의 강수성분의 발생원 분석 결과.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

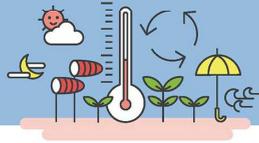
제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제11장 기타

11.1 수증기 농도 연직분포 및 특성분석	298
11.2 라돈 농도 및 특성 분석	302



제11장 기타

11.1 수증기 농도 연직분포 및 특성분석(숙명여자대학교 위탁관측소)

수증기는 대기를 구성하는 기체 중에서 기상현상과 가장 밀접한 관련성을 갖고 있으며, 시간에 따라 또는 공간에 따라 가장 변동이 심한 기체로 알려져 있다. 그러나 대류권에서 상승한 수증기는 낮은 기온으로 인해 극히 일부만이 성층권으로 유입되며, 중층대기 영역에서 안정적인 존재량을 갖는 추적 표지로서 역할을 한다. 또한 온실가스로서의 역할과 더불어 대기 중 수증기의 농도는 인위적 배출에 의한 것보다 자연적 환경에 의해 결정되기 때문에 기후변화의 원인과 결과를 동시에 나타낼 수 있는 표지로 사용된다.

수증기는 중층대기에서 안정적으로 존재하기 때문에 대기 운동을 추적하는 수단으로 사용할 수 있어 대기의 순환 속도와 이동성을 평가할 수 있다. 또한 중간권 영역에서는 메탄의 산화반응으로 수증기가 생성되는데, 대기로 유입되는 메탄의 양이 점차 증가하고 있다고 알려져 있으나, 그 관측자료는 매우 한정적이다. 따라서 수증기양 추적으로 통해 메탄의 양을 간접적으로 추정할 수 있다. 또한 수증기의 변동은 많은 대기화학반응에도 영향을 주기 때문에 수증기 변동으로 인해 대기의 특성과 기후가 어떻게 변화할지 감시할 필요가 있다.

기후변화로 인해 지구의 기온이 상승하고 있는 현재 상황은 지표면에서 유입되는 수증기양과 대기 중 존재할 수 있는 수증기양이 증가하고 있다는 의미로도 볼 수 있다. 과거 파괴된 오존층을 회복시키기 위해 프레온가스를 규제한 것과 달리 수증기의 농도 변동은 자연 상태로 인한 영향이 크기 때문에 그 변동성을 제어하기 어렵다. 이에 수증기 농도 변동을 장기적으로 감시하여 기후 변화에 대한 원인과 결과에 대한 기초 자료를 확보하는 것이 중요하다.

숙명여자대학교 지구환경연구소에서는 성층권에서 중간권 영역에 분포하는 수증기의 연직 분포를 마이크로파 수신기인 SWARA(Seoul Water vapor RAdiometer)를 이용하여 관측하고 있다. 수증기는 22 GHz의 전파를 회전운동을 통해 자체적으로 발산하는데, 지상으로 도달한 전파를 수신기를 통해 측정하여 관측 스펙트럼으로부터 모양 분석을 통해 연직분포를 산출한다. 수증기 관측용 마이크로파 수신기는 숙명여대 과학관 옥상에 2006년 10월 설치되었으며, 비 올 때를 제외하고 24시간 관측을 수행하고 있다. 비 유입으로 인한 장비 손상을 막기 위해 장비 외부에 자동 개폐가 가능한 커버를 설치하였다.

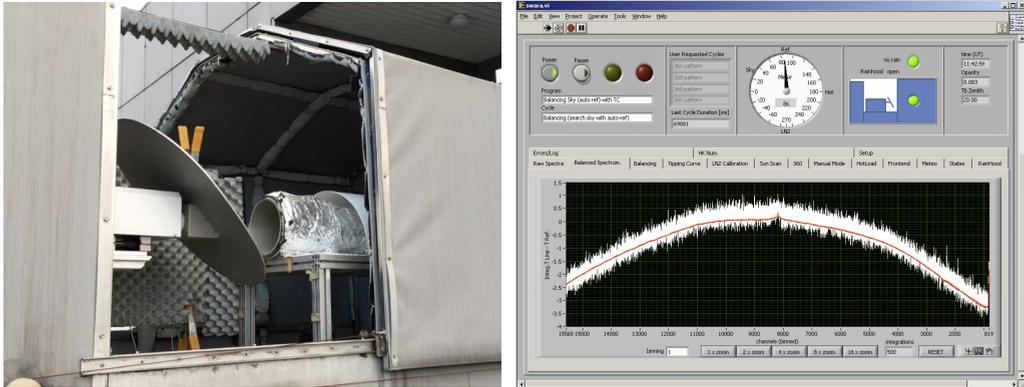


그림 11.1.1 (좌)숙명여대 지구환경연구소의 22 GHz 중층대기 수증기 연직분포 관측용 마이크로파 수신기 (SWARA). (우)SWARA 구동 소프트웨어.

중층대기에서 지상으로 전달된 마이크로파 대역의 대기 전파신호는 대류권의 온습도로 인해 그 투과율이 변동한다. 이 투과율은 광학깊이(Optacity)의 향으로 표현하며, 높은 투과율을 보일 수록 낮은 광학깊이를 갖고 있다. 따라서 대류권의 온습도가 높은 여름철에 광학깊이의 크기가 높게 나타나며, 겨울철은 춥고 건조한 기상 특성에 따라 낮은 광학깊이 크기를 보인다. 다음 그림에서는 2006년부터 2020년까지 수증기 관측자료로부터 유도한 대류권 광학깊이의 변동을 보여준다.

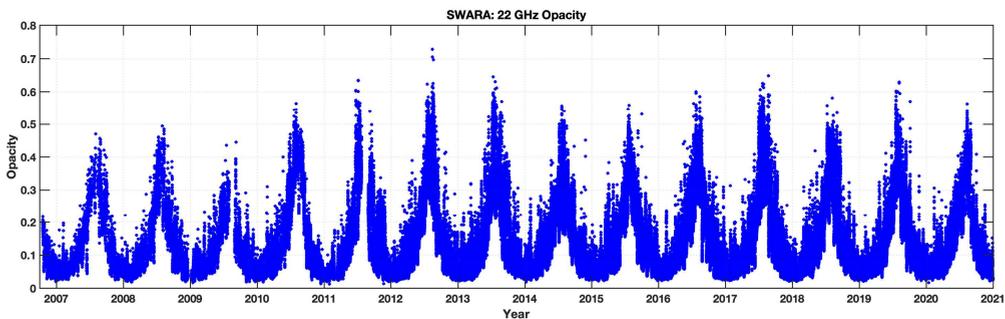


그림 11.1.2 2006~2020년 SWARA로 관측한 22 GHz 대류권 광학깊이(15~20분 마다 관측).

성층권 광학 깊이의 변동은 우리나라의 계절별 온습도의 영향이 전파 투과율에 영향을 미치는지 보여주고 있다. 22 GHz에서의 대류권 광학깊이는 겨울철 0.02에서 여름철 0.6이상까지 변동하고 있어 겨울철 98%, 여름철 55%의 투과율로 거의 1.8배의 투과율 차이를 보이고 있다. 중층대기에서 지상으로 전달되는 수증기 신호는 그 세기가 매우 약하기 때문에 여름철에는 낮은 투과율을 보정하기 위해 자료 보정을 위해 수 시간의 관측자료를 필요로 한다.

아래 그림은 수증기의 2006년부터 2020년까지의 중층대기 수증기 연직분포 변동을 보여주고 있다. 상대적 존재 비율을 의미하는 부피혼합비로 나타내었으며, 주로 30 km 이상에서 5~6 ppmv 이상의 농도로 분포한다. 특히 60 km 이상에서는 계절적 변동이 매우 뚜렷이 나타나며, 여름철에는 80 km 이상까지 수증기의 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

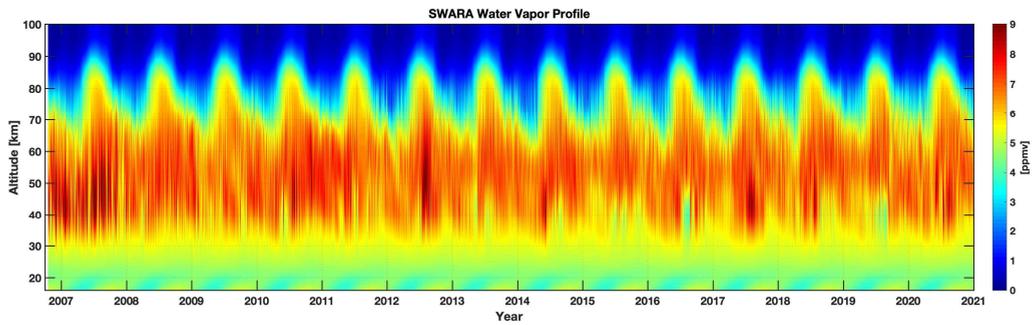


그림 11.1.3 2006~2020년 SWARA로 관측한 한반도 상공의 중층대기 수증기 연직분포(ppmv) 변동.

중층대기 수증기의 농도 변동을 30~50 km, 50~70 km, 70~75 km의 고도 구간별로 구분하여 나타내면 다음 그림과 같다. 30 km 이상에서 나타나는 수증기의 부피혼합비는 5~8 ppmv의 변동 범위를 갖고 있으며, 70 km 이상에서는 변동 폭이 계절에 따라 3배 이상의 차이를 보여주고 있다. 또한 30~50 km 영역에서는 계절적 변동성이 거의 나타나지 않으나, 그 외의 고도 범위에서는 뚜렷하게 변동성을 보이고 있다. 또한 연중 최고 농도를 보이는 시기가 고도별로 다르게 나타나고 있어, 대기 순환의 속도를 가늠할 수 있다.

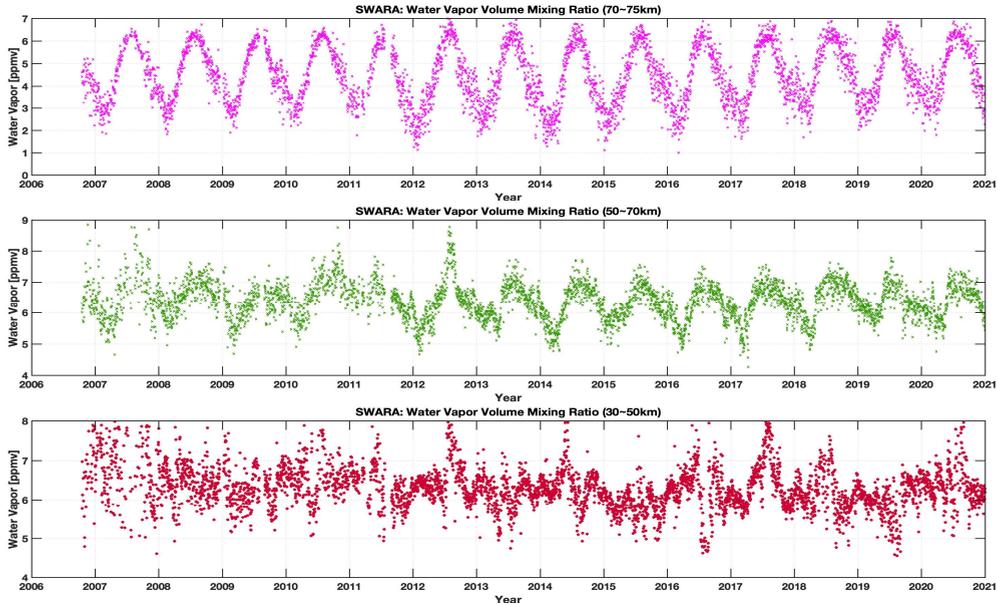


그림 11.1.4 2006~2020년 수증기의 고도별 연직분포(ppmv) 변동. 위에서부터 16~3 km, 30~50 km, 50~70 km, 70~75 km에서의 평균 수증기 농도.

연중 측정된 수증기의 부피혼합비를 연도별로 비교하기 위해 중간값을 비교하였다. 아래 그림을 보면 2012년 이후 60 km 고도 범위에서의 수증기 부피혼합비가 증가하고 있으며, 이러한 증가 추세에 대해 위성 관측자료를 통한 연구결과도 발표되고 있다. 중간권의 수증기는 복사강제력 및 오존 화학반응, 메탄 화학반응과도 연관되어 있어 지속적인 감시와 변동성 분석 연구를 필요로 한다.

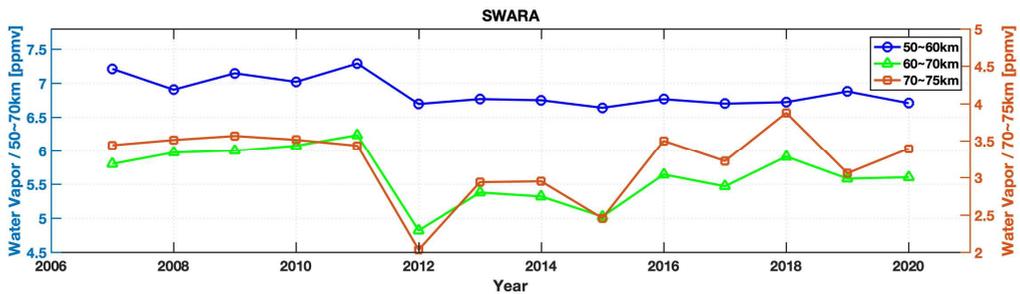


그림 11.1.5 2006~2020년 고도 범위별 수증기 농도의 연중 중간값 변동.

11.2 라돈 농도 및 특성 분석(제주대학교 위탁관측소)

우리 주변의 방사선은 크게 인공방사선과 자연방사선으로 구분되며 방사성원소의 종류는 1,500종 이상에 달한다. 인공방사선은 인위적 요인에 의해 핵무기, 원자력시설, 의료시설, 실험실 그리고 일반산업체 등에서 발생한다. 반면에 자연방사선은 지구 생성 초기부터 우주공간, 지구 대기, 지각 등에 존재해 온 방사선으로 자연적으로 발생하며 지표면 생물체에도 미량으로 존재한다. 이러한 자연방사성원소 중에서도 라돈(^{222}Rn)은 ^{85}Kr , ^{210}Pb , ^7Be 등과 함께 관심 대상이며, WMO/GAW에서는 이들 성분들을 주요 방사성 물질로 관측요소에 포함시켜 관리하도록 권장하고 있다(WMO/GAW, 2001).

라돈과 자핵종은 인체 피폭의 50% 이상을 차지하는 대표적인 자연방사성 물질이다. 라돈에 의한 폐암 발생은 흡연 다음으로 위험한 것으로 평가되고 있고, WHO에서는 폐암환자 중 3%~14%가 라돈에 기인한 것으로 추정하고 있다. 따라서 대기 중의 자연방사성 물질을 관리하기 위해서는 실내는 물론 실외에서 라돈 농도를 지속적으로 모니터링할 필요가 있다. 라돈은 반응성이 낮아서 화학적으로는 안정하지만 방사선을 방출하면서 붕괴되기 때문에 물리적으로는 불안정한 특성을 보인다. 라돈의 붕괴 과정에서 생성되는 ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi 그리고 ^{214}Po 과 같은 라돈 자핵종은 생성 시부터 정전기적으로 전하를 띠기 때문에 공기 중에 존재하는 먼지, 담배 연기, 수증기에 부착하여 에어로졸을 형성하거나 벽 또는 물체의 표면에 흡착된다. 또 호흡을 통해 흡입되면 폐 내부에서 붕괴하면서 방사선을 주변 조직에 조사하여 장기적으로 암을 유발하는 등의 생물학적 손상을 야기한다.

라돈의 주요 동위원소는 라돈(^{222}Rn), 토론(^{220}Rn), 악티논(^{219}Rn) 등이 있으며 이 중 라돈(^{222}Rn)에 의한 피해가 가장 크게 나타나고 있다. 라돈은 우라늄(^{238}U)의 붕괴 과정에서 생겨난 라듐(^{226}Ra)의 α -붕괴로 생성되며 상대적으로 긴 반감기(3.82일)를 갖는다(Whittlestone and Zahorowski, 1998). 그리고 다른 동위원소들에 비해 가장 널리 분포하는 대표적인 자연방사성 물질로 4번의 α -붕괴와 4번의 β -붕괴를 거쳐 최종적으로 ^{206}Pb 으로 안정화된다(Moon et al., 2009; WMO/GAW, 2004). 라돈에 의한 피폭은 자체보다는 주로 이들 라돈 자핵종인 ^{218}Po , ^{214}Po 의 α -붕괴에 의해 발생하며, 방사선에 장기간 노출 시 폐 조직이 손상되어 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다.

대기 중의 라돈농도 수준을 파악하기 위해서는 청정지역에서 라돈의 배경농도를 관측할 필요가 있다. 특히 아시아대륙의 편서풍 풍하측에 위치한 한반도의 경우 대륙에서 발생하여 기류를 타고 이동하는 여러 대기오염물질의 영향을 많이 받고 있다. 이러한 장거리 수송



오염물질의 영향을 모니터링하기 위해서는 대기 라돈의 농도변화를 관측하는 것이 중요하다. 라돈(^{222}Rn)은 반감기는 몇몇 주요 대기오염물질(NO_x , SO_2 , CO , O_3 등)과 비슷한 수명을 나타내며, 습도, 온도, 일사량에 무관하게 안정한 특성을 보인다. 그리고 화학적으로 불활성이고 물에 용해되지 않는 안정성 때문에 가스상 오염물질이나 대기 에어로졸의 장거리 수송 특성을 추적하기 위한 지표물질로 이용되고 있다.

호주핵과학기술기구(Australian Nuclear Science and Technology Organisation; ANSTO)에서는 주요 WMO/GAW 관측소를 중심으로 세계 30여 지점에 라돈검출기를 설치하여 오래전부터 대기 라돈농도 분포를 지속적으로 모니터링하고 있다. 그리고 측정 결과를 라돈 감시는 물론 주요 온실가스의 플럭스 관측을 위한 추적자(tracer)로 활용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 제주도 고산에서는 'ACE(Aerosol Characterization Experiment)-Asia' 미션을 위해 2001년부터 라돈 관측을 시작하였다. ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 고감도 라돈검출기를 설치하여 2001년 초부터 대기 라돈농도를 실시간 모니터링해오고 있으며, 2020년 12월 말 현재 총 20년간의 측정자료를 확보 중이다.

11.2.1 라돈 모니터링

제주도 고산(33.17°N, 126.10°E) 현장에 고감도 라돈검출기를 설치하여 대기 중의 라돈 농도를 2020년 1월부터 12월까지 30분 간격으로 실시간 측정하였다. 라돈검출기는 배경농도 측정을 위한 목적으로 호주 ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 High Sensitivity Radon Detector(모델 D1500) 시스템을 이용하였다(그림 10.2.1).

이 검출기는 필터를 거친 후 자연확산 또는 동력펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈과 셀 내부에서 생성된 라돈자손으로부터 방출된 알파입자를 측정하는 방식이다. 알파입자는 $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 와 반응하여 섬광을 발생하며 이를 광전증배관으로 검출, 계수할 수 있도록 설계되어 있다. 라돈 모니터링을 위해 사용한 라돈검출기의 감도는 $0.28\sim 0.29 \text{ counts}\cdot\text{sec}/\text{Bqm}^3$ 이며, 검출한계(low limit of detection)는 $25 \text{ mBq}/\text{m}^3$ 이다.

대기 농도 측정을 위한 공기 유입관은 50 mm HDPE 파이프를 사용하여 지상 10 m 높이로 설치하였다. 공기의 유속은 대략 $\sim 60 \text{ L}/\text{min}$ 이 되도록 유지하였다. 실시간 측정 라돈 농도 데이터는 Radon Detector System에 내장된 Campbell Scientific사의 모델 CR800 data logger를 사용하여 30분 간격으로 저장하였다. 그리고 data logger에 저장한 데이터를 컴퓨터로 전송하여 연속적으로 저장하였다.

라돈 관측 데이터를 보정하기 위한 검출기의 기기 검정은 월 1회 주기로 매회 5시간 동안 실시

하였다. 검정용 라돈(^{222}Rn) 표준물질은 $18.5 \pm 4\%$ kBq의 ^{226}Ra source(Pylon Electronic Inc., 모델 RN-2000A, Canada)를 이용하였다. 또한 검출기의 바탕(background) 값은 대략 3개월 주기로 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기의 지시수치를 24시간 동안 측정하였다. 이 때 바탕값은 검출기의 2차 필터에 포집된 ^{210}Pb (반감기 22.3년)의 양에 따라 시간이 경과할수록 서서히 상승하는 경향을 보였다. 그러나 2020년의 경우, 2019년 12월에 detector head를 신제품으로 교체한 상태라서 그 값은 비교적 낮은 수치를 나타내었다.



그림 11.2.1 제주도 고산 라돈검출기(ANSTO, Model D1500).

11.2.2 라돈 배경농도 모니터링 결과

제주도 고산에 고감도 라돈검출기를 설치하여 라돈을 모니터링한 2020년의 라돈 시계열 변화를 그림 11.2.2에 나타내었다. 그림에서 2020년 3월 19일~3월 31일(13일), 8월 23일~10월 4일(43일)의 데이터는 Data Logger 고장으로 결측된 결과이다. 2020년 고산지역의 라돈농도는 시간 평균 2625 ± 1383 mBq/m³를 나타내었고, 이를 일평균 농도로 환산한 농도는 2622 ± 1144 mBq/m³이었다. 또한 2001년부터 2020년까지 총 20년간 측정한 고산지역의 라돈 농도는 그림 11.2.3의 결과와 같이 평균농도 2647 ± 1101 mBq/m³로 2020년의 평균과 비슷한 수준을 나타내고 있다.

2020년에 측정한 계절별 라돈농도는 겨울(3311 mBq/m³) > 가을(3235 mBq/m³) > 봄(2307 mBq/m³) > 여름(1732 mBq/m³) 순으로 높았다. 일반적으로 라돈농도는 북서계열 풍향에 의해 기류가 대륙에서 유입되는 겨울, 가을, 봄에 라돈 농도가 높고, 반대로 기류가 남동풍에 의해 해양으로부터 유입되는 여름철에 농도가 가장 낮은 경향을 보인다. 2020년 측정 결과 역시 이러한



일반적인 경향과 일치하는 결과를 보였다. 또한 2001~2020년의 장기 측정 라돈 농도는 계절별로 겨울(3175 mBq/m^3) > 가을(3104 mBq/m^3) > 봄(2423 mBq/m^3) > 여름(1969 mBq/m^3)로 장기 측정 결과와 2020년의 결과는 서로 비슷한 계절변화 특징을 보였다.

2020년의 월별 라돈 농도는 2월 > 10월 > 1월 > 3월 > 11월 > 12월 > 6월 > 5월 > 7월 > 4월 > 8월 순으로 농도가 가장 높은 2월(3536 mBq/m^3)과 낮은 8월(674 mBq/m^3)에 약 5배 정도의 편차를 보이는 것으로 조사되었다. 또한, 일간 농도변화를 조사해 본 결과, 대체적으로 하루 중에는 야간이 낮 시간에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그리고 오전 6시 전후에 2983 mBq/m^3 로 가장 높고, 오후 3시경에 2252 mBq/m^3 로 낮은 농도를 보였다. 또한, 2001~2020년의 장기측정 결과에서는 11월 > 10월 > 1월 > 2월 > 12월 > 3월 > 9월 > 4월 > 6월 > 5월 > 8월 > 7월 순으로 농도가 가장 높은 11월(3275 mBq/m^3)과 낮은 7월(1651 mBq/m^3)에 약 2.0배 정도의 편차를 보였다. 그리고 오전 7시 전후에 3008 mBq/m^3 로 가장 높고, 오후 3시경에 2232 mBq/m^3 로 2020년과 비슷한 특성을 나타내고 있다.

이와 같이 국내 배경지역인 고산지역에서 관측한 라돈 농도를 외국의 타 배경지역과 비교해 본 결과, 홍콩의 Hok Tsui와 이탈리아의 L'Aquila지역 보다는 훨씬 낮으나 하와이 Mauna Loa 보다는 대략 24배 정도 더 높고, 일본의 Sado Island와는 서로 비슷한 수준을 보이고 있다 (Chambers et al., 2013, 2009; Zahorowski et al., 2005, Pitari et al., 2014).

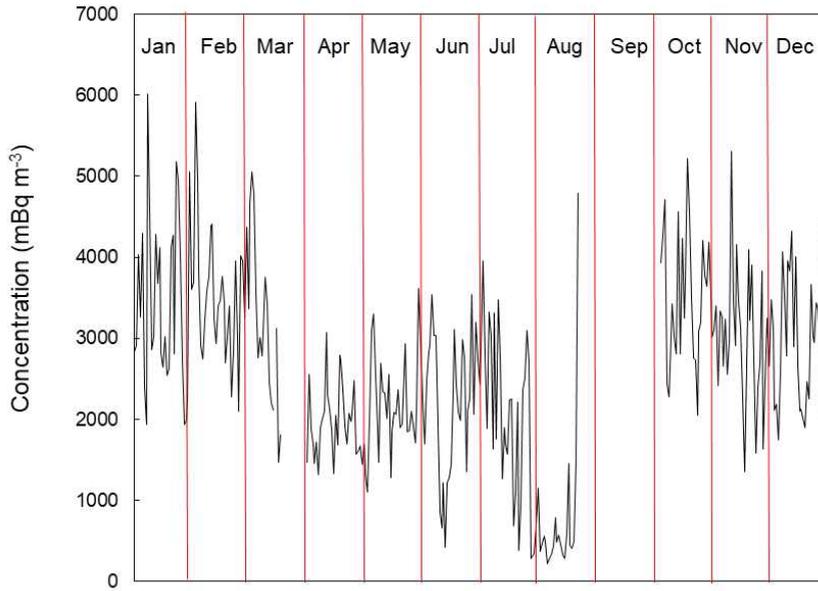


그림 11.2.2 2020년 고산 라돈농도 시계열 변화.

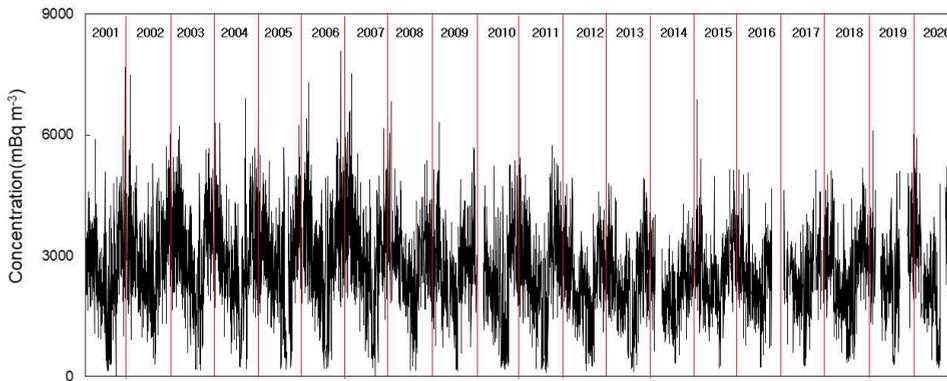


그림 11.2.3 2001~2020년 고산 라돈농도 시계열 변화.

또한 고산의 2020년 라돈농도를 계절별로 구분하여 그림 11.2.4에 비교하였다. 그림에서 막대 그래프는 시간별 라돈농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 중앙값(median)과 90 분위수(90th percentile), 10 분위수(10th percentile) 농도를 나타낸 것이다. 그림의 결과에서 2020년 계절별 평균농도는 봄에 2307 mBq/m³, 여름 1732 mBq/m³, 가을 3235 mBq/m³, 겨울 3311 mBq/m³로 4계절 중에서는 겨울철에 가장 높고, 다음으로 가을, 봄, 여름 순으로 높은 경향을 보였다. 또한 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수를 각 계절별로 분류하여 비교해



본 결과, 90 분위수와 10 분위수에서 모두 겨울철 높은 농도 값으로 평균농도와 동일한 경향을 보였다.

이러한 계절별 라돈 농도결과들은 2001~2020년의 장기 측정결과에서도 겨울철이 가장 높고, 다음으로 가을, 봄, 여름 순으로 높아 2020년과 일치하는 경향을 보이고 있다. 또한 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수를 각 계절별로 분류하여 비교해 본 결과, 90 분위수와 10 분위수에서 모두 겨울철에 높아 평균농도와 동일한 추세를 보였다(그림 11.2.5).

이와 같이 계절별 비교에서 겨울, 가을, 봄철에 라돈농도가 높은 것은 이 시기에 북서계열 풍향이 주류를 이루고 있고 이때 대륙으로부터 대기가 유입되었기 때문으로 보인다. 반면에 여름에 훨씬 낮은 농도를 나타내는 것은 이 시기에 주로 남동 계절풍의 영향을 받아 해양으로부터 공기가 유입되었기 때문인 것으로 추정된다.

또 대기 혼합고의 높이(mixing depth)는 대기오염물질의 누적, 확산, 희석에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1985). 이러한 대기 혼합고를 계절별로 비교해 보면, 대체적으로 가을과 겨울에는 기온이 낮아서 혼합고 높이가 낮아지는 반면, 봄과 여름에는 대기 혼합고의 높이가 상대적으로 높은 경향을 보이고 있다. 따라서 대기 라돈농도는 계절별로 혼합고의 높이에 따라 영향을 받고 있는 것으로 보이며, 혼합고 높이에 반비례하여 겨울과 가을에는 높은 농도를 유지하고, 봄과 여름에는 상대적으로 더 낮은 농도를 유지하는 것으로 추정된다(Kim et al., 2007).

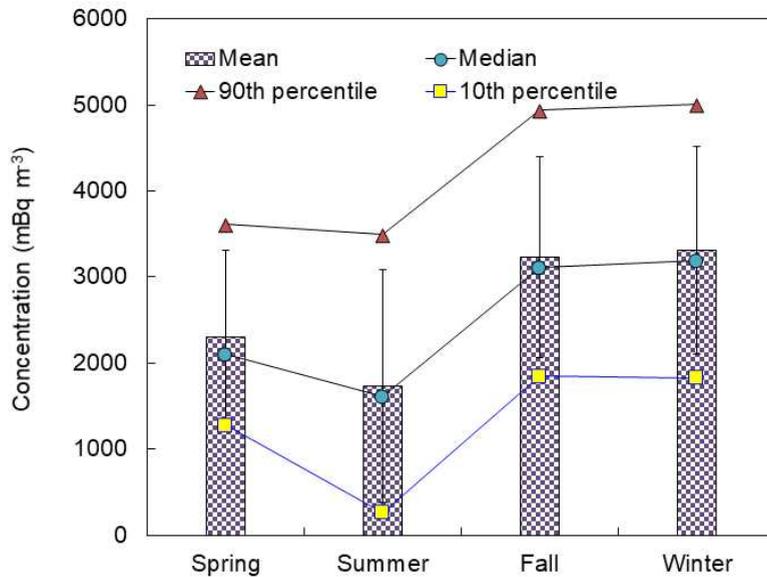


그림 11.2.4 2020년 고산 계절별 라돈농도 비교.

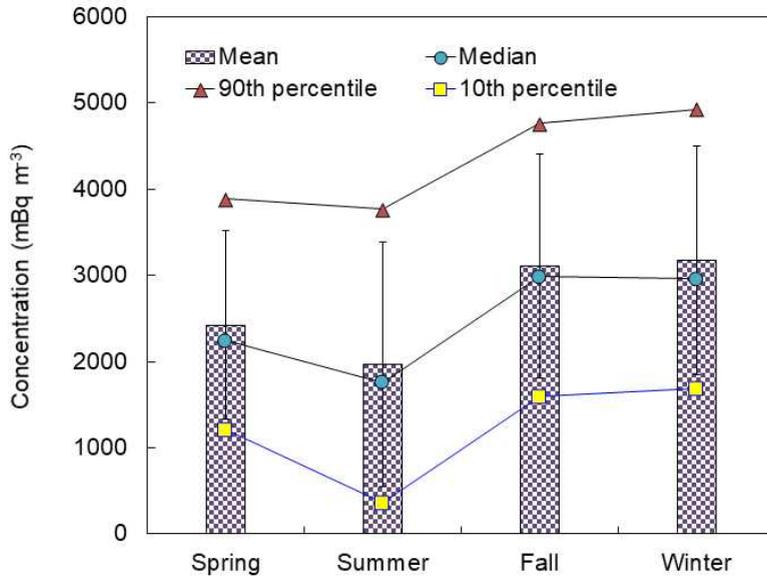


그림 11.2.5 2001~2020년 고산 계절별 라돈농도 비교.

2020년의 라돈농도를 월별로 비교하였고 그 결과를 그림 11.2.6에 나타내었다. 그림에서 막대 그래프로 나타낸 농도는 시간별 농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 각각 중앙값, 90 분위수, 10 분위수 농도를 나타낸 것이다. 이러한 월별 비교에서 라돈농도는 2월 > 10월 > 1월 > 3월 > 11월 > 12월 > 6월 > 5월 > 7월 > 4월 > 8월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 2월에 3536 mBq/m³, 가장 낮은 8월에 674 mBq/m³로 월별로는 거의 5배 정도의 다소 높은 편차를 나타내었다. 또 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수 농도를 월별로 비교해 본 결과, 결측된 3월과 10월을 제외한 나머지 월에서는 중앙값과 90 분위수, 10 분위수 농도가 월평균 농도와 비슷한 변화추세를 보였다.

2001~2020년의 장기 측정결과에서 월별 농도는 11월 > 10월 > 1월 > 2월 > 12월 > 3월 > 9월 > 4월 > 6월 > 5월 > 8월 > 7월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 11월에 3275 mBq/m³, 가장 낮은 7월에 1651 mBq/m³로 월별로는 거의 2.0배로 차이를 보였고, 2020년과 월별 차이가 나타나는 것으로 확인되었다(그림 11.2.7).

