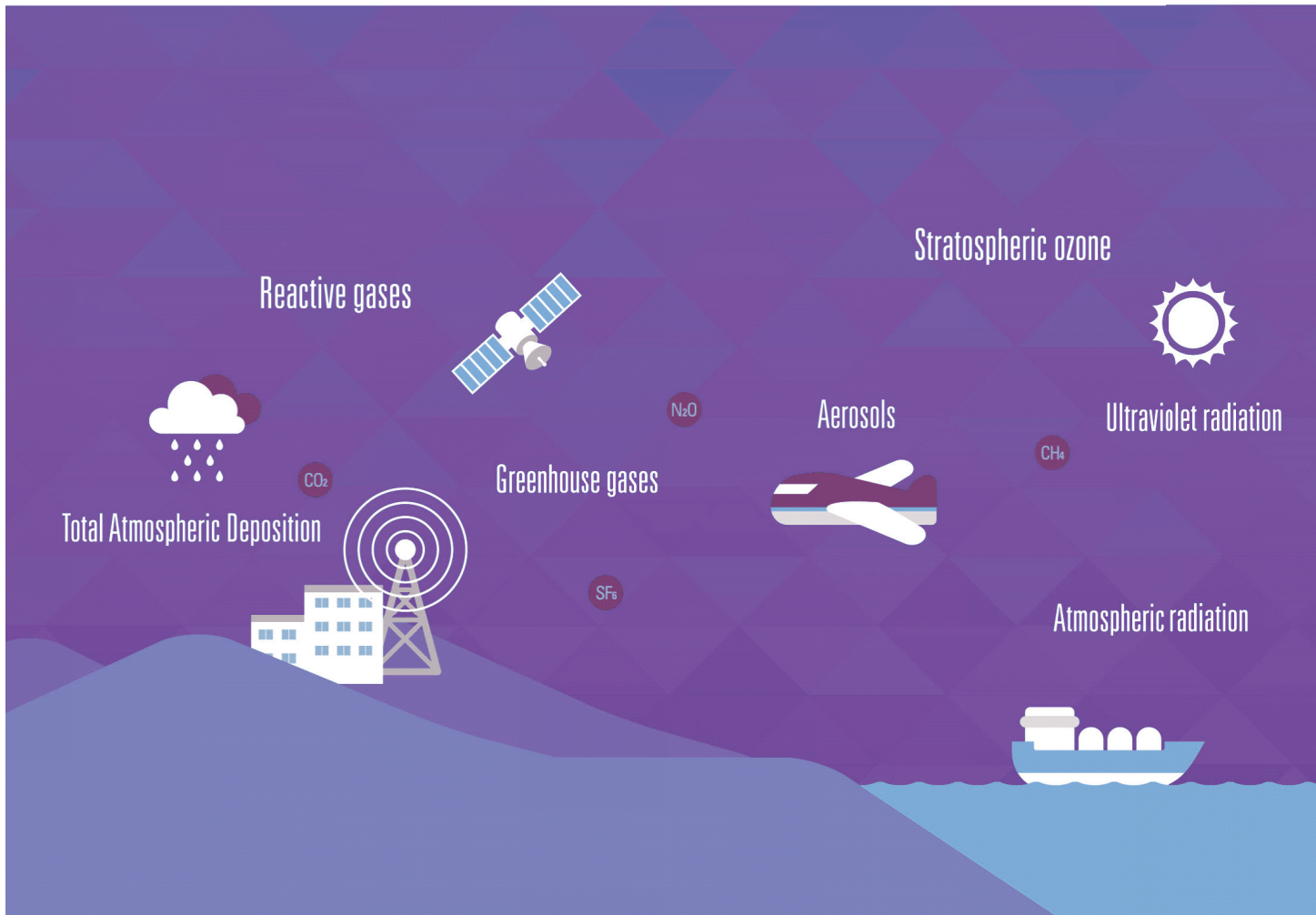




2021 지구대기감시 보고서

Report of Global Atmosphere Watch 2021





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(SF ₆) 세계표준센터	14
2.4 WMO IG ³ IS 프로젝트	15
제3장 기상특성	19
3.1 기후변화감시소 기상 특성	20

제4장 온실가스	31
4.1 온실가스 감시 목적	33
4.2 이산화탄소(CO ₂)	34
4.3 메탄(CH ₄)	48
4.4 아산화질소(N ₂ O)	51
4.5 육불화황(SF ₆)	53
4.6 염화불화탄소(CFCs)	55
4.7 한반도 기후변화감시소: 원격관측	57
4.8 2021년 온실가스 특성	61
제5장 반응가스	65
5.1 반응가스 감시 목적	66
5.2 지표오존(O ₃)	68
5.3 일산화탄소(CO)	70
5.4 질소화합물(NO _x)	72
5.5 이산화황(SO ₂)	74
5.6 2021년 반응가스 특성	76
제6장 에어로졸	79
6.1 에어로졸 감시 목적	80
6.2 에어로졸 물리 특성	84
6.3 에어로졸 광학 특성	89
6.4 에어로졸 화학 특성	103
6.5 2021년 에어로졸 특성	116

제7장 대기복사	125
7.1 대기복사 감시 목적	126
7.2 직달일사, 산란일사	127
7.3 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)	129
7.4 지구상향복사, 지구하향복사	131
7.5 순복사	133
7.6 2021년 대기복사 특성	134
제8장 성층권오존	139
8.1 성층권오존 감시 목적	140
8.2 오존전량	142
8.3 오존연직분포	151
8.4 남극오존홀	160
8.5 2021년 성층권오존 특성	164
제9장 자외선	169
9.1 자외선 감시 목적	170
9.2 자외선A	171
9.3 자외선B(홍반자외선)	172
9.4 서울 자외선 복사량	173
9.5 2021년 자외선 특성	175

제10장 총대기침적	179
10.1 총대기침적 감시 목적	180
10.2 강수채취율	182
10.3 pH(산성도)	185
10.4 전기전도도	188
10.5 강수이온성분	190
10.6 총대기침적량	201
10.7 2021년 강수성분 특성	206
제11장 기 타	209
11.1 수증기 농도 연직분포 및 특성	210
11.2 라돈 농도 및 특성	214
부 록	231
1. 관측자료품질보증체계	232
2. 지구대기감시 관측자료	260
3. 기후변화감시 기술노트 목록	301
4. 지구대기감시 매뉴얼 목록	302
5. 기후변화감시 관측자료 활용 학술논문	303
6. 기후변화감시기술 특허 보유 현황	314
7. 지구대기감시 보고서 작성자	316
참고문헌	318

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 수백 년
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 273배 강한 온실효과, 대기 중 체류시간 약 109년
육불화황 SF ₆	대기 중 존재하는 양이 1조분의 1로 적으나, 100년을 기준으로 CO ₂ 와 같은 농도로 가정할 시 CO ₂ 보다 약 23500배 강한 온실효과, 대기 중 체류시간 약 3200년
염화불화탄소 CFCs	몬트리올 의정서에 의해 대기 중 농도가 차츰 줄어들고 있으나 100년을 기준으로 CO ₂ 와 같은 농도로 가정할 시 CO ₂ 보다 약 5560~11200배 높은 온실효과 대기 중 체류시간 약 52~102년

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 대기 수명에 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 농도변화에 영향 줌 자동차 배기가스, 생물성 연소, 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, 전지구 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

성층권오존

- 태양으로부터 입사되는 유해 자외선으로부터 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 파장영역의 복사광
- 인체에 유해할 뿐만 아니라 가축, 농작물의 생육에도 악영향

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

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

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⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, F⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)

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

1. 온실가스

- 이산화탄소(CO₂) 최근 10년간 유사 수준 (2.7 ppm/year)으로 증가
 - 안면도: 423.1 ppm, 고산: 421.5 ppm, 울릉도 420.8 ppm로 지난해 비해 2.6~2.8 ppm 증가
 - 메탄(CH₄) 농도 산업화 이후 두 배 이상(2.8배) 증가, 최근 10년보다 2배 빠른 증가율
 - 안면도: 2005 ppb (2021년 증가율: 22 ppb/year, 최근 10년 증가율: 10 ppb/year, 2000년대: 1 ppb/year)
 - 전지구: 1896 ppb(2021년 증가율: 17 ppb/year, 최근 10년 증가율: 8 ppb/year, 2000년대: 1 ppb/year)
 - 고산, 울릉도 모두 지난해 대비 14~16 ppb 증가
 - 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆) 등 배경농도 증가세 지속
- ※ 몬트리올 의정서로 제한하고 있는 염화불화탄소류 (CFCs) 배경농도 감소 지속

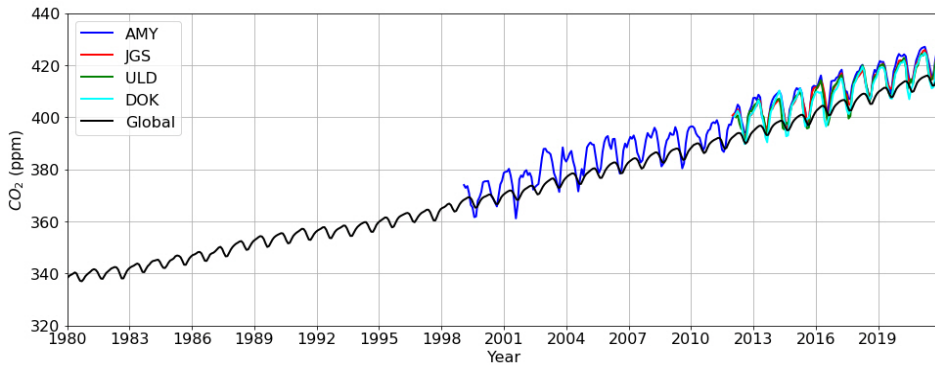
┃ 요약표 1.1 2021년 온실가스 배경농도 평균, 2021년 증가율과 최근 증가율 비교 ┃

감시소 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2021년 평균	최근 10년 증가율* (2021년 증가율**)	2021년 평균	최근 5년 증가율*** (2021년 증가율)	2021년 평균	최근 5년 증가율*** (2021년 증가율)
CO ₂ (ppm)	423.1	+2.7 (+2.7)	421.5	+2.7 (+2.6)	420.8	+2.7 (+2.8)
CH ₄ (ppb)	2005	+10 (+22)	1982	+10 (+14)	1988	- (+16)
N ₂ O (ppb)	336.1	+1.2 (+1.1)	336.0	+1 (+1.3)	335.3	- (+0.8)
SF ₆ (ppt)	11.2	+0.3 (+0.7)	11	+0.3 (+0.5)	11.1	+0.3 (+0.6)
CFC-11 (ppt)	221.4	-1.4 (-2.6)	-	-	-	-
CFC-12 (ppt)	493.3	-4.1 (-3.5)	-	-	-	-
CFC-113 (ppt)	69	-0.9 (+0.1)	-	-	-	-

* 최근 10년 증가율: 2011~2020년의 평균 증가율(전년도와의 차이값 평균)(단위/year), CFCs는 5년(2016~2020년)