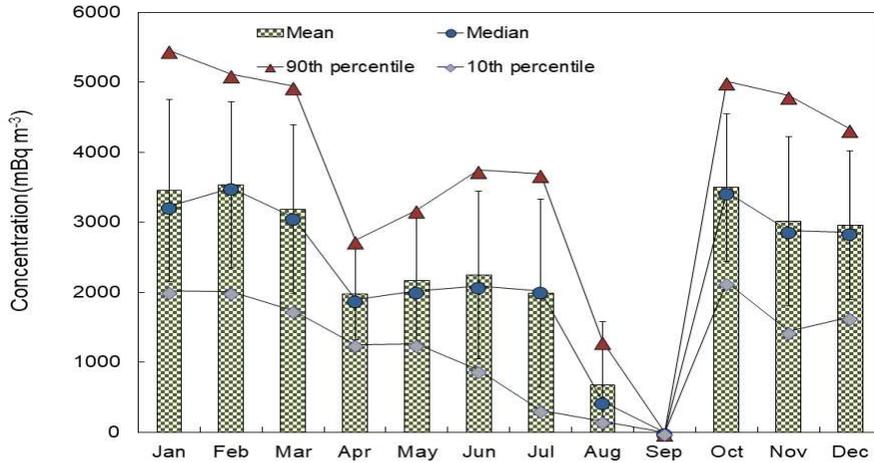


그림 11.2.6 20년 고산 월별 라돈농도 비교.

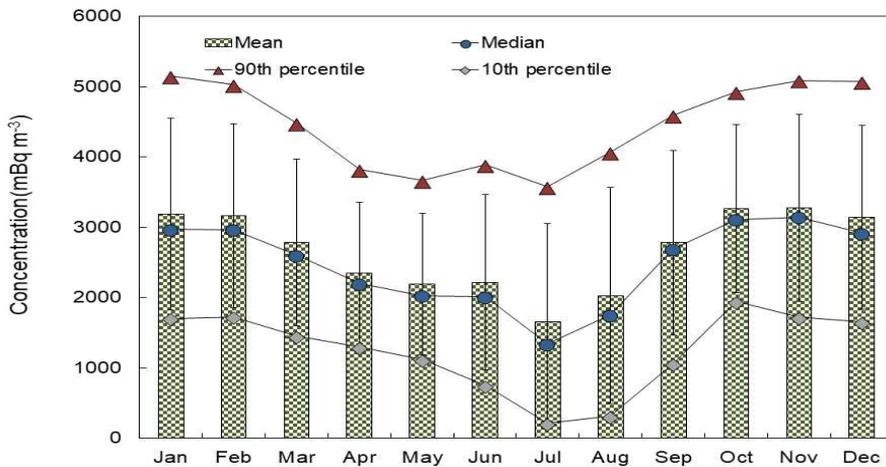


그림 11.2.7 2001~2020년 고산 월별 라돈농도 비교.

라돈농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 비교하였다. 그림 110.2.8의 결과와 같이 2020년 1~12월의 일간 변화를 비교한 라돈농도는 오전 6시에 2983 mBq/m³로 하루 중 가장 높고, 오후 3시경에 2252 mBq/m³로 가장 낮은 경향을 보였다.

또한 그림 11.2.9와 같이 2001~2020년 장기 측정 결과에서 일간 농도는 오전 7시경에 3008 mBq/m³로 가장 높고, 오후 3시경에 2232 mBq/m³로 농도가 가장 낮아 이 역시 연간 및 20년 장기 측정 결과가 비슷한 시간별 패턴을 유지하는 것으로 조사되었다.

이처럼 라돈농도 일간변화는 대체적으로 야간에 더 높고 주간에 낮은 경향을 보였고, 아침부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하고 다시 저녁시간에 상승하여 밤에는 점차로 상승하는 특징을 나타내었다(Omori et al., 2009). 이러한 경향은 대기의 혼합고의 변화에 따라 영향을 받았기 때문인 것으로 추정된다. 혼합고 높이는 날씨가 맑을 때에는 늦은 오전이나 오후의 낮 동안에 최고가 되어 대기 경계의 높이까지 이르게 되고, 이 높이 이내의 대기 오염물은 난류에 의해 균일하게 연직분포를 이루게 된다. 그러나 밤이나 이른 아침에는 지표 가까이에서 안정된 복사역전층이 형성되는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1985). 따라서 주간에 혼합고가 최대로 확장되어 라돈이 확산되므로 낮은 농도를 보이지만, 야간에는 혼합고가 낮아지고 밀집된 라돈이 더 높은 농도를 나타내는 것으로 추정된다. 이러한 라돈 일간 농도는 월별, 계절별 농도와 마찬가지로 혼합고의 확장, 축소에 따라 라돈의 확산과 농집에 영향을 미치고 이로 인해 농도가 변화하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

일변화를 계절별로 비교한 결과(그림 11.2.10, 그림 11.2.11)에서는 2010~2020년 겨울철에 라돈의 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않지만 여름에는 겨울에 비해 훨씬 더 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 경향은 2020년 측정 결과에서도 동일한 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 또 겨울철에는 주·야간 온도변화가 큰 차이를 보이지 않고 대기 혼합고의 차이도 상대적으로 작다. 따라서 라돈의 일간 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않게 된다. 그러나 이와 반대로 주·야간 온도차가 큰 편차를 보이는 여름철에는 혼합고의 확장 및 축소가 큰 변화를 보인다. 따라서 여름철에는 라돈의 최대, 최소 농도가 겨울에 비해 더 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다(Chambers et al., 2016).

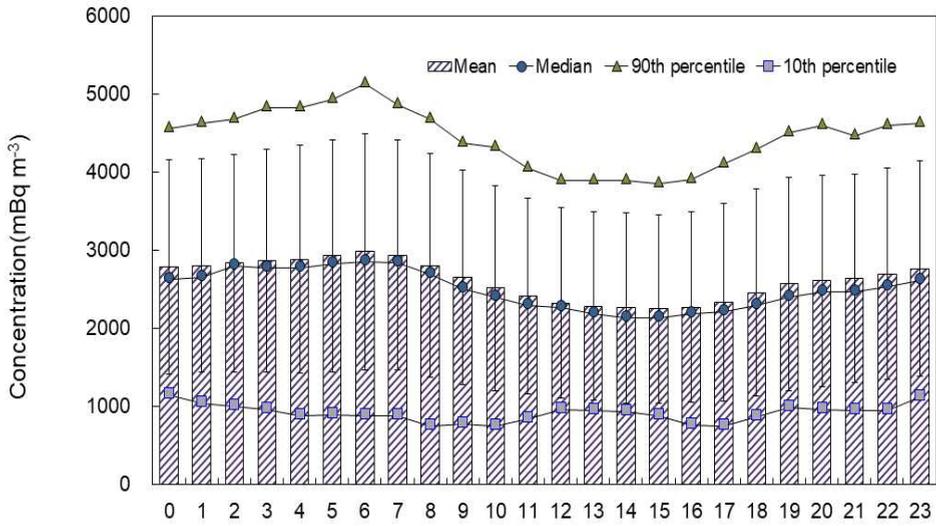


그림 11.2.8 2020년 고산의 시간별 라돈농도 비교.

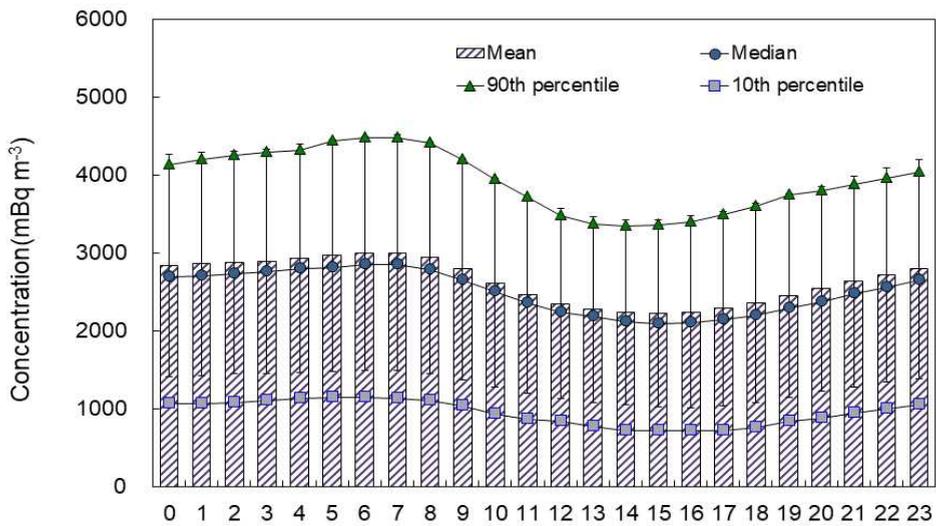


그림 11.1.9 2001~2020년 고산의 시간별 라돈농도 비교.

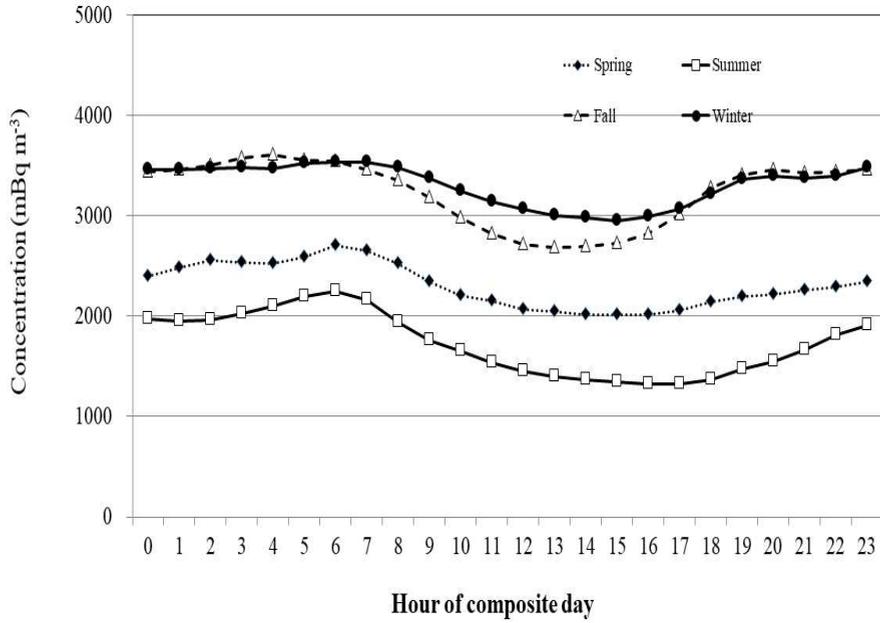


그림 11.2.10 2020년 고산의 계절별 시간 라돈농도 비교.

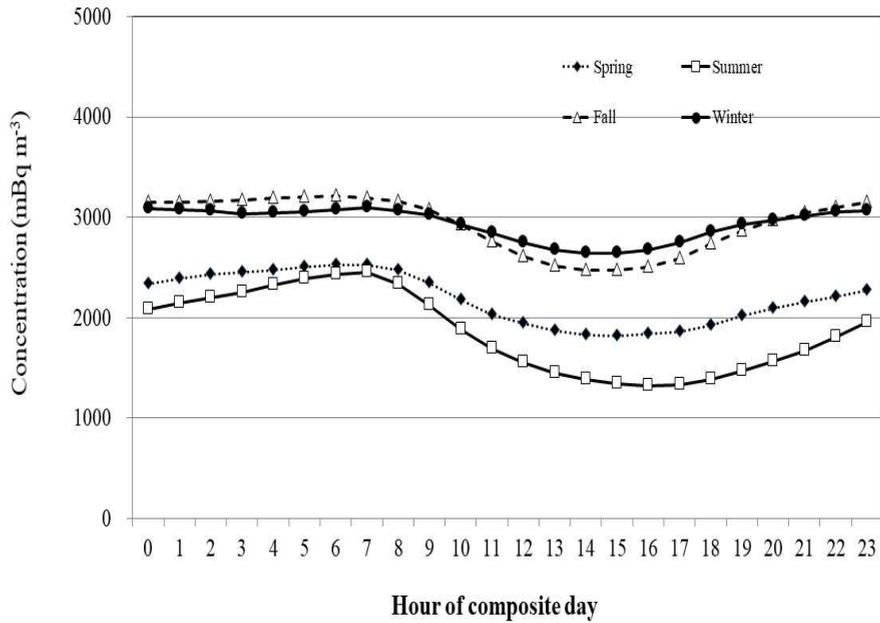


그림 11.2.11 2001~2020년 고산의 계절별 시간 라돈농도 비교.



11.2.3 라돈 장거리 이동 수송경로

기류 유입경로별로 라돈의 농도변화를 비교하였다. 이를 위해 2020년에 측정된 라돈의 일평균 농도를 기준으로 이 시기의 기류 이동궤적을 역궤적 군집분석법으로 조사하였다. 그리고 그림 11.2.12와 같이 기류의 유입경로를 제주도를 중심으로 중국 북부(Cluster 1), 중국 중부 및 황해(Cluster 2), 한반도(Cluster 3), 북태평양(Cluster 4)의 4개 구간으로 나누고, 역궤적 군집분석 결과를 기초로 제주도로 유입된 기류의 이동 경로를 조사하였다.

역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA)의 HYSPLIT4.0 모델을 이용하였다. 또한 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의 북반구 GDAS를 이용하였다. 또 중국 대륙에서 발생한 대기 오염물질의 경우 대략 2~5일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사 시간은 72시간으로 설정하였고, 측정지점 좌표는 고산(33.17°N, 126.10°E)을 기점으로 선정하였다. 또 출발점 고도는 72 m, 출발 시간은 해당 날짜의 매 00 UTC(KST 09:00)를 기준으로 설정하였다.

역궤적 군집분석결과를 기초로 4개 군집별 일평균 라돈농도를 비교한 결과, 기류의 이동은 Cluster 1 ~ Cluster 4에서 각각 16%, 39%, 25%, 19%의 빈도를 나타내어 대부분 북서풍을 타고 중국 대륙으로부터 제주로 이동한 것으로 확인되었다. 이 때 각 기류 이동 경로별 라돈농도를 비교한 결과, Cluster 1~Cluster 4에서 각각 2910 mBq/m³, 2947 mBq/m³, 2914 mBq/m³, 1350 mBq/m³를 나타내었다. 이처럼 라돈 농도는 기류가 중국 대륙에서 제주도로 이동했을 때 대체적으로 더 높은 경향을 보였다. 반면에 기류가 북태평양에서 제주지역으로 유입되었을 때에는 중국에서 유입되었을 때에 비해 2.2배 정도 더 낮은 농도를 나타내었다. 이와 같이 라돈 농도는 대체적으로 대륙에서 기류가 유입(continental fetch)되었을 때 높고, 북태평양에서 이동했을 때에 상대적으로 낮은 경향을 보이는 것으로 조사되었다.

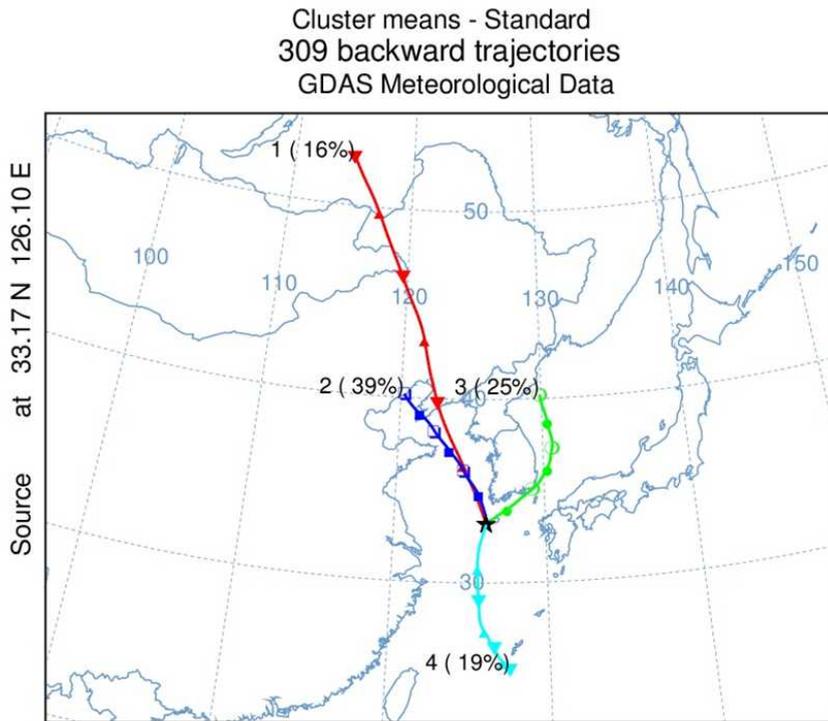


그림 11.2.12 기류 유입경로 및 라돈농도.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타



2020 지구대기감시 보고서



부 록

1. 관측자료품질보증체계	318
2. 지구대기감시 관측자료	346
3. 기후변화감시 기술노트 목록	389
4. 지구대기감시 매뉴얼 목록	390
5. 기후변화감시 관측자료 활용	391
6. 기후변화감시기술 특허 보유 현황	398
7. 지구대기감시 보고서 작성자	400

[부록 1] 관측자료품질보증체계

1.1 온실가스

1.1.1 관측장비

○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측연도
CO ₂	비분산적외선분석기 (NDIR)	Siemens	1시간	1999~2011년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년~현재
CH ₄	가스크로마토그래피- 불꽃이온화검출기 (GC-FID)	Agilent	1일	1999~2015년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2016년~현재
N ₂ O	가스크로마토그래피- 전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	1999년~현재
SF ₆				2007년~현재
CFC-11				1999년~현재
CFC-12				1999년~현재
CFC-113				2007년~현재



○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측시작연도
CO ₂	비분산적외선분석기 (NDIR)	Siemense	1시간	2009~2013년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2014년~현재
CH ₄	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2015년~현재
N ₂ O SF ₆	가스크로마토그래피- 전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	2010년~현재 2016년~현재

※ 2012년 고산 환경면에서 수월봉(현위치)으로 이동하였으며, 지역적 영향을 고려하여 같은 장소에서 관측한 2012년 이후부터 자료 제공

○ 울릉도

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측시작연도
CO ₂	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년~현재
CH ₄	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년~현재
N ₂ O SF ₆	가스크로마토그래피- 전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	2012년~현재 2015년~현재

○ 독도

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측시작연도
CO ₂	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년~현재

1.1.2 자료선별법 및 배경대기 산출법

관측요소	자료통계 방법
이산화탄소 (CO ₂)	<p><입력자료 선정></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 검교정하여 농도 재산정 <ul style="list-style-type: none"> * 안면도 : 1999~2011 NDIR, 3시간마다 3점교정, 2012~현재 CRDS 2주이내마다 4점교정 * 고 산 : 2009~2013 NDIR, 3시간마다 3점교정, 2014~현재 CRDS 2주이내마다 4점교정 * 울릉도 : 2012~2019.11. CRDS 2주마다 4점교정, 2019~현재. CRDS 5일마다 4점교정 ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거, 표준 가스 교정기간 제거 <p><시간평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균 산정 ④ CO₂ 1시간 평균값(HA)과 표준편차(HS) 계산 ⑤ $HS \leq HS_ctr$ 을 만족하는 HA만 선택 ⑥ ⑤에서 선택된 HA 중 다음 조건을 만족하는 HA 선택 $CD_up \leq CD_ctr$ 또는 $CD_down \leq CD_ctr$ ⑦ ⑥에서 선택된 HA 중 다음 조건을 만족하는 HA 선택 $HA - HA\text{의 }30\text{일 이동중앙값} \leq 1.3 \times HA\text{의 }30\text{일 이동표준편차}$ <p><일평균, 월평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ⑧ Thoning et al.(1989)의 방법을 적용하여 산정
메탄(CH ₄)	<p><입력자료 선정></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 검교정하여 농도 재산정 <ul style="list-style-type: none"> * 안면도: 1999~2015 GC-FID, 6시간마다 1점교정, 2016~현재 CRDS 2주마다 4점교정 * 고 산: 2014~현재 CRDS 2주마다 4점교정 * 울릉도: 2018~2019.11. CRDS 2주마다 4점교정, 2019.12.~현재. CRDS 5일마다 4점교정 ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거, 표준 가스 교정기간 제거 <p><시간평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균을 구한 뒤 ④ 시간평균의 표준편차가 A보다 크고 연속된 앞 뒤 시간평균값의 차이가 B이상 차이가 나면, 시간자료 기각 <ul style="list-style-type: none"> * 안면도 : (A) 9 ppb, (B) 16 ppb * 고 산 : (A) 4.5 ppb, (B) 8.5 ppb * 울릉도 : (A) 4 ppb, (B) 5.5 ppb * 자료의 약 30% 기각 <p><일평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ⑤ 시간평균 자료가 6개 이상일 때 1차 일평균 산정 <p><월평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ⑥의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅 ⑦ 관측값 - 커브피팅 = 잔차(a) 산정 ⑧ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/year)한 잔차(b) 생성 ⑨ 잔차(a) < 잔차(b)의 3σ안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택 ⑩ ⑥ ~ ⑨ 번 5번 반복 후 ⑪ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정 (Thoning et al., 1989, 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/year 반영)



관측요소	자료통계 방법
아산화질소 (N ₂ O)	<p><입력자료 선정></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 아산화질소 표준가스를 이용하여 농도 재산정(표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거 <p><시간자료 선택></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 시간자료의 연속된 앞·뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 <ul style="list-style-type: none"> * 안면도 : (A) 0.9 ppb, * 고 산 : (A) 0.86 ppb * 울릉도 : (A) 0.86 ppb * 자료의 약 30%~32% 기각됨 <p><일평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ⑤ 시간평균 자료가 6개 이상일 때 1차 일평균 산정 <p><월평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ⑥의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅 ⑦ 관측값 - 커브피팅 = 잔차(a) 산정 ⑧ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/year)한 잔차(b) 생성 ⑨ 잔차(a) < 잔차(b)의 3σ안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택 ⑩ ⑥ ~ ⑨ 번 5번 반복 후 ⑪ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정 (Thoning et al., 1989, 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/year 반영)
염화불화탄소류 (CFCs)	<p><입력자료 선정></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 염화불화탄소류의 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거 <p><시간자료 선택></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 관측소간의 비교, 기상자료 등을 판단하여 유효값 산정 <p><일평균, 월평균> ※ O'Doherty et al., 2001</p> <ul style="list-style-type: none"> ④ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting함 ⑤ fitting 값 잔차의 중간값을 산출 ⑥ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출 ⑦ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별 ⑧ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 일평균 산정 ⑨ 월평균 산정
육불화황 (SF ₆)	<p><입력자료 선정></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 육불화황 표준가스를 이용하여 농도 재산정(표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거 <p><시간자료 선택></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 관측소간의 비교, 기상자료 등을 판단하여 유효값 산정 <p><일평균, 월평균> ※ O'Doherty et al., 2001</p> <ul style="list-style-type: none"> ④ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting함 ⑤ fitting 값 잔차의 중간값을 산출 ⑥ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출 ⑦ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별 ⑧ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 일평균 산정 ⑨ 월평균 산정

1.1.3 품질관리를 위한 온실가스 관측자료 비교

WMO/GAW에서는 온실가스 관측의 자료 품질관리와 관측의 불확도 산정을 돕기 위해 플라스크 샘플링과 실시간 관측자료를 같은 관측소에서 이행하여 상호 비교하도록 권고하고 있다(WMO, 2016). 안면도는 한반도에서 가장 오래된 온실가스 실시간 관측 역사를 가지고 있으며, 2014년부터 플라스크 샘플링 자료와 비교를 진행하고 있다. 플라스크 샘플링의 분석은 WMO/GAW의 주요 시설 중 하나인 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory; CCL)이 진행하였으며, 이 시설은 미국해양대기청에서 운영하고 있다. 플라스크 샘플링은 안면도에서 주 1회 실시간 장비의 인렛과 동일한 높이에서 포집하고, 중앙교정실험실로 보내지며 분석 후 안면도의 1시간 평균자료와 비교한다.

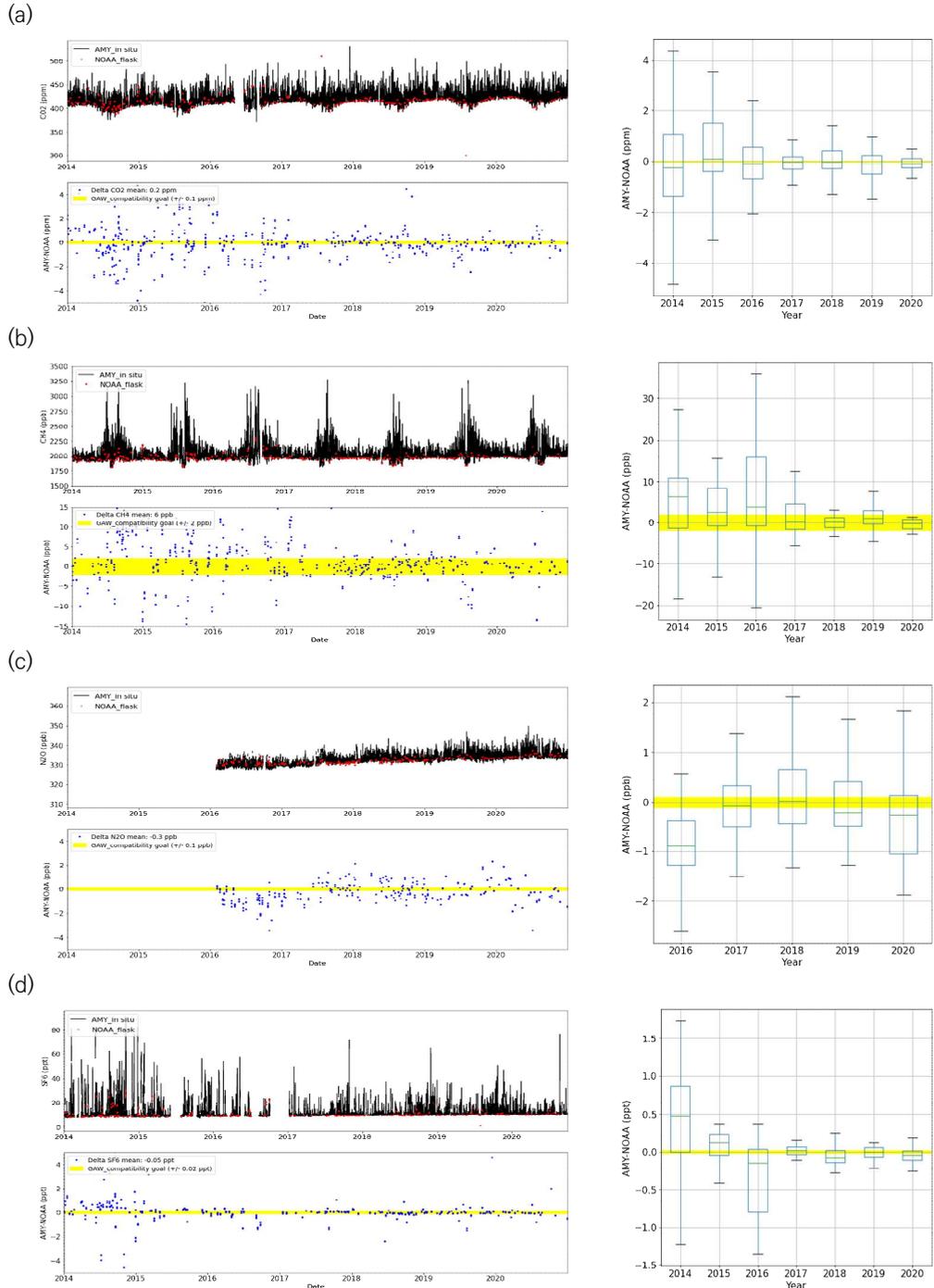
같은 관측소에서 같은 항목을 다른 장비로 측정하는 경우 GAW에서 제시하는 호환성 범위는 $\text{CO}_2 \pm 0.1 \text{ ppm}$, $\text{CH}_4 \pm 2 \text{ ppb}$, $\text{N}_2\text{O} \pm 0.1 \text{ ppb}$, $\text{SF}_6 \pm 0.02 \text{ ppt}$ 로 알려져 있다(WMO, 2020). 2014년부터의 비교 그림을 살펴보면, N_2O 를 제외한 대부분의 가스종이 2017년부터 확연히 그 차이값이 줄어들음을 확인할 수 있다(부록그림 1). N_2O 와 SF_6 는 GC- μECD 를 통해 관측되는데, 기기 자체의 표류오차가 크기 때문에 표류오차를 보정하는 것이 중요하며, 2017년부터 이를 보정하여 검교정하는 방식을 선택하였다. 이때 NOAA 플라스크와 차이값이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림에도 불구하고 SF_6 와 달리 N_2O 는 개선의 변화가 적다. 현재 GAW 네트워크 내에서도 N_2O 의 호환성 범위가 도전적으로 여겨져 정확한 관측을 위해 노력하고 있다.

CO_2 는 2012년부터 CH_4 은 2016년 중반부터 공동감쇠분광기로 관측을 시작하였으며, 이 관측 기기는 상대적으로 안정적으로 값을 관측한다고 알려져 있다. 따라서 CO_2 의 경우 다른 항목에 비해 호환성 범위에 늘 근접하여 있으며, CH_4 도 기기의 변경으로 비교적 정확한 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

향후 고도의 검교정 기법과 품질관리 기법을 통해 안정적인 관측자료가 생산될 예정이다.



[부록 1] 관측자료품질보증체계



부록그림 1. 2014년부터 2016년까지 플라스크자료와 비교한 실시간 관측자료(좌)와 연도별 차이값의 분포(우). (a) 이산화탄소(CO₂) (b) 메탄(CH₄) (c) 아산화질소(N₂O) (d) 육불화황(SF₆).