** 2021년 증가율: 2020년과의 차이값(단위/year)

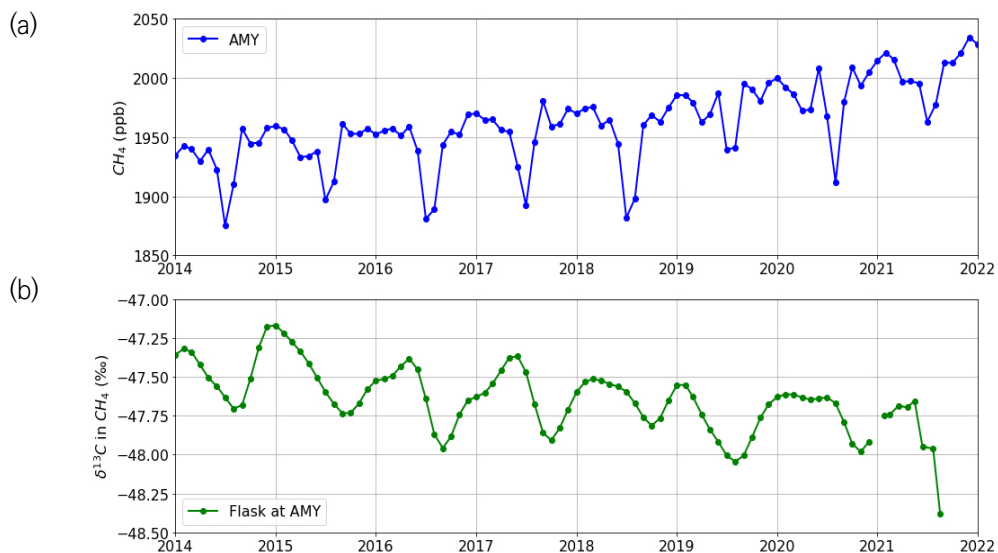
*** 최근 5년 증가율: 2016~2020년 평균 증가율(단위/year), SF₆는 4년(2017~2020년) 증가율



■ 요약그림 1.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 독도(DOK)와 전지구(Global)의 CO₂ 배경농도 ■

● 2021년 온실가스 특성

- 한반도에서 가장 긴 실시간 온실가스를 관측한 안면도 기후변화감시소의 이산화탄소(CO₂) 배경농도는 지속적으로 증가하여 423.1ppm을 기록하였음
- 이산화탄소(CO₂) 배경농도의 연간 증가율이 2019년 이후 2.7 ppm로 유지
- CH₄ 배경농도 산업화 이후 2.8배 증가, 배경농도 증가 속도 가속화, 2021 증가율(22 ppb/year)은 최근 10년 증가율(10 ppb/year) 대비 약 2.2배 증가 [본문 4.3]
 - 안면도: 2005 ppb로, 2021년 증가율: 22 ppb/year, 최근 10년 증가율: 10 ppb/year, 2000년대 1 ppb/year [요약표 1.1]
 - 전지구: 1896 ppb로, 2021년 증가율 17 ppb/year, 최근 10년 증가율: 8 ppb/year



■ 요약그림 1.2 안면도(AMY)에서 측정된 대기 중 (a) CH₄와 (b) CH₄ 동위원소 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$)의 월평균 농도 ■

2. 반응가스

- 지표오존(O₃): 안면도 41.6 ppb (최근 10년 대비 -0.7%), 고산 44.9 ppb (최근 8년 대비 3.7%)
- 2021년 직달일사가 안면도에서 감소, 고산에서 증가한 영향으로 추측
- 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO₂)은 꾸준히 감소

【 요약표 2.1 2021년과 최근 평균 비교 】

감시소 측정요소 (단위 : ppb)	안면도		고산		울릉도	
	2021년 (변화율**)	최근 10년*	2021년 (변화율)	최근 8년*	2021년 (변화율)	최근 6년*
O ₃	41.6±5.2 (-0.7%)	41.8±9.0	44.9±8.1 (+3.7%)	43.3±10.5		
CO	249.1±56.3 (-12.2%)	283.7±74.7	188.6±41.3 (-9%)	207.2±48.5	177.8±22.5 (-0.7%)	179.1±38.4
NO _x	5.4±2.0 (-16.1%)	6.4±2.4	3.8±1.2 (-2.1%)	3.9±0.9		
SO ₂	0.9±0.3 (-51.9%)	1.9±1.3	0.7±0.1 (+5%)	0.7±0.3		

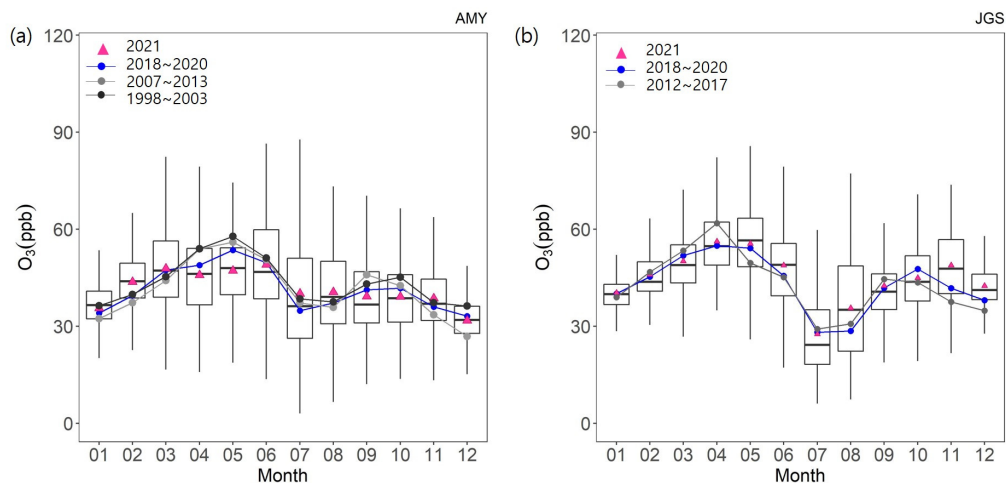
* 최근 평균: 안면도(2011~2020년, 2014.1~2017.2 안면도 관측환경 변화에 따른 무효처리), 고산(2013~2020년), 울릉도(2015~2020년)

* 안면도 연구동 산설 후 장비 이전 기간 2004~2006년 무효처리, 그 외 2021년 지구대기감시 보고서 통계표 참조

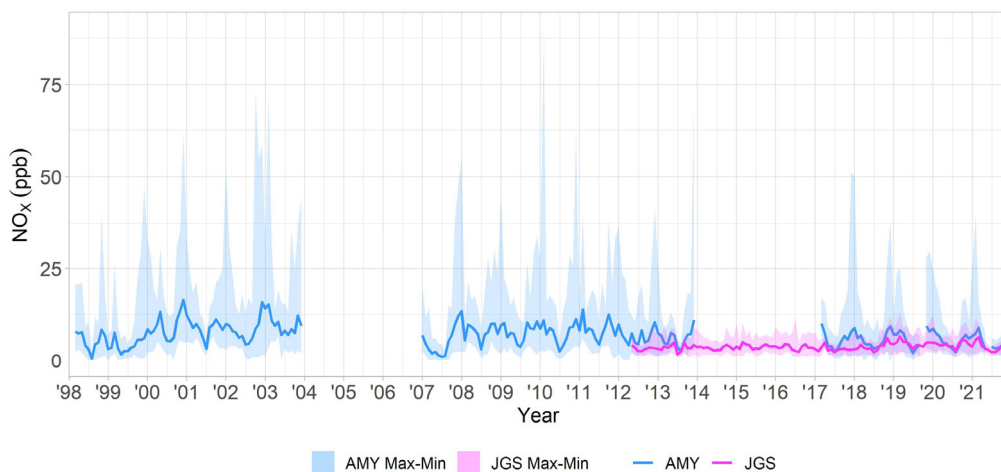
** 변화율(%) = (2021년 평균 - 최근 평균)/(최근 평균)*100

● 2021년 반응가스 특성

- 지표 O₃ 연평균은 최근 10년 대비 안면도에서 감소, 고산에서 증가 [요약표 2.1, 요약그림 2.1]
 - 안면도와 고산 직달일사의 증감과 일치 [요약표 2.1]
- 각 감시소에서 CO, NO_x, SO₂ 농도 최근 10년 대비 감소 [요약표 2.1, 요약그림 2.2]
 - 일차 오염물질 배출을 규제하는 대기환경정책의 결과 반영으로 추측



■ 요약그림 2.1 (a) 안면도와 (b) 고산 O₃의 2021년 월별 분포와 과거 월평균 자료와의 비교 ■



■ 요약그림 2.2 안면도와 고산에서 측정한 NO_x 연변화 경향 ■

3. 에어로졸

- PM10: 안면도 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고산 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 울릉도 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- 3월과 5월 황사의 영향으로 고농도 관측
- 안면도 총수농도의 월별 변동은 뚜렷하나, 연평균 증감 추세는 뚜렷하지 않음
- 광산란계수, 광흡수계수: 2월 최대, 최근 증감 추세 뚜렷하지 않음

■ 요약표 3.1 2021년과 최근 평균 비교 ■

감시소 측정요소	안면도		고산	
	2021년 (변화율 ^{***})	최근 10년 [*]	2021년 (변화율)	최근 10년 ^{**}
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	33±13 (-6.3%)	35±10	36±18 (+20.0%)	30±8
총수농도 (#/cm ³)	4590±432 (+13.6%)	4041±730	3864±1275 (-4.3%)	4039±1010
광산란계수 (Mm^{-1})	74.8±23 (-24.1%)	98.5±33		
광흡수계수 (Mm^{-1})	6.2±2.7 (-22.5%)	8.0±1.3		
수용성 이온성분 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	16.9±14.6 (-17.8%)	19.9±12.6		

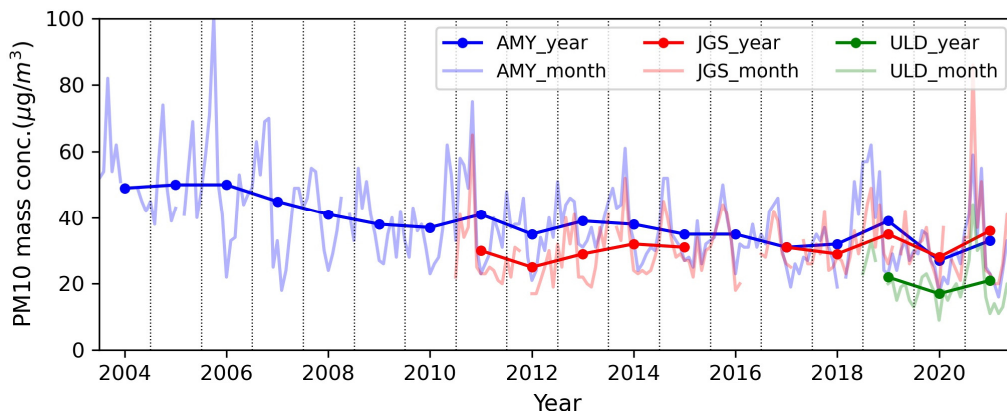
* 최근 평균: 2011~2020년

**고산 총수농도 2012~2020년

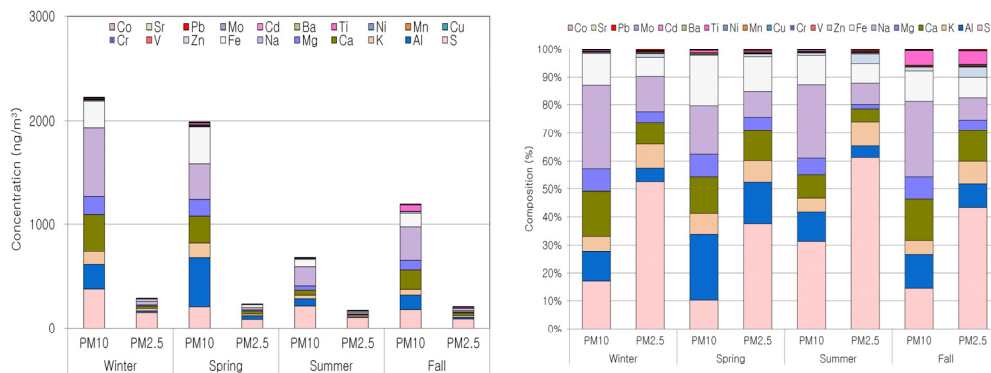
*** 변화율(%) = (2021년 평균 - 최근 평균)/(최근 평균)*100