1.2 반응가스

1.2.1 관측장비

○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
O ₃	오존분석기	ECOTECH	ML9812	1시간	1998~2005년
		THERMO	49i	1시간	2005~2007년
				1시간	2007년~현재
CO	일산화탄소분석기	ECOTECH	ML9830	1시간	1998~2005년
		THERMO	48i	1시간	2005~2007년
				1시간	2007년~현재
NO _x	질소산화물분석기	ECOTECH	ML9841A	1시간	1998~2005년
		THERMO	42i	1시간	2005~2007년
				1시간	2007년~현재
SO ₂	이산화황분석기	ECOTECH	ML9850	1시간	1998~2005년
		THERMO	43i	1시간	2005~2007년
				1시간	2007년~현재

○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
O ₃	오존분석기	THERMO	49i	1시간	2012년~현재
CO	일산화탄소분석기	THERMO	48i	1시간	2012~2018년
	공진출력분광기	Los Gatos	EP30	1시간	2019년
	공동감쇠분광기	PICARRO	G2401	1시간	2020년~현재
NO _x	질소산화물분석기	THERMO	42i	1시간	2012년~현재
SO ₂	이산화황분석기	THERMO	43i	1시간	2012년~현재

○ 울릉도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
CO	공동감쇠분광기	PICARRO	G2401	1시간	2015년~현재



1.2.2 품질관리 및 자료통계방법

관측요소	자료통계 방법
오존(O ₃) 일산화탄소(CO) 질소산화물(NO _x) 이산화황(SO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 통계 최소자릿수: 0.1 ○ 생산자료 → 시간통계 → 일통계 → 월통계 → 연통계 〈 시간 통계 〉 ○ 자료기간 : 생산자료를 이용하여 해당 시간의 00분 이후부터 59분까지의 1시간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 시간평균자료 ○ 산출방법 <ul style="list-style-type: none"> - 제거 후 생산자료가 시간당 66% 이상일 때 산출(1분자료 40개 이상) - 소수 두 번째 자리까지 계산하여 반올림 - 산출식 $\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1} + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ○ Thermo 49i CO는 주기적으로 분석하는 zero값으로 표준오차를 보정함. 예) 04시 zero = 5 ppb, 06시 zero = 10 ppb라면 2시간동안 5ppb가 선형적으로 증가하였다고 가정하여 관측값에서 빼 줌. ○ LGR EP30, PICARRO G2401로 측정된 CO는 교정, 점검 및 장애 시간을 제외한 관측값으로 시간 통계 산출함 ○ NO_x자료 중 NO는 전일 밤 10시~당일 새벽 2시의 NO 평균을 zero값으로 산출하여 연속된 날의 zero값과 zero값 사이를 선형내삽한 후 관측값에서 빼 줌. 이 때 O₃ <20 ppb인 경우 NO 고농도 사례로 보고 zero값 산출하지 않음 〈 일통계 〉 ○ 자료기간 : 시간평균자료가 하루 75% 이상일 때 산출(시간자료 18개 이상) ○ 자료종류 : 일평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음 〈 월통계 〉 ○ 자료기간 : 일자료가 50% 이상일 때 산출 ○ 자료종류 : 월평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음 〈 연통계 〉 ○ 자료기간 : 해당 연의 1월부터 12월까지의 1년간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 연평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음

1.3 에어로졸

1.3.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
PM10 질량농도	부유분진측정기 (β -ray PM ₁₀)	Thermo	FH62C14	1시간	2003년~현재 (안면도)
					2009년~현재 (고 산)
크기별 수농도 (0.5~20 μ m)	공기역학입자 계수기 (APS)	TSI	3321	1시간	2006년~현재 (안면도)
					2009년~현재 (고 산)
미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5 μ m)	전자기유도 입자계수기 (SMPS)	TSI	3034	1시간	2005~2016년 (안면도)
		GRIMM	5.416	1시간	2017년~현재 (안면도)
응결핵 수농도 (0.01~3 μ m)	응결핵계수기 (CPC)	TSI	3772	1시간	2010년~현재 (고 산)
연직분포	에어로졸 라이다	EN3엔지니어링	MPoLAR 2020	15분	2010년~현재 (안면도)
광산란계수	광산란계수측정기 (Nephelometer)	TSI	3563	1시간	2003년~현재 (안면도)
광흡수계수	광흡수계수측정기 (Aethalometer)	Magee Scientific	AE16	1시간	2001~2010년 (안면도)
			AE31	1시간	2011년~현재 (안면도)
광학깊이	정밀필터복사계 (PFR)	PMOD, Switzerland	GAW-PFR	1시간	2010년~현재 (안면도)
					2011년~현재 (고 산)
	태양광도계 (Sun-Photometer)	Cimel	CE-318N	수시	2013년~현재 (안면도)
PM10, PM2.5 이온/원소	저용량미세먼지 채취기 (Low-vol air sampler)	APM 엔지니어링	2000A	6일	PM10/PM2.5 이온: 2008~2017년 3월 (안면도)
			PMS-104	6일	PM10/PM2.5 이온: 2017년 3월~현재 (안면도) PM10/PM2.5 원소: 2018년~현재 (안면도)



1.3.2 품질관리 및 자료통계방법

관측요소	자료통계 방법
PM10 질량농도 (β-ray 흡수법)	<p>〈자료 품질 보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 국가기준측정시스템(NRM)과 비교평가를 통과한 기준채취기(Class I)를 이용하여 현장에서 등가성평가 수행 (부록 1.3.2 참조) <p>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기기상태 검사: 6자리 상태 코드가 '000000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심'으로 분류 ○ 계측한계 검사: 1~5,000 μg/m³를 벗어나면 '의심'으로 분류 ○ 시간연속성 검사 현재(t)와 직전(t-1) 또는 직후(t+1)에 관측된 PM10 질량농도의 변동량이 '50+0.15×PM10'를 초과할 경우 '의심'으로 분류 $\Delta PM10 = \min[PM10(t) - PM10(t \pm 1)] \quad (1)$ <ul style="list-style-type: none"> ○ 튀는 값 검사: 3개의 연속적인 PM10 자료의 차이를 이용하여 식 (2)과 같이 d를 구한 후 식 (3)의 조건을 만족하지 않은 경우 '의심'으로 분류. 여기서 Md는 식 (2)에서 구한 d의 중간값이며, 중위절대편차(median of absolute deviation, MAD)는 식 (4)로 정의됨. $d = [PM10(t) - PM10(t - 1)] - [PM10(t + 1) - PM10(t)] \quad (2)$ $d \geq Md - z \times MAD \text{ or } d \leq Md + z \times MAD \quad (3)$ $MAD = \text{median}(d - Md) \quad (4)$
	<ul style="list-style-type: none"> ○ PM10 질량농도가 지난 1시간 평균의 20%를 초과하면 '의심'으로 분류 ○ 지속성 검사: 과거 60분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 ○ 정합성 검사: 인근 동일 요소 산출물(부유분진측정기, APS, OPC의 PM10 질량농도) 비교하여 차이가 50% 초과할 경우 '의심'으로 분류 <p>〈자료품질관리(수동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리 <p>〈통계방법〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 75% 이상일 때 시간평균값 산출 ○ 유효 시간평균 자료가 일, 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 산출 <p>[참고] WMO GAW 권고에 따라 부유분진측정기는 표준대기상태(0°C, 1기압) 자료가 생산됨</p>

관측요소	자료통계 방법
<p>응결핵 수농도 (0.01~3 μm, 총수농도)</p>	<p><자료 품질 보증> ○ WMO 에어로졸 세계표준센터에서 수행하는 국제비교실험 참여(부록 1.3.3 참조) http://actris-ecac.eu/files.ECAC-report-CPC-2018-6-5.pdf (2018) http://actris-ecac.eu/files.ECAC-report-CPC-2019-5-5.pdf (2019)</p> <p><자료품질관리(자동)> ○ 기기상태 검사: 기기 에러가 기록된 자료는 '의심'으로 분류 ○ 계측한계 검사: 1~10,000개/cm³를 벗어나면 '의심'으로 분류 ○ 지속성 검사: 과거 20분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 ○ 튀는 값 제거: PM10과 동일</p> <p><자료품질관리(수동)> ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리</p> <p><통계방법> ○ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출 ○ 유효 시간평균 자료가 일, 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 산출</p>
<p>크기별 수농도 (0.5~20 μm)</p>	<p><자료 품질 보증> ○ 연 1회 이상 표준입자(0.8, 1.0, 2.8 μm)를 이용한 자체 점검 ○ 매 2년마다 제작사 교정 수행 ○ APS와 중복 입경 구간(0.532~1.0 μm) 수농도 비교 평가</p> <p><자료품질관리(자동)> ○ 기기상태 검사 ① 상태 코드가 '0000 0000 0000 0000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심' ② event 4)0 : '의심' ③ dead time = 0 : '의심' ④ 내부 diode 온도 ≤ 18℃ : '의심' ○ 계측한계 검사: 구간별 수농도가 1,000 개/cm³ 이상일 때 '의심', 10,000 개/cm³ 일 때 '오류'로 분류 ○ 지속성 검사: 과거 60분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 ○ 정합성 검사: 인근 동일 요소 산출물(부유분진측정기, APS, OPC의 PM10 질량농도) 비교하여 차이가 50% 초과할 경우 '의심'으로 분류</p> <p><자료품질관리(수동)> ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리</p>



관측요소	자료통계 방법
	<p>〈통계방법〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출 ○ 유효 시간평균 자료가 일, 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 산출 <p>[참고] WMO GAW 권고에 따라 측정 온도와 기압 자료를 이용해 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환</p>
<p>미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5 μm)</p>	<p>〈자료 품질 보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 연1회 이상 표준입자(203nm)를 이용한 자체 점검 ○ APS와 중복 입경 구간(0.532~1.0 μm) 수농도 비교 평가 ○ WMO 에어로졸 세계표준센터에서 수행하는 국제비교실험 참여 http://actris-ecac.eu/files/ECAC-report-MPSS-2018-6-6.pdf (2018) * 2018년 국제비교실험 결과에 따라 SMPS의 에어로졸 중화기 방사선원을 기존 아메리슘(Am-241)에서 크립톤(Kr-85)으로 교체(2019.12.) <p>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기기상태 검사: warning=0, error=0인 경우만 '정상', 나머지는 '의심' ○ 계측한계 검사: 총수농도가 10⁷ 개/cm³ 이상일 때 '의심' ○ 지속성 검사: 과거 20분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 <p>〈자료품질관리(수동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리 <p>〈통계방법〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출 ○ 유효 시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출 <p>[참고] WMO GAW 권고에 따라 측정 온도와 기압 자료를 이용해 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환</p>
<p>광산란계수</p>	<p>〈자료 품질 보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 매2개월마다 스펠가스 확인(span check) - 입자가 제거된 순수 공기와 광산란계수를 알고 있는 스펠(span) 가스인 이산화탄소(CO₂)의 광자수를 측정하여 교정계수를 확인 <p>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 장비 내부 측정 온도와 기압 자료를 이용해 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환 (Anderson and Ogren, 1998). $\sigma(T, P) = \sigma(STP) \frac{273.15}{T} \frac{P}{1013.25} \quad (5)$ <p>여기서 σ는 광산란계수, T, P는 온도와 압력, STP는 표준대기 상태</p>

관측요소	자료통계 방법
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 광산란계수측정기 각도 보정(Angular Correction Factor): Anderson and Ogren (1998) 참고 ○ 기기상태 검사: 기기에러=0000 아닌 경우 '의심' ○ 계측한계 검사: 5(BNC voltage<7 범위를 벗어나면 '의심' (샘플 온도 검사) <ul style="list-style-type: none"> ① 상한: 광산란계수가 2,000 Mm⁻¹ 이상이면 '의심', 20,000 Mm⁻¹ 이상이면 '오류'로 분류 ② 하한: 광산란계수가 0.3 Mm⁻¹ 미만이면 '의심', 0.1 Mm⁻¹ 미만이면 '오류'로 분류 산란용스트롬 지수가 -2보다 작으면 '의심' ○ 단계검사: 변동량이 2σ(과거 12개 자료의 표준편차×2) 초과할 경우 '의심'으로 분류 ○ 지속성 검사: 과거 10분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 ○ 배경농도 검사: 제로잉 수행(ZBXX mode) 시 광산란계수(450 nm, 표준대기 보정 후)가 40 Mm⁻¹를 초과하는 자료는 다음 제로잉 수행 이전 자료까지 '의심'으로 분류 ○ 상대습도가 40%를 초과하는 자료는 '의심'으로 분류 <p>〈자료품질관리(수동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리
광흡수계수	<p>〈자료 품질 보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 연1회 이상 제로잉 ○ WMO 에어로졸 세계표준센터에서 수행하는 국제비교실험 참여 http://actris-ecac.eu/files/ECAC-report-AP-2018-3-4.pdf (2018) <p>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 광흡수계수기가 20℃, 1기압 상태로 설정되어 있으므로, GAW에서 권고하는 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환(식(5) 참고) ○ 관측장비에서 산출된 감쇄계수를 광흡수계수로 변환하기 위해 GAW 보고서(Report No. 227) 권고에 따름. $\sigma_{ap} = b_{ATN} / C_0$ <p>여기서, C₀는 보정상수로 3.5를 적용하였으며, 약 25% 불확실도를 보임(WMO, 2016).</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 단계검사: 변동량이 2σ(과거 12개 자료의 표준편차×2) 초과할 경우 '의심'으로 분류 ○ 지속성 검사: 과거 10분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 <p>〈자료품질관리(수동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리

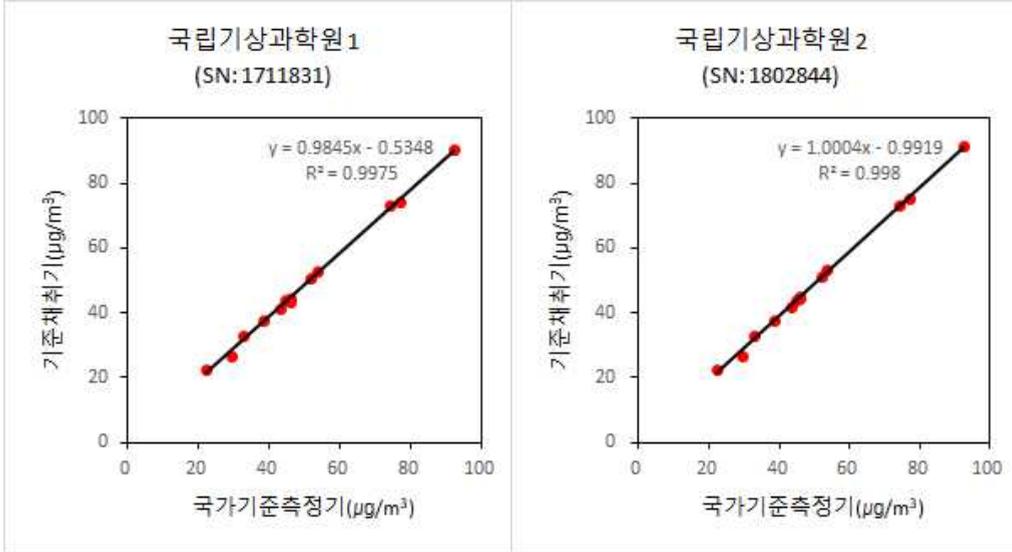


관측요소	자료통계 방법
광학깊이 (정밀필터복사계 (PFR))	<p>〈자료 품질 보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 3년마다 세계광학깊이연구-보정센터(WORCC PMOD/ WRC)-제작사 교정 수행 <p>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기기상태 검사 <ol style="list-style-type: none"> ① 내부 센서온도 19.5 ±1℃: 센서온도 ② 태양 추적 장치 위치 이상유무 ③ 구름의 영향 : 광학두께 > 3.0, Air mass $\delta E \approx \Delta E / \Delta m$에 대한 1차 태양복사 함수는 항상 Negative하다는 사실에 의존, 고계도함수(Higher order derivatives) 통계 분석 필터, 3개의 샘플에 대한 AOD 가변성 한계값 ④ 4개 관측채널 중 하나라도 Overflow ⑤ 야간(태양고도가 -6도 미만) ○ 계측한계 검사: AOD이 및 오스트롱 산출 결과 2 이상일 때 '의심' <p>〈통계방법〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 위 자료 품질관리를 통과한 자료가 일별 관측유�효데이터가 10개 이상일 때 일평균값으로 산출 ○ 유효 일평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출
PM10 질량농도	- 채취시간이 24시간 이상된 자료제거 또는 채취시간이 10시간 미만인 자료 제거
PM2.5 질량농도	- PM10 무게 측정 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) < PM2.5 무게 측정 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 일 때, 자료 제거
PM10 이온성분	- Filter 무게 측정 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) < 화학성분 총 질량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 일 때, 자료 제거 - 양이온 당량농도 합($\Sigma[\text{Cation}]_{\text{eq}}$), 음이온 당량농도 합($\Sigma[\text{Anion}]_{\text{eq}}$)을 의미하며, 아래의 식으로 계산 $0.7 < \frac{\Sigma[\text{Cation}]_{\text{eq}}}{\Sigma[\text{Anions}]_{\text{eq}}} < 1.3$
PM2.5 이온성분	- 양이온과 음이온 당량 농도합의 비가 30% 이상 차이 나는 자료는 최종 결과에서 제외 - PM10 각각의 화학성분($\mu\text{g}/\text{m}^3$) < PM2.5 각각의 화학성분($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 일 때, Filter의 상태 및 기기의 상태 확인 후 자료 제거
PM10 원소성분	- PM10 각각의 화학성분(ng/m^3) < PM2.5 각각의 화학성분(ng/m^3) 일 때, Filter의 상태 및 기기의 상태 확인 후 자료 제거
PM2.5 원소성분	

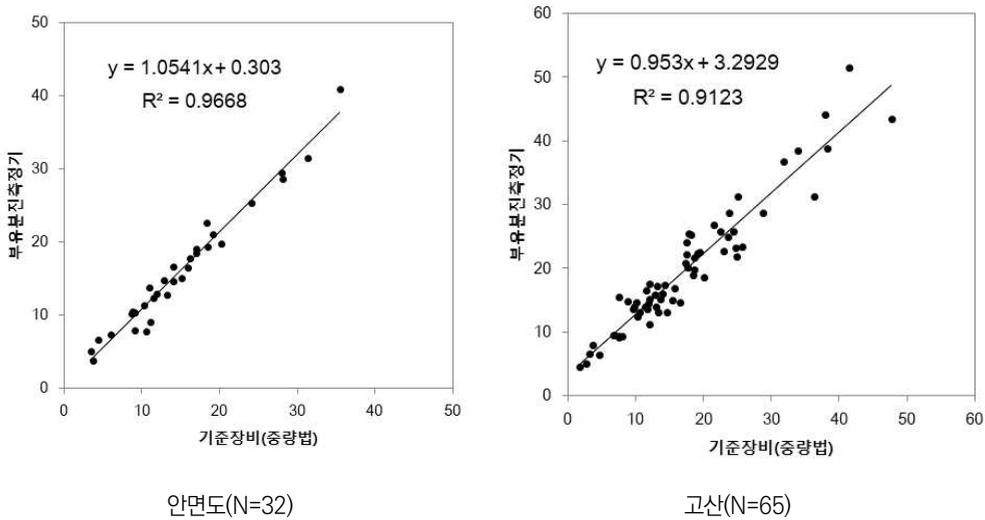
1.3.3 부유분진측정기 등가성평가

안면도와 고산에서 운영 중인 부유분진측정기는 「환경측정기기 형식승인·정도검사 등에 관한 고시⁶⁾」에 따라 2018년부터 등가성평가를 수행하고 있다. 정도검사 기준에 따르면 기준채취기와 평가대상 부유분진측정기 간 선형회귀식의 기울기(0.9~1.1)와 절편(-5.0~5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 만족하는 연속된 날의 유효시료가 10개 이상인 때 등가성이 인정되어 정도검사를 받을 수 있다. 또한, 기상청 기후변화감시소는 2018년 3월 GAW 에어로졸 세계표준센터로부터 받은 적합성 평가 시 권고에 따라 를 받았는데 부유분진측정기에 대해 기준채취기와의 등가성을 연중 확인하고 있다. 부유분진 측정기 등가성평가를 위한 기준채취기는 국립환경과학원의 국가기준측정시스템과 비교 측정하여 성능을 검증받은 중량농도법 측정기이다. 2020년에 국가기준측정시스템과 기후변화감시소(NRM)의 기준채취기(Class I) 2대의 성능검증 결과를 그림 1.3.1에 보였다. 국가기준측정시스템과 기준채취기(Class I)의 선형회귀식 기울기는 0.98, 1.00이며, 절편은 각각 -0.53과 -0.99로 중량법 기준채취기 등가성평가 기준을 만족하였다. 성능이 검증된 이 기준채취기(Class I)들은 각각 안면도와 고산 기후변화감시소로 이동하여 현지에서 부유분진측정기의 등가성평가를 위해 운영되었다. PM10 화학성분의 품질관리 절차(지구대기감시 업무 매뉴얼(II), 2017)를 거쳐 최종 확정된 2020년 기준채취기의 PM10 질량농도 시료 수(중량법)는 안면도, 고산 각각 32, 65개이다. 기준채취기와의 등가성 확인 결과 안면도는 기울기 1.05, 절편 0.30, 고산은 기울기 0.95, 절편 3.29로 자동측정기(부유분진측정기) 등가성평가 기준(기울기 0.90~1.1, 절편 -5.0~5.0)을 모두 만족하였다(부록그림 2, 부록그림 3).

6) 국립환경과학원 고시 2017-6 (2017. 4.) 부칙 제1조(시행일) 등가성 평가시험은 2018년 1월 1일부터 시행한다.



부록그림 2. 국가기준측정시스템과 국립기상과학원 기준채취기(Class I)의 비교평가.



부록그림 3. 2020년 부유분진측정기 등가성평가 결과.

1.4 대기복사

1.4.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
직달일사	직달일사계 (Pyrheliometer)	EKO, Japan	MS-54	1시간	1999년~현재 (안면도)
			MS-54	1시간	2008년~현재 (고 산)
산란일사	전천일사계 (Pyranometer)	EKO, Japan	MS-802F	1시간	1999년~현재 (안면도)
			MS-802	1시간	2008년~현재 (고 산)
태양복사	전천일사계 (Pyranometer)	EKO, Japan	MS-802F	1시간	1999년~현재 (안면도)
			MS-802	1시간	2008년~현재 (고 산)
지구복사	지구복사계 (Pyrgeometer)	EKO, Japan	MS-202F	1시간	1999년~현재 (안면도)
순복사	순복사계 (Net-Pyrradiometer)	EKO, Japan	MF-11	1시간	1999년~현재 (안면도)

1.4.2 대기복사 자료통계방법

관측요소	자료통계 방법
직달일사 / 산란일사	- BSRN에서 권고하는 QC 3단계 적용 [시간평균]
태양복사	- 태양·지구복사: QC를 거친 1분 관측 데이터가 한 시간에 80% 이상 존재할 경우 시간평균값 계산. [일평균]
지구복사	- 태양복사: 태양천정각(Solar Zenith Angle) < 90°인 시간 중 시간평균 자료가 80% 이상 존재한 날의 24시간 평균값. - 지구복사: 24시간 중 시간평균 데이터가 80% 이상 존재한 날의 24시간 평균값
순복사	[월평균] - 일평균이 전체 날수의 50% 이상 존재한 달의 일평균에 대한 평균값 [연평균] - 월평균이 10개월 이상 존재할 경우의 월평균에 대한 평균값



○ Quality Check 방법(BSRN 기준)

1단계 QC (Physically Possible Limits)

- Global Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 1.5 X $\mu_0^{1.2}$ + 100 W/m ²
- Reflected Solar Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 1.2 X $\mu_0^{1.2}$ + 50 W/m ²
- Direct Solar Irradiance	Min : -4 W/m ² Max : Sa
- Diffuse Solar Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 0.95 X $\mu_0^{1.2}$ + 50 W/m ²
- Downwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m ² Max : 700 W/m ²
- Upwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m ² Max : 900 W/m ²

2단계 QC (Comparisons)

- Ratio of Global Radiation over SUM	Global / SUM → within +/- 8% of 1.0 (for SZA < 75°, SUM > 50 W/m ²) Global / SUM → within +/- 15% of 1.0 (for 75° < SZA < 93°, SUM > 50 W/m ²)
- Ratio of Diffuse over Global Radiation	SWDIFF / Global < 1.05 (for SZA < 75°, Global > 50 W/m ²) SWDIFF / Global < 1.10 (for 75° < SZA < 93°, Global > 50 W/m ²)
- Reflected Solar Radiation comparison	SWUP < SUM (SUM > 50 W/m ²)
- Air Temperature comparison (Infrared Radiation)	$\sigma(Ta-15K)^4$ < LWUP < $\sigma(Ta+25K)^4$ $0.4X\sigma Ta^4$ < LWDOWN < $\sigma Ta^4 + 25$
- Infrared Radiation comparison	LWDOWN < LWUP + 25 W/m ² LWDOWN > LWUP - 300 W/m ²

3단계 QC (NET Comparison)

- NET & Cal. NET	NET < 50 W/m ² → NET - Cal. NET < 25 W/m ² NET ≥ 50 W/m ² → (NET - Cal. NET) / NET < 0.5
------------------	--

* 태양상향복사(SWUP), 태양하향복사(전천일사/Global), 직달일사(SWDIR), 산란일사(SWDIFF), 지구상향복사(LWUP), 지구하향복사(LWDOWN)

* SUM : SWDIFF + SWDIR × μ_0

* SZA : Solar Zenith Angle

* μ_0 : Cos(SZA)

* Sa : S_0 / AU^2 (S_0 : Solar constant at mean Earth-Sun distance, AU : Earth - Sun distance in Astronomical Units)

* σ : 5.67×10^{-8}

* Ta : air temperature in Kelvin (170K < Ta < 350K)

1.5 성층권오존

1.5.1 관측장비

○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	Kipp & Zonen	MK III	1일	2013년~현재

○ 고 산

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	Kipp & Zonen	MK III	1일	2011년~현재

○ 포 향

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	SCI-TEC	MK II	1일	1994~2017년
오존연직 분포	오존존데	ENSCI & SPC	ECC	주 1회	1995년~현재



○ 서 울(위탁관측소)

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	SCI-TEC	MK-IV	1일	1997년~현재 (연세대학교)
오존전량	Dobson 분광광도계	Ealing	Beck #124	일 6회 Direct-오전, 정오, 오후 Zenith-오전, 정오, 오후	1984년~현재 (연세대학교)
오존연직 분포	110 GHz 마이크로파 수신기	자체개발	SORAS	15분	2008년~현재 (숙명여자대학교)

1.5.2 성층권 오존 자료

관측요소	자료통계 방법
오존전량	< 오존분광도계 > - 태양광 중 6개 파장에 대한 광도를 참조 값과 비교하여 오존전량 산출 - 일평균 • 2018년 이전(고산은 2019년 이전) : 일평균 오존전량(OZAVG 파일 일 평균값) 중 편차가 50 [DU] 이하 이고, 계측상한, 하한을 벗어나지 않은 자료 • 2018년 이후(고산은 2019년 이후) : O3Brewer 소프트웨어를 사용해 보정된 일평균 자료 중 편차가 50 [DU] 이하이고, 계측상한, 하한을 벗어나지 않은 자료 - 월평균 : 매월 10일 이상의 일 자료가 있을 경우 일 대푯값의 평균값 - 연평균 : 월평균이 10개월 이상 존재할 경우의 월평균에 대한 평균값
오존연직분포	< ECC 오존존데 > - 관측일 중 30 km까지 정상적으로 관측을 성공한 자료를 사용하여 분석

1.5.3 오존전량 관측값 보정

성층권오존은 매년 세계자료센터(World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre; WOUDC)에 관측값을 보고하고 있으며, 오존전량의 경우 O3Brewer 자료처리 소프트웨어 (<http://www.o3soft.eu/o3brewer.html>)의 사용을 권장하고 있다. O3Brewer 자료처리 소프트웨어는 10일 전후의 SL(할로젠램프) 측정값과 기기 상수값들을 바탕으로 오존값을 보정하며 WOUDC 제출 포맷으로 자료를 생산해 준다. 이를 통해 더욱 정확한 오존전량 관측값을 안정적으로 얻을 수 있다. 과거에는 기기 상수값의 불확실성으로 인해 O3Brewer 자료처리 소프트웨어를 사용한 관측값 보정을 적용하지 않았지만, 2019년부터는(안면도의 경우 2018년부터) 장비 검교정 전문가가 직접 설정한 기기 상수값을 사용하여 안면도와 고산 모두 O3Brewer 자료처리 소프트웨어를 통한 관측값 보정을 적용하고 있다.



1.6 자외선

1.6.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
자외선A	UVA-Detector	Solarlight	#501	10분	2012년~현재 (울릉도)
					2007년~현재 (안면도)
					2009년~현재 (포 항)
					2012년~현재 (고 산)
자외선B	UV-Biometer	Solarlight	#501	10분	2012년~현재 (울릉도)
					1999년~현재 (안면도)
					1999년~현재 (포 항)
총자외선	Brewer 분광광도계	SCI-TEC	MK-IV	상시	2011년~현재 (고 산)
					2004년~현재 (서울, 연세대학교)

1.6.2 자외선 자료통계방법

관측요소	자료통계 방법
자외선A	- 매일 10분 간격으로 144개 원시 파일 생산 자외선A : 10분 누적값 (단위: J/cm ²) 자외선B : 10분 누적값 (단위: MED) - 원시자료 품질관리 수행 <ul style="list-style-type: none"> • 관측오류 결측 처리 • 계측 하한, 계측 상한 값을 벗어날 경우 오류처리 • 기기상태 오류 <ul style="list-style-type: none"> - 관측센서온도가 24℃~26℃를 벗어날 경우 오류 처리 • Tropospheric Ultraviolet-Visible (TUV) radiation model (V. 5.3) 값 보다 클 경우 오류 값 처리(75° 이하)
자외선B	- 품질관리를 통과한 원시자료가 80% 이상일 때 자외선A, 자외선B 시간 누적값, 시간 최댓값 산출 1시간 누적값 : 자외선A (단위: MJ/m ²), 자외선B (단위: kJ/m ²) 1시간 최댓값 : 자외선A, 자외선B (W/m ²) - 시간자료 중 80% 이상 존재할 때 자외선A, 자외선B 일 누적값, 일 최댓값 산출 일 누적값 : 자외선A (단위: MJ/m ²), 자외선B (단위: kJ/m ²) 일 최댓값 : 자외선A, 자외선B (W/m ²) - 매월 80% 이상의 일 자료가 있을 경우 일 누적값의 월 평균값, 일 최댓값의 월평균 산출 - 매년 80% 이상의 월 자료가 있을 경우 연 평균값 산출



1.7 총대기침적

1.7.1 관측장비

관측요소	장비명	제작사	모델명	관측기간
건성침적, 습성침적	강수자동측정시스템	Eigenbrodt	NMO 191/ KSDSC	2012년~현재 (안면도)
		KNR	APK9900	2014년~현재 (고 산)
		KNR	APK9900	2014년~현재 (울릉도)
		KNR	Aqua, JP/RM8300	2007~2016년 (울 진)
산성도	산성도측정기	Thermo	Orion 3~Star	2009년~현재 (안면도)
				2009년~현재 (고 산)
				2009년~현재 (울릉도)
				2009~2016년 (울 진)
전기전도도	전기전도도 측정기	Thermo	Orion 3~Star	2009년~현재 (안면도)
				2009년~현재 (고 산)
				2009년~현재 (울릉도)
				2009~2016년 (울 진)
강수 이온성분 (9종 : F ⁻ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	이온크로마토 그래피(IC)	Dionex	ICS-2000	2005년~현재 (안면도)

1.7.2 총대기침적 자료통계방법

관측요소	자료통계 방법										
산성도	<ul style="list-style-type: none"> - 당일 9시부터 익일 9시까지 강수량이 0.5 mm 이하 시료, 제외 24시간 이상채취된 자료 제외 - 아래 이온밸런스법과 전기전도도 균형을 동시에 만족하는 경우에 이용 <p>〈 이온 차의 허용범위 검사〉</p> <ul style="list-style-type: none"> - 총 이온농도 (CE+AE) 크기에 따른 이온 차의 허용 범위(Acceptable Ion Difference, AID)를 기준으로 자료의 타당성 판단 $IonDifference(\%) = \frac{(CE - AE)}{(CE + AE)} \times 100$										
전기전도도	<p>표 1. 총 이온 농도(CE+AE)에 따른 이온 차의 허용범위(AID) (WMO, 2004)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">CE+AE (ueq/L)</th> <th style="width: 50%;">Acceptable Ion Difference(AID, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[CE+AE] ≤ 50</td> <td>AID ≤ ±60</td> </tr> <tr> <td>50 < [CE+AE] ≤ 100</td> <td>AID ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>100 < [CE+AE] ≤ 500</td> <td>AID ≤ ±15</td> </tr> <tr> <td>500 < [CE+AE]</td> <td>AID ≤ ±10</td> </tr> </tbody> </table>	CE+AE (ueq/L)	Acceptable Ion Difference(AID, %)	[CE+AE] ≤ 50	AID ≤ ±60	50 < [CE+AE] ≤ 100	AID ≤ ±30	100 < [CE+AE] ≤ 500	AID ≤ ±15	500 < [CE+AE]	AID ≤ ±10
CE+AE (ueq/L)	Acceptable Ion Difference(AID, %)										
[CE+AE] ≤ 50	AID ≤ ±60										
50 < [CE+AE] ≤ 100	AID ≤ ±30										
100 < [CE+AE] ≤ 500	AID ≤ ±15										
500 < [CE+AE]	AID ≤ ±10										
강수이온성분	<p>〈 전기전도도 차 허용범위 검사〉</p> <ul style="list-style-type: none"> - 직접 측정된 전기전도도(ECmea)와 이론적으로 계산한 전기전도도(ECcal) 비교 - 전기전도도 차의 허용범위(Acceptable Conductivity Difference, ACD)를 기준으로 타당성 판단 $ConductivityDifference(\%) = \frac{EC_{cal} - EC_{mea}}{EC_{mea}} \times 100$ <p>표 2. 측정된 전기전도도에 따른 전기전도도 차의 허용범위(ACD) (WMO, 2004)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">ECmea (μS/cm)</th> <th style="width: 50%;">Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ECmea ≤ 5</td> <td>ACD ≤ ±50</td> </tr> <tr> <td>5 < ECmea ≤ 30</td> <td>ACD ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>30 < ECmea</td> <td>ACD ≤ ±20</td> </tr> </tbody> </table> <p>〈 이온 당량농도비 검사〉</p> <ul style="list-style-type: none"> - 양이온의 당량농도(Cation Equivalents, CE) 총합과 음이온의 당량농도(Anion Equivalents, AE) 총합은 같음 - Park et al.(2003)에 따라 이온 비가 ±30%를 벗어나는 자료는 제거함 $70 < IonRatio(\%) = \frac{CE}{AE} \times 100 < 130$	ECmea (μS/cm)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)	ECmea ≤ 5	ACD ≤ ±50	5 < ECmea ≤ 30	ACD ≤ ±30	30 < ECmea	ACD ≤ ±20		
ECmea (μS/cm)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)										
ECmea ≤ 5	ACD ≤ ±50										
5 < ECmea ≤ 30	ACD ≤ ±30										
30 < ECmea	ACD ≤ ±20										



1.7.1 강수 국제 비교실험

WMO/GAW 산하 세계 강수화학센터(World Data Centre for Precipitation Chemistry; WDCPC)는 QA/SAC(Quality Assurance/Science Activity Center)를 통하여 세계 산성비 관측소의 산성강하물 분석 능력을 평가하고 있다. 평가방법은 제조한 미지시료(Sample) 3개를 GAW 사업에 참여하는 실험실에 배송한 후 각국의 실험실에서는 지정된 마감 시일 내에 pH, 전기전도도, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 등 11개 요소의 분석결과를 제출한다. 이 결과는 GAW 지침서의 DQOs(Data Quality Objective) 방법에 의해 자료를 검증하게 되며, 4 분위수 통계방법에 의한 상대평가로 각국 실험실을 평가하게 된다.

각국 실험실의 평가결과는 QA/SAC 홈페이지 <http://www.qasac-america.org/>를 통해 게재되며, WDCPC 보고서로 발간된다. 부록그림 4는 강수화학 국제비교실험에서 분석결과를 링-다이어그램으로 나타낸 예시자료이다. 분석값 중 초록색은 참여 실험실이 제출한 중앙값에 근접한 신뢰성 있는 값이다. 2020년 10월에 시행된 제 62차 강수화학 국제비교실험은 45개국, 67개 실험실에서 실시하였고, 부록그림 5는 미지시료 분석한 결과를 나타내었다. 강수분석 결과는 국제비교실험 값의 중앙값 근처에 분포하여 신뢰성 있는 결과를 보여주었다.

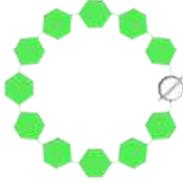
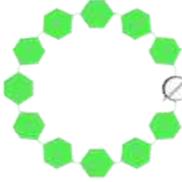
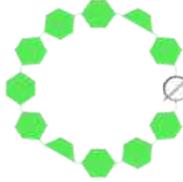


Table 1. Precipitation Chemistry - Data Quality Objectives

Measurement	DQO (before January 2018)	DQO (effective January 2018)
pH < 4.00	± 0.07 units	± 0.05 units
pH: 4.00 - 4.99	± 0.07 units	± 0.07 units
pH ≥ 5.00	± 0.07 units	± 0.10 units
conductivity	$\pm 7\%$	$\pm 7\%$
acidity	$\pm 25\%$	$\pm 25\%$
sulfate	$\pm 7\%$	$\pm 5\%$
nitrate	$\pm 7\%$	$\pm 5\%$
ammonium	$\pm 7\%$	$\pm 7\%$
fluoride	none	$\pm 20\%$
chloride	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
sodium	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
potassium	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
calcium	$\pm 15\%$	$\pm 15\%$
magnesium	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$

부록그림 4. 강수화학 국제비교실험 분석결과 링-다이아그램 예시자료 및 변경된 DQO(Data Quality Objectives) 자료.



미지시료 1	미지시료 2	미지시료 3
 <p data-bbox="330 631 471 661">분석요소 Good</p>	 <p data-bbox="666 631 807 661">분석요소 Good</p>	 <p data-bbox="980 626 1173 701">pH, F Satisfactory 그 외 분석요소 Good</p>

부록그림 5. 국립기상과학원 제 62차 강수화학 국제비교실험 참여 결과.

[부록 2] 지구대기감시 관측자료

2.1 온실가스 평균자료

□ 이산화탄소(CO₂) [단위: ppm]

※ WMO 척도가 WMO-X2007에서 WMO-X2019로 변경되어 모든 CO₂ 값이 척도에 따라 업데이트 됨

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	373.7	374.0	372.9	373.6	370.8	366.3	365.4	361.7	361.9	-	-	371.3	369.2
2000	375.0	375.4	375.4	-	372.7	369.6	368.7	367.2	365.8	370.0	374.3	375.7	371.8
2001	378.7	379.1	379.2	380.2	377.6	373.8	368.1	361.2	366.4	376.2	377.7	377.0	374.6
2002	379.1	379.7	377.8	378.6	377.0	372.2	373.1	373.8	374.4	379.1	384.4	387.8	378.1
2003	387.9	386.7	386.5	385.8	382.8	378.6	376.8	374.0	371.3	380.7	388.4	384.1	382.0
2004	383.0	384.4	386.1	387.1	383.3	380.8	376.5	371.6	376.4	380.1	377.6	383.1	380.8
2005	388.5	389.6	390.3	389.6	389.5	385.2	380.8	-	380.5	386.6	390.5	392.2	387.6
2006	392.8	389.3	387.8	391.7	391.7	386.4	381.4	378.4	379.9	387.2	389.9	388.5	387.1
2007	390.7	392.5	391.8	393.0	391.0	386.5	384.9	382.7	383.5	387.4	391.3	394.0	389.1
2008	392.8	392.1	394.0	396.0	394.6	390.5	385.7	381.2	382.1	388.1	391.1	392.0	390.0
2009	394.0	393.3	393.3	396.2	394.3	389.9	385.6	380.4	382.3	389.9	394.4	396.0	390.8
2010	396.5	396.5	395.8	393.8	392.8	392.2	389.8	387.3	388.6	393.3	394.9	395.4	393.1
2011	397.6	398.1	397.7	398.9	396.8	391.1	387.5	386.7	389.0	395.1	397.2	397.0	394.4
2012	399.5	401.2	402.6	404.9	403.9	399.1	396.7	394.0	394.4	400.3	402.7	404.3	400.3
2013	407.4	407.5	406.6	408.7	407.7	400.3	398.6	396.4	394.4	400.4	404.5	406.6	403.3
2014	407.9	408.7	409.2	410.0	408.6	404.3	400.2	395.3	396.8	403.1	405.0	406.6	404.6
2015	410.0	411.2	410.6	411.2	409.3	405.2	402.7	397.3	396.6	405.2	411.5	412.1	406.9
2016	411.8	412.0	414.0	416.1	411.9	407.0	403.9	401.5	407.4	413.8	414.0	414.1	410.6
2017	415.2	415.6	417.4	418.3	414.0	410.0	409.9	407.0	407.1	412.1	414.3	416.1	413.1
2018	417.5	417.7	419.4	420.1	416.3	412.4	410.5	406.7	407.8	415.5	418.2	417.3	415.0
2019	419.8	421.6	421.2	421.3	419.4	415.5	412.3	409.0	411.9	417.8	419.9	422.8	417.7
2020	424.3	423.6	423.5	424.2	423.4	418.5	414.4	413.6	414.8	418.7	421.9	423.6	420.4



○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	400.7	401.4	401.0	403.0	401.9	397.2	394.7	392.5	393.7	398.7	400.6	401.0	398.9
2013	402.9	404.0	404.4	406.3	406.2	401.6	398.8	396.6	395.4	400.5	403.2	403.2	401.9
2014	404.8	405.5	406.2	406.9	405.8	403.3	400.6	396.4	395.5	400.9	404.5	405.0	403.0
2015	406.1	407.7	409.1	409.9	408.4	405.3	402.3	398.3	398.5	405.2	409.9	411.2	406.0
2016	411.6	411.2	412.6	414.1	412.5	409.3	404.4	399.5	402.8	408.8	410.5	411.8	409.1
2017	413.0	413.7	416.0	416.9	413.0	409.4	408.6	405.1	404.7	410.0	413.2	414.0	411.5
2018	415.2	416.0	416.8	418.3	416.2	412.0	409.9	408.2	409.2	413.8	416.3	416.4	414.0
2019	418.0	419.6	420.2	420.6	418.3	413.9	412.2	411.1	411.0	415.3	417.7	419.3	416.4
2020	421.7	421.9	421.8	422.6	420.9	416.0	413.6	413.6	414.4	417.9	420.4	421.6	418.9

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2014	405.4	406.4	406.9	407.1	403.5	395.8	395.3	397.8	(397.3)	400.9	404.4	405.7	402.2
2015	407.5	408.4	408.8	409.6	407.9	401.5	397.5	395.7	396.0	402.8	407.2	408.4	404.3
2016	410.5	411.7	412.7	414.2	410.8	405.6	402.0	397.0	399.6	407.4	411.5	412.3	407.9
2017	412.9	414.4	415.5	416.2	412.7	408.9	406.6	399.5	400.5	409.2	413.6	414.8	410.4
2018	416.1	417.3	418.1	420.0	418.2	413.4	409.7	406.1	408.3	413.7	415.6	416.1	414.4
2019	417.8	419.8	420.1	420.3	418.4	411.9	409.7	407.9	407.5	413.6	417.4	418.8	415.3
2020	420.3	421.3	421.6	422.9	419.1	411.0	412.7	414.7	412.5	416.0	419.1	420.0	417.6

○ 독도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2014	-	-	-	410.3	-	402.8	398.7	392.6	392.6	400.2	404.3	405.2	400.8
2015	406.6	407.7	409.4	411.3	409.2	401.1	397.3	-	-	402.2	405.9	408.0	405.9
2016	409.8	409.9	-	-	-	-	396.4	398.6	400.8	404.9	408.6	410.2	404.9
2017	410.9	412.2	414.1	415.0	-	-	-	-	-	-	-	-	413.1
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	412.5	414.4	415.4	414.1
2019	417.7	419.0	-	419.2	417.6	412.6	410.1	407.8	-	412.5	416.4	417.8	415.1
2020	419.5	420.6	420.9	421.7	419.5	410.4	407.1	410.6	412.4	416.7	419.7	420.2	416.6

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 메탄(CH₄) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	1869	1863	1851	1844	1837	1865	1888	1864	1868	1861
2000	1864	1878	1888	1875	1859	1840	1827	1819	1859	1868	-	-	1858
2001	-	-	-	-	1841	1850	1809	1838	1874	1874	1861	1864	1851
2002	1877	1875	1868	1864	1863	1858	1825	1826	1869	1871	1870	1876	1862
2003	1895	-	-	-	-	1865	1869	1831	-	-	1888	1898	1874
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	1870	-	1873	1873	1872
2005	1871	1866	1874	1865	1860	1859	1812	1823	1862	-	-	-	1855
2006	1857	1862	1857	1848	1870	1881	1832	1813	1881	1901	1890	1901	1866
2007	1905	1901	1892	1892	-	-	-	1831	1900	-	1900	1897	1890
2008	1900	1909	1913	1901	1893	1896	1840	1844	1856	1901	1910	1910	1889
2009	1906	1916	1910	1906	1895	1881	1869	1879	1908	1909	1905	1915	1900
2010	1918	1913	1920	1907	1884	1902	1851	1863	1918	1913	1912	1917	1901
2011	1911	1922	1907	1906	1903	1895	1877	1870	1925	1919	1920	1925	1907
2012	1929	1931	1932	1918	1927	1906	1878	1881	1927	1929	1933	1943	1919
2013	1948	1953	1948	1932	1932	1931	1892	1885	1931	1940	1937	1942	1931
2014	1944	1953	1943	1938	1941	1939	1885	1910	1962	1952	1964	1962	1941
2015	1970	1961	1954	1952	1937	1942	1925	1906	1972	1956	1979	1970	1952
2016	1967	1964	1968	1965	1966	1960	1929	1920	1984	1991	1991	1980	1965
2017	1984	1972	1975	1966	1962	1955	1951	1958	1979	1977	1977	1987	1970
2018	1983	1981	1983	1969	1972	1964	1948	1951	1981	1981	1988	1989	1974
2019	1998	2002	1989	1970	1984	1993	1958	1979	2011	1998	1998	2013	1991
2020	2020	2007	1993	1979	1984	2016	1979	1936	2005	2028	2013	2019	1998

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2014	1934	1941	1932	1923	1935	1932	1895	1915	1955	1932	1919	1932	1929
2015	1939	1945	1947	1934	1933	1934	1886	1887	1945	1950	1951	1963	1934
2016	1955	1946	1952	1953	1946	1905	1874	1924	1946	1940	1953	1959	1938
2017	1957	1955	1958	1954	1954	1917	1886	1934	1968	1959	1957	1964	1947
2018	1965	1971	1966	1953	1957	1927	1875	1891	1944	1968	1970	1975	1947
2019	1979	1984	1985	1968	1966	1978	1932	1912	1960	1979	1978	1985	1967
2020	1998	1992	1982	1972	1967	1971	1920	1899	1983	2007	1988	1996	1973

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2018	1953	1959	1961	1953	1947	1921	1895	1911	1946	1958	1958	1958	1943
2019	1967	1978	1972	1957	1958	1956	1936	1934	1951	1958	1968	1980	1960
2020	1981	1982	1979	1967	1968	1971	1943	1942	1987	1996	1993	1998	1976



□ 아산화질소(N₂O) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	-	-	315.4	314.7	315.0	315.6	315.5	315.2
2000	315.5	315.7	315.7	315.9	316.0	315.7	315.6	315.7	315.8	316.2	316.3	316.8	315.9
2001	317.2	316.1	315.9	316.2	315.9	316.1	316.3	316.0	315.8	316.1	316.4	316.3	316.2
2002	316.2	316.3	316.5	316.5	316.9	316.9	316.5	316.7	316.9	317.3	317.6	317.6	316.8
2003	317.4	-	317.9	318.5	318.3	318.1	318.0	317.6	-	-	-	-	318.0
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	322.4	323.4	322.9
2008	323.9	321.8	320.6	320.5	321.6	323.5	324.1	324.7	325.0	323.9	323.0	322.6	322.9
2009	322.8	323.3	323.7	323.8	323.6	323.6	324.4	324.5	324.2	324.2	324.0	324.2	323.9
2010	324.1	324.0	324.7	324.7	324.3	324.2	324.6	325.3	325.4	325.0	326.0	326.2	324.9
2011	324.9	324.4	324.4	324.6	324.9	324.6	324.8	325.2	-	-	-	326.2	324.9
2012	326.4	326.1	326.1	326.5	326.3	325.9	326.4	-	-	-	-	-	326.2
2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	329.1	330.1	330.8	330.8	330.6	330.2	330.2	330.7	330.2	329.8	330.6	330.3
2017	330.6	330.0	330.5	330.8	330.5	331.0	332.4	332.8	332.1	331.7	331.6	332.0	331.3
2018	332.3	332.6	333.4	333.2	333.1	333.0	332.9	333.0	332.8	332.8	333.1	332.9	332.9
2019	332.5	333.1	333.7	333.6	334.0	334.6	334.4	334.7	335.0	334.7	334.2	333.8	334.0
2020	334.0	334.5	334.6	334.7	335.4	336.0	335.6	334.8	335.2	335.4	334.9	334.5	335.0

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	325.2	325.3	325.7	326.0	326.0	325.7	325.4	326.1	326.4	-	-	325.8
2013	-	-	325.7	326.2	327.1	326.9	326.1	326.1	326.0	-	-	-	326.3
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	330.8	330.9	331.0	330.5	329.9	330.6
2017	329.9	330.0	330.5	330.8	330.6	330.6	330.7	331.6	332.2	332.1	331.8	331.7	331.0
2018	331.9	332.3	332.5	332.4	332.4	331.8	331.0	331.2	332.1	332.9	333.3	333.0	332.2
2019	332.8	333.2	333.4	333.5	333.8	334.0	333.7	334.1	334.4	333.8	333.6	333.8	333.7
2020	334.1	334.3	334.1	333.8	334.4	335.6	335.7	334.8	335.2	335.0	334.6	334.6	334.7

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2019	-	-	-	-	333.1	333.4	333.8	333.2	332.3	332.5	332.7	333.1	333.0
2020	333.9	333.6	333.3	334.6	335.5	335.3	335.3	335.4	335.0	334.3	334.1	334.4	334.5

□ 육불화황(SF₆) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2007	-	-	6.2	6.3	6.3	6.5	6.6	-	-	-	6.7	6.8	6.5
2008	6.4	6.3	6.8	-	-	-	6.7	-	-	6.8	7.0	7.1	6.7
2009	7.0	7.2	7.1	7.2	7.3	7.4	7.3	7.5	7.3	7.3	7.3	7.0	7.2
2010	7.3	7.2	7.4	7.6	8.0	-	-	-	-	-	-	-	7.5
2011	-	7.4	7.5	7.7	7.7	8.0	8.2	8.2	7.9	7.9	-	-	7.8
2012	8.4	7.8	7.8	7.9	7.9	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.1	8.1	8.0
2013	8.1	8.1	8.1	8.1	8.3	8.4	8.1	8.1	8.2	8.3	8.3	-	8.2
2014	8.3	8.4	8.7	-	-	-	-	-	-	-	9.1	8.8	8.7
2015	8.7	9.1	9.2	9.2	9.1	9.3	9.1	9.6	9.8	9.0	9.5	9.3	9.2
2016	9.2	9.1	9.2	9.4	9.6	9.7	9.4	9.4	9.5	9.6	-	-	9.4
2017	-	9.5	9.6	9.4	9.8	9.9	9.9	9.9	9.8	9.7	9.7	9.8	9.7
2018	9.8	9.8	9.8	9.9	10.0	10.0	9.8	9.8	9.9	9.9	10.0	10.1	9.9
2019	10.1	10.1	10.1	10.3	10.4	10.6	10.4	10.3	10.4	10.4	10.3	10.4	10.3
2020	10.4	10.4	10.4	10.5	10.6	10.7	10.5	10.5	10.6	10.5	-	-	10.5

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2017	9.4	9.4	9.4	9.5	-	-	9.6	9.6	9.6	9.7	9.7	9.8	9.6
2018	-	-	-	-	9.7	10.1	10.0	10.0	9.9	9.9	10.0	10.0	10.0
2019	10.0	10.0	10.1	10.1	10.1	10.5	10.7	10.5	10.4	10.4	10.4	10.3	10.3
2020	-	-	-	10.2	10.4	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.7	10.8	10.5

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2017	9.4	9.4	9.4	9.5	-	-	9.6	9.6	9.6	9.7	9.7	9.8	9.6
2018	-	-	-	-	9.7	10.1	10.0	10.0	9.9	9.9	10.0	10.0	9.9
2019	10.0	10.0	10.1	10.1	10.1	10.5	10.7	10.5	10.4	10.4	10.4	10.3	10.3
2020	-	-	-	10.2	10.4	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.7	10.8	10.5

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄



□ 염화불화탄소-113(CFC-113) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.2	79.3	78.8
2008	78.6	76.6	77.7	78.7	76.1	-	-	-	75.7	76.1	76.6	-	77.0
2009	77.8	80.0	78.2	78.4	76.5	77.3	80.1	77.8	79.8	79.7	80.1	-	78.7
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	-	-	78.4	-	78.2	77.9	78.5	80.7	75.1	76.3	75.7	75.3	77.3
2012	74.9	76.1	77.2	78.7	-	-	74.4	-	-	74.3	74.1	74.2	75.5
2013	74.7	74.2	73.1	73.3	73.6	73.7	74.0	74.2	76.6	-	-	73.6	74.1
2014	73.7	-	72.4	73.4	73.6	72.1	72.0	72.2	-	71.5	-	-	72.6
2015	-	74.1	76.3	-	72.3	72.8	71.1	70.8	71.0	-	71.2	71.3	72.3
2016	71.0	71.7	71.2	71.8	72.0	71.9	71.5	70.9	71.0	71.1	71.4	71.3	71.4
2017	71.7	72.0	72.1	70.8	71.3	71.6	71.3	71.2	71.3	70.9	70.2	70.0	71.2
2018	70.0	70.1	70.4	70.4	70.6	70.6	70.2	70.2	69.7	69.7	70.1	71.0	70.3
2019	71.0	70.9	70.9	70.8	69.6	69.3	68.9	68.9	69.5	69.3	-	-	69.9
2020	-	-	-	-	-	69.1	69.1	68.9	69.0	68.8	68.6	68.9	68.9

□ 염화불화탄소-11(CFC-11) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	267.6	268.8	268.8	269.6	270.0	269.7	268.2	265.5	266.9	266.9	264.4	267.9
2000	265.0	264.5	264.6	263.6	266.0	266.9	264.9	268.1	267.9	265.1	264.8	-	265.6
2001	266.0	266.5	265.3	266.0	265.9	264.4	265.0	268.1	265.8	265.9	264.2	263.7	265.6
2002	263.0	263.1	263.9	265.0	265.8	268.9	267.6	266.1	266.2	261.9	260.0	260.7	264.4
2003	259.6	259.9	257.5	261.1	263.0	261.6	261.4	259.4	258.7	258.2	258.3	-	259.9
2004	-	-	-	267.6	262.6	260.4	255.6	256.0	255.8	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	248.5	244.7	244.5	247.6	246.3
2009	246.2	252.6	250.6	246.1	243.2	241.4	246.8	246.1	246.6	248.4	244.9	-	246.6
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	-	235.0	238.2	238.5	234.3	-	-	238.3	233.2	-	236.3
2015	-	233.5	235.4	-	239.9	242.3	233.4	237.1	238.9	-	231.0	228.6	235.6
2016	-	231.7	229.0	232.1	234.1	234.7	230.8	231.9	232.6	232.5	233.3	231.5	232.2
2017	230.5	230.0	231.1	232.0	233.4	233.6	230.5	230.8	232.9	232.0	228.5	227.5	231.1
2018	227.2	227.2	228.0	229.5	230.6	230.7	228.1	227.8	227.7	228.1	228.9	231.8	228.8
2019	231.4	231.8	232.0	232.4	230.0	229.7	226.8	226.2	227.0	227.1	227.3	227.2	229.1
2020	226.9	226.5	224.6	224.2	224.2	223.8	222.8	222.0	223.1	223.5	223.1	222.7	224.0

□ 염화불화탄소-12(CFC-12) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	534.4	534.8	535.0	534.8	535.5	532.6	540.4	538.0	540.7	537.9	538.3	536.6
2000	540.8	541.1	541.6	540.1	544.5	540.2	538.5	538.5	540.4	541.7	540.5	535.1	540.3
2001	540.8	536.8	541.1	534.7	540.4	539.6	540.3	542.7	537.9	541.7	541.1	538.7	539.7
2002	540.7	540.1	540.6	545.2	544.6	544.2	545.1	546.1	548.8	545.3	545.3	544.8	544.2
2003	545.9	540.1	546.6	543.0	544.3	539.5	545.0	543.0	-	-	-	-	543.4
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	548.2	544.9	548.3	548.4	547.5
2005	544.5	548.3	549.1	543.3	540.6	-	-	-	-	-	-	-	545.2
2006	-	-	-	-	-	547.3	549.9	544.7	-	-	-	-	547.3
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	528.1	530.3	531.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	529.9
2013	-	-	524.1	525.4	525.5	526.2	524.4	-	-	-	-	524.8	525.1
2014	526.3	522.9	522.2	532.1	531.4	521.3	520.9	522.7	-	519.0	515.3	-	523.4
2015	-	-	-	-	515.2	516.9	513.2	516.0	517.1	-	521.1	520.8	517.2
2016	-	514.1	513.6	515.6	516.7	516.7	514.7	514.5	514.7	514.9	514.9	514.5	515.0
2017	514.9	514.0	514.6	510.8	509.6	510.1	509.2	508.7	509.6	508.7	503.8	502.4	509.7
2018	503.2	503.4	504.3	505.3	505.1	504.9	504.0	503.6	499.9	500.0	-	-	503.4
2019	-	-	-	-	-	497.6	496.4	496.3	498.9	498.4	498.5	498.8	497.8
2020	499.2	498.8	498.6	498.1	497.1	496.8	496.0	495.6	495.7	495.3	495.4	495.3	496.8

※ "-"은 장비 수리, 점검, 이상자료 등에 의한 결측을 나타냄



2.2 반응가스

- ※ 2007년 이전 안면도 자료 중 일부는 관측환경, 자료 이상 등으로 인해 품질처리로 무효처리됨
- ※ 안면도 자료(2014. 3.~2017.2.)는 관측환경에 따른 품질처리로 무효 처리됨
- ※ 한 해 6개월 이하의 월평균 자료로 산출한 연 평균값은 ()로 표시함

□ 오존(O₃) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1998	-	-	50.9	47.0	57.7	53.4	-	18.0	21.8	20.3	16.4	35.7	-
1999	30.0	28.1	16.9	41.2	51.2	43.7	42.3	60.8	61.3	56.9	50.0	46.5	44.1
2000	39.4	49.4	56.6	56.1	54.2	41.0	41.6	33.9	34.3	28.3	23.3	18.5	39.7
2001	25.5	24.2	-	-	45.5	40.0	28.1	34.6	39.5	62.6	54.4	47.1	-
2002	50.8	57.3	66.8	77.5	80.2	70.2	39.1	36.4	54.8	46.6	38.5	32.9	54.3
2003	36.8	38.3	45.8	50.6	57.6	59.2	43.4	43.9	48.2	48.7	32.0	37.3	45.2
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	30.9	34.7	39.6	48.4	47.4	40.2	43.4	24.5	48.1	46.0	40.7	32.7	39.7
2008	32.8	45.5	50.4	67.3	58.2	53.4	32.3	42.6	49.1	45.0	30.9	27.9	44.6
2009	29.5	32.1	39.5	55.5	56.0	50.9	38.6	36.8	46.0	45.0	29.4	15.7	39.6
2010	33.5	35.4	42.7	49.3	56.8	60.7	40.3	36.6	40.5	44.8	42.3	34.1	43.1
2011	36.9	40.5	47.9	54.9	58.3	53.8	37.5	38.8	45.8	42.7	34.2	28.0	43.3
2012	28.0	35.7	44.7	50.3	58.3	43.2	33.7	30.2	50.4	41.5	29.5	23.4	39.1
2013	33.5	36.5	44.2	51.5	56.8	50.3	34.3	39.9	42.2	32.6	26.9	26.3	39.6
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	57.7	59.2	56.4	41.7	42.7	52.7	38.2	34.8	30.6	-
2018	32.2	40.1	47.0	49.5	52.5	51.4	28.3	39.9	43.1	41.7	37.9	31.1	41.2
2019	36.2	40.5	48.9	46.5	59.4	48.0	37.8	44.7	37.2	40.3	34.3	32.5	42.2
2020	34.0	38.0	46.3	50.4	48.8	49.6	38.8	26.6	42.6	43.5	36.2	36.1	40.9

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	12.4	44.3	36.1	28.1	52.4	49.8	36.6	37.4	-
2013	47.1	44.1	56.2	64.1	52.1	33.3	19.2	21.7	44.8	39.9	35.5	37.3	41.3
2014	36.9	42.0	46.8	64.6	66.7	55.6	32.9	33.3	43.3	40.6	39.3	35.4	44.8
2015	39.7	50.0	57.2	62.6	51.1	49.6	38.8	-	43.8	48.0	34.6	27.6	-
2016	30.3	47.0	50.3	52.6	55.2	40.9	21.7	27.7	34.2	39.9	37.2	34.5	39.3
2017	40.8	51.2	56.7	65.4	59.2	-	28.8	40.7	48.9	44.0	41.9	36.6	-
2018	38.2	45.6	50.8	52.8	49.8	45.6	16.9	26.9	44.6	48.0	44.1	37.9	41.8
2019	42.6	47.5	57.7	55.4	64.4	50.0	34.9	37.4	37.0	45.9	40.9	37.3	45.9
2020	39.3	43.2	46.9	56.4	48.1	41.1	31.0	21.5	44.4	49.3	40.4	39.0	41.7

□ 일산화탄소(CO) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1998	-	-	218.5	171.7	192.1	241.0	222.9	319.9	359.9	258.0	312.3	351.7	-
1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	-	-	435.6	-	-	241.8	215.1	159.4	195.6	245.7	331.8	434.6	-
2001	318.2	253.8	278.3	286.2	276.5	328.7	331.9	309.6	297.3	280.4	306.1	348.5	301.3
2002	400.3	394.4	405.4	407.2	354.6	319.9	243.5	260.9	265.3	322.3	268.6	306.3	329.1
2003	345.8	430.2	298.7	262.0	282.5	366.4	334.2	242.9	349.6	365.4	360.7	458.2	341.4
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	246.4	302.4	312.4	311.0	304.5	216.1	227.3	140.4	270.2	270.6	330.5	339.5	272.6
2008	250.0	227.4	254.4	194.2	126.3	204.1	229.0	240.7	222.9	280.1	215.3	236.3	223.4
2009	243.3	352.5	256.0	301.0	216.8	198.1	182.6	268.3	237.6	219.6	212.0	290.0	248.2
2010	273.8	286.9	244.0	242.8	287.8	229.6	159.6	179.8	245.6	240.4	281.7	306.2	248.2
2011	254.4	484.0	306.2	294.5	282.9	278.1	126.5	193.4	226.0	301.6	493.6	290.8	294.3
2012	440.3	321.4	321.6	256.5	321.1	212.3	174.1	188.9	267.3	238.5	317.7	353.8	284.5
2013	480.5	372.4	326.3	369.2	319.6	272.8	219.1	229.6	253.2	248.3	303.6	349.7	312.0
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-	183.1	204.6	283.5	240.5	237.6	306.4	-
2018	360.6	307.6	309.7	238.5	212.0	222.2	119.0	158.1	196.7	225.3	351.1	288.2	249.1
2019	390.1	404.2	397.6	255.2	283.2	220.4	187.3	243.9	225.4	250.1	271.4	302.6	286.0
2020	362.0	308.6	280.8	231.0	240.5	226.1	211.5	127.7	251.4	291.3	286.9	288.8	258.9



○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	212.1	131.0	108.5	80.1	148.8	163.4	195.9	188.9	-
2013	247.1	204.9	217.2	208.4	231.4	152.8	81.5	99.4	144.4	152.2	222.6	211.1	181.1
2014	241.3	254.7	209.1	206.9	263.1	199.5	143.7	146.8	188.9	174.9	217.9	211.7	204.9
2015	238.7	245.6	246.9	237.4	179.3	191.9	159.0	206.2	236.3	301.5	265.3	283.4	232.6
2016	295.2	241.2	233.4	249.6	230.6	205.3	136.3	167.3	215.8	199.7	222.2	202.6	216.6
2017	255.8	262.9	287.5	253.6	194.2	219.3	125.9	181.2	221.3	191.7	211.1	234.8	219.9
2018	246.4	263.4	240.3	205.5	182.6	157.2	93.7	119.0	192.6	208.2	235.8	257.3	200.2
2019	294.7	306.8	290.8	217.9	216.5	182.5	137.6	181.2	152.4	177.8	198.5	235.0	216.0
2020	251.9	247.3	197.4	206.4	201.8	152.8	135.0	71.8	193.7	209.1	176.6	203.7	187.3

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2015	-	-	273.4	217.3	208.1	183.0	155.8	171.9	156.4	177.4	184.3	214.0	-
2016	231.4	234.6	241.5	231.1	191.2	168.7	96.1	116.4	108.7	129.1	156.2	156.8	171.8
2017	212.7	238.8	251.7	218.6	210.5	151.0	144.6	107.3	158.5	154.0	190.7	198.9	186.4
2018	212.0	231.0	215.0	216.7	193.8	162.0	116.6	131.7	155.0	152.6	188.2	179.7	179.5
2019	198.2	231.5	231.1	167.2	189.8	158.1	153.9	177.6	131.9	132.3	150.8	195.6	176.5
2020	176.1	207.8	181.2	175.3	166.1	148.1	127.8	118.6	163.5	170.6	177.1	191.2	167.0

□ 질소산화물(NO_x) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1998	-	-	7.6	7.6	7.8	4.2	-	0.7	4.4	4.9	8.4	7.1	-
1999	3.8	3.5	7.7	3.3	1.8	2.8	2.6	3.5	3.9	5.7	5.6	6.1	4.2
2000	8.8	7.4	8.2	10.1	13.3	7.6	5.5	5.3	6.5	11.0	13.6	15.7	9.4
2001	12.3	10.6	8.9	10.0	8.6	6.3	3.4	9.1	9.8	11.2	10.0	8.8	9.1
2002	9.3	9.6	8.1	7.8	6.2	6.8	4.4	4.6	6.1	6.7	10.3	15.9	8.0
2003	13.8	15.4	9.8	9.6	10.6	7.2	8.2	6.8	8.7	7.6	12.5	9.6	10.0
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	6.9	4.6	3.0	2.1	2.4	1.5	1.1	1.3	5.1	6.9	9.9	12.6	4.8
2008	13.3	5.5	9.9	9.3	8.5	7.1	3.5	7.1	7.8	10.1	10.1	7.3	8.3
2009	9.7	10.3	6.4	7.6	7.3	4.5	3.5	5.6	10.7	8.8	8.8	10.9	7.8
2010	8.9	11.0	7.2	9.0	8.3	5.3	2.8	4.3	5.7	8.9	9.2	11.4	7.7
2011	8.2	13.9	7.7	8.8	8.3	6.0	4.7	7.2	9.7	12.3	10.2	8.9	8.8
2012	8.4	8.8	5.8	4.4	7.5	5.4	5.8	8.2	4.9	5.5	8.7	11.4	7.1
2013	7.5	6.7	4.9	4.6	7.6	7.1	3.7	2.5	5.5	7.1	7.4	11.0	6.3
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	7.4	3.8	4.0	2.4	3.5	5.3	6.7	5.8	8.0	-
2018	8.8	6.1	7.0	4.9	4.3	4.4	3.2	3.5	4.3	5.3	8.3	9.8	5.8
2019	7.1	7.2	8.2	7.6	5.2	3.7	2.8	3.6	4.2	-	9.9	8.2	-
2020	8.7	7.3	6.9	5.1	4.7	3.9	3.2	2.3	3.9	5.9	7.0	6.5	5.5

※ 2019. 10. 자료는 WCC-NO_x의 장비비교실험(MetNO2) 참가로 결측함

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	4.2	3.5	2.6	2.7	3.2	3.6	3.7	3.6	-
2013	3.3	3.1	4.0	3.5	4.1	5.0	1.8	2.7	4.9	3.9	3.6	4.4	3.7
2014	3.8	4.0	3.5	3.7	3.3	2.9	2.9	3.0	3.9	4.1	3.8	3.1	3.5
2015	3.9	3.2	5.4	4.4	4.3	3.1	3.9	-	4.0	4.4	4.0	3.9	-
2016	3.9	3.4	3.7	4.5	4.3	3.4	3.1	2.8	4.3	4.7	4.0	3.7	3.8
2017	3.8	-	3.8	-	-	-	-	3.0	3.3	3.4	3.2	3.1	-
2018	3.2	3.3	4.1	3.5	3.2	3.4	2.1	2.9	4.2	3.9	6.0	4.5	3.7
2019	4.5	5.0	6.7	5.1	5.2	4.3	3.3	4.3	4.2	4.0	4.9	4.9	4.7
2020	4.9	4.8	4.3	4.2	4.6	3.9	4.1	2.7	4.8	5.7	5.5	4.4	4.5



□ 이산화황(SO₂) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1998	-	-	3.1	1.7	3.3	2.0	-	1.4	3.1	2.0	3.1	3.9	-
1999	2.4	1.6	2.1	-	-	1.0	0.9	0.8	1.1	1.6	2.1	2.8	-
2000	-	-	-	0.8	0.5	0.8	0.9	0.7	0.7	1.6	3.0	3.9	1.4
2001	3.6	3.0	2.3	1.7	1.5	0.7	-	1.1	1.0	1.7	2.4	2.7	2.0
2002	3.0	2.7	1.6	1.5	1.3	1.4	0.7	0.7	1.4	-	2.5	3.0	1.8
2003	3.8	3.5	2.9	1.6	2.0	0.8	0.5	0.8	1.2	2.6	2.3	4.6	2.2
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	6.8	4.6	3.2	2.4	2.7	1.7	1.5	-	1.4	2.7	6.0	6.9	3.6
2008	5.5	5.2	4.1	4.0	2.6	1.4	0.9	1.8	2.6	2.9	4.4	3.9	3.3
2009	3.9	3.9	2.6	3.7	2.5	1.5	1.1	1.5	2.3	2.8	1.9	2.3	2.5
2010	4.7	2.9	2.0	2.2	2.5	1.7	1.0	0.9	1.7	2.4	3.3	4.0	2.4
2011	5.2	5.6	3.1	3.2	3.7	1.5	0.9	1.3	2.1	3.0	3.0	4.5	3.1
2012	7.5	3.6	2.0	1.4	2.0	1.4	1.2	1.3	1.3	1.7	3.1	3.5	2.5
2013	5.8	4.0	2.6	2.4	2.2	2.0	0.9	1.0	1.6	1.4	1.9	4.0	2.5
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	1.3	1.7	1.5	0.7	1.1	1.6	1.6	1.5	2.0	-
2018	2.4	2.3	1.3	1.4	1.1	1.4	1.2	1.2	0.9	1.3	1.8	1.9	1.5
2019	1.2	1.4	1.1	0.9	1.2	0.7	0.5	1.0	0.7	0.8	1.5	1.1	1.0
2020	1.3	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.6	1.0	1.0	1.3	0.8