● 2021년 에어로졸 특성

- 최근 10년 대비 PM10 연평균: 안면도 -6.3%, 고산 +20.0%
 - 봄철 잦은 황사의 영향으로 3월과 5월 평균 농도 증가 [요약그림 3.1]
- 최근 10년 대비 총수농도: 안면도 +13.6%, 고산 -4.3%
 - 연간 변화 추세는 통계적으로 유의미하지 않으므로 분석됨
- 광산란계수와 광흡수계수는 2월에 고농도 관측, 최근 10년 대비 낮은 수준
- 봄철 황사의 영향으로 토양 기원 성분인 Al, K, Ca, Mg, Fe, Ti가 전체 원소의 83.7% 차지 [요약그림 3.2]



■ 요약그림 3.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) PM10 질량농도의 월별 평균 및 연평균($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ■



■ 요약그림 3.2 안면도 PM10, PM2.5 에어로졸 원소성분의 최근 10년과 2021년의 계절별 농도 및 조성비 ■

4. 대기복사

- 태양하향복사(전천일사) : 안면도 173.6 W/m² (최근 10년 대비 +1.1%)
고 산 165.7 W/m² (최근 10년 대비 +3.3%)
- 태양하향복사는 안면도의 경우 여름철 길었던 일조시간의 영향으로, 고산은 일조시간의 전반적인 증가로 인해 다소 높았음

■ 요약표 4.1 2021년과 최근 평균 비교 ■

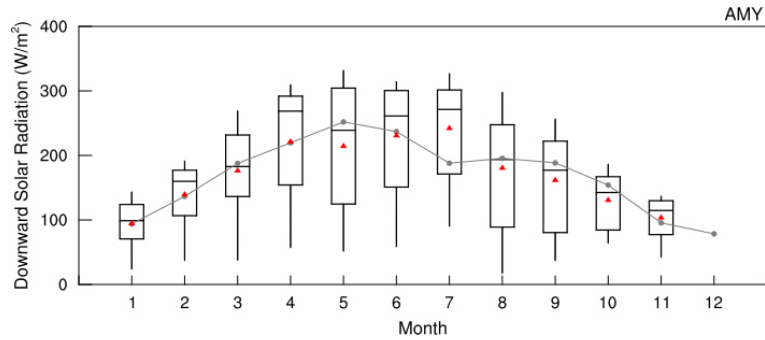
감 시 소 측정요소 (W/m ²)	안면도		고산	
	2021년 (변화율)	최근 10년*	2021년 (변화율)	최근 10년*
직달일사	141.5±23.8 (-6.6%)	151.4±45.3	130.7±29.3 (+8.0%)	121.0±45.1
산란일사	81.2±25.8 (+3.9%)	78.1±28.8	84.8±23.8 (-0.2%)	85.0±26.7
태양하향복사	173.6±48.9 (+1.1%)	171.7±57.6	165.7±48.9 (+3.3%)	160.4±54.7
태양상향복사	35.2±7.7 (+0.8%)	34.9±9.2	-	-
지구하향복사	-	302.7±47.9	-	-
지구상향복사	-	371.2±49.3	-	-
순복사	73.2±49.6 (-5.0%)	77.0±47.1	-	-

* 최근 평균: 안면도, 고산(2011~2020년)

** 변화율(%) = (2021년 평균 - 최근 평균)/(최근 평균)*100

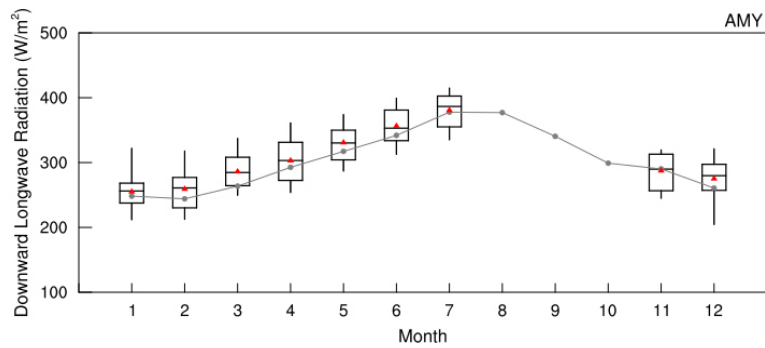
● 2021년 대기복사 특성

- 태양복사요소(직달일사, 산란일사, 태양상향복사, 태양하향복사)는 안면도 직달일사를 제외하고 최근 10년 평균 대비 대체로 높음 [요약표 4.1]
 - 안면도는 7월 평년보다 북쪽에 발달한 북태평양고기압의 영향으로 길어진 일조시간의 영향으로 태양복사요소가 대체로 높았으나, 봄철 잦은 강수로 직달일사는 오히려 낮았음 [본문그림 7.6.1, 요약그림 4.1]
 - 고산은 당해 길었던 일조시간의 영향으로 태양복사요소가 높았음 [본문그림 7.6.1]



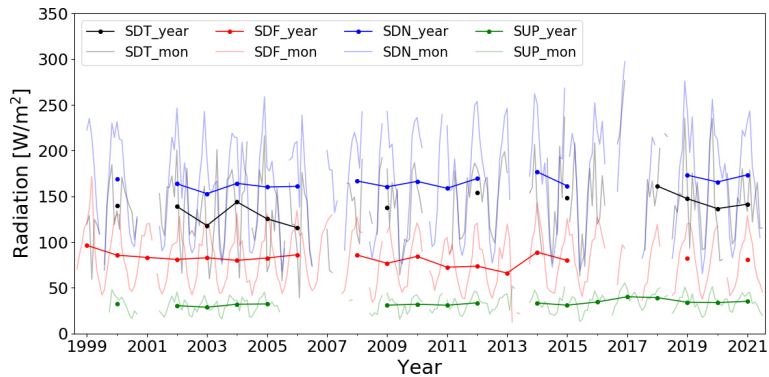
■ 요약그림 4.1 안면도 월별 태양하향복사 (2021년 관측값: 박스플롯, 최근 10년 평균: 회색선) ■

- 지구복사요소들은 봄철 과거 평균보다 높았음 [요약표 4.1]
 - 3월 찬 대륙고기압의 강도가 약해 이례적으로 높은 기온을 나타냈으며, 기온의 영향을 크게 받는 지구복사요소들은 봄철에 상대적으로 높은 값을 나타냄 [요약그림 4.2]



■ 요약그림 4.2 안면도 월별 지구하향복사 (2021년 관측값: 박스플롯, 최근 10년 평균: 회색선) ■

- 전체 관측기간 동안 안면도의 태양복사요소들은 눈에 띄는 경향성을 보이지 않음 [요약그림 4.3]



■ 요약그림 4.3 안면도 연도별 태양복사요소 변화 (SDT:직달일사, SDF:산란일사, SDN:태양하향복사, SUP:태양상향복사) ■

5. 성층권오존

- 오존전량 : 포항(오존존데) 309 DU (최근 10년 대비 +0.6%)
- 봄철 성층권-대류권 상호교환이 악화되었음에도 불구하고, 당해 성층권오존은 전반적으로 고농도 유지

【 요약표 5.1 2021년과 최근 평균 비교 】

감 시 소 측정요소	안면도		고산		포항(오존존데)	
	2021년 (변화율****)	최근 7년*	2021년 (변화율)	최근 10년*	2021년 (변화율)	최근 10년*
오존전량 (DU)	305** (-)	323±29	290*** (-)	303±24	309±14 (+0.6%)	308±36

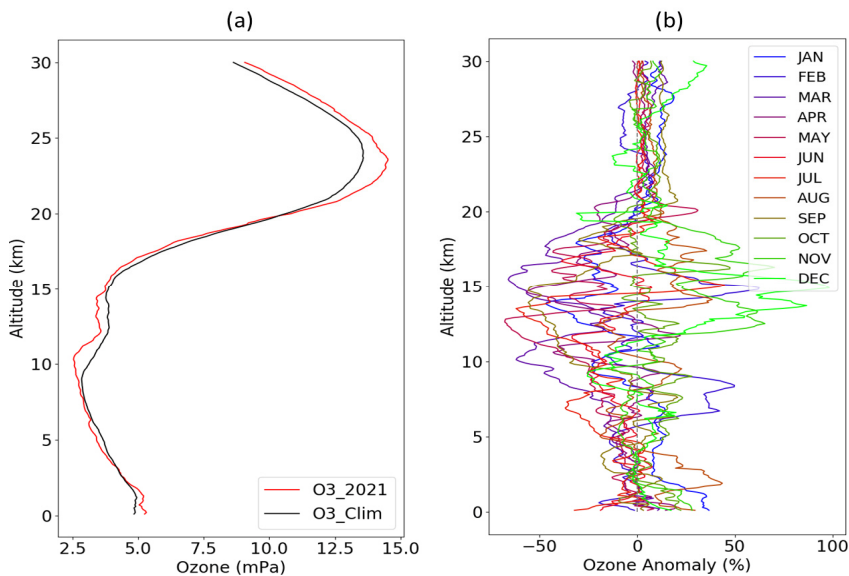
* 최근 평균 : 안면도(2013~2020년), 고산(2011~2020년), 포항(2011~2020년)

** 2021년 결측으로 인해 안면도의 오존전량은 8~12월에 대해서만 평균값. 결측이 많아 변화율은 산출하지 않음.

*** 2021년 결측으로 인해 고산의 오존전량은 1월 평균값. 결측이 많아 변화율은 산출하지 않음.

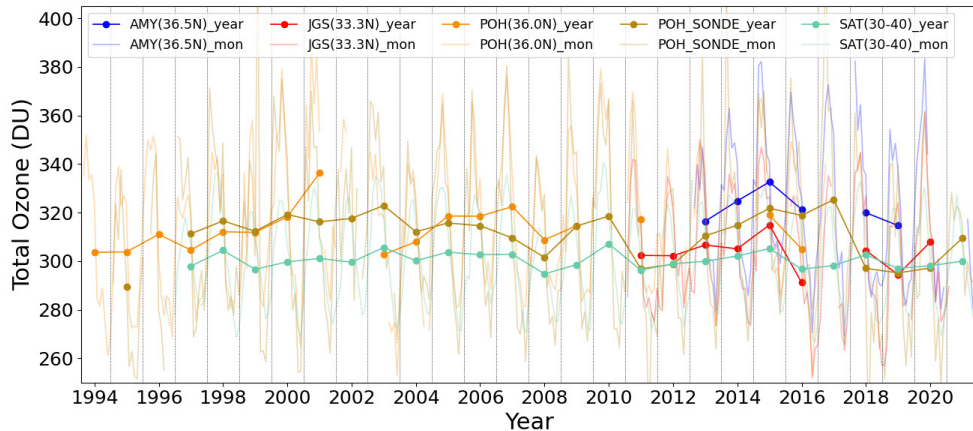
● 2021년 성층권오존 특성

- 포항 오존존데 자료로 추정된 오존전량은 최근 평균과 비슷 [요약표 5.1]
- 봄철 성층권-대류권 상호교환의 악화로 대류권계면 부근은 오존 농도가 낮았으나 20~25 km의 오존층 고도에서는 당해 전반적으로 높은 농도를 나타냄 [요약그림 5.1]



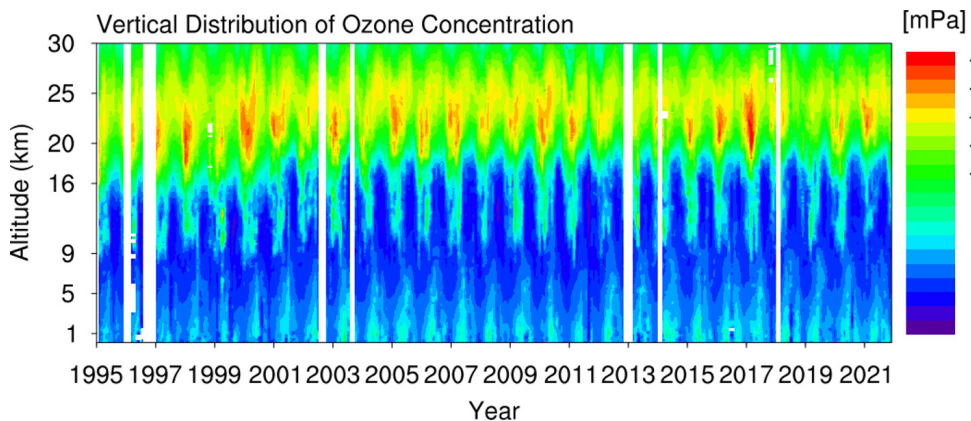
【 요약그림 5.1 최근 10년 (2011~2020년, 검정색)과 2021년 포항지역(빨강색) 연직 오존농도의 (a) 연평균과 (b) 월별 편차 】