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	0.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.8	0.6	-
2013	1.3	0.8	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.4	1.0	0.5
2014	1.4	0.6	0.7	0.5	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.6	0.8	0.5
2015	0.2	-	0.6	0.4	0.6	0.6	0.7	-	0.3	0.4	0.3	0.6	0.5
2016	0.7	1.0	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6
2017	0.3	0.4	0.4	0.8	-	-	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5
2018	-	1.0	0.6	0.7	0.6	0.9	0.7	0.7	0.6	0.9	1.1	1.0	0.8
2019	1.7	1.3	1.0	0.8	1.6	0.9	0.6	1.2	0.7	0.8	0.8	0.8	1.0
2020	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5	0.6	0.9	1.0	0.9	1.1	0.8

2.3 에어로졸

□ PM10 (부유분진측정기, β-선 흡수법) [단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	-	-	-	45	51	47	31	24	33	39	33	54	-
2004	52	54	82	54	62	51	-	28	-	49	45	42	49
2005	45	38	57	74	49	39	43	-	41	55	69	40	50
2006	48	59	71	101	51	41	22	33	34	53	44	47	50
2007	49	63	53	69	70	25	33	18	24	36	49	49	45
2008	43	46	55	54	42	30	24	29	36	46	-	41	41
2009	33	55	43	51	41	35	27	26	35	40	28	42	38
2010	33	28	43	36	38	31	23	26	28	37	62	53	37
2011	33	58	56	49	75	31	23	26	29	40	36	31	41
2012	48	37	38	38	46	28	21	24	34	30	40	34	35
2013	51	38	44	46	45	32	31	33	37	31	35	40	39
2014	45	49	43	44	61	38	33	24	26	29	31	30	38
2015	37	52	52	35	33	31	27	28	25	39	26	32	35
2016	33	34	41	50	40	33	23	32	31	31	38	31	35
2017	35	32	42	44	46	30	25	19	26	23	28	27	31
2018	32	35	33	37	31	27	19	-	22	32	51	41	32
2019	57	57	62	40	54	24	23	29	24	30	33	27	39
2020	30	29	36	35	27	25	17	22	20	29	30	26	27

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2011	22	41	34	37	65	25	23	23	25	24	21	20	30
2012	28	22	31	30	-	-	17	17	21	25	30	19	25
2013	32	25	40	32	41	22	22	20	19	25	37	31	29
2014	41	-	37	33	52	35	24	23	24	23	24	28	32
2015	33	45	40	33	28	29	27	27	22	34	24	30	31
2016	31	35	39	44	41	33	18	20	-	-	-	-	-
2017	29	28	34	42	39	29	26	25	-	-	33	26	31
2018	26	32	28	42	24	25	28	27	23	28	36	29	29
2019	35	44	49	31	44	29	26	31	-	29	42	26	35
2020	29	32	33	37	27	23	18	37	-	27	24	21	28

※ 2017년 9월 21일까지 환경분석센터(구 고산기후변화감시소)
2017년 10월부터 수월봉(통합관측실)에서 관측



□ 미세먼지 크기별 수농도 [총수농도, 단위: 개/㎤]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2005	6035	6250	5889	5184	5320	3809	4323	4247	-	4607	5129	3848	4949
2006	4416	4070	4341	3915	4113	3409	3313	2863	3107	2388	4505	3519	3684
2007	4275	3921	3681	3535	4866	4604	3693	-	3968	4833	-	3090	4062
2008	3329	3454	3414	3590	3547	3870	2782	-	5457	4744	4344	4273	3964
2009	4189	3016	3587	3561	-	2008	2035	3884	4460	-	-	-	3430
2010	3836	4098	3704	4194	3858	3414	2713	2533	3494	3764	3240	3039	3481
2011	4048	4020	4645	3581	4153	2528	2975	3264	3413	3402	-	3467	3577
2012	-	4405	3790	4105	3511	2899	-	4209	4302	4964	4506	5251	4128
2013	4677	4905	4130	4788	3804	4375	2469	3260	5149	4871	4179	3651	4197
2014	4385	4485	3925	3559	3823	3375	3707	1650	4439	-	-	4482	3721
2015	4554	3929	3857	3828	4501	4997	4820	3861	4742	4790	3278	3878	4275
2016	3842	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-	3220	3932	4663	4573	4378	4564	4220
2018	4677	4817	4046	4310	-	-	5711	4505	4978	-	4023	-	4566
2019	-	-	4519	4896	4708	3687	3561	-	-	-	5855	4060	4351
2020	3980	4178	5143	4544	4945	4414	4621	3027	6359	6693	5520	4668	4838

※ 2005~2016(0.01~0.5 μm), 2017~ (0.008~1.2 μm, 표준상태(0°C, 1기압) 변환값)

□ 응결핵 수농도(0.01 ~ 3 μm, 총수농도) [단위: 개/㎤]

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	4337	5164	6298	5261	3559	3002	3283	3578	4781	4710	3466	2452	4153
2013	2404	3149	3117	3136	2700	2906	2747	2856	-	-	5768	4838	3448
2014	4947	3744	4434	5039	6321	4664	5208	4945	5497	4876	4125	3167	4750
2015	3027	2866	3601	3765	4732	3855	4760	3735	4065	-	-	2874	3736
2016	2368	3672	3344	4012	4644	3786	2574	3413	3497	4760	3645	2182	3488
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6386	3974	2927	-
2018	2819	4140	3571	5006	4885	4764	4425	5631	-	-	5283	3673	4385
2019	3290	4056	4711	4629	6148	4235	3398	3720	5284	4689	4861	3118	4373
2020	2857	3225	4635	4421	4362	3588	3432	2483	4858	6036	4489	3403	3979

※ 2013년 12월부터 수월봉(슈퍼사이트)에서 관측
2017년 10월부터 수월봉(통합관측실)로 관측위치 변경

□ 에어로졸 광산란계수 [550 nm, 단위: Mm^{-1}]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	160.3	232.9	244.4	153.4	276.9	273.5	222.4	159.4	-	132.3	115.6	152.2	191.3
2004	149.6	118.8	126.5	114.4	169.7	164.3	84.2	110.6	-	-	-	-	131.8
2005	207.3	108.4	149.3	145.1	149.9	253.2	363.7	174.9	160.2	152.7	122.0	86.2	171.4
2006	151.7	163.8	144.2	147.5	187.6	252.4	114.6	189.3	116.7	187.7	96.7	163.2	159.5
2007	178.5	199.9	159.3	173.6	155.5	107.0	166.7	64.1	82.9	124.2	136.4	155.7	144.5
2008	105.0	91.3	154.7	192.1	101.9	119.2	103.2	98.8	-	125.6	111.8	-	120.5
2009	-	-	106.4	180.9	113.2	143.6	102.1	-	88.9	97.4	74.3	120.5	114.3
2010	104.5	88.8	92.0	95.4	82.1	152.7	70.4	70.7	71.6	104.6	171.1	117.5	101.5
2011	73.1	209.4	97.0	115.6	125.1	122.5	66.9	84.9	76.3	123.0	127.1	94.7	108.6
2012	169.4	119.1	113.6	79.4	-	109.9	-	-	-	-	67.9	109.7	117.1
2013	146.3	103.6	101.7	102.7	126.8	127.3	130.4	120.3	93.1	75.1	110.6	113.7	112.8
2014	133.4	178.7	128.2	153.3	148.5	171.8	129.3	104.5	84.1	-	-	-	134.3
2015	118.1	142.5	168.8	107.6	100.8	138.6	140.9	137.5	79.9	124.6	122.7	122.3	124.3
2016	103.0	73.8	99.2	103.3	58.2	88.7	49.5	74.3	76.0	52.0	57.5	-	77.2
2017	-	85.1	131.6	90.2	73.7	80.0	74.7	57.5	78.2	54.4	70.0	85.1	80.0
2018	115.5	83.8	108.3	71.9	74.8	106.9	54.1	55.4	29.8	39.8	105.0	71.1	76.0
2019	107.4	93.0	123.3	69.8	76.6	65.8	87.3	72.2	48.5	66.7	63.4	91.3	80.2
2020	102.9	108.2	81.4	65.2	70.5	73.0	55.7	71.5	44.0	59.7	77.2	78.1	74.4

□ 지상 에어로졸 산란 용스트롬 지수(450-700 nm)

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	1.50	1.60	1.57	1.61	1.57	1.43	1.24	1.31	-	1.65	1.63	1.45	1.51
2004	1.50	1.39	1.25	1.58	1.76	1.93	1.88	2.00	-	-	-	-	1.65
2005	1.38	1.41	1.41	1.36	1.66	1.51	1.40	1.44	1.54	1.58	1.43	1.49	1.47
2006	1.41	1.27	1.27	1.16	1.69	1.51	1.36	1.63	1.73	1.44	1.39	1.45	1.45
2007	1.38	1.42	1.42	1.54	1.56	1.76	1.72	1.54	1.69	1.79	1.59	1.49	1.57
2008	1.50	1.50	1.59	1.69	1.75	1.62	1.64	1.85	-	1.89	1.88	-	1.68
2009	-	-	1.53	1.78	1.78	1.50	1.29	-	1.82	1.59	1.54	1.42	1.59
2010	1.54	1.55	1.54	1.65	1.73	1.76	1.72	1.69	1.67	1.72	1.47	1.36	1.62
2011	1.41	1.57	1.44	1.68	1.52	1.73	1.82	1.89	1.83	1.77	1.67	1.50	1.66
2012	1.41	1.47	1.54	1.66	-	1.72	-	-	-	-	1.76	1.50	1.57
2013	1.56	1.72	1.72	1.81	1.82	1.84	1.34	1.65	1.57	1.63	1.36	1.51	1.63
2014	1.44	1.61	1.63	1.70	1.68	1.57	1.78	1.91	2.06	-	-	-	1.72
2015	1.60	1.63	1.79	1.90	1.91	1.83	1.73	1.77	1.89	1.69	1.89	1.67	1.78
2016	1.67	1.70	1.83	1.74	1.66	1.71	1.84	1.88	1.94	1.77	1.80	-	1.79
2017	-	1.41	1.73	1.49	1.47	1.61	1.48	-	-	-	-	1.49	1.52
2018	1.28	1.29	1.51	1.58	1.49	1.55	1.52	1.53	1.63	1.57	1.52	1.50	1.50
2019	1.49	1.60	1.55	1.50	1.54	1.71	1.42	1.69	1.51	1.37	1.34	1.42	1.51
2020	1.40	1.37	1.34	1.51	1.53	1.52	1.43	1.13	1.36	1.30	1.28	1.32	1.38



□ 550 nm 에어로졸 광흡수계수 [단위: Mm^{-1}]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	5.9	8.8	10.5	8.2	8.3
2011	5.2	11.3	5.4	7.0	7.0	7.6	4.7	6.5	8.1	11.9	10.8	8.4	7.8
2012	12.3	9.5	8.1	6.6	-	-	-	-	8.8	8.6	7.9	12.3	9.4
2013	14.0	10.2	10.4	9.9	10.1	8.5	4.5	6.6	8.7	9.2	8.8	11.1	9.3
2014	11.8	13.3	10.9	12.3	10.8	7.8	6.1	6.0	7.2	7.5	8.1	7.1	9.0
2015	9.7	9.7	10.0	7.3	6.7	6.6	5.7	5.4	4.6	-	9.1	11.0	7.9
2016	9.8	7.5	8.8	8.8	9.0	7.5	4.4	7.1	8.9	8.5	9.1	9.0	8.2
2017	8.2	7.0	10.0	7.2	4.5	4.1	1.7	-	-	6.3	5.7	6.9	6.5
2018	8.9	7.6	5.8	4.8	4.8	4.4	3.2	4.0	3.8	-	-	7.0	5.4
2019	9.0	9.1	8.9	6.3	7.6	4.7	3.3	4.5	6.3	11.4	12.3	10.6	8.2
2020	13.2	10.9	10.5	8.6	8.2	8.7	6.6	4.6	6.8	9.0	8.0	8.1	8.6

[참고]

- 안면도 분동 옥상 단독 흡입구(비도체 튜브 사용)로 연속 관측(2003~2004년)
- 안면도 연구동 이전 통합 흡입구(도체 튜브 사용)로 연속 관측(2005~2006년)
- 광학특성 관측 장비 샘플링시스템 개선 적용(2007~2012년)
- 광학특성 관측 장비 표준 에어로졸 샘플링시스템 구축 적용(2013년~)

□ PM10 이온 [단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$]

○ 안면도

연	개수	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	nss- SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	nss- Ca ²⁺
2008	28	0.22	2.8	9.8	6.0	4.2	1.5	1.3	0.2	0.5
2009	23	0.09	1.6	8.8	5.9	1.8	2.8	0.5	0.2	0.8
2010	42	0.08	1.3	7.7	6.5	1.5	2.9	0.5	0.2	0.8
2011	37	0.07	0.9	8.2	6.5	1.2	3.0	0.3	0.3	1.0
2012	39	0.06	0.9	7.4	5.0	0.8	3.4	0.2	0.2	0.6
2013	43	0.08	1.3	8.6	6.1	1.3	3.9	0.2	0.3	0.7
2014	41	0.06	1.0	8.9	7.3	1.1	4.7	0.3	0.2	0.7
2015	33	0.08	1.0	7.8	6.9	1.1	3.9	0.2	0.2	0.5
2016	47	0.05	0.9	7.4	5.9	1.2	2.4	0.6	0.2	0.5
2017	37	0.03	2.0	6.6	6.4	1.7	3.1	0.4	0.2	0.5
2018	57	0.01	1.3	5.9	5.7	1.1	3.1	0.2	0.1	0.2
2019	69	0.01	1.5	5.8	5.4	1.3	2.9	0.2	0.2	0.5
2020	67	0.01	1.7	5.5	4.3	1.3	2.7	0.2	0.2	0.4
연평균	563	0.05	1.4	7.3	5.9	1.4	3.1	0.3	0.2	0.6

□ PM10 이온 계절 평균 [단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$]

○ 안면도

계절	기간	개수	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	nss- SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	nss- Ca ²⁺
겨울	2010~2019	106	0.08	2.1	8.0	6.4	1.7	3.6	0.4	0.2	0.6
	2020	14	0.02	2.5	9.0	5.3	1.5	4.1	0.3	0.2	0.4
봄	2010~2019	143	0.05	1.2	8.6	7.4	1.2	3.9	0.3	0.2	0.8
	2020	19	0.00	2.4	6.5	4.2	1.7	2.9	0.2	0.2	0.4
여름	2010~2019	91	0.03	0.5	6.5	5.4	0.8	3.3	0.2	0.1	0.3
	2020	16	0.00	0.7	1.7	5.4	0.8	2.1	0.1	0.1	0.1
가을	2010~2019	119	0.04	1.1	5.7	4.9	1.2	2.2	0.3	0.2	0.5
	2020	17	0.01	1.3	4.3	2.7	1.1	1.6	0.2	0.2	0.5

※ "지구대기감시 업무매뉴얼(II)-에어로졸 및 총대기침적-, 2017, 국립기상과학원"의 QA/QC방법으로 자료 처리함.
 ※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함.



□ PM10 원소 [단위: ng/m³]

○ 안면도

연	개수	S	Al	K	Ca	Mg	Na	Fe
2018	56	1383.6	377.0	283.5	398.8	228.8	778.8	396.5
2019	64	1414.7	355.8	259.6	418.5	241.1	959.3	380.7
2020	51	1013.1	241.9	117.0	224.4	174.4	760.0	228.1
연	개수	Zn	V	Cr	Cu	Mn	Ni	Ti
2018	56	30.7	7.2	2.0	4.2	14.9	6.3	14.3
2019	64	47.6	4.3	1.5	6.3	13.8	4.9	16.2
2020	51	19.6	1.0	1.0	5.1	7.4	2.2	7.5
연	개수	Ba	Cd	Mo	Pb	Sr	Co	-
2018	56	4.4	0.9	0.5	12.9	2.7	0.2	-
2019	64	5.7	2.9	0.7	13.3	2.8	0.2	-
2020	51	3.4	2.6	0.3	6.7	2.0	0.1	-

2.4 대기복사

□ 직달일사 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	119.6	129.0	59.2	124.9	119.4	109.3	-	-
2000	69.2	139.7	166.3	184.8	119.0	134.4	114.0	171.0	156.7	147.7	139.2	132.9	139.6
2001	102.8	125.3	-	-	-	-	-	-	-	-	153.0	117.4	-
2002	107.0	160.4	159.8	172.4	149.4	200.7	105.3	65.8	145.2	180.7	108.3	112.8	139.0
2003	106.7	135.9	117.9	144.1	161.1	97.4	59.8	85.4	120.6	201.3	106.8	79.0	118.0
2004	102.3	168.4	170.9	179.5	156.2	111.3	60.8	152.4	156.3	209.6	-	115.4	143.9
2005	101.7	119.5	179.2	163.1	216.4	67.5	75.5	135.1	112.0	159.0	118.9	57.7	125.5
2006	101.1	-	164.5	119.1	119.3	93.1	39.0	176.3	153.0	144.9	90.1	73.3	115.8
2007	-	-	91.3	-	-	113.8	68.9	66.8	-	-	-	-	-
2008	-	164.6	163.7	145.1	149.0	109.6	97.9	190.6	-	-	133.1	120.5	-
2009	-	108.5	177.7	192.3	-	180.0	117.2	165.2	137.0	158.0	64.0	81.0	138.1
2010	103.2	100.5	103.7	177.6	186.9	161.5	149.9	132.0	-	-	-	-	-
2011	-	148.2	-	235.0	-	-	87.7	92.6	178.0	148.3	103.1	104.5	-
2012	111.4	170.5	148.9	175.1	186.4	180.5	170.9	143.9	166.4	171.0	115.8	106.0	153.9
2013	99.0	142.4	168.1	192.5	198.8	175.9	-	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	153.8	159.5	206.9	137.3	111.1	86.0	-	191.7	107.6	77.1	-
2015	133.4	107.9	204.9	148.2	236.6	-	122.0	151.4	208.6	148.9	62.9	109.0	148.5
2016	73.5	149.5	180.5	139.6	208.5	119.6	125.4	172.7	140.3	-	-	-	-
2017	-	207.5	218.3	248.1	276.7	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	91.2	168.6	149.3	166.9	139.6	157.5	202.5	-	218.4	215.4	-	103.6	161.3
2019	140.1	132.2	153.4	151.0	235.5	161.9	93.1	175.7	135.2	165.5	134.6	91.7	147.5
2020	93.1	141.6	211.1	235.5	138.6	117.7	79.5	80.9	-	174.7	132.6	97.9	136.7

※ 1999~2016년 월평균값은 계산된 직달일사값임[(전천일사-산란일사)/cos(solar zenith angle)].

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75.8	71.4	-
2009	53.8	71.5	108.4	169.7	200.8	126.5	76.5	146.1	142.1	169.5	75.2	52.5	116.1
2010	61.4	87.1	94.8	132.9	136.9	90.8	65.7	132.0	143.3	126.1	111.7	65.2	104.0
2011	42.6	119.9	180.7	208.5	129.8	41.3	103.0	-	-	-	93.2	52.8	-
2012	49.8	67.3	122.7	167.7	149.8	97.7	119.3	188.0	161.3	177.8	92.8	54.1	120.7
2013	69.4	111.0	138.8	-	-	80.8	101.5	173.2	171.0	180.7	99.4	83.0	120.9
2014	120.7	105.7	149.2	177.0	204.0	84.8	78.0	80.8	119.7	202.9	132.7	61.3	126.4
2015	87.1	97.8	145.9	144.7	200.7	122.5	96.8	130.6	171.8	185.7	62.1	61.9	125.6
2016	31.4	89.4	116.2	141.0	181.5	94.8	129.5	135.4	88.7	67.2	89.7	76.6	103.5
2017	59.0	96.4	102.0	117.1	119.1	102.0	85.7	175.6	-	147.8	126.6	65.0	108.8
2018	65.8	102.8	146.3	153.3	98.0	153.0	187.2	213.6	116.8	185.2	154.0	53.5	135.8
2019	103.9	99.0	148.5	157.6	202.1	105.4	72.3	135.4	154.9	190.1	148.2	60.8	131.5
2020	48.6	115.1	165.3	205.3	142.5	103.2	63.9	130.1	117.8	188.6	128.9	87.7	124.8



□ 산란일사 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	70.3	85.0	97.4	115.4	121.1	136.1	171.8	97.4	68.6	55.9	42.2	96.5
2000	47.8	68.5	87.6	105.1	125.6	129.8	129.9	92.9	78.0	68.3	49.1	46.2	85.7
2001	52.1	65.4	83.4	107.2	106.7	119.9	120.4	102.3	-	65.3	49.8	43.2	83.2
2002	49.3	60.7	83.3	96.3	98.3	100.1	128.0	102.8	95.3	66.2	50.4	42.3	81.1
2003	50.8	63.5	98.2	95.9	121.0	118.2	115.4	96.3	88.4	57.0	44.0	45.1	82.8
2004	53.4	61.1	88.7	95.2	99.9	131.2	96.2	101.5	77.2	55.9	58.2	41.6	80.0
2005	54.4	61.2	80.0	99.6	101.9	131.1	123.2	95.5	82.0	62.5	56.2	43.7	82.6
2006	50.5	65.1	86.3	110.3	113.8	134.5	107.1	109.9	88.4	67.6	53.2	46.9	86.1
2007	49.7	57.9	84.1	108.6	114.0	122.5	126.6	129.8	-	-	-	43.8	-
2008	47.2	64.5	86.4	112.0	114.3	127.4	111.3	110.4	-	-	50.0	34.4	85.8
2009	37.6	55.9	83.5	100.3	-	110.5	117.4	95.0	78.3	68.2	53.3	45.1	76.8
2010	50.7	51.2	80.3	96.1	110.4	121.1	113.8	89.8	-	-	68.4	62.1	84.4
2011	47.1	58.7	66.0	83.7	102.0	104.9	85.7	97.9	75.5	61.0	48.6	39.2	72.5
2012	38.0	54.3	66.6	83.8	118.0	120.9	92.6	91.7	77.1	57.7	45.0	38.5	73.7
2013	48.9	57.2	93.9	81.8	99.6	119.8	103.6	12.4	-	22.6	21.8	-	66.2
2014	-	-	76.2	102.6	113.1	143.0	125.6	108.0	79.5	50.0	46.8	45.1	89.0
2015	44.0	64.4	78.1	94.5	100.9	125.7	107.4	108.5	77.8	67.3	50.2	40.5	79.9
2016	56.4	57.1	82.5	101.6	103.8	127.3	119.4	106.5	93.5	-	-	-	-
2017	-	53.5	78.7	97.1	93.3	-	-	-	67.1	-	-	36.2	-
2018	52.5	55.5	79.7	97.5	105.3	119.2	95.7	-	63.2	-	-	41.7	-
2019	44.8	68.8	88.7	98.5	102.2	119.9	120.4	109.8	83.4	66.3	45.8	37.6	82.2
2020	47.7	59.3	73.9	94.3	113.1	117.4	-	-	-	60.6	41.3	45.6	-

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.6	44.7	-
2009	46.7	67.6	89.8	90.4	93.4	115.7	122.0	109.2	89.3	76.9	59.2	46.4	83.9
2010	55.7	62.3	86.7	91.4	111.4	117.7	123.2	97.0	98.0	79.9	67.5	47.3	86.5
2011	50.9	69.8	84.9	98.9	111.6	126.5	119.4	-	-	-	56.8	44.2	-
2012	57.3	77.1	81.6	95.9	122.1	131.5	108.7	101.4	91.6	68.3	58.7	46.9	86.8
2013	53.4	62.4	94.8	-	-	128.8	125.1	105.8	81.0	74.0	60.4	46.4	83.2
2014	56.0	76.1	86.3	93.3	115.1	136.9	120.6	117.3	92.3	57.4	54.0	49.6	87.9
2015	55.1	64.2	89.3	101.7	110.2	113.5	133.2	105.9	73.6	64.0	56.4	47.1	84.5
2016	52.8	69.4	87.6	104.9	108.2	120.3	115.8	92.3	88.1	73.8	51.7	44.1	84.1
2017	55.5	65.1	86.9	104.1	114.7	121.7	129.4	101.1	-	63.9	59.4	51.2	86.6
2018	54.5	68.9	82.2	107.2	117.5	108.2	109.2	97.5	86.8	59.0	51.7	46.8	82.5
2019	54.1	64.8	86.0	100.7	108.2	129.5	119.4	105.5	86.7	68.3	55.8	49.4	85.7
2020	52.4	66.5	73.0	104.6	115.4	106.2	112.2	121.6	87.2	67.6	50.5	51.6	84.1

□ 태양상향복사 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	-	-	23.7	47.9	42.3	39.6	36.7	39.9	33.6	28.1	20.0	16.4	32.8
2001	24.6	21.3	-	-	-	-	-	-	-	-	24.5	21.2	-
2002	17.7	26.0	34.0	40.9	34.2	45.3	34.3	25.6	36.8	33.1	19.6	18.2	30.5
2003	28.0	23.7	30.4	34.6	41.9	32.8	25.7	26.3	31.2	35.2	19.0	15.8	28.7
2004	27.9	30.1	42.1	39.1	36.0	36.5	24.5	39.8	35.1	37.0	18.0	18.4	32.0
2005	23.7	28.3	38.2	40.3	45.1	29.9	30.9	34.5	30.0	30.8	23.8	-	32.3
2006	-	-	37.2	-	-	-	-	-	32.7	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	36.2	36.8	-	-	-	-	-	-	22.1	19.2	-
2009	22.6	20.9	35.3	41.3	-	44.4	35.7	38.2	33.1	32.6	15.7	21.5	31.0
2010	31.4	20.9	25.6	38.4	41.2	42.1	37.3	34.8	-	-	26.1	22.3	32.0
2011	26.6	27.1	40.3	43.8	-	36.6	26.5	30.0	38.7	32.1	20.3	18.6	31.0
2012	23.8	32.1	33.2	40.0	46.6	44.3	35.7	33.5	33.5	32.7	21.2	26.0	33.6
2013	26.3	30.4	38.9	39.4	42.3	43.4	25.1	51.8	49.5	-	-	-	-
2014	-	-	34.0	38.9	47.6	42.1	33.1	28.2	34.7	32.3	21.7	21.1	33.4
2015	19.8	23.6	39.2	35.7	50.9	-	33.5	40.3	38.9	30.3	13.2	15.5	31.0
2016	25.1	25.1	37.2	36.5	46.6	39.7	35.7	41.9	37.2	-	-	20.0	34.5
2017	29.6	34.2	46.1	51.0	55.3	48.7	35.4	42.6	45.2	38.9	30.3	25.2	40.2
2018	29.5	38.7	37.7	43.2	42.2	47.4	49.9	-	40.2	41.5	-	22.2	39.3
2019	26.1	31.7	39.4	39.5	50.7	43.7	33.3	43.5	28.8	32.4	24.1	17.6	34.2
2020	20.2	30.0	44.2	51.3	38.2	36.8	31.9	30.4	38.0	37.4	25.0	23.1	33.9



□ 태양하향복사(전천일사) [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	222.6	235.1	214.7	178.8	135.3	108.8	-	-
2000	75.7	142.0	180.9	230.3	214.4	231.7	212.6	211.4	172.0	148.0	110.9	98.9	169.1
2001	95.1	127.8	-	-	-	-	147.7	-	-	-	117.1	90.5	-
2002	95.8	139.3	178.5	214.7	200.9	246.5	200.9	147.7	186.8	166.4	99.3	88.2	163.8
2003	94.2	132.7	168.6	195.0	242.9	191.2	157.9	154.1	163.8	166.5	93.0	75.7	153.0
2004	95.7	148.3	195.9	219.1	215.0	214.1	144.0	209.4	179.6	171.9	89.8	88.0	164.2
2005	98.6	126.0	190.4	216.5	259.0	181.5	177.8	188.4	157.5	150.0	109.1	68.2	160.3
2006	92.4	-	189.8	192.2	207.4	210.1	138.2	238.8	187.5	145.8	93.9	74.6	161.0
2007	-	-	141.5	-	-	200.2	179.3	178.7	132.2	144.8	-	-	-
2008	91.1	147.2	185.6	210.7	220.0	207.9	180.6	242.6	-	-	100.2	82.0	166.8
2009	99.4	113.5	195.5	229.4	-	243.0	203.2	207.2	163.0	154.9	80.0	76.0	160.5
2010	93.7	105.0	144.6	215.7	231.9	236.3	216.4	203.3	-	-	122.0	95.1	166.4
2011	98.8	135.4	206.8	239.4	-	227.3	156.2	158.1	191.0	151.2	97.8	85.3	158.8
2012	96.8	145.9	163.6	212.3	249.4	253.9	214.1	189.4	173.0	158.8	100.4	77.0	169.6
2013	90.4	130.7	190.1	211.3	237.9	246.5	146.6	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	172.1	207.9	262.3	251.5	203.8	163.3	186.6	151.1	97.0	72.5	176.8
2015	92.2	116.0	193.3	191.0	268.4	-	193.8	218.8	204.1	151.3	68.4	79.2	161.5
2016	87.1	128.2	187.0	196.7	252.2	220.8	207.0	232.3	185.6	-	-	-	-
2017	-	155.6	204.5	265.7	297.3	-	-	-	-	-	-	82.5	-
2018	93.7	148.8	172.6	214.8	206.7	-	-	-	210.8	-	-	82.1	-
2019	105.5	138.0	183.3	201.0	276.2	244.7	197.9	237.0	170.2	152.1	107.1	65.5	173.2
2020	86.0	130.4	203.5	256.2	217.1	212.6	183.6	169.3	185.9	159.2	102.4	82.8	165.8

○ 고 산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83.5	78.0	-
2009	73.0	107.3	159.2	213.9	248.1	208.8	177.0	212.0	180.8	175.8	93.9	69.0	159.9
2010	85.6	111.0	140.7	187.3	217.3	187.6	177.5	195.8	190.5	151.4	121.5	73.9	153.3
2011	71.6	136.7	198.4	242.9	213.0	154.7	197.3	-	-	-	96.5	66.8	-
2012	81.1	102.4	155.9	211.5	237.9	201.2	194.7	233.7	197.5	168.3	103.5	69.3	163.1
2013	83.8	119.8	186.5	-	-	188.0	206.3	228.5	188.1	174.8	108.6	83.0	156.7
2014	110.2	127.0	175.2	217.5	269.6	202.4	177.5	175.1	168.8	170.8	117.2	76.8	165.7
2015	94.0	113.0	182.2	200.3	257.3	202.6	206.4	197.8	186.2	172.5	85.0	75.6	164.4
2016	63.7	118.2	164.3	208.5	245.3	192.6	209.9	195.5	148.7	112.0	98.1	80.5	153.1
2017	86.3	121.4	155.7	180.0	205.8	204.7	199.5	225.5	-	142.2	120.0	79.1	156.4
2018	84.3	123.4	173.7	210.8	182.4	223.1	248.4	248.3	160.0	162.2	121.3	68.8	167.2
2019	99.2	117.1	177.9	207.0	254.1	205.5	174.0	201.1	182.6	169.4	122.9	74.4	165.4
2020	71.7	124.9	173.9	249.1	219.0	190.7	-	-	-	-	111.0	87.6	-

□ 지구상향복사 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	452.9	480.2	495.9	490.9	448.2	417.1	377.3	-
2000	365.0	370.3	395.9	427.5	436.2	465.5	468.8	468.2	450.9	447.9	409.9	393.1	424.9
2001	354.3	358.1	-	-	-	-	418.0	-	-	-	351.9	315.1	-
2002	319.6	330.2	355.7	381.8	400.6	430.5	447.5	445.1	426.6	384.1	339.9	323.5	382.1
2003	306.7	319.1	346.3	374.8	409.2	423.9	439.2	442.3	426.9	391.0	357.8	317.7	379.6
2004	305.5	326.5	343.8	370.0	396.8	429.0	422.6	451.1	417.5	381.1	345.5	328.7	376.5
2005	289.6	302.0	327.5	378.4	395.8	427.7	442.4	440.5	430.2	-	355.4	291.2	371.0
2006	301.0	284.6	341.6	350.2	383.7	415.8	435.9	456.5	418.5	394.4	348.0	315.1	370.4
2007	305.6	303.6	336.2	338.1	368.1	419.0	434.7	447.7	416.7	374.5	350.3	-	372.2
2008	291.7	294.4	352.6	380.9	406.9	439.2	450.3	456.7	-	-	349.1	329.6	375.1
2009	307.4	322.9	340.3	372.2	-	439.7	444.9	446.4	412.8	389.4	342.8	308.9	375.2
2010	300.8	318.1	335.4	356.5	400.2	425.2	430.2	451.9	-	-	-	295.7	-
2011	281.4	309.0	314.9	-	-	-	441.4	447.6	419.2	383.9	372.0	316.7	-
2012	303.2	308.9	338.7	376.0	415.3	441.4	453.0	458.9	419.5	384.6	341.3	287.5	377.4
2013	301.2	313.6	339.6	364.6	406.3	428.1	394.5	486.5	-	-	-	-	-
2014	-	276.5	344.7	362.7	393.2	421.5	435.7	424.0	396.9	376.3	347.1	302.4	371.0
2015	306.6	320.0	338.9	361.8	382.2	-	-	437.7	418.2	379.9	344.1	326.7	361.6
2016	311.5	317.5	344.8	372.9	399.2	414.1	438.9	448.9	433.1	-	-	323.8	380.5
2017	312.3	311.4	338.1	367.7	402.3	404.6	-	424.4	404.6	347.6	330.8	312.0	359.6
2018	293.0	301.8	353.0	375.1	393.2	396.7	432.1	-	405.8	355.6	-	317.4	362.4
2019	314.4	325.5	348.7	370.6	401.8	425.0	433.9	425.2	420.6	388.0	348.7	321.5	377.0
2020	323.5	328.2	347.6	363.8	397.1	424.0	432.5	445.4	416.4	381.5	352.2	313.9	377.2