- 한반도에서 관측된 오존전량은 유사한 위도(북위 30~40°) 평균보다 높은 관측값을 나타냄 [요약그림 5.2]
 - 상대적으로 고위도에 위치한 안면도가 고산보다 약 20 DU 높은 관측값 [요약표 5.1, 요약그림 5.2]



▮ 요약그림 5.2 포항(오존분광광도계와 오존존데), 안면도, 고산 지점과 위성(2004년 이전: TOMS/EP-TOMS, 2004~2011년: OMI/Aura, 2012년 이후: OMPS/Suomi-NPP)에서 관측된 북위 30~40° 지역의 연평균 오존 시계열 ▮

- 포항의 장기적인 연직오존변화를 살펴보면, 대류권의 농도증가 뚜렷함 [요약그림 5.3]
- 연직적으로 오존은 주로 봄철 16~25 km 고도에서 피크가 나타나며, 비슷한 기간 9~16 km 고도에서 오존이차피크 발생 [요약그림 5.3]



▮ 요약그림 5.3 포항지역의 오존 연직분포 변화 ▮

6. 자외선

- 자외선A 일누적 복사량 : 안면도 0.79 MJ/m² (최근 10년 대비 +10.6%)
고 산 0.74 MJ/m² (최근 9년 대비 +3.8%)
- 자외선B(홍반자외선) 일최대 복사량 : 안면도 0.137 W/m² (최근 10년 대비 +10.0%)
고 산 0.149 W/m² (최근 9년 대비 +11.3%)
- 자외선A와 자외선B(홍반자외선) 모두 여름철 길었던 일조시간의 영향으로 증가

▣ 요약표 6.1 2021년과 최근 평균 비교 ▣

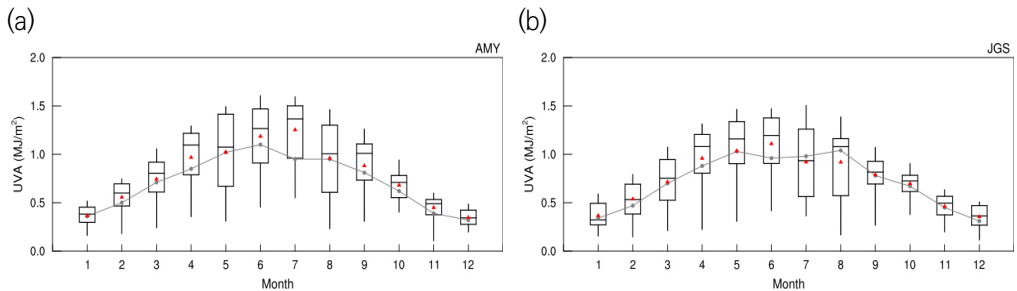
감시소 측정요소	안면도		고산		울릉도		포항	
	2021년 (변화율**)	최근 10년*	2021년 (변화율)	최근 7년*	2021년 (변화율)	최근 7년*	2021년 (변화율)	최근 10년*
자외선A (MJ/m ²)	0.79 ±0.30 (+10.6%)	0.71 ±0.27	0.74 ±0.25 (+3.8%)	0.72 ±0.28	0.71 ±0.27 (+14.0%)	0.62 ±0.28	0.71 ±0.22 (+3.4%)	0.68 ±0.25
자외선B (홍반자외선 , W/m ²)	0.137 ±0.064 (+10.0%)	0.124 ±0.056	0.149 ±0.056 (+11.3%)	0.134 ±0.055	0.139 ±0.063 (+17.3%)	0.118 ±0.056	0.117 ±0.054 (-3.7%)	0.122 ±0.054

*최근 평균 : 안면도, 포항(2011~2020년), 고산, 울릉도(2012~2020년)

** 변화율(%) = (2021년 평균 - 최근 평균)/(최근 평균)*100

● 2021년 자외선A 특성

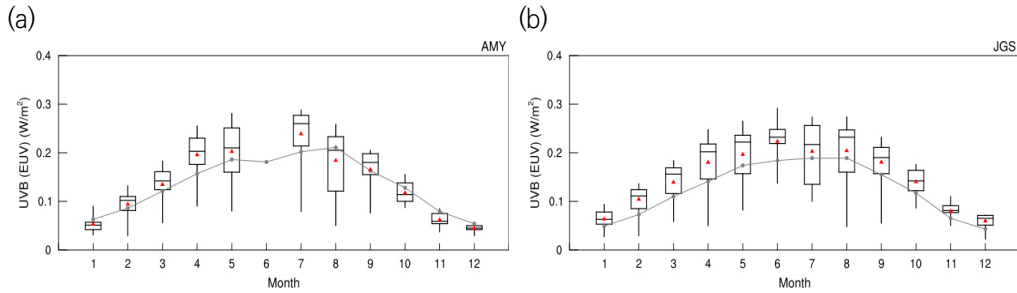
- 자외선A 일 누적 복사량은 전 지점에서 최근 평균보다 높았음 [요약표 6.1, 요약그림 6.1]
 - 여름철 평년보다 북쪽에 발달한 북태평양고기압의 영향으로 덥고 습한 공기 유입되어 맑은 날씨가 지속되었고, 이에 따라 일반적으로 강수가 많은 7월(고산은 6월) 일조시간이 길었음 [본문그림 9.5.1]
 - 최근 평균 대비 안면도는 7월에 +58.4%, 고산은 6월에 +51.6% 높은 일조시간 [본문그림 9.5.1]
 - 울릉도의 경우 결측으로 인해 2월 관측값이 빠지면서 일조량 변화에 비해 높은 연평균 [본문그림 9.2.1]



▣ 요약그림 6.1 (a) 안면도, (b) 고산 자외선A 일 누적 복사량의 월 변화 (2021년 관측값: 박스플롯, 최근 평균: 회색선) ▣

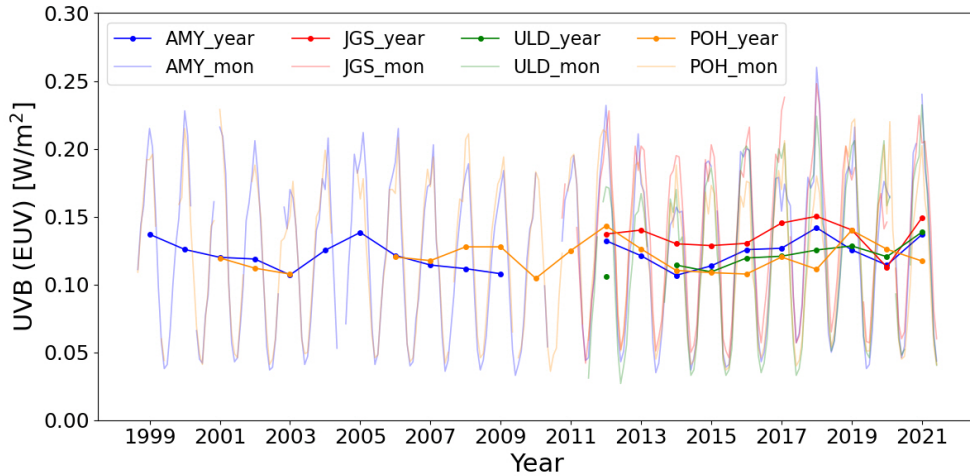
● 2021년 자외선B(홍반자외선) 특성

- 자외선B 일 최대 복사량은 포항을 제외한 전 지점에서 최근 평균보다 높았음 [요약표 6.1, 요약그림 6.2]
- 자외선A와 마찬가지로 여름철의 높은 일조시간의 영향 [본문그림 9.5.1]



■ 요약그림 6.2 (a) 안면도, (b) 고산 자외선B 일 누적 복사량의 월 변화
(2021년 관측값: 박스플롯, 최근 평균: 회색선) ■

- 전체 관측기간 동안 자외선은 크게 눈에 띄는 경향성은 보이지 않음 [요약그림 6.3]
- 태양천정각이 가장 낮은 저위도에 위치한 고산에서 대체로 높은 관측값 [요약그림 6.3]



■ 요약그림 6.3 지점별 자외선B(홍반자외선) 월별/연별 관측값의 변화
(AMY:안면도, JGS:고산, ULD:울릉도, POH:포항) ■

7. 총대기침적

- 습성침적: 안면도 8863.0 mg/m²/year (최근 10년 대비 +23.2%)
 고 산 9063.1 mg/m²/year (최근 10년 대비 -13.4%)
 울릉도 23145.6 mg/m²/year (최근 10년 대비 -9.3%)
- 건성침적: 안면도 3966.8 mg/m²/year (최근 10년 대비 +7.9%)
- 습성침적 성분 중 붓철에 토양성분(Ca²⁺)이 황사 영향으로 최근 10년보다 높은 농도를 보임

【 요약표 7.1 2021년과 최근 평균 비교 】

감 시 소 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2021년 (변화율**)	최근 10년*	2021년 (변화율)	최근 10년*	2021년 (변화율)	최근 10년*
강수량 (mm)	1089.0 (+15.8%)	917.1	1480.0 (+5.5%)	1399.2	1532.6 (-0.5%)	1540.4
pH	5.32 (+10.2%)	4.78	5.19 (+5.0%)	4.93	5.09 (+5.5%)	4.81
전기전도도	19.7 (-23.9%)	24.4	15.9 (-37.7%)	21.9	37.6 (-30.0%)	48.5
습성침적 (mg/m ² /year)	8863.0 (+23.2%)	7193.4	9063.1 (-13.4%)	10461.0	23145.6 (-9.3%)	25524.2
건성침적 (mg/m ² /year)	3966.8 (+7.9%)	3675.7	-	-	-	-

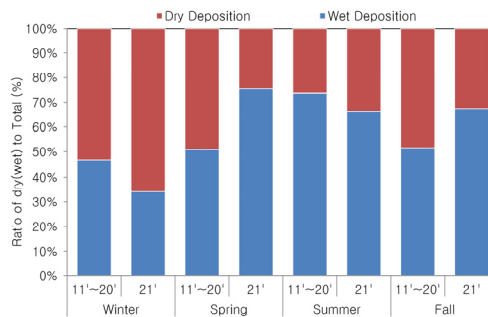
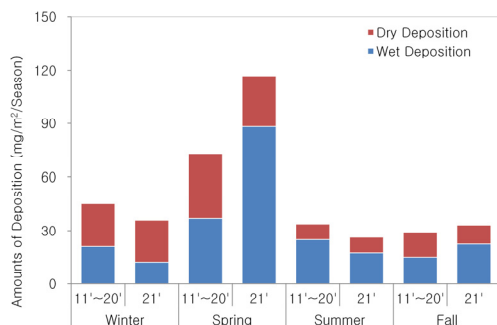
* 최근 10년 평균 : 안면도, 고산, 울릉도(2011~2020년)

** 변화율(%) = (2021년 평균 - 최근 연평균)/(최근 연평균)*100

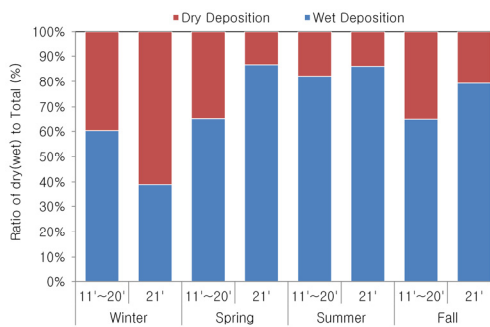
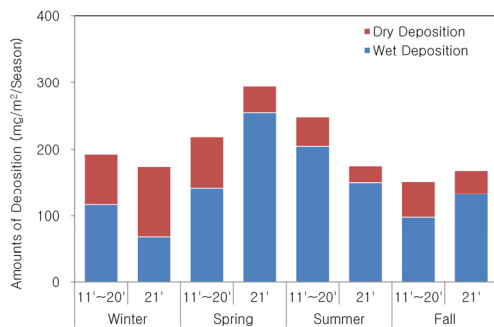
● 2021년 총대기침적 특성

- 울릉도를 제외한 안면도, 고산 감시소 강수량이 최근 10년보다 많았음 [본문그림 10.2.2]
- pH: 2021년 pH가 5.0 이상이며, 최근 10년 대비 약 5~10% [요약표 7.1]
- 전기전도도: 안면도, 고산, 울릉도 최근 10년 대비 약 23.9~37.7% 감소 [요약표 7.1]
- 습성침적: 안면도 감시소 최근 10년 대비 약 23.2% 증가, 고산, 울릉도 최근 10년 대비 감소 [요약표 7.1, 요약그림 7.1]
 - 안면도 해염성분(Na⁺, Cl⁻), 이차오염물질(NH₄⁺), 토양성분(Ca²⁺) 농도가 증가함 [본문표 10.5.1]
 - 고산, 울릉도 대부분 성분이 감소함 [본문그림 10.5.4]
- 건성침적: 최근 10년 대비 약 7.9% 증가 [요약표 7.1, 요약그림 7.1]

• 토양성분(Ca^{2+})



• 이차오염물질(이동형, 자동차) NO_3^-



■ 요약그림 7.1 최근 10년과 2021년의 계절별 Ca^{2+} , NO_3^- 성분의 건성 및 습성 침적량과 비율 ■

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





Report of Global Atmosphere Watch 2021

제1장 머리말



제1장 머리말

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC¹⁾)는 5차 보고서(2013년)에 이어 6차 보고서(2021년)에서도 인간의 영향으로 대기와 해양, 육지가 온난해지고 있는 것이 명백함을 밝혔다. 대기 중 온실가스 농도가 계속 증가하여 2020년 평균 이산화탄소(CO₂) 농도는 413 ppm, 메탄(CH₄) 농도는 1889 ppb, 아산화질소(N₂O) 농도는 333 ppb에 도달했다(WMO, 2021). 1850년 이후 10년 단위로 봤을 때 과거 어느 때 보다 지난 40년간 기후가 지속적으로 온난해졌고, 21세기의 첫 20년 동안(2001~2020년) 지구 표면온도가 1850~1900년 대비 0.99 °C 더 높아졌다. 2011~2020년에는 1850~1900년보다 지구 표면온도가 1.09 °C 더 높았고, 육지의 온도 상승폭(1.59 °C)이 해양(0.88 °C)보다 더 큰 것으로 분석되었다. 최근 전세계에서 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 위탁관측소를 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)가 GAW 지역급 관측소로 지정되어 있다.

¹⁾ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change



한반도 지구대기감시 관측망에서는 GAW에서 권고하는 온실가스, 반응가스, 에어로졸, 대기 복사, 성층권오존/자외선, 총대기침적 분야에서 총 37종의 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 2001년부터 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 규제 대상 6대 온실가스 중 하나인 육불화황(SF₆)의 관측 기술을 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, 전자기 유도입자계수기, 광흡수계수측정기)에 참여하여 관측자료 신뢰도를 확보하였다. 2019년에는 NO_x 세계표준센터에서 수행하는 국제 비교실험을 통해 안면도 NO_x 분석 자료가 기준장비와 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 분석 결과를 비교·평가하여, 강수화학성분에 대한 분석 능력을 검증하고, 신뢰자료를 강화하였다.

2020년에는 기후변화감시소 원격제어를 통한 관측 운영 자동화를 추진하고, 예비장비 활용 및 긴급보수 등을 통해 관측 공백 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 관측 환경 구축 등을 수행하였다. 또한, 기후변화감시 관측 요원 장비 운영 교육, 지구대기감시 업무 교육 동영상 제작 등 교육훈련 업무도 강화하였다. 온실가스 국내

순차순환비교실험을 통해 3개 감시소 자료가 WMO/GAW가 제시하는 허용오차 범위 내에 있음을 확인하였고, 미국해양대기청과 염화불화탄소 국제 비교실험, 제62차 WMO/GAW 강수화학 국제 비교실험, 중앙교정실험실과 육불화황 비교실험 등 관측자료 품질관리를 위해 노력하고 있다. 2021년에도 안면도 에어로졸, 에어로졸라이다, 대기복사, 포항 자외선 관측분야의 관측환경을 개선하였고, 정밀필터복사계 및 지구복사계, 응결핵계수기, 강수화학에 대한 국제비교실험에 참여, 중앙교정실험실과의 비교실험을 통한 온실가스 자료 안정화, 제7차 메탄(CH₄) 아시아 순차순환비교실험 등을 통해 관측자료의 품질 유지 및 향상을 위한 노력을 지속하였다. 또한 안면도에 CO₂ 동위원소 측정기를 도입하는 등 기후변화 원인 분석을 위한 관측을 강화해 나아가고 있다. 특히, 2021년에는 2001년부터 시작된 지구대기감시보고서 발간 20주년을 맞이하여 특별판 보고서를 발간하였다.

기상청 안면도 기후변화감시소에서 관측하는 27종의 관측값은 매년 통계청의 국가승인통계를 취득하여 국가 '표준'으로 인정받고 있다. 2022년에는 고산에서 관측한 요소에 대해서도 국가승인통계 취득 승인을 신청할 예정이다.

본 보고서는 기상청 국립기상과학원에서 운영하는 기후변화감시망(4개의 기본감시소, 7개의 위탁관측소)에서 관측된 자료를 정리하였으며, 한반도 지구대기감시업무와 기후변화에 대한 이해도를 높이고, 기후위기 대응 및 탄소중립·녹색성장을 위한 국가정책에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타



2021 지구대기감시 보고서



제2장

한반도 지구대기감시업무 현황

2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램	8
2.2 한반도 지구대기감시소 현황	11
2.3 세계기상기구 육불화황(SF ₆) 세계표준센터	14
2.4 WMO IG ³ IS 프로젝트	15



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, 30개소의 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(출처 : Global distribution of GAW stations from the GAW Station Information System (GAW SIS)).



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), GAW 관측소정보센터(GAW Station Information System; GAWSIS)로 구성되어 있다. 과학자문그룹(Scientific Advisory Group; SAG)은 프로그램의 과학적 정책 방향을 결정하고 지구대기감시 프로그램 사무국은 중앙기구와 지구대기감시 관측소 간의 협력과 운영을 돕는다.

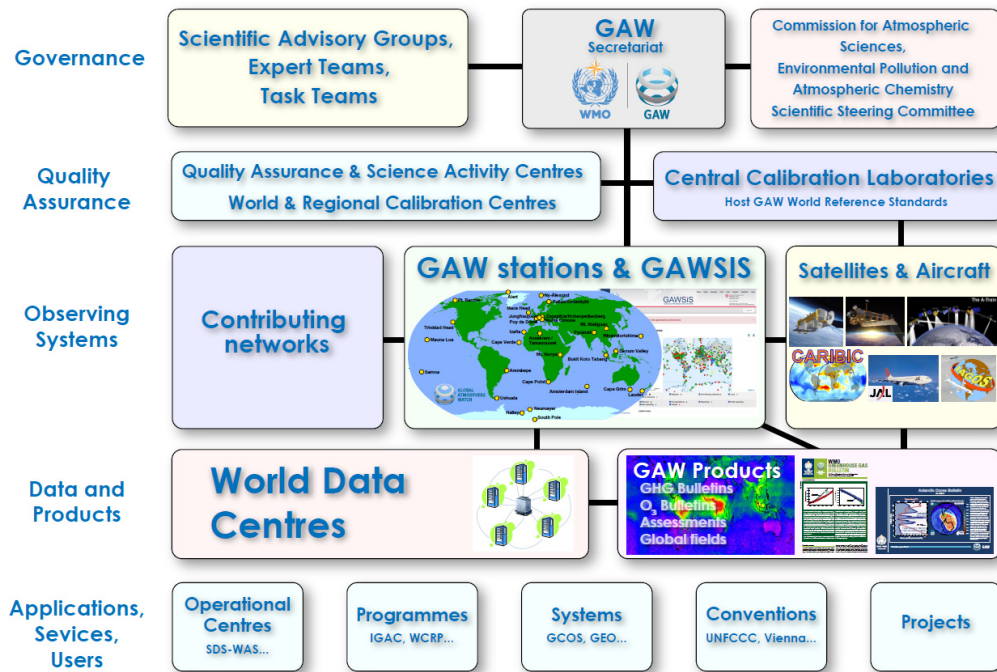


그림 2.1.2 WMO/GAW 프로그램 구성 요소 (출처 : WMO/GAW 보고서 No. 228).

전세계의 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://wdcpc.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 국제협약을 지원하며, 기후변화와 장거리 대기오염에 관한 이해를 향상하는 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 원인물질의 감시 필요성이 대두되면서 1992년부터 무안기상대에서 온실가스를 관측하기 시작하였고, 1994년부터 포항 기후변화감시소(이하 포항, POH)에서 성층권 오존과 자외선 관측도 시작했다.

기후변화가 세계적인 관심사로 떠오르면서 1995년 12월에 소백산기상관측소를 배경대기관측소로 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 원인물질의 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 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(2013), 자외선(1999) 대기복사(1999)	WMO/GAW 지역급 감시소 (1999, AMY)
	33.30°N 126.21°E	52.0	온실가스(1990), 반응가스(2012), 에어로졸(2011), 총대기침적(1998), 성층권오존(2010), 자외선(1999), 대기복사(2008)	WMO/GAW 지역급 감시소 (2013, JGS)
고산	33.29°N 126.16°E	71.0	온실가스(1990), 반응가스(2012), 에어로졸(2011), 총대기침적(1998), 성층권오존(2010), 자외선(1999), 대기복사(2008)	WMO/GAW 지역급 감시소 (1990, GSN)
	37.48°N 130.90°E (울릉도)	220.9	온실가스(2012), 반응가스(2015) 에어로졸(2012), 총대기침적(1997) 자외선(2012)	
울릉도독도	37.23°N 131.86°E (독도)	24.0	온실가스(2012)	
포항	36.02°N 129.37°E	2.5	성층권 오존(1994), 자외선(1999)	WMO/GAW 지역급 감시소 (1994, POH)

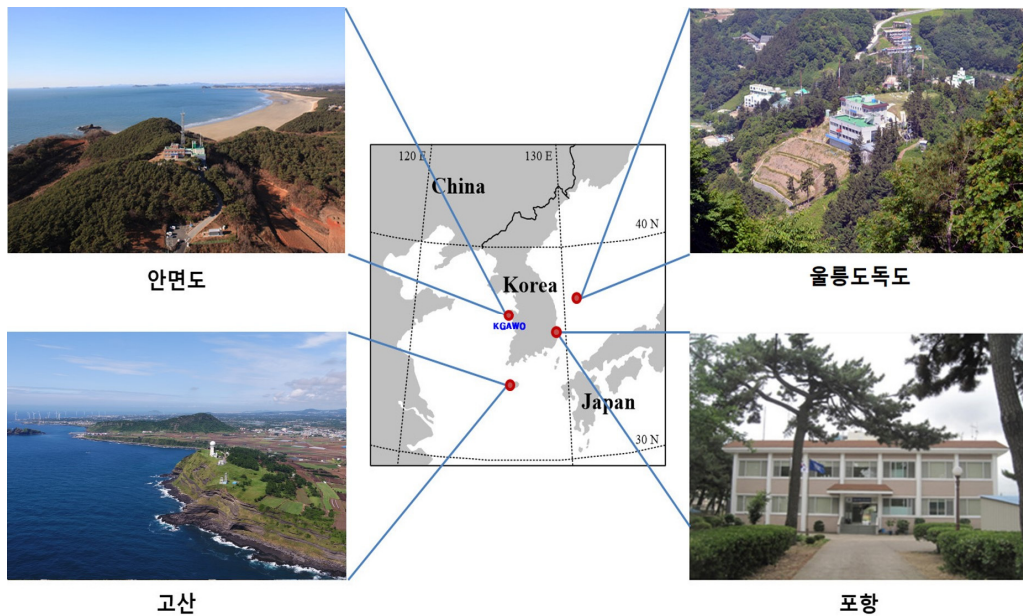


그림 2.2.1 한반도 기후변화감시망의 구성.