□ 지구하향복사 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	399.1	432.2	442.3	433.8	377.1	343.2	301.3	-
2000	308.0	302.3	328.1	361.4	388.1	417.9	429.6	422.0	391.7	376.1	336.0	316.0	364.8
2001	293.2	302.8	-	-	-	-	415.7	-	-	-	279.6	256.8	-
2002	264.3	257.1	284.8	316.9	348.3	365.3	410.1	415.1	368.0	315.8	283.2	273.3	325.2
2003	250.7	256.7	283.3	312.4	341.0	372.7	402.3	403.7	374.9	316.1	304.1	262.2	323.3
2004	248.3	259.2	273.0	297.6	338.1	376.2	394.5	398.4	364.0	305.3	284.0	261.7	316.7
2005	246.3	252.1	260.6	308.8	324.3	389.0	410.5	407.9	391.0	-	286.7	256.7	321.3
2006	249.9	246.1	266.9	293.5	327.5	363.3	411.6	399.6	350.9	331.2	296.5	263.7	316.7
2007	250.3	244.2	285.9	274.2	310.7	365.2	400.7	409.7	383.5	317.9	280.7	-	320.3
2008	240.7	226.2	275.7	309.7	342.0	388.9	413.9	393.4	-	-	286.7	271.5	314.9
2009	242.4	264.7	262.4	286.8	-	361.8	385.1	375.7	339.5	308.6	291.8	257.6	306.9
2010	250.5	268.5	278.7	276.7	322.6	347.0	370.6	396.9	-	-	-	240.9	-
2011	225.6	243.5	229.6	-	-	-	401.5	396.1	342.8	303.3	314.3	260.6	-
2012	246.4	240.3	271.2	301.1	326.6	352.2	390.9	399.8	351.2	307.3	281.3	240.3	309.1
2013	248.0	252.7	261.9	289.7	325.4	350.8	349.5	373.8	-	-	-	-	-
2014	-	197.5	262.9	275.6	295.8	337.8	371.8	366.2	311.9	294.5	283.0	250.1	295.2
2015	245.1	258.4	252.7	289.8	295.5	-	-	371.8	329.4	300.0	299.7	264.7	290.7
2016	253.9	243.2	259.4	301.7	314.0	340.3	378.2	368.2	349.9	-	-	268.7	307.8
2017	251.6	238.0	250.3	282.3	310.5	314.2	-	367.8	330.4	269.7	260.3	256.8	284.7
2018	231.5	225.6	291.7	302.2	325.7	315.5	363.6	-	331.8	280.1	-	266.9	293.5
2019	254.7	266.8	280.3	308.0	321.8	352.7	377.0	350.9	362.1	323.0	292.1	274.6	313.7
2020	276.8	273.8	276.0	282.9	339.8	371.4	389.0	398.2	354.2	314.4	300.3	262.8	320.0

□ 순복사 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	129.8	140.9	124.2	98.9	51.2	29.6	5.4	-
2000	16.7	49.3	71.8	107.9	117.2	138.4	139.3	133.1	80.2	52.1	24.6	15.0	78.8
2001	19.6	42.3	-	-	-	-	126.0	-	-	-	24.3	14.5	-
2002	20.2	38.2	72.8	107.2	113.6	134.3	129.2	94.2	88.8	62.6	19.8	16.6	74.8
2003	9.7	48.4	75.0	99.4	131.4	110.2	98.0	90.1	82.9	55.5	21.1	4.4	68.8
2004	10.2	47.5	75.0	107.3	119.4	125.1	93.8	121.1	88.9	56.2	10.9	7.8	71.9
2005	20.2	38.5	79.2	103.2	132.2	106.3	107.6	105.4	86.8	54.4	13.1	(0.6)	70.5
2006	15.4	30.2	79.0	94.8	114.1	120.8	89.1	141.9	85.6	53.8	17.9	5.1	70.6
2007	7.3	30.6	59.2	97.0	107.6	112.4	111.7	107.4	69.9	49.6	14.4	(6.7)	63.4
2008	11.9	35.6	72.9	99.2	115.4	125.2	110.2	139.7	-	-	23.4	12.6	74.6
2009	16.7	34.6	82.8	113.8	-	129.6	119.1	125.7	70.8	49.7	14.0	5.0	69.3
2010	8.0	32.7	61.1	95.3	122.0	134.4	128.4	115.5	-	-	-	10.5	-
2011	10.5	38.8	84.2	-	-	-	88.1	93.9	95.0	46.2	25.9	8.8	-
2012	13.9	40.8	64.1	102.4	130.3	135.6	131.9	115.1	86.0	55.4	17.6	4.1	74.8
2013	7.5	37.0	75.3	99.9	125.1	144.4	102.2	114.4	79.7	-	-	-	-
2014	-	32.4	73.1	97.0	140.3	145.3	128.0	93.1	92.9	50.7	21.0	4.7	79.9
2015	15.2	37.0	78.1	99.3	142.6	-	-	130.1	92.6	55.8	18.0	8.5	67.7
2016	11.8	41.1	79.8	105.3	139.0	132.7	134.1	135.1	-	-	-	-	-
2017	-	44.9	76.3	119.3	149.1	158.8	-	125.1	96.0	55.1	20.6	11.4	85.7
2018	17.2	42.4	76.0	105.6	117.0	151.9	156.6	-	100.2	60.9	-	9.8	83.8
2019	13.9	41.3	73.2	95.3	141.6	136.2	122.6	137.9	78.4	55.7	19.4	5.6	76.8
2020	15.7	40.2	79.0	116.3	123.4	134.7	-	-	-	40.7	19.6	7.1	-



2.5 성층권 오존

□ 오존전량 [단위: Dobson Unit (DU)]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2013	-	322	340	329	347	325	299	301	300	279	307	332	316
2014	329	350	363	347	349	341	309	300	295	286	296	334	325
2015	331	380	382	362	344	341	310	306	309	299	308	319	333
2016	346	370	357	350	331	326	312	299	293	271	295	306	321
2017	318	342	365	373	360	352	305	297	304	269	-	-	328
2018	-	382	354	364	338	336	292	285	292	296	291	290	320
2019	295	307	354	341	349	338	321	287	282	291	293	319	315
2020	341	351	362	383	344	-	307	283	301	280	289	-	324

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2011	285	331	342	342	316	318	286	281	285	279	275	289	302
2012	281	280	311	335	330	321	303	294	304	281	291	297	302
2013	288	287	318	350	344	336	307	294	290	273	285	308	307
2014	302	319	336	328	332	319	294	289	289	275	274	305	305
2015	296	340	347	341	326	327	306	305	307	287	-	284	315
2016	-	323	327	318	310	296	282	287	277	252	264	266	291
2017	277	300	323	335	331	-	-	281	283	263	275	299	297
2018	310	336	339	345	320	327	294	287	286	284	267	257	304
2019	257	266	315	314	318	324	310	281	284	-	276	294	294
2020	310	315	341	361	332	313	309	283	295	275	278	282	308

○ 포함

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1994	-	335	352	334	336	325	285	281	289	275	261	268	304
1995	297	330	339	323	327	323	279	272	273	273	292	317	304
1996	336	350	346	352	346	301	286	278	286	283	269	301	311
1997	326	320	318	323	327	320	291	275	284	285	288	297	305
1998	328	345	338	343	321	336	291	287	281	284	-	281	312
1999	296	336	297	349	358	319	300	284	281	295	305	321	312
2000	323	351	354	379	355	335	306	294	294	274	265	290	318
2001	364	342	389	365	384	354	-	304	293	284	315	306	336
2002	-	337	359	353	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	345	333	344	319	320	318	-	275	271	274	253	278	303
2004	318	306	340	333	337	327	301	287	273	-	272	292	308
2005	321	330	347	369	349	333	310	295	281	281	289	318	319
2006	319	321	365	358	323	334	298	290	300	289	313	313	319
2007	332	340	359	376	359	336	313	295	291	281	281	307	322
2008	298	319	343	337	325	320	289	295	290	288	299	303	309
2009	319	304	354	356	336	330	310	283	286	289	287	323	315
2010	330	361	379	368	358	366	313	-	-	-	-	-	-
2011	324	356	369	359	327	317	290	287	290	287	289	311	317
2012	311	300	326	346	330	323	-	-	-	283	306	-	-
2013	-	318	343	349	335	324	303	298	-	273	306	328	318
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	317	365	367	359	337	-	297	295	297	284	291	300	319
2016	328	349	346	334	321	315	291	286	274	253	277	285	305
2017	308	327	340	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



○ 서울

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균	표준 편차
1985	334	344	336	353	334	330	291	280	276	281	308	334	317	27.8
1986	362	386	380	358	340	330	303	292	293	298	291	300	328	36.3
1987	334	360	369	362	344	335	307	301	290	280	288	315	324	31.2
1988	330	331	347	360	320	322	285	285	287	271	301	319	313	27.4
1989	316	325	350	344	354	321	301	286	288	285	292	320	315	25.0
1990	347	337	348	351	337	319	293	279	282	298	298	334	319	27.2
1991	335	337	333	343	325	309	299	298	295	295	300	312	315	18.2
1992	333	358	345	371	360	341	314	295	286	286	292	308	324	31.0
1993	315	318	337	341	326	324	313	293	293	297	293	321	314	17.5
1994	357	350	380	339	356	337	294	290	307	292	296	299	325	31.7
1995	332	349	361	344	361	338	297	283	286	283	305	323	322	30.2
1996	342	363	-	364	363	323	306	285	298	294	294	320	323	30.5
1997	343	350	340	334	344	338	308	287	296	307	302	319	322	21.7
1998	355	363	365	357	340	359	307	305	299	290	307	302	329	29.7
1999	318	349	324	372	373	330	320	307	302	313	318	327	329	23.4
2000	320	349	366	375	363	336	303	292	304	294	283	319	325	30.6
2001	364	330	381	353	354	338	299	297	284	284	301	312	325	33.0
2002	324	331	349	333	334	339	304	299	301	297	316	328	321	17.4
2003	366	366	372	348	344	342	310	297	283	291	282	297	325	34.6
2004	332	347	361	345	350	328	288	290	291	284	294	324	320	28.4
2005	357	361	376	368	354	347	316	297	282	277	311	327	331	34.1
2006	330	336	379	373	342	352	319	292	301	292	318	325	330	28.4
2007	342	349	382	381	351	333	313	294	286	281	299	324	328	32.3
2008	314	345	365	360	346	335	309	303	293	297	313	324	325	24.5
2009	343	322	372	376	343	349	321	298	293	297	301	337	329	28.8
2010	341	372	392	396	377	372	331	298	292	294	324	323	343	38.1
2011	343	361	391	(378)	(342)	(351)	(327)	(304)	(305)	299	296	320	335	31.6
2012	336	336	337	337	338	340	339	337	338	337	336	334	337	28.6
2013	335	336	350	376	343	327	301	302	293	272	316	350	325	29.3
2014	350	358	365	356	350	345	317	301	291	288	300	346	331	28.6
2015	342	389	382	358	350	348	320	316	306	300	313	323	337	29.2
2016	356	372	355	358	332	339	308	304	292	275	293	305	324	32.3
2017	315	355	376	368	367	352	328	305	306	281	310	339	333	37.1
2018	345	386	361	371	347	343	299	295	299	301	297	294	328	34.1
2019	303	319	366	361	371	370	333	297	284	287	290	324	325	34.0
2020	339	350	368	381	434	323	324	301	298	282	290	320	327	29.0
평균	338	350	362	360	350	338	310	297	294	291	302	321	326	
표준편차	15.6	18.5	17.8	14.9	13.6	13.5	13.1	10.7	11.0	12.4	11.9	13.2	6.8	

※ 괄호()안의 값은 결측으로 인하여 OMI-TOMS 자료를 Dobson 관측 값으로 환산한 자료임.

2.7 자외선

□ 자외선A 일누적값 [단위: MJ/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0.70	0.67	0.46	0.30	-
2008	0.38	0.60	0.76	0.89	1.02	1.04	0.92	1.14	0.88	0.64	0.43	0.32	0.75
2009	0.41	0.46	0.76	0.96	1.09	1.12	1.05	1.05	0.91	0.73	0.41	0.31	0.77
2010	0.37	0.45	0.60	0.84	0.99	1.08	1.03	0.90	0.78	0.63	0.45	0.34	0.71
2011	0.42	0.51	0.77	0.85	0.89	0.90	0.79	0.78	0.84	0.63	0.39	0.33	0.67
2012	0.36	0.57	0.63	0.85	1.04	1.13	1.02	0.87	0.77	0.65	0.38	0.32	0.72
2013	0.35	0.50	0.74	0.83	0.97	1.09	0.78	1.01	0.78	0.66	0.38	0.29	0.70
2014	0.36	0.49	0.66	0.81	1.09	1.14	0.99	0.79	0.81	0.61	0.41	0.31	0.71
2015	0.36	0.47	0.76	0.81	1.10	1.09	0.94	0.98	0.88	0.60	0.30	0.30	0.72
2016	0.34	0.47	0.69	0.80	1.05	1.03	0.94	1.02	0.72	0.50	0.37	0.30	0.69
2017	0.34	0.49	0.70	0.86	1.02	1.28	0.85	0.97	0.81	0.54	0.38	0.29	0.71
2018	0.33	0.46	0.60	0.75	0.81	1.10	1.30	1.15	0.91	0.68	0.42	0.36	0.74
2019	0.42	0.54	0.74	0.87	1.22	1.20	1.00	1.14	0.78	0.67	0.45	0.33	0.78
2020	0.36	0.53	0.83	1.04	0.99	1.04	0.92	0.82	-	0.67	0.41	0.34	0.72

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.30	0.39	0.56	0.79	0.96	0.88	0.87	0.87	0.74	0.62	0.37	0.24	0.63
2013	0.29	0.41	0.64	0.72	0.93	0.79	0.88	0.94	0.71	0.60	0.36	0.26	0.63
2014	0.33	0.38	0.54	0.70	0.91	0.97	0.88	0.84	0.81	0.74	0.48	0.32	0.66
2015	0.36	0.46	0.73	0.82	1.13	0.94	1.02	0.96	0.86	0.74	0.36	0.30	0.72
2016	0.28	0.46	0.73	0.86	1.00	0.90	1.02	1.09	0.73	0.56	0.43	0.34	0.70
2017	0.41	0.59	0.77	0.99	1.20	1.06	1.09	1.16	-	0.65	0.52	0.35	0.80
2018	0.38	0.54	0.78	0.99	0.92	1.12	1.32	1.29	0.82	0.75	0.53	0.31	0.82
2019	0.41	0.51	0.76	0.95	1.16	1.03	0.91	1.07	-	-	0.53	0.33	0.77
2020	0.33	0.53	0.77	1.07	1.05	0.93	0.84	1.11	-	0.73	0.47	0.35	0.74



○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	-	-	-	-	-	-	0.81	0.83	-	0.65	0.36	0.36	-
2010	0.40	0.45	0.51	0.76	0.95	1.08	0.99	0.90	0.73	0.57	0.46	0.35	0.68
2011	0.45	0.45	0.74	0.82	-	0.99	0.94	0.76	0.69	0.59	0.35	-	0.68
2012	0.34	0.44	0.56	0.81	0.90	0.81	0.86	0.74	0.64	0.57	0.38	0.28	0.61
2013	0.34	0.43	0.59	0.74	0.85	0.81	0.85	0.82	0.61	0.45	0.38	0.29	0.60
2014	0.33	0.31	-	0.76	1.07	0.80	0.95	0.70	0.77	0.57	0.41	0.38	0.64
2015	0.37	0.50	0.75	0.70	1.10	0.91	0.95	0.92	0.75	0.64	0.31	0.30	0.68
2016	0.36	0.52	0.64	0.81	1.05	0.93	0.94	1.05	0.56	0.48	0.39	0.35	0.67
2017	0.41	0.59	0.71	0.91	1.15	1.14	0.84	-	0.76	0.52	0.46	0.39	0.72
2018	0.41	0.54	0.66	0.93	0.94	0.98	1.04	0.91	0.64	0.63	0.45	0.34	0.71
2019	0.42	0.51	0.71	0.82	1.10	1.04	0.98	1.02	0.69	0.64	0.46	0.40	0.73
2020	0.38	0.59	0.79	1.07	1.15	1.25	0.81	1.07	0.79	0.74	0.48	0.45	0.80

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.19	0.42	0.54	-	0.95	-	-	0.75	0.68	0.51	0.29	0.18	-
2013	0.26	0.33	-	0.66	0.89	0.82	0.84	0.85	0.61	0.42	0.29	-	0.60
2014	-	-	0.52	0.72	0.93	0.83	0.84	0.58	0.67	0.47	0.29	0.20	0.60
2015	0.20	0.35	0.57	0.65	0.97	0.85	0.83	0.78	0.64	0.66	0.29	0.24	0.59
2016	0.27	0.38	0.69	0.83	1.04	1.04	0.86	0.88	0.54	0.38	0.26	0.23	0.62
2017	0.28	0.36	0.55	0.84	1.01	1.08	0.83	-	0.85	0.53	0.39	0.28	0.64
2018	0.29	0.48	0.70	0.84	-	1.04	-	1.01	0.68	0.60	0.40	0.26	0.63
2019	0.35	0.45	0.72	0.95	1.24	0.98	0.99	1.03	0.70	0.57	0.30	0.30	0.71
2020	0.26	0.42	0.73	0.95	1.09	1.17	0.79	0.92	-	0.58	0.38	0.30	0.69

□ 자외선A 일 최댓값 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	37.82	34.65	25.78	19.18	-
2008	20.99	30.07	35.31	40.81	45.30	49.66	46.38	51.33	43.43	33.01	24.21	20.29	36.73
2009	23.81	26.07	37.12	42.92	46.33	49.46	48.98	49.38	42.70	35.24	23.62	17.88	36.96
2010	21.15	24.07	30.81	42.25	44.20	46.57	47.96	44.90	39.31	32.82	23.95	19.86	34.82
2011	23.49	25.92	35.98	39.45	41.45	41.14	41.50	40.41	40.12	30.99	22.79	19.46	33.56
2012	20.32	29.39	30.44	40.00	44.58	46.78	47.80	43.85	38.57	32.49	22.97	18.89	34.67
2013	20.39	25.91	34.71	36.46	40.79	46.27	38.73	44.63	36.94	33.26	22.35	17.20	33.14
2014	19.86	24.90	31.57	37.87	45.28	49.44	45.85	39.08	39.58	30.61	23.21	18.41	33.80
2015	20.39	25.55	34.31	37.72	47.05	46.98	43.30	43.49	39.70	30.26	18.30	17.79	33.73
2016	19.65	23.98	32.52	37.27	45.83	43.52	42.44	44.63	35.14	26.68	20.02	16.88	32.38
2017	19.13	24.23	31.40	36.60	43.16	51.55	41.74	47.31	37.17	27.38	21.23	16.68	33.13
2018	17.99	22.57	27.71	33.24	34.59	46.56	52.88	49.96	41.62	33.56	22.36	20.55	33.63
2019	22.26	27.90	33.63	39.65	47.43	49.94	46.35	51.24	37.86	32.65	23.52	18.80	35.94
2020	20.03	27.26	37.55	43.52	44.56	45.58	43.95	41.94	-	32.69	21.95	19.65	34.42

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	19.50	23.24	28.01	36.29	43.39	41.91	42.18	43.60	36.71	31.26	22.05	16.75	32.07
2013	18.31	21.82	31.44	37.15	42.00	38.64	39.25	43.75	36.11	30.86	21.67	17.25	31.52
2014	19.50	21.04	26.66	33.79	38.90	47.20	42.60	44.81	41.30	35.78	27.84	21.76	33.43
2015	21.29	26.62	36.77	41.76	48.98	44.94	46.54	46.84	41.92	36.24	21.25	19.90	36.09
2016	19.73	27.31	35.17	40.71	45.78	43.86	45.96	51.41	38.65	32.07	25.75	21.49	35.66
2017	25.61	31.05	36.82	44.17	52.08	47.34	50.99	54.99	-	35.89	29.39	22.73	39.19
2018	23.90	30.61	38.75	47.63	46.38	51.42	57.75	56.73	43.62	37.19	29.13	19.94	40.25
2019	23.68	28.00	36.93	46.25	50.17	47.75	44.65	50.79	-	-	28.59	21.11	37.79
2020	20.72	29.50	37.01	45.74	47.88	41.75	44.54	52.50	-	36.18	25.48	21.81	36.65



○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	-	-	-	-	-	-	43.06	43.38	-	32.29	21.75	19.57	-
2010	21.94	23.89	27.49	37.17	42.81	47.05	45.80	45.60	37.21	32.48	23.76	19.05	33.69
2011	23.35	23.75	34.53	39.35	-	43.96	44.50	39.72	35.26	29.90	20.60	-	33.49
2012	18.48	23.09	27.26	36.59	40.69	38.38	40.06	38.85	33.19	29.10	20.88	16.03	30.22
2013	17.72	22.75	28.74	35.07	38.19	38.20	40.17	38.22	30.26	25.23	19.86	15.47	29.16
2014	17.74	18.73	-	35.96	44.37	37.69	46.05	37.03	37.96	28.83	22.19	20.45	31.55
2015	19.77	26.03	34.96	35.14	45.76	41.91	43.11	42.88	38.17	31.80	18.40	17.29	32.94
2016	19.21	26.35	31.62	36.83	45.34	42.36	43.99	46.33	29.86	27.46	20.71	19.36	32.45
2017	21.64	29.09	34.38	41.86	48.82	46.92	39.36	-	37.71	29.20	24.24	20.29	33.95
2018	21.05	26.70	31.20	39.05	40.81	45.06	43.55	42.21	36.72	31.38	24.20	18.93	33.40
2019	21.26	26.64	33.63	38.62	45.37	44.76	48.22	46.02	36.06	32.61	25.81	21.44	35.04
2020	21.96	29.12	37.47	46.28	49.24	52.40	39.89	52.07	40.36	36.49	24.96	23.69	37.83

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	13.39	24.00	29.61	-	42.80	-	-	38.75	37.62	27.01	19.71	12.92	-
2013	16.73	20.48	-	34.87	39.03	38.73	40.87	38.74	31.50	25.60	18.22	-	30.48
2014	-	-	26.56	32.56	41.31	39.00	39.81	29.65	32.92	24.14	17.74	13.97	29.77
2015	14.56	21.01	27.54	30.70	39.48	39.85	37.07	35.94	31.49	32.84	17.63	15.70	28.65
2016	17.80	22.55	33.36	39.06	43.40	45.44	42.25	42.12	31.66	23.00	17.05	15.45	31.10
2017	18.24	23.28	29.76	38.53	43.56	45.41	38.85	-	39.14	31.03	24.13	19.30	31.93
2018	20.79	26.48	31.81	35.64	-	45.95	-	45.66	37.03	32.12	23.04	18.01	31.65
2019	20.57	26.44	35.57	43.34	49.55	44.26	44.81	44.88	36.21	31.11	19.47	19.49	34.64
2020	18.21	25.91	35.76	43.75	44.89	48.38	39.23	44.73	-	31.74	22.28	19.77	34.06

□ 자외선B(홍반자외선) 일누적값 [단위: kJ/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	1.85	2.63	3.08	3.91	3.83	3.50	2.53	1.55	0.88	0.54	2.43
2000	0.60	1.09	1.72	2.40	2.65	3.50	4.14	3.74	2.62	-	1.00	0.70	2.20
2001	0.62	1.20	1.60	2.64	3.07	-	3.53	3.79	3.27	1.70	0.89	0.63	2.09
2002	0.68	1.14	1.70	2.67	2.88	3.52	3.71	2.70	2.55	1.67	0.77	0.57	2.05
2003	0.58	0.96	1.56	-	2.96	2.62	2.77	2.71	2.42	1.78	0.89	0.60	1.80
2004	0.70	1.18	1.83	2.62	2.84	3.19	3.03	3.82	2.61	1.85	0.82	-	2.23
2005	-	1.17	1.94	2.61	3.66	3.25	3.41	3.64	3.12	1.98	1.06	0.58	2.40
2006	0.74	1.29	1.91	2.20	3.18	3.25	2.92	4.04	2.48	1.60	0.80	0.58	2.08
2007	0.64	1.12	1.34	2.13	2.89	3.18	2.97	3.26	2.03	1.73	0.95	0.47	1.89
2008	0.67	1.13	1.57	2.18	2.79	2.91	3.03	3.39	2.37	1.47	0.78	0.51	1.90
2009	0.63	0.90	1.49	2.19	2.63	2.86	2.92	3.15	2.54	1.58	0.74	0.48	1.84
2010	0.61	0.77	1.20	1.93	2.54	2.77	3.14	-	-	1.58	0.84	-	-
2011	-	-	-	2.30	2.85	3.02	2.78	3.10	3.00	1.78	1.00	0.62	-
2012	0.68	1.38	1.73	2.68	3.29	3.91	4.05	3.26	2.52	2.01	0.87	0.59	2.25
2013	0.72	1.23	2.07	2.43	3.28	3.84	2.89	3.09	2.31	1.81	0.83	0.50	2.08
2014	0.65	1.03	1.57	2.09	2.79	2.84	2.78	2.36	2.68	1.84	0.91	0.52	1.84
2015	0.69	0.92	1.86	2.33	3.56	3.57	3.33	-	2.74	1.67	0.68	0.56	1.99
2016	0.61	1.02	1.94	2.52	3.68	3.77	3.62	3.75	2.55	1.74	0.94	0.64	2.23
2017	0.74	1.17	1.92	2.66	3.41	3.60	2.53	2.96	2.80	2.62	1.37	0.83	2.22
2018	0.97	1.44	2.41	3.29	3.20	3.39	5.18	4.44	3.00	1.93	1.00	0.75	2.58
2019	0.91	1.33	1.92	2.65	3.75	3.65	3.20	3.94	2.47	1.79	0.97	0.56	2.26
2020	0.63	1.05	1.92	2.62	3.00	3.33	2.93	2.74	-	2.08	1.02	0.66	2.00



○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2011	-	-	-	2.73	3.05	-	-	-	2.46	1.63	0.93	0.53	-
2012	0.80	1.19	1.79	2.52	3.24	3.29	3.64	3.80	2.83	2.27	1.10	0.65	2.26
2013	0.83	1.41	2.22	2.72	3.73	3.11	3.77	3.52	2.71	2.21	1.11	0.66	2.33
2014	0.86	1.16	1.65	2.58	3.33	3.06	3.34	2.99	2.63	2.08	1.15	0.61	2.12
2015	0.72	0.97	1.73	2.32	3.63	3.01	3.61	3.27	2.62	2.12	0.86	0.66	2.13
2016	0.57	1.01	1.93	2.58	3.28	3.03	3.72	3.72	2.45	1.66	1.05	0.78	2.15
2017	1.10	1.60	2.18	2.91	3.74	3.51	4.07	4.18	-	2.07	1.38	0.74	2.50
2018	0.85	1.25	2.11	2.91	3.08	3.67	4.75	4.36	2.91	2.60	1.60	0.87	2.58
2019	1.21	1.64	2.36	3.11	3.84	3.29	3.03	3.25	-	-	1.39	0.79	2.39
2020	0.80	1.41	2.14	3.08	3.11	2.62	2.35	-	-	1.94	1.14	0.86	-

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	1.77	2.46	3.25	3.53	3.17	3.21	2.38	-	0.91	0.69	-
2000	-	-	1.88	-	2.82	3.04	3.64	3.21	2.34	1.73	1.03	0.75	-
2001	0.63	1.22	1.62	2.66	2.76	-	4.03	3.51	2.76	1.55	1.02	0.75	2.05
2002	0.72	1.30	1.85	-	-	3.37	3.33	2.83	2.42	1.65	1.03	0.60	1.91
2003	0.69	0.96	1.47	2.29	2.46	2.60	2.40	2.83	2.21	1.81	0.92	0.78	1.79
2004	0.79	1.32	1.92	2.66	2.77	3.30	3.50	2.95	2.14	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	3.44	2.97	3.07	2.10	1.50	1.03	0.76	-
2006	0.73	1.36	1.81	2.10	2.94	3.16	2.67	3.65	2.47	1.86	0.84	0.65	2.02
2007	0.69	1.02	1.58	2.23	3.04	3.30	2.96	3.30	2.02	1.68	1.11	0.62	1.96
2008	0.73	-	1.66	2.55	3.02	2.82	3.77	3.63	2.54	1.82	0.93	0.68	2.20
2009	0.74	1.09	1.71	2.44	3.00	3.13	2.82	3.06	2.55	1.84	0.93	-	2.12
2010	0.71	0.84	1.02	1.82	2.47	2.71	3.16	3.01	2.24	1.54	0.88	0.56	1.75
2011	0.76	0.82	1.59	2.09	-	3.08	3.34	3.18	2.87	2.10	1.01	-	2.08
2012	0.86	1.50	1.87	3.24	3.68	3.78	3.80	3.15	2.71	2.25	1.19	0.72	2.40
2013	0.96	1.53	2.20	2.72	3.43	3.37	3.18	2.86	2.13	1.60	1.08	0.68	2.15
2014	0.82	0.91	1.53	2.09	3.05	2.48	3.17	2.38	2.31	1.52	0.91	0.60	1.81
2015	0.67	0.91	1.61	2.08	3.26	2.68	3.16	2.98	2.25	1.71	0.65	0.53	1.87
2016	0.61	0.99	1.53	2.21	3.13	2.84	3.13	3.26	1.66	1.42	0.86	0.67	1.86
2017	0.86	1.31	1.75	2.49	3.26	3.60	3.04	3.43	2.44	1.46	1.00	0.63	2.11
2018	0.71	0.96	1.58	2.21	2.72	2.88	3.52	2.98	2.04	1.94	1.13	0.82	1.96
2019	1.03	1.49	2.09	2.78	3.92	3.71	3.66	4.07	2.54	1.91	1.15	0.80	2.43
2020	0.75	1.35	2.07	2.83	3.28	3.91	2.52	3.73	2.26	1.87	0.95	0.70	2.19

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.39	1.04	1.40	2.48	-	2.77	3.02	2.86	2.37	1.56	0.64	0.32	1.71
2013	0.52	0.79	1.45	1.80	2.89	2.66	2.85	2.81	2.09	-	-	-	-
2014	-	-	1.42	2.17	3.02	2.75	3.00	2.12	2.28	1.54	0.78	0.39	1.95
2015	0.44	0.79	1.55	2.16	3.48	3.19	3.47	3.05	2.10	1.68	0.62	0.44	1.91
2016	0.47	0.77	1.76	2.57	3.56	3.70	3.38	3.42	1.94	1.26	0.61	0.46	1.99
2017	0.55	0.79	1.39	2.51	3.37	3.82	3.45	3.37	2.66	1.51	0.80	0.43	2.05
2018	0.47	0.82	1.65	2.36	3.28	3.34	4.30	3.61	2.22	2.27	1.25	0.69	2.19
2019	0.90	1.22	1.84	2.49	3.59	3.51	3.79	4.01	2.70	1.96	0.86	0.69	2.30
2020	0.59	1.08	2.10	2.93	3.85	4.21	2.72	2.94	-	1.50	0.93	0.68	2.14



□ 자외선B(홍반자외선) 일 최댓값 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	0.111	0.144	0.158	0.192	0.215	0.201	0.155	0.098	0.058	0.038	0.137
2000	0.041	0.067	0.101	0.130	0.149	0.189	0.228	0.210	0.158	-	0.066	0.045	0.126
2001	0.042	0.077	0.092	0.138	0.161	-	0.216	0.209	0.182	0.103	0.057	0.043	0.120
2002	0.046	0.071	0.099	0.147	0.160	0.180	0.206	0.181	0.143	0.101	0.054	0.037	0.119
2003	0.039	0.060	0.093	-	0.157	0.141	0.170	0.164	0.143	0.108	0.061	0.041	0.107
2004	0.047	0.072	0.105	0.140	0.148	0.178	0.170	0.208	0.152	0.104	0.053	-	0.125
2005	-	0.071	0.113	0.147	0.196	0.182	0.192	0.212	0.179	0.121	0.068	0.041	0.138
2006	0.049	0.081	0.109	0.127	0.171	0.180	0.190	0.215	0.143	0.096	0.056	0.040	0.121
2007	0.043	0.075	0.090	0.124	0.155	0.172	0.174	0.203	0.131	0.108	0.061	0.036	0.114
2008	0.044	0.069	0.092	0.125	0.147	0.168	0.181	0.189	0.143	0.093	0.052	0.037	0.112
2009	0.044	0.062	0.091	0.122	0.143	0.157	0.171	0.184	0.142	0.094	0.052	0.033	0.108
2010	0.041	0.051	0.076	0.119	0.141	0.149	0.182	-	-	0.099	0.054	-	-
2011	-	-	-	0.132	0.162	0.171	0.179	0.195	0.174	0.112	0.068	0.044	-
2012	0.046	0.088	0.104	0.152	0.182	0.204	0.232	0.195	0.156	0.121	0.064	0.043	0.132
2013	0.051	0.080	0.123	0.135	0.177	0.211	0.174	0.168	0.133	0.110	0.057	0.035	0.121
2014	0.042	0.064	0.091	0.117	0.144	0.148	0.157	0.153	0.154	0.111	0.063	0.037	0.107
2015	0.046	0.061	0.102	0.132	0.189	0.191	0.187	-	0.154	0.101	0.049	0.039	0.114
2016	0.041	0.062	0.111	0.141	0.198	0.194	0.200	0.199	0.150	0.108	0.061	0.043	0.126
2017	0.050	0.070	0.106	0.140	0.178	0.179	0.154	0.174	0.163	0.158	0.091	0.057	0.127
2018	0.064	0.086	0.136	0.179	0.171	0.176	0.260	0.233	0.167	0.116	0.064	0.050	0.142
2019	0.058	0.083	0.107	0.145	0.181	0.187	0.181	0.216	0.142	0.106	0.062	0.038	0.126
2020	0.041	0.066	0.108	0.135	0.162	0.176	0.169	0.164	-	0.124	0.066	0.046	0.114