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 (SEO)
광주과학기술원	35.22°N 126.83°E (광주)	에어로졸 광학깊이, 연직분포	2007. 1. 1.	
서울대학교	37.75°N 127.15°E (광릉수목원)	산림 이산화탄소(CO ₂)	2008. 11. 5.	
극지연구소	62.22°S 58.78°W (남극세종과학기지)	이산화탄소(CO ₂)	2010. 10. 26.	WMO/GAW 지역급 관측소 (KSG)
	74.62°S 164.23°E (남극장보고과학기지)	이산화탄소(CO ₂), 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/GAW 내에는 전세계 약 62개의 관측소에서 육불화황(SF₆)을 관측하고 있다(gawsis.meteoswiss.ch/GAWSIS; last access; March, 2021). 이 관측소들이 생산하는 관측값들로 전지구 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. 기술 지원 중 하나의 방법으로 육불화황 세계표준센터(World Calibration Centre for SF₆; WCC-SF₆)는 아시아·태평양 기후변화 워크숍을 2009년부터 개최해오고 있다(그림 2.3.1). 2021년 10월 25일부터 26일까지 개최된 제10차 아시아·태평양 기후변화감시 국제워크숍은 COVID-19 팬데믹의 여파로 원격으로 진행되었으며, 총 25개의 발표자가 온실가스 관측과 모델링을 주제로 발표하였다.

우리나라에서는 2021년 WMO IG³IS(세계기상기구 통합 전지구 온실가스 과학정보시스템) 프로젝트를 아시아 최초로 승인받아 이를 소개하고, 이 프로젝트에 사용되는 통합 감시프로그램(지표, 선박, 항공, 고층 타워 등)을 발표하였다. 중국에서는 정밀한 관측과 모델링을 통한 배출량 검증에 대해 발표하였으며, 일본은 세계자료센터에 대한 소개를 하였다. 특히 개발도상국인 베트남, 말레이시아의 경우 관측소의 확대가 확정되어 관측 공백 지역에 조밀한 관측망이 세워질 전망이다. 아시아태평양 지역에서의 온실가스 관측 활동이 잘 구성된 미국, 뉴질랜드, 호주, 브라질 등의 국가에서는 관측과 모델링을 병행하여 온실가스의 배출원을 추적하는 프로그램이 활발하게 이루어졌다.

본 워크숍은 선진기술을 배우고, 개발도상국의 기술을 개선하는 본래의 취지가 반영되어 향후 육불화황 세계표준센터의 활동을 통한 교두보 및 개발도상국 지원 등의 역할이 강화될 예정이다.



그림 2.3.1 제10차 아시아태평양 기후변화감시 워크숍.



2.4 WMO IG³IS 프로젝트

기후 위기 대응과 탄소중립 달성을 위해서는 정확한 온실가스 배출량 산정이 중요하다. 세계 기상기구(WMO)는 배출량 정확도를 개선하기 위하여 기존의 상향식 인벤토리와 독립적인 비교가 가능한 하향식의 세계기상기구 통합 전지구 온실가스 과학정보시스템(Integrated Global Greenhouse Gas Information System; IG³IS) 개발과 활용을 회원국에 독려하고 있다. 또한 2019년도에 갱신된 2006년 IPCC 인벤토리 가이드라인에는 품질보증과 품질검사 및 검증 과정으로 IG³IS가 새롭게 채택되었다.

영국, 스위스, 호주, 뉴질랜드는 국가 인벤토리보고서(National Inventory Report)에 국가 규모의 IG³IS 결과를 활용하고 있고, 미국도 국가 인벤토리보고서에 IG³IS 분석 내용을 포함하겠다고 선언하였다. 주로 인벤토리 품질보증과 품질검사 부분에서 상향식과 하향식 배출량의 차이를 비교하고, 그 차이가 큰 경우 원인 분석 및 그에 따른 배출계수 등의 개선 사항을 제시하고 있다.

이러한 국제적 흐름에 발맞추어 기상청 국립기상과학원은 그동안 축적된 온실가스 관측 기술과 수치 예보모델 역량을 바탕으로 INVERSE-KOREA 사업을 추진하였고, 아시아 최초로 2021년 5월 WMO의 공식 IG³IS 프로젝트로 승인받게 되었다. 2023년까지 시스템개발 예정이며, 이후 실시간 운영을 통해 대한민국의 탄소중립을 위한 과학 정보를 관련기관에 지원할 계획이다.

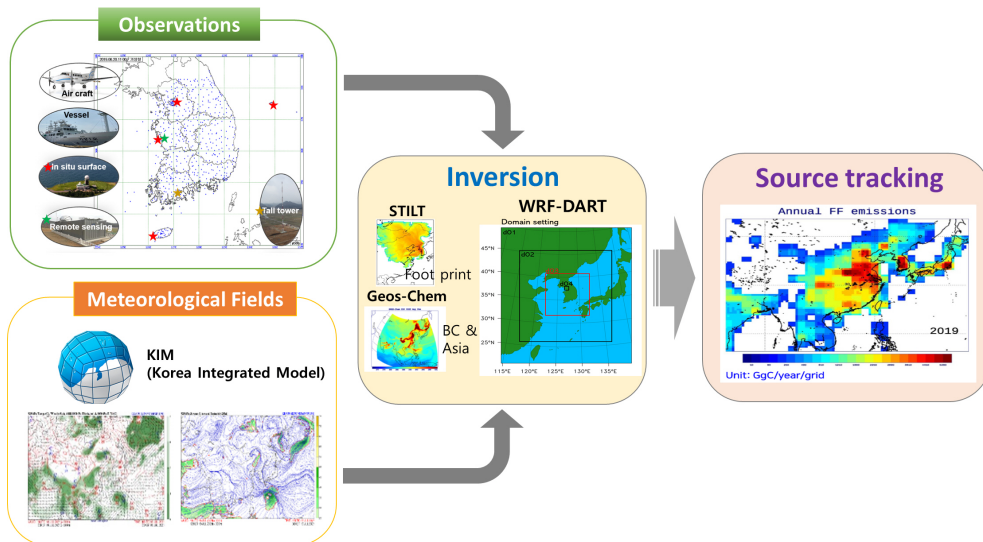


그림 2.4.1 온실가스 기원추적 시스템 개발 사업 개념도.

WMO SECRETARIAT

WMO SECRETARIAT



WMO OMM
World Meteorological Organization
Organisation météorologique mondiale
Организация метеорологических организаций
المنظمة العالمية للأرصاد الجوية
世界气象组织

Secretariat
7 bis, avenue de la Paix - Case postale 2300
CH 1211 Genève 2 - Suisse
Tel. +41 (0) 22 750 81 11
Fax +41 (0) 22 750 81 01
wmo@wmo.int - public@wmo.int

Our ref.: 11321/2021-SJ/AER

Mr Kwangsook Park
Permanent Representative of the Republic
of Korea with WMO
Korea Meteorological Administration (KMA)
61, Yeouidoabang-ro, 16-gil, Dongjak-gu
Republic of Korea

11 May 2021

Subject: Endorsement of "Inverse modelling for Validating and Evaluating of the Reduction of Sectoral greenhouse gas Emissions in KOREA - INVERSE KOREA" as an official project of the Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG³IS)

Dear Mr Park,

I am pleased to learn about the advances made by the Republic of Korea with regard to the establishment of the Integrated Global Greenhouse Gas Information System (IG³IS) on multi-scales from national to urban. The efforts of the Republic of Korea are highly valued by the World Meteorological Organization (WMO). As you are aware, the observations of Greenhouse Gases (GHG) coordinated by the Global Atmosphere Watch (GAW) Programme of WMO and performed by its members and partners around the globe help support society in guiding climate action and improving understanding of the carbon cycle. This data is used to produce the annual WMO Greenhouse Gas Bulletin, and guide analysis and assessments that support the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Observational data combined with modelling allow for the improved estimates of GHG emissions following the methodology of the IG³IS.

In this regard, I have received the request for the official endorsement of "Inverse modelling for Validating and Evaluating of the Reduction of Sectoral greenhouse gas Emissions in KOREA - INVERSE KOREA" led jointly by Dr Sangwon Joo from the National Institute of Meteorological Sciences and Dr Haeyoung Lee from the Korea Meteorological Administration, as an official project of IG³IS. This project was presented and discussed at the recent IG³IS Steering Committee. The IG³IS Steering Committee has reviewed the proposal and assessed its alignment with the IG³IS principles and objectives. The Steering Committee concluded that the project meets all the requirements for an IG³IS endorsement and welcomed the important contribution that the initiative will provide to the IG³IS National Objective. It was understood that at the next stages the project will address the urban scale as well.

The proposed project will contribute to the national objective of IG³IS. Following the IG³IS implementation principles, the project includes frequent estimations of sectoral emission changes in GHG to support the national GHG reduction policy for individual emission sectors in a timely manner. The top-down estimates to be established in the project will minimize the uncertainty in the national emission inventory for reliable evaluation of the Nationally Determined Contributions (NDC). Such estimates are critical in carrying out the policy for achieving carbon neutral by 2050. The project products will be used to provide guidance to individual emission sectors to conform to the emissions policy.

The proposed project will make important steps toward the advancement of the methodological approaches in IG³IS. If fully implemented, it will benefit the country and the global community highlighting the advantages of the observations-based approach to emission estimates at different scales. Lessons learned from the project implementation will be included in the updates of the IG³IS good practices and will help other Members to build their national and sub-national projects taking the example of the Republic of Korea into consideration.

WMO therefore endorses the project "Inverse modelling for Validating and Evaluating of the Reduction of Sectoral greenhouse gas Emissions in KOREA" as an official IG³IS project. I look forward to the project results and its contribution to the activities of the GAW Programme and its IG³IS initiative.

I would like to express my appreciation for your continued support in promoting the activities of WMO.

Yours sincerely,



Dr Elena Manaenkova
for the Secretary-General

그림 2.4.2 WMO IG³IS (세계기상기구 통합 전지구 온실가스 과학정보시스템)프로젝트 승인.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제3장 기상특성

3.1 기후변화감시소 기상 특성 20



제3장 기상특성

3.1 기후변화감시소 기상 특성

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

여러 가지 측정항목 중 풍향, 풍속, 기온, 상대습도를 분석하였으며, 강수량은 제 10장 제2절에 언급되었다.

풍향의 경우 월별 풍향 조성 비율과 풍향·풍속을 함께 나타낸 바람장미는 시간 평균을 사용하였다. 모든 측정항목의 장기간 연변화는 일 평균값을 사용하여 월평균과 월 최댓값, 월 최솟값으로 표현하였다.

안면도 기상자료 중 2009년 11월부터 2011년 8월까지 자료는 AWS의 위치를 이전하면서 일부 풍향이 측정되지 않아 이 기간의 전체 측정항목들을 분석에서 제외하였다. 각 감시소 AWS 분 단위의 자료를 중심으로, 시간, 월, 연평균을 산출할 때 반올림 등의 소수점 처리 없이 그대로 사용하였다.

최근 13년(2008~2020년)과 비교하여 안면도와 울릉도에서 2021년 평균 풍속이 0.1~0.3 m/s 감소했고, 고산에서는 0.1 m/s 증가했다. 세 감시소에서 2021년 평균 기온은 최근 13년보다 0.6~1.2 °C 높았다. 세 감시소 중 고산에서 풍속이 가장 강하였고, 내륙과 근접한 안면도의 풍속이 가장 낮았다. 연평균 기온은 위도가 낮은 고산(33.29°N)이 가장 높고, 안면도(36.53°N)와 울릉도(37.48°N)는 비슷하였다(표 3.1.1).

표 3.1.1 기후변화감시소별 기상요소의 2021년 연평균과 최근 10년 연평균.

기상요소	연도	안면도(AMY)	고산(JGS)	울릉도(ULD)
풍속	2021년	2.9 m/s	6.7 m/s	3.6 m/s
	2008~2020년	3.0 m/s	6.6 m/s	3.9 m/s
기온	2021년	13.5 °C	17.0 °C	13.5 °C
	2008~2020년	12.5 °C	15.8 °C	12.9 °C



3.1.1 안면도 기후변화감시소

- 최근 13년(2008~2020년)보다 1월 북동풍, 2월 남풍, 9월 동풍, 11월 서풍 빈도 높음
- 최근 13년 월평균 최고 기온 8월, 2021년 월평균 최고 기온 7월에 나타남

안면도에 영향을 주는 풍향은 겨울철에 주로 북, 북서풍이며 여름철에 남, 남서풍의 비율이 높은 계절변동을 보였다(그림 3.1.1(a)). 안면도의 일평균 풍속 자료로 계산한 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 보면(그림 3.1.1(b)) 연중 월평균 풍속은 여름에 낮고 겨울에 높으며, 태풍의 영향을 받는 가을에 풍속의 월 최댓값이 월평균의 2~3배 이상으로 나타내기도 하였다. 2021년 월별 최대 일풍속은 최근 13년보다 낮았다. 안면도의 2021년 풍향과 풍속을 바람장미로 나타내어 최근 13년(2008~2020년)과 비교한 결과, 2021년에는 1월에 북동풍, 2월에 남풍, 9월에 동풍, 11월에 서풍의 빈도가 더 많았다(그림 3.1.2).

안면도에서 측정된 기온의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 겨울(1월)에 낮고 여름(7~8월)에 높은 1년 주기가 뚜렷하였다(그림 3.1.3). 최근 13년 동안 안면도의 월평균은 $-2 \sim 27$ °C로 분포하였고, 일평균 최댓값은 2018년 7월에 29.7 °C였고, 최솟값은 2021년 1월에 -11.5 °C이었다. 2021년 안면도 기온의 월평균은 $0.3 \sim 25.3$ °C의 범위로 분포하였으며 5월과 8월 평균 기온은 최근 13년 평균과 비교하여 각각 0.3 °C, 0.6 °C 낮았다(그림 3.1.4). 또 최근 13년의 월평균 중 최고 기온은 8월이나 2021년에는 7월 평균 기온이 가장 높았으며, 최근 13년과 2021년에 1월 평균 기온이 가장 낮았다. 2021년 1월의 최고 일평균 기온(8.3 °C)과 최저 일평균 기온(-11.5 °C)의 차이는 19.8로 2008년 이후 기온의 변화가 가장 컸다.

안면도에서 측정된 상대습도의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기를 보였다(그림 3.1.5). 상대습도의 월평균은 61~98%의 범위로 분포하였고, 월 최고 일평균은 2013년 6, 7월과 2021년 5월에 99%로 가장 높았고, 월 최저 일평균은 2020년 5월에 31%로 가장 낮았다.

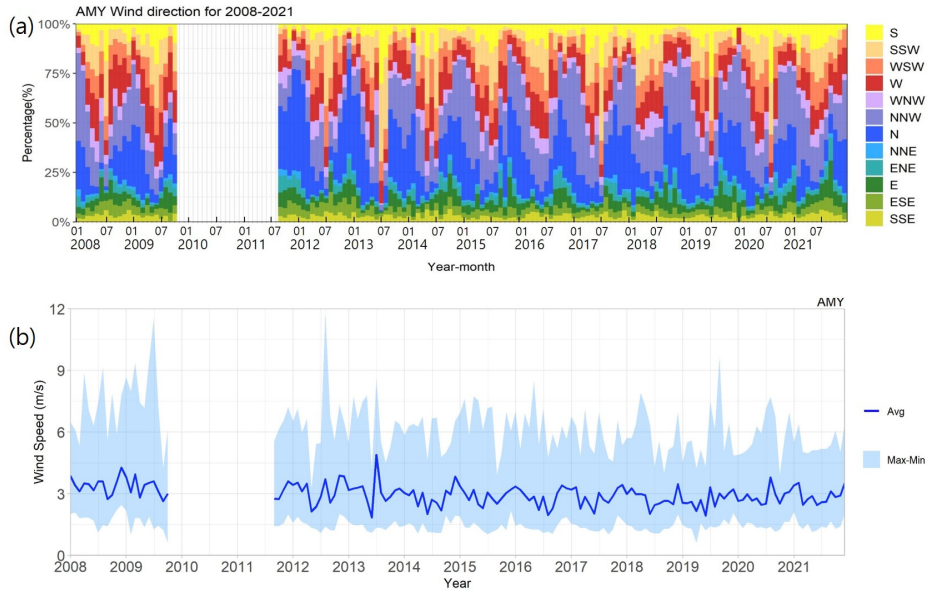


그림 3.1.1 2008~2021년 안면도(AMY)에서 측정된 풍향 (a) 조성비율과 (b) 풍속 연변화.

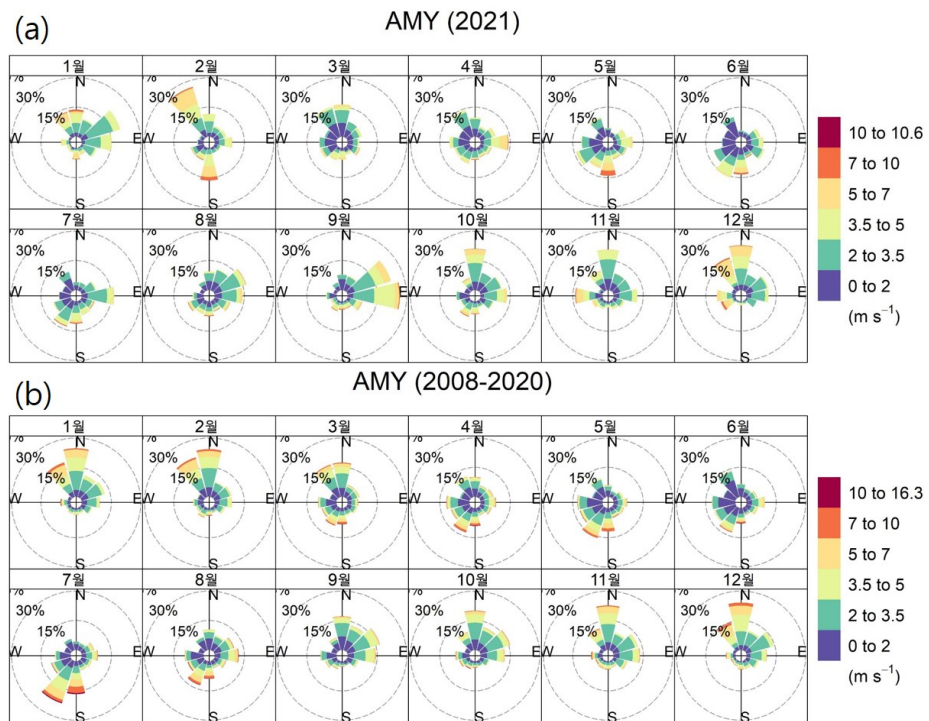


그림 3.1.2 2021년 안면도(AMY)에서 측정된 (a) 풍향·풍속과 (b) 최근 13년(2008~2020년) 평균 풍향·풍속.

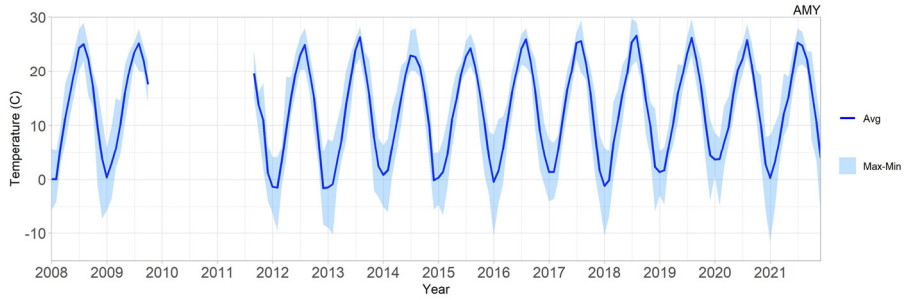


그림 3.1.3 2008~2021년 안면도(AMY)에서 측정된 기온의 연변화.

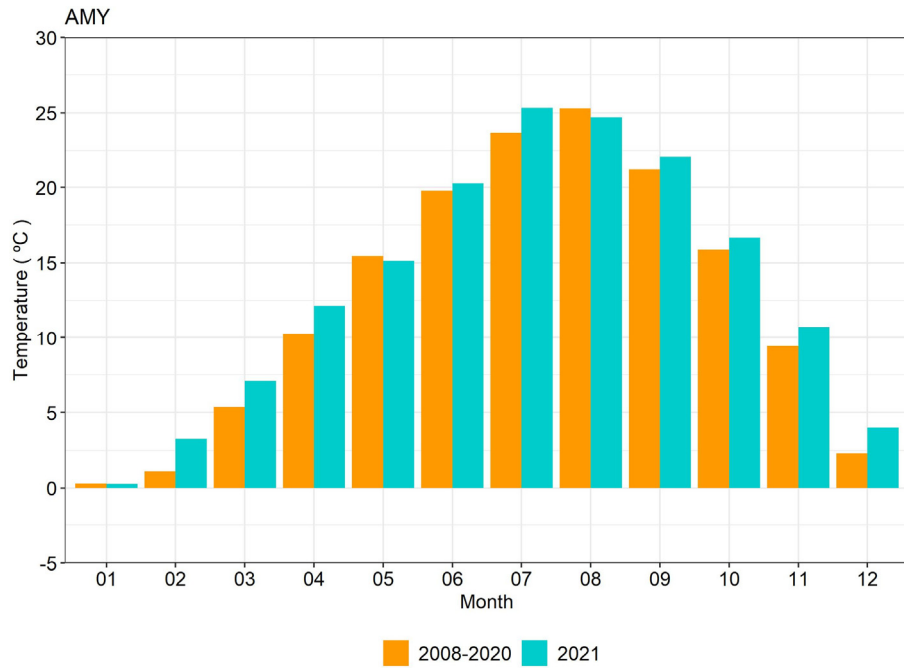


그림 3.1.4 안면도(AMY)의 2021년 월평균 기온과 최근 13년(2008~2020년) 월평균 기온 비교.

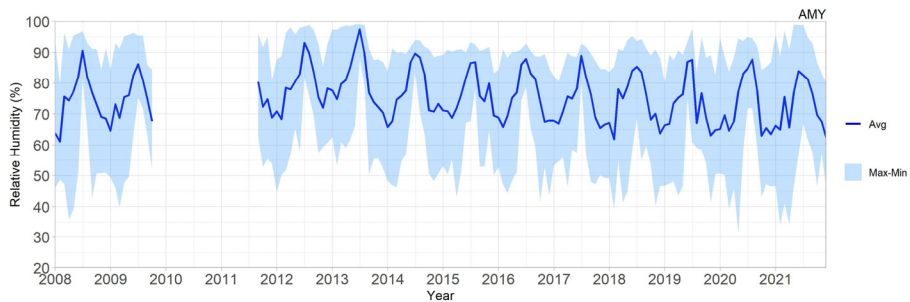


그림 3.1.5 2008~2021년 안면도(AMY)에서 측정된 상대습도의 연변화.