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2011	-	-	-	0.149	0.174	-	-	-	0.142	0.104	0.068	0.042	-
2012	0.061	0.084	0.109	0.140	0.177	0.190	0.212	0.228	0.175	0.140	0.078	0.052	0.137
2013	0.065	0.091	0.137	0.166	0.202	0.184	0.202	0.199	0.165	0.139	0.080	0.051	0.140
2014	0.061	0.074	0.102	0.150	0.180	0.184	0.195	0.194	0.162	0.129	0.079	0.050	0.130
2015	0.055	0.070	0.113	0.147	0.192	0.176	0.203	0.194	0.157	0.126	0.060	0.051	0.129
2016	0.046	0.072	0.114	0.150	0.184	0.179	0.205	0.216	0.155	0.113	0.073	0.057	0.130
2017	0.079	0.100	0.126	0.158	0.196	0.190	0.228	0.238	-	0.135	0.091	0.057	0.145
2018	0.062	0.083	0.126	0.169	0.183	0.203	0.248	0.231	0.182	0.151	0.100	0.065	0.150
2019	0.081	0.105	0.136	0.184	0.202	0.186	0.177	0.186	-	-	0.087	0.058	0.140
2020	0.057	0.092	0.123	0.159	0.167	0.141	0.146	-	-	0.112	0.071	0.060	0.113

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	0.109	0.140	0.166	0.192	0.192	0.196	0.143	-	0.060	0.044	-
2000	-	-	0.114	-	0.159	0.164	0.215	0.197	0.145	0.108	0.069	0.049	-
2001	0.041	0.074	0.096	0.143	0.147	-	0.229	0.205	0.167	0.100	0.064	0.049	0.120
2002	0.046	0.078	0.107	-	-	0.176	0.188	0.171	0.149	0.100	0.064	0.041	0.112
2003	0.045	0.061	0.095	0.132	0.134	0.141	0.150	0.176	0.142	0.108	0.059	0.049	0.108
2004	0.050	0.080	0.111	0.150	0.155	0.177	0.199	0.178	0.138	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	0.184	0.163	0.178	0.129	0.097	0.062	0.046	-
2006	0.048	0.083	0.106	0.123	0.170	0.170	0.167	0.208	0.156	0.113	0.056	0.043	0.120
2007	0.046	0.065	0.098	0.131	0.164	0.185	0.172	0.194	0.133	0.112	0.069	0.042	0.118
2008	0.050	-	0.102	0.139	0.163	0.161	0.207	0.211	0.155	0.109	0.062	0.046	0.128
2009	0.049	0.075	0.105	0.140	0.157	0.174	0.179	0.194	0.151	0.116	0.065	-	0.128
2010	0.046	0.054	0.069	0.106	0.137	0.152	0.183	0.177	0.138	0.101	0.055	0.036	0.105
2011	0.048	0.053	0.092	0.123	-	0.169	0.193	0.196	0.174	0.131	0.071	-	0.125
2012	0.059	0.095	0.118	0.182	0.208	0.214	0.212	0.198	0.165	0.138	0.079	0.051	0.143
2013	0.062	0.096	0.132	0.155	0.188	0.190	0.180	0.164	0.125	0.107	0.070	0.045	0.126
2014	0.054	0.067	0.094	0.120	0.160	0.142	0.188	0.157	0.141	0.100	0.060	0.041	0.110
2015	0.044	0.060	0.096	0.124	0.168	0.152	0.173	0.167	0.136	0.102	0.046	0.037	0.109
2016	0.039	0.062	0.093	0.123	0.165	0.157	0.176	0.175	0.107	0.095	0.054	0.046	0.108
2017	0.054	0.078	0.101	0.137	0.168	0.184	0.170	0.206	0.146	0.097	0.062	0.040	0.120
2018	0.044	0.059	0.091	0.115	0.143	0.159	0.180	0.167	0.134	0.117	0.072	0.054	0.111
2019	0.064	0.093	0.120	0.162	0.202	0.194	0.219	0.222	0.158	0.118	0.076	0.051	0.140
2020	0.051	0.081	0.121	0.153	0.175	0.203	0.152	0.220	0.140	0.112	0.059	0.045	0.126

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.031	0.070	0.094	0.135	-	0.161	0.172	0.171	0.155	0.100	0.051	0.027	0.106
2013	0.040	0.056	0.093	0.116	0.151	0.154	0.167	0.153	0.128	-	-	-	-
2014	-	-	0.087	0.120	0.163	0.153	0.170	0.131	0.135	0.095	0.056	0.033	0.114
2015	0.037	0.057	0.093	0.121	0.172	0.179	0.186	0.168	0.122	0.099	0.044	0.033	0.109
2016	0.037	0.053	0.105	0.147	0.183	0.199	0.202	0.198	0.137	0.090	0.048	0.035	0.119
2017	0.042	0.060	0.092	0.141	0.177	0.200	0.193	0.204	0.150	0.102	0.056	0.033	0.121
2018	0.038	0.054	0.095	0.127	0.176	0.181	0.224	0.198	0.145	0.137	0.079	0.051	0.125
2019	0.059	0.080	0.104	0.134	0.171	0.187	0.202	0.206	0.163	0.123	0.062	0.050	0.128
2020	0.046	0.077	0.121	0.163	0.188	0.206	0.158	0.165	-	0.093	0.060	0.048	0.120



2.7 총대기침적

□ 습성침적 관측자료(부피가중평균)

○ 안면도

연	개수	강수량 (mm)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)									
					F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
					($\mu\text{eq}/\text{L}$)								
1997	21	602.2	4.76	21.6	5.2	61.1	16.8	43.2	68.7	28.0	3.8	11.0	15.7
1998	35	869.3	4.96	23.5	2.7	66.7	20.0	53.4	59.6	33.2	3.8	15.4	17.6
1999	47	1198.9	5.03	18.7	0.9	60.9	16.6	30.9	59.9	17.7	2.8	13.0	16.4
2000	18	206.8	4.56	28.4	0.5	54.7	33.7	66.1	54.4	33.9	3.8	16.0	31.1
2001	22	286.5	4.70	19.2	1.1	32.0	21.5	49.4	35.3	36.8	2.2	7.7	16.2
2002	21	369.5	4.69	18.9	0.5	25.0	26.0	38.3	32.4	32.3	1.8	6.2	12.0
2003	32	298.5	4.44	26.1	3.9	27.8	31.6	57.2	27.9	38.8	2.1	8.4	17.8
2004	56	1001.0	4.73	19.1	1.0	37.8	25.1	46.3	35.8	26.2	2.2	9.7	16.1
2005	56	956.0	4.58	32.8	2.0	70.2	44.7	52.4	62.0	33.0	4.0	16.8	24.3
2006	45	530.0	4.79	48.2	2.2	141.9	53.2	103.5	123.6	56.4	7.9	34.7	62.2
2007	74	1248.0	4.52	32.8	3.0	49.2	36.3	70.2	43.7	39.4	3.0	12.6	21.4
2008	62	687.5	4.41	40.1	1.3	74.1	40.4	66.1	65.0	38.5	3.9	17.3	22.9
2009	48	723.5	4.66	32.1	2.3	90.5	35.9	57.0	77.5	36.6	3.9	19.8	20.9
2010	77	1412.5	4.75	22.7	1.1	42.5	26.2	43.0	37.0	31.2	2.1	10.4	14.8
2011	64	928.0	4.53	36.0	1.5	59.7	46.7	73.3	51.9	63.7	3.2	16.5	30.2
2012	68	1212.5	4.75	21.9	0.6	59.5	20.4	36.3	51.6	23.7	1.5	14.0	13.6
2013	64	946.5	4.57	31.2	1.7	68.4	34.8	57.5	57.7	45.3	3.0	15.4	21.4
2014	73	787.5	4.70	23.5	1.2	45.7	31.2	44.7	38.9	44.6	2.3	11.2	15.5
2015	70	644.5	4.62	35.5	1.3	101.7	42.6	61.1	85.7	55.1	3.4	21.2	20.4
2016	56	648.5	4.91	19.9	0.9	47.3	28.5	38.1	39.3	40.8	2.4	11.4	15.5
2017	54	471.5	4.70	30.8	1.0	79.1	48.6	54.3	65.6	55.0	2.8	17.9	21.4
2018	56	880.0	5.25	12.0	0.5	32.1	16.5	20.8	28.0	23.9	1.3	6.8	7.1
2019	54	656.5	5.14	26.0	1.1	82.1	40.0	44.0	74.1	58.8	2.5	19.0	17.6
2020	68	1079.0	5.23	14.5	0.3	52.3	15.4	19.3	44.9	23.0	1.4	10.2	6.4
연평균	-	1083.7	4.72	26.0	1.5	60.4	30.3	49.1	53.9	36.6	2.8	14.0	18.9

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				(μ S/cm)	(μeq/L)								
겨울	2010~2019	109	4.39	71.8	2.3	244.8	84.2	114.2	211.8	79.9	8.4	52.8	48.6
	2020	17	5.06	34.7	1.1	119.8	55.7	57.1	109.2	69.4	4.5	28.1	24.2
봄	2010~2019	142	4.91	22.4	14	33.7	34.7	52.3	28.9	45.1	2.5	10.9	32.2
	2020	14	5.54	18.5	0.9	34.6	32.7	39.3	26.4	57.0	1.7	7.7	14.8
여름	2010~2019	221	4.76	20.5	0.9	35.9	26.3	39.3	30.0	42.5	1.4	8.5	9.5
	2020	28	5.21	9.9	0.2	29.5	10.6	12.3	25.3	17.3	0.8	6.3	4.3
가을	2010~2019	158	4.72	23.8	0.9	68.7	24.1	36.3	60.2	25.3	2.2	14.9	11.5
	2020	12	5.55	19.9	0.2	111.8	9.3	19.2	97.1	10.5	2.2	20.2	6.2

※ “지구대기감시 업무매뉴얼(II)[에어로졸 및 총대기침적], 2017, 국립기상과학원”의 QA/QC방법으로 자료 처리함

※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함



○ 고산

연	개수	강수량	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(mm)		(μS/cm)	(μeq/L)								
1998	6	266.3	5.47	19.8	0.4	77.3	17.0	39.6	65.8	19.0	3.4	18.2	17.7
1999	38	1079.9	5.34	33.7	0.7	164.2	17.8	40.3	178.3	12.7	6.4	33.9	24.6
2000	17	178.7	4.65	23.6	0.4	61.8	21.4	45.2	62.0	19.4	3.8	21.5	19.3
2001	21	418.7	4.84	19.3	0.3	77.4	11.4	38.3	69.6	18.4	2.9	14.5	8.3
2002	30	503.9	4.78	24.0	0.0	79.3	21.5	42.7	93.6	16.7	3.2	21.8	15.9
2003	36	524.4	4.60	31.6	2.8	104.5	25.9	61.9	101.2	32.5	4.0	27.3	18.4
2004	41	1092.3	4.81	22.5	0.6	94.9	15.2	34.5	84.2	10.7	4.0	20.6	11.9
2005	42	664.6	4.68	30.9	1.1	93.9	32.5	45.0	82.8	15.2	4.8	24.7	20.4
2006	46	1010.4	4.98	23.7	1.3	75.3	20.4	45.0	64.2	11.1	3.2	19.2	31.2
2007	50	936.7	4.75	46.7	1.4	261.1	17.1	56.0	236.4	15.2	6.7	41.2	19.2
2008	52	745.8	4.57	31.4	0.8	85.8	23.1	45.6	75.5	17.9	4.0	17.8	13.9
2009	49	1045.2	4.81	20.4	1.0	54.1	18.1	33.9	47.2	13.6	2.8	12.1	12.0
2010	57	1140.7	5.05	38.8	0.9	188.1	29.8	49.2	171.6	15.6	8.9	42.0	29.8
2011	42	700.6	4.63	35.7	0.5	134.7	28.7	42.3	116.5	17.8	7.9	28.8	21.1
2012	79	1583	4.91	22.7	0.4	93.8	13.2	28.8	80.8	12.1	2.4	19.4	12.6
2013	73	807	4.66	35.5	1.0	130.0	29.4	53.4	112.6	27.9	3.7	27.3	20.1
2014	99	1434	4.90	19.9	1.1	68.4	18.7	33.0	58.8	18.5	2.3	15.1	15.8
2015	93	1747.5	5.07	13.2	0.5	38.5	14.7	23.8	32.8	16.6	1.4	7.7	7.9
2016	99	1375.0	5.12	24.4	0.3	119.6	14.2	31.7	103.2	16.2	2.9	23.8	13.0
2017	51	893.4	4.88	17.1	0.5	39.0	22.2	31.2	34.0	24.4	1.5	8.5	7.6
2018	71	1368.0	4.95	17.1	0.5	58.5	15.3	23.8	48.7	18.5	1.7	11.1	7.0
2019	70	1518.6	5.02	15.4	0.3	59.1	11.3	19.1	52.1	13.3	1.6	12.7	5.9
2020	65	1194.1	5.07	34.5	0.3	188.9	16.2	37.1	162.8	21.6	4.2	34.6	12.3
연평균	-	1449.9	4.88	25.3	0.7	101.9	18.7	36.3	91.8	16.8	3.6	21.2	15.0

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				(μ S/cm)	(μeq/L)								
겨울	2010~2019	155	4.68	49.5	0.8	223.7	35.2	65.6	199.0	25.3	5.9	45.9	27.8
	2020	14	4.92	37.4	0.3	176.1	24.8	44.4	162.4	30.5	4.4	37.1	11.7
봄	2010~2019	185	4.88	19.4	0.8	53.2	20.6	35.9	45.7	23.4	2.7	12.4	15.8
	2020	12	5.00	20.8	0.4	57.1	24.1	35.8	46.7	31.4	1.5	8.8	8.3
여름	2010~2019	216	5.02	14.0	0.5	46.1	13.3	19.3	38.7	13.5	2.2	9.8	7.3
	2020	21	5.06	8.7	0.2	13.7	12.2	14.0	12.1	19.3	0.7	3.3	3.0
가을	2010~2019	172	5.03	25.5	0.4	124.2	14.8	29.1	109.2	12.2	3.4	25.0	12.0
	2020	15	5.20	72.0	0.3	479.6	11.7	61.5	408.0	14.7	10.3	88.4	26.8

※ 2012년 이전까지 (구)고산기상대에서, 2012년부터 환경분석센터(고산 기후변화감시소)로 이전하여 관측함

※ 2017년 7, 9월은 AWS고장으로 기상대 자료를 사용함

※ “지구대기감시 업무매뉴얼(II)[에어로졸 및 총대기침적], 2017, 국립기상과학원”의 QA/QC방법으로 자료 처리함

※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함



○ 울릉도

연	개수	강수량	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(mm)		(μ S/cm)									
1997	15	474.1	4.91	40.1	1.7	222.1	18.8	52.1	191.8	17.0	11.6	39.7	32.4
1998	23	872.9	5.17	40.7	0.9	204.4	18.4	55.5	159.8	14.2	12.7	37.4	33.5
1999	72	1431.8	5.13	48.6	1.1	232.8	23.6	62.3	223.6	12.5	11.8	44.4	33.4
2000	25	482.1	4.49	44.3	0.1	135.4	41.4	83.5	136.7	31.0	8.7	33.4	43.2
2001	16	320.3	4.81	33.3	0.1	165.5	16.6	55.4	159.4	18.8	9.1	33.6	27.6
2002	9	333	4.73	24.0	0.0	71.0	26.4	53.4	78.4	30.2	5.9	17.0	15.3
2003	16	493.8	4.85	23.6	0.7	83.8	20.5	49.3	79.6	26.3	5.4	23.8	25.3
2004	32	838.2	5.08	35.2	0.6	170.0	20.8	63.3	150.3	25.7	11.3	35.1	30.6
2005	50	858.5	5.36	65.1	1.1	366.3	54.3	33.3	295.8	9.7	53.9	67.1	79.8
2006	87	1621.9	5.12	27.5	0.8	126.4	14.1	41.6	94.9	12.2	19.1	22.9	21.9
2007	67	1266.2	4.71	41.4	1.9	146.7	34.0	67.3	105.0	31.2	34.1	25.8	31.4
2008	86	1278	4.66	39.3	0.8	144.5	25.7	58.9	125.7	21.2	13.0	26.4	22.4
2009	53	1227.2	5.18	43.4	1.1	212.6	21.9	59.4	151.2	20.8	45.8	35.3	37.3
2010	66	1225.6	4.82	51.6	0.8	238.7	26.8	67.6	174.4	25.5	52.3	42.1	34.2
2011	69	1344	4.86	55.2	0.9	255.3	28.5	70.3	189.2	35.4	56.2	43.2	35.6
2012	84	1513.4	4.41	67.8	0.9	273.9	41.3	89.4	240.3	34.0	8.6	57.3	34.1
2013	62	1126.1	4.93	57.2	1.3	233.6	45.0	83.4	206.9	35.7	10.6	53.6	93.9
2014	90	1490.4	4.69	56.9	1.1	266.8	40.7	79.8	236.1	34.7	9.3	56.2	37.5
2015	88	1299.6	5.11	34.0	0.4	185.0	13.2	42.0	162.4	11.4	6.4	34.5	13.6
2016	102	1911.9	4.92	41.7	0.7	210.7	20.7	53.8	187.4	20.9	6.5	43.2	22.1
2017	80	1008.9	4.88	40.7	1.1	204.9	27.5	57.6	176.8	25.2	6.4	41.2	18.6
2018	78	1357.1	4.96	31.5	0.5	152.4	18.6	42.4	134.3	16.9	4.1	29.4	12.6
2019	79	1163.7	5.09	43.7	0.4	243.5	18.3	49.8	215.9	19.9	6.6	50.0	20.9
2020	76	1140.2	4.98	37.3	0.3	204.6	13.9	42.9	179.3	10.4	3.6	29.0	10.1
연평균	-	1580.8	4.85	45.7	0.9	213.9	7.1	61.8	180.9	23.1	18.8	41.1	32.7

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				(μ S/cm)	(μ eq/L)								
겨울	2010~2019	292	4.53	81.6	1.1	389.8	49.4	107.1	337.9	40.2	20.3	77.9	40.3
	2020	26	4.90	48.2	0.3	255.6	16.6	58.1	226.6	20.1	6.1	52.4	14.6
봄	2010~2019	152	4.94	42.0	1.1	166.8	32.7	72.7	138.9	37.3	20.3	34.0	44.8
	2020	14	4.62	32.2	0.5	127.9	20.6	51.0	103.8	11.9	2.0	15.0	10.4
여름	2010~2019	134	5.09	26.3	0.6	123.6	12.9	32.8	99.6	17.1	13.2	23.5	17.1
	2020	22	5.26	13.9	0.1	62.6	8.0	17.1	57.9	7.3	1.9	14.0	5.6
가을	2010~2019	215	4.90	44.6	0.5	228.4	19.5	50.3	195.0	14.4	14.6	45.1	29.3
	2020	18	5.11	56.4	0.4	353.9	14.5	56.3	307.3	8.2	5.1	40.8	13.0

※ "지구대기감시 업무매뉴얼(II)[에어로졸 및 총대기침적], 2017, 국립기상과학원"의 QA/QC방법으로 자료 처리함

※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함



[부록 3] 기후변화감시 기술노트 목록

- 기술노트 2014-01 통합지구대기화학관측(IGACO)의 오존 및 자외선 이행 계획
- 기술노트 2014-02 GC- μ ECD를 활용한 대기 농도 수준의 SF₆ 분석 가이드라인
- 기술노트 2014-03 건조 공기 포집 및 안정도 평가를 위한 가이드라인
- 기술노트 2014-04 강수화학 국제비교실험 참가방법 및 결과
- 기술노트 2014-05 WMO 지구대기감시(GAW) 전략계획(2012-2015) : WMO/GAW 전략계획(2008-2015) 보강
- 기술노트 2014-06 표준 에어로졸 샘플링 시스템
- 기술노트 2014-07 총자외선지수 산출기법 및 프로그램
- 기술노트 2014-08 강수화학 측정자료의 분석 절차
- 기술노트 2015-01 오존층에 관한 질문과 답변 20가지
- 기술노트 2015-02 WMO 육불화황 세계표준센터의 3차 표준가스 제조 방법
- 기술노트 2015-03 Various Methods for Atmospheric SF₆ Using GC- μ ECD (WMO/GAW Report NO. 222)
- 기술노트 2015-04 강수화학(대기 침적) 측정 및 분석 매뉴얼
- 기술노트 2015-05 WMO Guideline 2014 Atmospheric Composition : MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC COMPOSITION
- 기술노트 2016-01 온실가스 관측업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-02 인체 비타민D 생성을 위한 태양자외선복사 노출시간 산정
- 기술노트 2016-03 국가승인기후변화감시통계 업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-04 에어로졸 관측업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-05 Calibration Methods of GC- μ ECD for Atmospheric SF₆ Measurements(WMO/GAW Report NO. 239)
- 기술노트 2017-01 WMO 육불화황 세계표준센터의 실무 매뉴얼
- 기술노트 2017-02 The report of the result on SF₆ Inter-Comparison Experiment, 2016 ~ 2017

※ 기상청 기후정보포털(www.climate.go.kr)의 홍보·열린마당에서 열람 가능

[부록 4] 지구대기감시 매뉴얼 목록

- 지구대기감시 업무 매뉴얼(I) 온실가스 및 반응가스
- 지구대기감시 업무 매뉴얼(II) 에어로졸 및 총대기침적
- 지구대기감시 업무 매뉴얼(III) 대기복사 성층권오존 및 자외선



[부록 5] 기후변화감시 관측자료 활용

▶ 출판연도순으로, 동일한 출판연도인 경우에 영문판(알파벳순)과 한글판 순서(가나다순)대로 수록

- 신도식, 김산, 김정식, 차주완 1999: 안면도에서 1998년 봄철에 관측된 황사의 광학적 특징. 한국대기환경학회지, 15, 739-746.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 1999: 황사 시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성. 한국대기환경학회지, 15, 575-586.
- 김만구, 강미희, 홍영민, 박기준, 이보경, 이동수, 김산 2001: 필터팩을 이용한 서울과 춘천, 안면도의 건성 강하량 측정. 한국대기환경학회지, 17, 19-29.
- 김정식, 최재천 2001: 배경 대기 중 CO₂ 자료 선정 방법에 따른 안면도 자료의 분석. 한국대기환경학회지, 17, 277-288.
- 문병관, 김준, 류상범, 윤용훈, 임종환 2001: 안면도 지구대기감시 관측소에서의 순복사 비교 관측과 복사계 보정. 대기, 11, 176-180.
- 최재천, 오성남, 김정식, 김주공 2001: 한반도 도서지역의 산성오염물질 강하량과 이동경로 사례분석. 한국기상학회지, 329-346.
- 박기준, 최재천, 박상순, 오성남 2002: 안면도에서 측정된 온실가스(CH₄, N₂O, CFCs)의 변동 특성 연구. 대기, 12, 502-505.
- 조경숙, 방소영, 최재천, 최병철, 차주완, 박기준, 최성철, 노영민, 김영준 2003: 에어러졸 라이더를 이용한 안면도에서의 에어로졸 수직분포 측정. 대기, 13, 484-487.
- 송병현, 박기준, 유희정, 최병철 2005: 지구대기감시관측소의 온실가스 농도 관측용 공기 시료 채취구 높이 변경에 따른 CO₂ 및 CH₄ 관측 자료 비교 연구. 기상학회지, 41, 5, 851-859.
- 노영민, 김영민, 김영준, 최병철 2006: GIST/ADEMRC 다파장 라만 라이더 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이더 비 연구. 한국대기환경학회지, 22, 1-14.
- 구태영, 홍기만, 김상백, 공종용, 김명수 2008: 2006년 4월 안면도에서 발생한 황사, 안개, 청명, 구름 사례에 대한 에어로졸 특성 분석. 대기, 18, 99-111.
- 노영민, 이한림, Detlef Muller 2010: 다파장 라만 라이더를 이용한 발생지에 따른 안면도 지역 에어로졸의 광학적 및 미세물리적 특성. 한국대기환경학회지, 26, 554-566.
- 유희정, 김정식, 이정순, 문동민, 이진복, 김종호, 김상훈, 이일용 2010: 기후변화감시센터의 대기 중 2007년 육불화황 측정 결과 및 특성. 한국대기환경학회지, 27, 1, 1-15.
- 강창희, 김원형, 허철구, 강동훈 2012: 제주도 고산지역의 라돈 배경농도 실시간 모니터링, 분석

- 과학, 한국분석과학회, 25(1), 7-13.
- 고희정, 신승희, 허철구, 김원형, 강창희, 강동훈, Scott Chambers 2013: 제주도 고산측정소의 대기 라돈농도 시계열 변화, 한국대기환경학회지, 29(1), 86~96.
- 김관철, 최성철, 노영민 2016: 선포토미터 데이터를 이용한 편광소멸도 산출과 라이다 편광 소멸도와의 비교, 대한원격탐사학회지, 32, 97-104.
- 이경화, 김관철, 노영민 2016: 대기 에어로졸 고도 분포와 선포토미터 편광소멸도의 연관성 연구, 대한원격탐사학회지, 32, 133-139.
- 부준오, 송정민, 신수현, 김원형, 강창희 2016: 2009~2014년 제주지역 강수의 이온조성 및 오염특성, 한국분석학회지, 1-10.
- 신동호, 노영민 2016: 황사 발원지에서 선포토미터를 활용한 에어로졸의 광학적 특성 산출과 미세먼지 속 황사 구분, 대한원격탐사학회지, 32, 245- 251.
- 송정민, 부준오, 김원형, 강창희, 고희정, S. Chambers 2017: 제주도 고산지역의 대기 라돈 배경 농도 및 시계열 변동, 한국대기환경학회지, 33(2), 174-183.
- 부준오, 송정민, 신수현, 김원형, 강창희 2017: 제주도 한라산 강수성분의 산성화 및 중화 기여도 조사, 한국환경분석학회지, 20(1), 1-10.
- 송정민, 김기주, 부준오, 김원형, 강창희 S. Chambers 2018: 대기 라돈 및 기체상 오염물질의 기류 이동경로별 농도변화:2010~2015년 측정, 한국대기환경학회지, 34(2), 321-330.
- 고희정, 정지영, 김은실, 이상삼, 류상범 2019: 안면도와 고산 기후변화감시소에서 채취한 강수성분의 조성 및 중화특성(2008~2017년), 대기, 403-416.
- Park, S. S., J. Kim, H. K. Cho, H. Lee, Y. Lee, and co-authors 2012: Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea. Atmos. Environ., 47, 226-235.
- Kim, Y. S., C. Yoon, S. W. Kim, K. Y. Kim, H. C. Kim and J. Ryu 2013: Observation of new particle formation and growth events in Asian continental outflow, Atmos. Environ., 64, 160-168.
- Kim, J., S. Park, M. K. Park, S. Li, J. Y. Kim, C. O. Jo, J. Y. Kim, and K. R. Kim 2013: Parameter optimization and automation of the FLEXPART Lagrangian Particle dispersion model for atmospheric back-trajectory analysis. Atmosphere, 23, 93-102.
- Kim, J., H. K. Cho, J. Mok, H. D. Yoo, and N. Cho 2013: Effects of ozone and aerosol on surface UV radiation variability. J. Photochem. Photobiol. B., 119, 46-51.



- Kim, Y. M., S. C. Yoon, S. W. Kim, K. Y. Kim, H. C. Lim, and J. G. Ryu 2013: Observation of new particle formation and growth events in Asian continental outflow. *Atmos. Environ.*, **64**, 160-168.
- Matsuil, H., M. Koikel, N. Takegawa, Y. Kondol, A. Takami, T. Takamura, S. Yoon, S. W. Kim, H. C. Lim, and J. D. Fast 2013: Spatial and temporal variations of new particle formation in East Asia using an NPF-explicit WRF-cham model: North-south contrast in new particle formation frequency. *Geophys. Res. Lett.*, **118**, 11,647-11,663.
- Panicker, A. S., S. H. Park, D. I. Lee, D. C. Kim, W. S. Jung, S. M. Jang, J. H. Jeong, D. S. Kim, J. g. Yu, and Harrison Jeong 2013: Observations of black carbon characteristics and radiative forcing over a global atmosphere watch supersite in Korea. *Atmos. Environ.*, **77**, 98-104.
- Park, S. Y., J. G. Park, C. S. Kim and I. C. Shin 2013: Clarification of methane emission sources using WDCGG data: Case study of Anmyeon-do observatory, *Atmos. Environ.*, **7-2**, 85-94.
- Hong, H., H. Lee, J. Kim, and Y.-G. Lee 2014: First comparison of OMI-DOAS total ozone using ground-based observations at a megacity site in East Asia: Causes of discrepancy and improvement in OMI-DOAS total ozone during summer, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 10058-10067.
- Kim, W., J. Kim, S. S. Park, and H.-K. Cho 2014: UV Sensitivity to Changes in Ozone, Aerosols, and Clouds in Seoul, South Korea, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **53**, 310-322.
- Kim, W. H., H. J. Ko, C. G. Hu, H. Lee, C. Lee, S. Chambers, A. G. Williams, and C. H. Kang 2014: Background Level of Atmospheric Radon-222 Concentrations at Gosan Station, Jeju Island, Korea in 2011, *Bull. Korean. Chem. Soc.*, **35**(4), 1149-1153.
- Crawford, J., S. Chambers, C. H. Kang, A. Griffiths, and W. H. Kim 2015: Analysis of a decade of Asian outflow of PM10 and TSP to Gosan, Korea; also incorporating Radon-222, *Atmos. Pollut. Res.*, **6**(3), 529-539.
- Park, S. S., Y. G. Lee, and J. H. Kim 2015: Impact of UV-A radiation on erythral UV and UV-index estimation over Korea. *Adv Atmos Sci.*, **32**, 1639-1646.

- Song, J. M., W. H. Kim, C. H. Kang, H. Lee, C. Lee, S. Chambers, and A. G. Williams, 2015: Temporal Variability of Atmospheric Radon-222 Concentration at Gosan Station, Jeju Island, Korea, during 2009-2013, *Bull. Korean. Chem. Soc.*, 36(2), 603-608.
- Thompson, R. L., A. Stohl, L. X. Zhou, E. Dlugokencky, Y. Fukuyama, Y. Tohjima, S.-Y. Kim, H. Lee, E. G. Nisbet, R. E. Fisher, D. Lowry, R. F. Weiss, R. G. Prinn, S. O'Doherty, D. Young11, and J. W. C. White. 2015: Methane emissions in East Asia for 2000-2011 estimated using an atmospheric Bayesian inversion, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 4352-4369, doi:10.1002/2014JD022394.
- Bu, J. O., J. M. Song, W. H. Kim, C. H. Kang, S. D. Chambers, A. G. Williams, and C. Lee 2016: Variability of Atmospheric Radon-222 and Secondary Aerosol Components in Accordance with Air Mass Transport Pathways at Jeju Island, Korea, during 2011-2014, *Bull. Korean. Chem. Soc.*, 37(6), 841-846.
- Chambers, S. D., C. H. Kang, A. G. Williams, J. Crawford, A. D. Griffiths, K. H. Kim, and W. H. Kim 2016: Improving the representation of cross-boundary transport of anthropogenic pollution in Southeast Asia using Radon-222, *Aerosol. Air. Qual. Res.*, 16(4): 958-976.
- Kim, J., H.K. Cho, J. Herman, S. S. Park, and co-authors 2016: Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI measurements over Seoul, Korea, *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 3661-3676.
- Noh, Y. M., K. H. Lee, K. C. Kim, S. K. Shin, D. Mueller, and D. H. Shin, 2016: Influence of the vertical absorption profile of mixed Asian dust plumes on aerosol direct radiative forcing over East Asia, *Atmos. Environ.*, 138, 191-204
- Noh, Y. M., S. K. Shin, K. H. Lee, D. Mueller and K. C. Kim 2016: Utilization of the depolarization ratio derived by AERONET Sun/sky radiometer data for type confirmation of a mixed aerosol plume over East Asia, *Int. J. Remote. Sens.*, 37, 2180-2197.
- Noh, Y. M., D. Mueller, S. K. Shin, D. H. Shin, and Y. J. Kim, 2016: Vertically-resolved profiles of mass concentrations and particle backscatter coefficients



- of Asian dust plumes derived from lidar observations of silicon dioxide, *Chemosphere*, 143. 24-31.
- Baek, K., J. H. Kim, J. R. Herman, D. P. Haffner and J. Kim 2017: Validation of Brewer and Pandora measurements using OMI total ozone, *Atmos. Environ.*, 160, 165-175.
- Ichii, K., M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, M. C. Alberto, J. Ardo, E. S. Euskirchen, M. Kang, T. Hirano, J. Joiner, H. Kobayashi, L. B. Marchesini, L. Merbold, A. Miyata, T. M. Saitoh, K. Takagi, A. Varlagin, M. S. Bret-Harte, K. Kitamura, Y. Kosugi, A. Kotani, K. Kumar, S-G. Li, T. Machimura, Y. Matsuura, Y. Mizoguchi, T. Ohta, S. Mukherjee, Y. Yanagi, Y. Yasuda, Y. Zhang and F. Zhao 2017: New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 122. 767-795.
- Kang, M., B. Ruddell, J-H. Chun and J. Kim 2017: Identifying CO₂ advection on a hill slope using information, *Agric. For. Meteorol.*, 232. 265-278.
- Oh, Y. S., S. T. Kenea, T.-Y. Goo, K. S Chung, J. S Rhee, M. L. Ou, Y. H. Byun, P. O. Wennberg, M. Kiel, J. P. DiGangl, G. S. Diskin, V. A. Velazco, and D. W. T. Griffith 2018: Characteristics of greenhouse gas concentrations derived from ground-based FTS spectra at Anmyeondo, South Korea, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 2361-2374.
- Bu, J. O., J. M. Song, L. K. Kim, S. Y. Kim, W. H. Kim, and C. H. Kang 2019: Chemical characterization of precipitation by air pollutants on Jeju Island in Korea during 2015-2016, *Bull. Korean. Chem. Soc.*, 40, 157-162.
- Hedellus, J. K., T. L. He, D. B. A. Jones, B. C. Baler, R. R. Buchhotz, M. D. Maziere, N. M. Deutscher, M. K. Dubey, D. G. Feist, D. W. T. Griffith, F. Hase, L. T. Iraci, P. Jeseck, M. kiel, R. Kivi, C. Liu, I. Morino, J. Notholt, Y. S. Oh, H. Ohyma, D. F. pollard, M. Rettinger, S. Roche, C. M. Roehl, M. Schnelder, K. Shiomi, K. Strong, R. Sussmann, C. Sweeney, Y. Te, O. Uchino, V. A. Velazco, W. Wang, T. warnelse, P. O. Wennberg, H. M. worden, and D. Wunch 2019: Evaluation of MOPITT Version 7 joint TIR-NIR Xco retrievals with TCCON, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5547-5572.

- Lee, H., S. O. Han, S. B. Ryoo, J. S. Lee, and G. W. Lee 2019: The measurement of atmospheric CO₂ at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 2149-2163.
- Kenea, S. T., Y. S. Oh, J. S. Rhee, T. Y. Goo, Y. H. Byun, L. D. Labzovskii, S. Li, L. Haeyoung, and R. F. Banks 2019: Evaluation of Simulated CO₂ Concentrations from the CarbonTracker-Asia Model Using In-situ Observations over East Asia for 2009-2013, *Adv. Atmos. Sci.*, 36, 603-613.
- Kenea, S. T., Y. S. Oh, T. Y. Goo, J. S. Rhee, Y. H. Byun, L. D. Labzovskii, and S. Li, 2019: Comparison of XCH₄ Derived from g-b FTS and GOSAT and Evaluation Using Aircraft In-Situ Observations over TCCON Site, Asia. Pac. *J. Atmos. Sci.*, 55, 415-427.
- Zellweger, C., R. Steinbrecher, O. Laurent, H. Lee, L. Emmenegger, M. Steinbacher, and B. Buchmann 2019: Recent advances in measurement techniques for atmospheric carbon monoxide and nitrous oxide observations, *Atmos. Meas. Tech.* 12, 5863-5878.
- Bu, J. O., J. M. Song, L. K. Kim, S. Y. Park, H. J. Kang, and C. H. Kang 2020: Chemical characteristics of wet precipitation in urban and mountainous sites of Jeju Island, *J. Anal. Sci. Technol.*, 33(1), 33-41.
- Collaud Coen M., E. Andrews, A. Alastuey, T. P. Arsov, J. Backman, and Coauthors 2020: Multidecadal trend analysis of aerosol radiative properties at a global scale, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 8867-8908, <https://doi.org/10.5194/acp-20-8867-2020>.
- Oshio, H., Y. Yoshida, T. Matsunga, N. M. Deutscher, M. Dubey, D. W. T. Griffith, F. Hase, L. T. Iraci, R. Kivi, C. Liu, I. Morino, J. Notholt, Y. S. Oh, H. Ohyama, C. Petri, D. F. Pollard, Coleen, K. Shiomi, R. Sussmann, Y. Te, and V. A. Velazco, Thorsten Warneke and Debra Wunch 2020: Bias Correction of the Ratio of Total Column CH₄ to CO₂ Retrieved from GOSAT Spectra, *Remote. Sens(Basel)*, 12, 3155.
- Laj, P., A. Bigi, C. Rose, E. Andrews, C. Lund Myhre and Coauthors, 2020: A global analysis of climate-relevant aerosol properties retrieved from the network of GAW near-surface observatories, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4353-4392, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4353-2020>.
- Lee H., E. J. Dlugokencky, J. C. Turnbull, S. Lee, S. J. Lehman, J. B. Miller, G. Petron, J. S.



- Lim, G. W. Lee, S. S. Lee, and Y. S. Park 2020: Observations of atmospheric $^{14}\text{CO}_2$ at Anmyeondo GAW station, South Korea: implications for fossil fuel CO_2 and emission ratios, *Atmos. Chem. and Phys.*, 20, 12033–12045.
- Lee H., M. Ko, S. Kim, W. S and Y. Park 2020: Comparison of GC- μECD and OA-ICOS methods for high-precision measurements of atmospheric nitrous oxide (N_2O) at a Korean GAW station, *Atmosphere*, 20, 11, 948; doi:10.3390/atmos11090948
- Parker, R. J., A. Webb, H. Bosch, P. Somkuti, R. B. Guillo, A. D. Noia, N. Kalaitzi, J. S. Anand, P. Bergamaschi, F. Chevallier, P. I. Palmer, L. Feng, N. M. Deutscher, D. G. Feist, D. W. T. Griffith, F. Hase, R. Kivi, I. morino, J. Notholt, Y. S. Oh, H. Ohyama, C. Petri, D. F. Pollard, Coleen, M. k. Sha, K. Shiomi, K. Strong, R. Sussmann, Y. Te, v. A. Velazco, T. Warneke, P. O. Wennberg, and D. Wunch 2020: A decade of GOSAT Proxy satellite CH_4 observations, *Earth. Syst. Sci. Data.*, 12, 3183–3412.
- Shin, D., S. Song, S. B. Ryoo and S. S. Lee 2020: Variations in Ozone Concentration over the Mid-Latitude Region Revealed by Ozonesonde Observations in Pohang, South Korea, *Atmosphere*, 11(7), 746.
- Yun. J., S. Jeong, C. H. Ho, H. Park, J. Liu, H. Lee, S. Sitch, P. Friedlingstein, S. Lienert, D. Lombardozzi, V. Haverd, A. Jain, S. Zaehle, E. Kato, H. Tian, N. Vuichard, A. Wiltshire and N. Zeng, 2020: Enhanced regional terrestrial carbon uptake over South Korea revealed by atmospheric CO_2 measurements from 1999 to 2017, *Glo. Change Biol.*, doi.org/10.1111/gcb.15061
- Rose, C., M. Collaud Coen, E. Andrews, Y. Lin and coauthors 2021: SEasonality of the particle number concentration and size distribution: a global analysis retrieved from the network of Global Atmosphere Watch (GAW) near-surface observatories, *Atmos. Chem. Phys., Discuss.* <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1311>, in review.

[부록 6] 기후변화감시기술 특허 보유 현황

- 제10-0495483호 표준가스 중량법 제조를 위한 자동 무게 측정 장치
(출원일: 2003.09.09. / 등록일: 2005.06.07.)
- 제10-0922630호 수분제거장치
(출원일: 2008.06.12. / 등록일: 2009.10.13.)
- 제10-0993808호 풍향에 따른 자동 시료 포집
(출원일: 2008.10.02. / 등록일: 2010.11.05.)
- 제10-1074697호 에어로졸 전처리 시스템
(출원일: 2009.02.09. / 등록일: 2011.10.12.)
- 제10-1437410호 태양광흡수 분광장치 및 태양 광흡수 분광장치의 스펙트럼 처리방법
(출원일: 2014.04.16 / 등록일: 2014.08.28)
- 제10-1437419호 고분해 태양흡수분광간섭계(FTS)의 검정용 가스셀 광학거치대
(출원일: 2014.04.18. / 등록일: 2014.08.28.)
- 제10-1499672호 표준 에어로졸 샘플링 시스템
(출원일 : 2014.04.29. / 등록일 : 2015.03.02.)
- 제10-1535533호 대기상태에 따른 광자검출기 및 광검출기의 광전자 전도 팁 제작방법
(출원일: 2015.02.04. / 등록일: 2015.07.03.)
- 제10-1549193호 광량조절 기능을 구비한 대기상태에 따른 광자검출장치 및 그 광량조절방법.
(출원일 : 2015.03.17. / 등록일 : 2015.08.26)
- 제10-1609740호 에어로졸 질량농도의 연직분포 산출방법
(출원일 : 2015.08.24. / 등록일 : 2016.03.31.)
- (미국) US 746373 B2, Apparatus for detecting photons in accordance with atmospheric condition using function of adjusting light quantity
(출원일 : 2015.12.12. / 등록일 : 2017.08.29.)



- (유럽) EP 3062073 B1, Apparatus for detecting photons in accordance with atmospheric condition using function of adjusting light quantity
(출원일 : 2015.12.11. / 등록일 : 2018.11.7.)
- 제10-1779415호 지구 자기장 측정 기기
(출원일 : 2016.12.15. / 등록일 : 2017.09.12.)
- 제10-1779416호 지구 자기장 탐지 방법
(출원일 : 2016.12.15. / 등록일 : 2017.09.12.)
- 제10-2020-0163024호 기후변화감시장비 이력관리 솔루션
(출원일 : 2020.11.27.)

[부록 기] 지구대기감시 보고서 작성자

○ 작성자

	총괄	미래기반연구부	부장	김연희	연주용	희용
20주년 특별판	지구대기감시 소개	미래기반연구부	기상연구관	김정변	연주재	희용영
	한 눈에 보는 지구대기감시 역사	미래기반연구부	기상연구관	정주용		
	지구대기감시 관련 사진·뉴스 모음	미래기반연구부	기상연구관 기상서기	정김	주남	용현
제 1 장	머리말	미래기반연구부	기상연구관	정주용		
제 2 장	지구대기감시 현황	미래기반연구부	기상연구관 기상연구사 기상연구사	변재수 김이해	영민 영	
제 3 장	기상특성	미래기반연구부	기상연구관 기상연구사	정김	주수	용민
제 4 장	온실가스	미래기반연구부 " 서울대학교 극지연구소	기상연구사 기상연구사 교수	이오김	이해영 김최태	영석 준진
제 5 장	반응가스	미래기반연구부	기상연구사	김수민		
제 6 장	에어로졸	미래기반연구부 " 연세대학교 광주과기원	기상연구사 기상연구사 연구원 교수	김고정 구원자 박기홍	정은석 원자호	정희호
제 7 장	대기복사	미래기반연구부	연구원	신대근		
제 8 장	성층권오존	미래기반연구부 연세대학교 숙명여자대학교	연구원 교수 교수	신대근 구자호 오정진		
제 9 장	자외선	미래기반연구부 연세대학교	연구원 교수	신대근 구자호		
제10장	총대기침적	미래기반연구부	기상연구사	고희정		
제11장	기타	숙명여자대학교 제주대학교	교수 교수	오정진 강창희		

○ 작성 지원

미래기반연구부	정원석, 이선란, 서원익, 이수정, Samuel Takele Kenea, 김은실, 문세영, 고미영, 정지영, 김정현, 최남원, 강희윤, 최홍우, 이충훈
대구지방청 포항관측소	김영환, 홍승학



참 고 문 헌

REFERENCES

- 곽민경, 김재환 2011: 한반도 EUV-B 복사의 특성분석 및 적정 비타민D 합성을 위한 노출시간 산출. 대기. 21, 123-130.
- 국립기상과학원, 2017: 지구대기감시 업무매뉴얼.
- 국립환경과학원, 2020: 대기환경연보 2019.
- 극지연구소, 2021: 남극 과학기지 운영에 따른 주변 환경 및 생태계 오염 요인 모니터링, 출간 중.
- 기상청, 2011: 2010 지구대기감시 보고서.
- 기상청, 2017: 2016 지구대기감시 보고서.
- 기상청, 2020: 2019년 기후특성 보고서.
- 기상청, 2021: 2020년 기후특성 보고서.
- 김준, 조희구, 이윤곤, 오성남, 백선균, 2005: 서울 상공의 최신 성층권 오존 변화 경향, 대기, 15(2), 101-118.
- 방소영, 최재천, 박상순, 조경숙, 오성남, 2003: 한반도 배경지역 강수 중 수용성 이온성분의 화학적 특성 분석, Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 39(1), 29-41.
- 우정현, 부찬중, 김진수, 김영성, 김윤하, 2018: 중국 대기오염물질 배출의 시공간적 변화 분석. 대기환경학회. 34, pp87-100.
- 조희구, 백선균, 김준, 오성남 2003: 서울 상공의 근 인위적 오존층 변화 경향, 대기, 13(1), 144-147.
- 천성남 2018: 화력발전소 미세먼지 배출현황과 저감. The Korean Institute of Electrical Engineers. 8.
- Bleeker, W., W. Dansgaard, and W. Lablans, 1966: Some remarks on simultaneous measurements of particulate contaminants including radioactivity and isotopic composition of precipitation, Tellus, 18, 773-785.
- Bromwich, D. H., J. P. Nicolas, A. J. Monaghan, M. A. Lazzara, L. M. Keller, G. A. Weidner, and A. B. Wilson, 2013: Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth, Nat. Geosci., 6(2), 139-145.
- Bu, J. O., J. M. Song, S. H. Chin, W. H. Kim, and C. H. Kang, 2016: Ionic composition and pollution characteristics of precipitation in Jeju Island during 2009-2014, Anal. Sci. Technol, J. Anal. Sci., Technol., 29(1), 19-28.



- Butchart, N., 2014: The Brewer-Dobson circulation. *Rev. Geophys.*, 52(2), 157-184.
- Chambers, S., C. H. Kang, A. G. Williams, J. Crawford, A. D. Griffiths, K. H. Kim, and W. H. Kim, 2016: Improving the representation of cross-boundary transport of anthropogenic pollution in Southeast Asia using Radon-222, *Aerosol Air Qual. Res.*, 16(4), 958-976, doi: 10.4209/aaqr. 2015.08.0522.
- Chambers, S., W. Zahorowski, A. G. Williams, J. Crawford, and A. D. Griffiths, 2013: Identifying tropospheric baseline air masses at Mauna Loa Observatory between 2004 and 2010 using Radon-222 and back trajectories, *J. Geo. Res.*, 118, 992-1004, doi:10.1029/2012JD018212.
- Chambers, S., W. Zahorowski, K. Matsumoto, and M. Uematsu, 2009: Seasonal variability of radon-derived fetch regions for Sado Island, Japan, based on 3 years of observations: 2002-2004, *Atmos. Environ.*, 43(2), 271-279.
- Chen, J., H. Hu, F. Wang, M. Zhang, T. Zhou, S. Yuan, R. Bai, N. Chen, K. Xu, H. Huang, 2021: Air quality characteristics in Wuhan (China) during the 2020 COVID-19 pandemic, *Environmental Research*, 195, 110879.
- Chung J. D., and C. H. Lee, 2003: Water soluble Ionic Components in Precipitation at ChungNam West-Coast Area, *J. Environ. Sci.*, 12(12), 1285-1292.
- Collaud Coen M., E. Andrews, A. Alastuey, T.P. Arsov, J. Backman, and coauthors, 2020: Multidecadal trend analysis of in situ aerosol radiative properties around the world, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 8867-8908, <https://doi.org/10.5194/acp-20-8867-2020>.
- Etheridge, D. M., L. P. Steele, R. J. Francey, and R. L. Langernfelds, 1998: Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability, *J. Geophys. Res.*, 103, 15979-15993.
- Hall, B. D., A. M. Crotwell, D. R. Kitzis, T. Mefford, B. R. Miller, M. F. Schibig, and P. P. Tans, 2021: Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO₂ calibration scale. *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 3015-3032, 2021.
- Hamed A., H. Korhonen, S. Sihto, J. Joutsensaari, H. Jarvinen, and coauthors, 2011: The role of relative humidity in continental new particle formation, *J. Geophys. Res.*, 116, D03202, doi:10.1029/2010JD014186.

- Ho, K.F., S.C. Lee, C.K. Chan, J.C. Yu, J.C. Chow, X.H. Yao, 2003: Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong-Kong, *Atmospheric Environment*, 37(1), 31-39.
- Hocking, W. K., T. Carey-Smith, D. W. Tarasick, P. S. Argall, K. Strong, Y. Rochon, I. Zawadzki, and P. A. Taylor, 2007: Detection of stratospheric ozone intrusions by wind profiler radars, *Nature*, 450, 281-284.
- Hu D., Y. Guo, F. Wang, Q. Xu, Y. Li, W. Sang, X. Wang, and M. Liu, 2017: Brewer-Dobson Circulation: Recent-Past and Near-Future Trends Simulated by Chemistry-Climate Models, *Adv. in Meteorol.*, 10, 1-13.
- IPCC, 2013: *Climate change 2013: The physical science basis*. Working Group I Contribution to the IPCC fifth Assessment Report [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1585.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I.
- Itahashi, S. I., Uno, and S. Kim, 2013: Seasonal source contributions of tropospheric ozone over East Asia based on CMAQeHDDM. *Atmos. Environ.* 70, 204-217.
- JCGM: International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM, 3rd edition, 2008 version with minor corrections), 2012: available at: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf (last access: 1December 2018).
- Jolliffe, I. T., 2002: Principal components in regression analysis. *Principal component analysis*, 167-198.
- Kang, G.U., 2004, Comparison of Chemical Characteristics in Wet and Bulk Precipitation Collected in the Iksan Area, *J. KOSAE*, 20(3), 381-396
- Kang, M., J. Kim, H.-S. Kim, B. M. Thakuri, and J.-H. Chun, 2014: On the Nighttime Correction of CO₂ Flux Measured by Eddy Covariance over Temperate Forests in Complex Terrain. *Korean J. Agric. and Forest Meteorol.*, 16, 233-245.
- Kenea, S. T., H. Lee, S. Joo, S. Li, L. D. Labzovskii, C.-Y. Chung, and Y.-H. Kim,



- 2021: Interannual Variability of Atmospheric CH₄ and Its Driver Over South Korea Captured by Integrated Data in 2019, *Remote Sens.*, (accepted in June 2021).
- Kim, E.H., P.S. Kim, C.Y. Kim, K.S. Lee, and K.D. Kwon, 1985: Determination of the Mixing Height in Seoul by the Radioactivity Measurement of Radon in Air, *J. Environ. Sci.*, 6(2), 129-136.
- Kim, J. Y., Y. H. Youn, K. B. Song, and K. H. Kim, 2000: Characteristics of Vertical Ozone Distributions in the Pohang Area, Korea, *J. Korean Earth Science.*, 21(3), 287-301.
- Kim, J., H. J. Lee, S. H. Lee, 2006: The Characteristics of Tropospheric Ozone Seasonality Observed from Ozone Soundings at Pohang, Korea. *Environ. Monit. Assess.*, 118, 1-12.
- Kim, Y.S., C.M. Lee, K.Y. Kim, H.J. Jeon, J.C. Kim, and T. Iida, 2007: Time Series Observations of Atmospheric Radon Concentration in Seoul, Korea for an Analysis of Long-Range Transportation of Air Pollutants in the North-East Asia, *Kor. J. Env. Hlth.*, 33(4), 283-292.
- Kivi, R., E. Kyro, T. Turunen, N. R. P. Harris, P. von der Gathen, M. Rex, S. B. Andersen, and I. Wohltmann, 2007: Ozonesonde observations in the Arctic during 1989-2003: Ozone variability and trends in the lower, *J. Geophys. Res.*, 112(D08306). doi: 10.1029/2006JD007271.
- Komhyr, W. D., and Harris, T. B., 1971: Development of an ECC-Ozonesonde, NOAA Technical report ERL, 200, APCL 18, 54.
- Koo, J. H., Choi, T, Lee, H, Kim, J, Ahn, D. H, Kim, J., Kim, Y. H, Yoo, C, Hong, H, Moon, K. J, and Lee, Y. G, 2018: Total ozone characteristics associated with regional meteorology in West Antarctica. *Atmos. Environ.*, 195, 78-88. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.056>.
- Koo, J. H., J. Kim, Y. Lee, S. Park, S. Lee, H. Chong, Y. Cho, J. Kim, K. Choi, T. Lee, 2021: The implication of the air quality pattern in South Korea after the COVID-19 outbreak, *nature*, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80429-4>.
- Korkiakoski, M., 2014: Water vapor correction functions for CO₂ and CH₄ in cavity ring-down spectroscopy, master's thesis, University of Helsinki, Finland.

- Krotkov, N. A., J. Herman, P. K. Bhartia, C. Seftor, A. Arola, J. Kaurola, P. Taalas, and A. Vasilkov, 2002: OMI Surface UV Irradiance Algorithm, in OMI Algorithm Theoretical Basis Document, Volume III: Clouds, Aerosols, and Surface UV Irradiance, ATBD-OMI-03.
- Kulmala, M., H. Vehkamäki, T. Petäjä, M. D. Maso, A. Lauria, V. M. Kerminen, W. Birmilic, and P.H. McMurry, 2004: Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: A review of observations, *J. Aerosol Sci.*, 35, 143, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.10.003>.
- Laj, P., A. Bigi, C. Rose, E. Andrews, C. Lund Myhre, and coauthors, 2020: A global analysis of climate-relevant aerosol properties retrieved from the network of GAW near-surface observatories, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4353-4392, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4353-2020>.
- Le Quere, C., R. B. Jackson, M. W. Jones, A. J. P. Smith, S. Abernethy, R. M. Andrew, A. J. De-Gol, D. R. Willis, Y. Shan, J. G. Canadell, P. Friedlingstein, F. Creutzig, and G.P. Peters, 2020: Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement, *Nat. Clim. Change*, 10, 647-653.
- Lee, D., J. Kim, S.-J. Kim, S.-K. Moon, J.-H. Lim, Y. Son, S. King, S. Kim, K. Kim, N. Wo, B. Lee, and S. Kim, 2007: Lessons from cross-scale studies of water and carbon cycles in the gwangneung forest catchment in a complex landscape of monsoon Korea. *Korean J. Agric. and Forest Meteorol.*, 9(2), 149-160. (in Korean with English abstract).
- Lee, H., S.O. Han, S.-B. Ryoo, J.S. Lee, and G.W. Lee, 2019: The measurement of atmospheric CO₂ at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 2149-2163.
- Masarie, K.A., R.L. Langenfelds, C.E. Allison, T.J. Conway, E.J. Dlugokencky, R.J. Francey, P.C. Novelli, L.P. Steele, P.P. Tans, B. Vaughn and J.W.C. White, 2001: NOAA/CSIRO Flask Air Intercomparison Experiment: A Strategy for Directly Assessing Consistency among Atmospheric Measurements Made by Independent Laboratories. *J. Geophys. Res.*, 106, 20445-20464.



- Montzka, A. S., S. D. Dutton, P. Yu, E. Ray, R. W. Portmann, J. S. Daniel, L. Kuijpers, B. D. Hall, D. Mondeel, C. Siso, J. D. Nance, M. Rigby, A. J. Manning, L. Hu, F. Moore, B. R. Miller, and J. W. Elkins, 2018: An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature*, 557, 413-417.
- Montzka, S. A., G. S. Dutton, R. W. Portmann, M. P. Chipperfield, S. Davis, W. Feng, A. J. Manning, E. Ray, M. Rigby, B. D. Hall, C. Siso, J. D. Nance, P. B. Krummel, J. Muhle, D. Young, S. O'Doherty, P. K. Salameh, C. M. Harth, R. G. Prinn, R. F. Weiss, J. W. Elkins, H. W.-Terrinoni, and C. Theodoridi, 2021: A decline in global CFC-11 emissions during 2018-2019, *Nature*, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03260-5>.
- Moon, K. H., J. S. Kim, J. K. Ahn, H. C. Kim, and H. M. Lee, 2009: Long-term Variation of Radon in Granitic Residual Soil at Mt. Guemjeong in Busan, Korea, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 18(4), 279-291.
- NADP, 1999: National trends network site operation manual, NADP manual 1999-01, 1.
- NASA Ozone Watch 2020: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>.
- Nevison, C. D., N. M. Mahowald, S. C. Doney, I. D. Lima, G. R. van der Werf, J. T. Randerson, D. F. Baker, P. Kasibhatla, and G. A. McKinley, 2008: Contribution of ocean, fossil fuel, land biosphere, and biomass burning carbon fluxes to seasonal and interannual variability in atmospheric CO₂, *J. Geophys. Res.*, 113, doi:10.1029/2007JG000408.
- Olsen, A. R., E. C. Voldner, D. S. Bigelow, W. H. Chan, T. L. Clark, M. A. Lulis, P. K. Misra, and R. J. Vet, 1990: Unified wet deposition data summaries for North America: data summary procedures and results for 1980-1986. *Atmos. Environ.*, 24A(3), 661-672.
- Omori, Y., I. Tohbo, H. Nagahama, Y. Ishikawa, M. Takahashi, H. Sato, T. Sekine, 2009: Variation of atmospheric radon concentration with bimodal seasonality, *Radiat. Meas.*, 44, 1045-1050.
- Park, S. S., J. Kim, H. K. Cho, H. Lee, Y. Lee, and K. Miyagawa, 2012: Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea. *Atmos. Environ.*, 47, 226-235.

- Park, S., L. M. Western, T. Saito, A. L. Redington, S. Henne, X. Fang, R. G. Prinn, A. J. Manning, S. A. Montzka, P. J. Fraser, A. L. Ganesan, C. M. Harth, Jooil Kim, P. B. Krummel, Q. Liang, J. Muhle, S. O'Doherty, H. Park, M.-K. Park, S. Reimann, P. K. Salameh, R. F. Weiss, and M. Rigby, 2021: A decline in emissions of CFC-11 and related chemicals from eastern China, *Nature*, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03277-w>.
- Petropavlovskikh, I., R. Evans, G. McConville, S. Oltmans, D. Quincy, K. Lantz, P. Disterhoft, M. Stanek, and L. Flynn, 2011: Sensitivity of Dobson and Brewer Umkehr ozone profile retrievals to ozone cross-sections and stray light effects, *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 1841-1853, <https://doi.org/10.5194/amt-4-1841-2011>.
- Pitari G., E. Coppari, N. De Luca, and P. Di Carlo, 2014: Observations and box model analysis of radon-222 in the atmospheric surface layer at L'Aquila, Italy: March 2009 case study, *Environ. Ear. Sci.*, **71**(5), 2353-2359.
- Ray, E. A., F. L. Moore, J. W. Elkins, K. H. Rosenlof, J. C. Laube, T. Rockmann, D. R. Marsh and A. E. Andrews, 2017: Quantification of the SF₆ lifetime based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex, *J. Geophys. Res.*, **122**, doi:10.1002/2016JD026198.
- Rigby, M., S. Park, T. Saito, L. M. Western, A. L. Redington, X. Fang, S. Henne, A. J. Manning, R. G. Prinn, G. S. Dutton, P. J. Fraser, A. L. Ganesan, B. D. Hall, C. M. Harth, J. Kim, K.-R. Kim, P. B. Krummel, T. Lee, S. Li, Q. Liang, M. F. Lunt, S. A. Montzka, J. Muhle, S. O'Doherty, M.-K. Park, S. Reimann, P. K. Salameh, P. Simmonds, R. L. Tunnicliffe, R. F. Weiss, Y. Yokouchi, and D. Young, 2019: Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations, *Nature*, **569**, 546-550.
- Shin, D., S. Song, S.B. Ryoo, and S.S. Lee, 2020: Variations in Ozone Concentration over the Mid-Latitude Region Revealed by Ozonesonde Observations in Pohang, South Korea, *Atmosphere*, **11**(7), 746.
- Sipilä, M., T. Berndt, T. Petäjä, D. Brus, J. Vanhanen, F. Stratmann, J. Patokoski, R. L. Mauldin III, A. P. Hyvärinen, H. Lihavainen, and M. Kulmala, 2010: The role of sulfuric acid in atmospheric nucleation, *Science.*, **327**(5970), 1243-1246. <https://doi.org/10.1126/science.1180315>.



- Smit, H. G. J., Straeter, W, Johnson, B, Oltmans, S, Davies, J, Tarasick, D. W, Hoegger, B, Stubi, R, Schmidlin, F, Northam, T, Thompson, A, Witte, J, I. Boyd, and F. Posny, 2007: Assessment of the performance of ECC-ozonesondes under quasi-flight conditions in the environmental simulation chamber: insights from the Juelich Ozone Sonde Intercomparison Experiment (JOSIE), *J. Geophys. Res.*, 112(D19306). doi:10.1029/2006JD007308.
- Solomon, S., 1999: Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Rev. Geophys.*, 37, 275–316, <https://doi.org/10.1029/1999RG900008>.
- SPARC/IO3C/GAW, 2019: SPARC/IO3C/GAW Report on Long-term Ozone Trends and Uncertainties in the Stratosphere, SPARC Report No. 9, GAW Report No. 241, WCRP-17/2018.
- Tiszenkel, L., C. Stangl, K. J. Krasnomowitz, Q. Ouyang, H. Yu, M. J. Apsokardu, M. V. Johnston, and S. H. Lee, 2019: Temperature effects on sulfuric acid aerosol nucleation and growth: initial results from the TANGENT study, *Atm.s. Chem. Phys.*, 19, 8915–8929, <https://doi.org/10.5194/acp-19-8915-2019>.
- Vinther, B. M., K. K. Andersen, P. D. Jones, K. R. Briffa, and J. Cappelén, 2006: Extending Greenland temperature records into the late eighteenth century. *J. Geophys. Res.*, 111(D11).
- WCC-Empa, 2017: System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the regional GAW station Jeju-Gosan Republic of Korea Jun, 17/2, 42.
- Weber, M., M. C. Egbers, V. E. Fioletov, S. M. Frith, J. D. Wild, J. P. Burrows, C. S. Long, and D. Loyola, 2018: Total ozone trends from 1979 to 2016 derived from five merged observational datasets – the emergence into ozone recovery, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 2097–2117, <https://doi.org/10.5194/acp-18-2097-2018>.
- Whittlestone, S., and W. Zaborowski, 1998: Baseline radon detectors for shipboard use: Development and deployment in the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 103(D13), 16,743–16,751.
- Williamson, C. E., R. G. Zepp, R. M. Lucas, S. Madronich, A. T. Austin, C. L. Ballaré, M. Norval, B. Sulzberger, A. F. Bais, R. L. McKenzie, S. A. Robinson, D. P. Häder, N. D. Paul, and J. F. Bornman, 2014: Solar ultraviolet radiation in a changing climate, *Nat. Clim. Change.*, 4, 434–441.

- WMO, 2001: Global Atmosphere Watch Measurements Guide (WMO/TD No.1073), GAW Report No.143.
- WMO, 2004: 1st International Expert Meeting on Sources and Measurements of Natural Radionuclides Applied to Climate and Air Quality Studies (WMO/TD No.1201), GAW Report No. 155.
- WMO, 2004: Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme (WMO/TD No.1251), GAW Report No. 160.
- WMO, 2009: Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases, (WMO/TD No.1456), GAW Report No. 184.
- WMO, 2010: Guidelines for the Measurement of Atmospheric Carbon Monoxide (WMO/TD No. 1551), GAW report No. 192.
- WMO, 2011: WMO/GAW Expert Workshop on Global Long-term Measurements of Nitrogen Oxides and Recommendations for GAW Nitrogen Oxides Network, (WMO/TD No, 1570), GAW report No. 195.
- WMO, 2013: Guidelines for Continuous Measurements of Ozone in the Troposphere, (WMO/TD No, 1110), GAW report No. 209.
- WMO, 2016: WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, 2nd Edition (WMO/TD No.1177), GAW Report No. 227.
- WMO, 2018: Calibration Methods of GC- μ ECD for Atmospheric SF₆ Measurements, GAW Report No. 239.
- WMO, 2020: 20th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques (GGMT-2019), Jeju Island, South Korea, 2-5 September 2019, GAW report No. 255
- WP4-NA4: Trace gases networking: Volatile organic carbon and nitrogen oxides Deliverable D4.10: Standard operating procedures (SOPs) for NO_x measurements.
- Wu, Z., M. Hu, S. Liu, B. Wehner, S. Bauer, A. N. Sling and coauthors, 2007: New particle formation in Beijing, China: Statistical analysis of a 1-year data set, J. Geophys. Res., 112, D09209, <https://doi:10.1029/2006JD007406>.



- Yamaji, K., T. Ohara, I. Uno, H. Tanimoto, J. Kurokawa, and H. Akomoto, 2006: Analysis of the seasonal variation of ozone in the boundary layer in East Asia using the Community Multi-scale Air Quality model: What controls surface ozone levels over Japan?, *Atmos. Environ.*, 40, 1856-1868.
- Zahorowski, W., S. Chambers, T. Wang, C. H. Kang, I. Uno, S. Poon, S. N. Oh, S. Wercqynski, J. Kim, and A. H. Sellers, 2005: Radon-222 in boundary layer and free tropospheric continental outflow events at three ACE-Asia sites, *Tellus*, 57(2), 124-140.
- Zoran, M. A., M. R. Dida, A. T. Zoran, L. F. Zoran, and A. Dida, 2013: Outdoor ²²²Radon concentrations monitoring in relation with particulate matter levels and possible health effects, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 296(3), 1179-1192.

2020 지구대기감시 보고서

발행일 : 2021년 6월

발행처 : 국립기상과학원 미래기반연구부

63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원

홈페이지 : 기후정보포털(www.climate.go.kr)