3.1.2 고산 기후변화감시소

- 최근 13년(2008~2020년)보다 1월 북풍 빈도 적고, 5월 북서풍 풍속 강함
- 최근 13년 월평균 최고 기온 8월, 2021년 월평균 최고 기온 7월에 나타남

고산에 영향을 주는 풍향은 겨울철에 주로 북, 북서풍이 지배적이고 여름철에 남남동, 남풍의 비율이 높은 계절변동을 보였다(그림 3.1.6(a)). 특히, 매년 7월마다 남동풍의 비율이 일시적으로 높았다. 또, 고산의 일평균 풍속 자료로 계산한 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 보면(그림 3.1.6(b)) 연중 월평균 풍속은 여름에 3~6 m/s, 겨울에 5.5~12.5 m/s로 분포하였다. 겨울철 월 최고 일평균은 월평균보다 약 1.5~2배 이상 높았고, 종종 20 m/s 이상 풍속이 높아지기도 했는데, 2008년 이후 가장 높은 일평균 풍속은 2020년 12월에 측정한 22.3 m/s이다. 고산의 풍속은 매년 가을부터 세지기 시작하여 겨울에 가장 강하였다. 고산의 2021년 풍향과 풍속을 바람장미로 나타내어 최근 13년(2008~2020년)과 비교한 결과, 2021년에는 1월에 북풍의 빈도가 낮았고, 3월에 북풍, 6월에 남서풍, 10월에 북풍의 빈도가 더 높았으며, 5월은 최근 13년보다 북서풍의 풍속이 더 강하였다(그림 3.1.7).

고산에서 측정한 기온의 하루평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 기온이 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기가 뚜렷하였다(그림 3.1.8). 최근 13년 동안 고산의 월평균 기온은 2.5~28 °C 사이에 분포하였고, 일평균 최댓값은 2019년 7월 30.4 °C였고, 최솟값은 2016년 1월에 -3.8 °C였다. 2021년 고산 기온의 월평균은 6.9~26.6 °C의 범위로 분포하였으며 8월 평균 기온은 최근 13년 평균과 비교하여 0.2 °C 낮았다(그림 3.1.9). 또 최근 13년의 월평균 중 최고 기온은 8월이나 2021년에는 7월 평균 기온이 가장 높았으며, 최근 13년과 2021년에 1월 평균 기온이 가장 낮았다. 2021년 1월의 최고 일평균 기온(13.9 °C)과 최저 일평균 기온(-1 °C)의 차이는 14.9로 2016년 1월의 기온 변화폭이 16.4였던 때 이후 두 번째로 큰 변화폭을 보였다.

고산에서 측정한 상대습도의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기를 보였다(그림 3.1.10). 상대습도의 월평균은 50~95.2%의 범위로 분포하였고, 월 최고 일평균은 99.9%로 2012년 6월, 2014년 8월, 2015년 4, 5월, 2018년 5, 6월, 2020년 5, 6, 7월, 2021년 5, 6, 7월에 나타났고, 월 최솟값은 2012년 11월에 32%로 가장 낮았다.

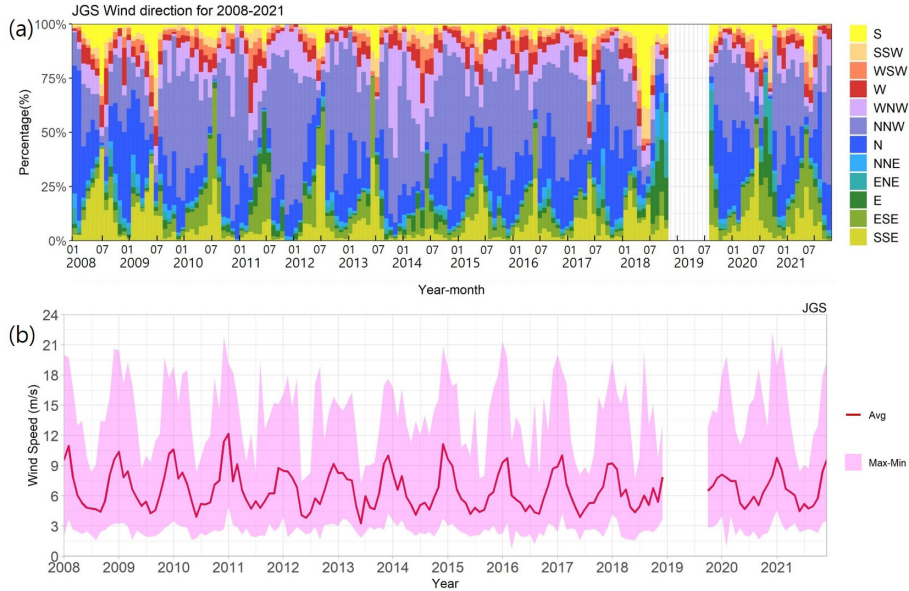


그림 3.1.6 2008~2021년 고산(JGS)에서 측정된 (a) 풍향 조성비율과 (b) 풍속 연변화.

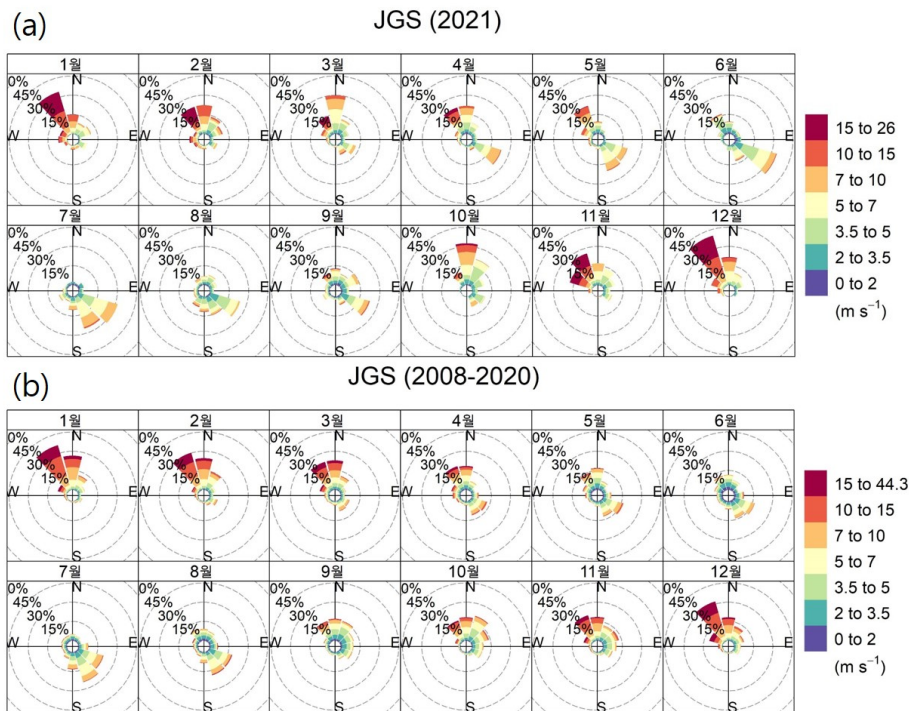


그림 3.1.7 2021년 고산(JGS)에서 측정된 (a) 풍향·풍속과 (b) 최근 13년(2008~2020년) 평균 풍향·풍속.

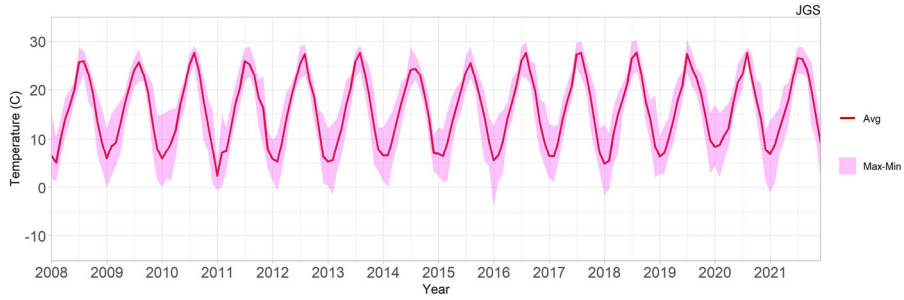


그림 3.1.8 2008~2021년 고산(JGS)에서 측정된 기온의 연변화.

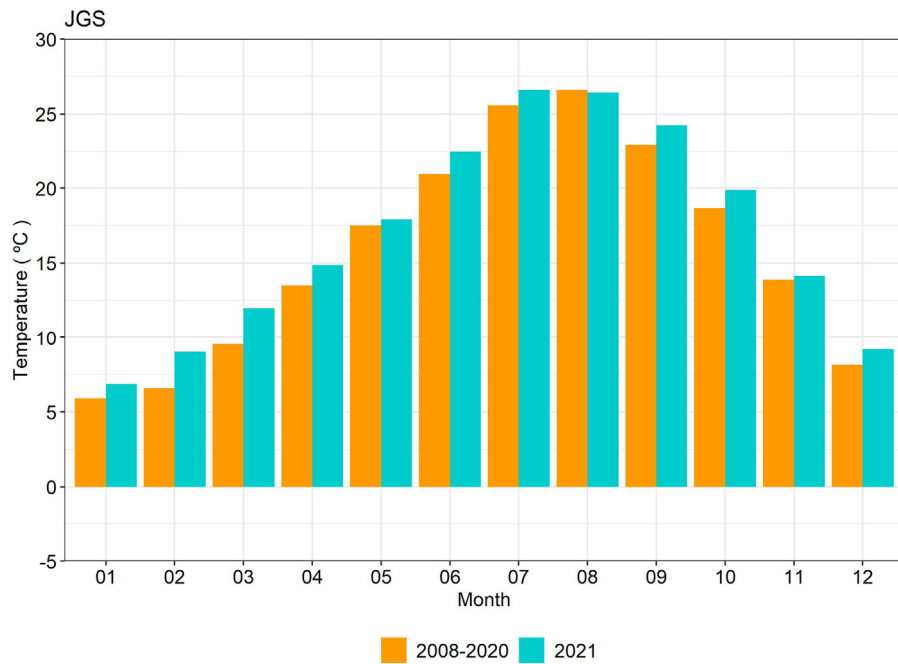


그림 3.1.9 고산(JGS)의 2021년 월평균 기온과 최근 13년(2008~2020년) 월평균 기온 비교.

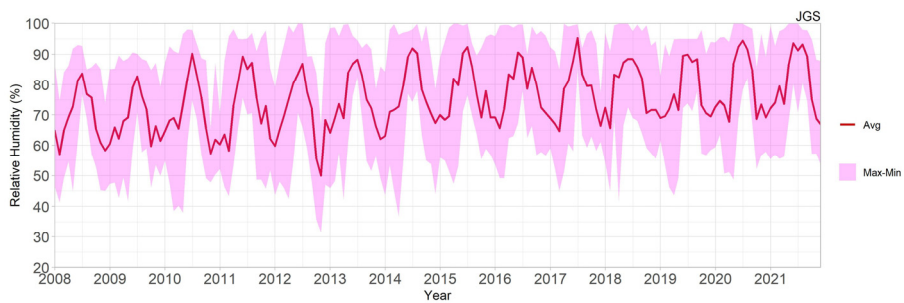


그림 3.1.10 2008~2021년 고산(JGS)에서 측정된 상대습도의 연변화.



3.1.3 울릉도 기후변화감시소

- 최근 13년(2008~2020년)보다 1, 2월 남서풍, 9, 10월 북동풍 빈도 많음
- 최근 13년 월평균 최고 기온 8월, 2021년 월평균 최고 기온 7월에 나타남

울릉도에 부는 바람은 겨울에 서남서풍, 여름에는 북동풍의 비율이 더 높은 계절변동을 보인다(그림 3.1.11(a)). 울릉도의 일평균 풍속으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값으로 표현하였을 때(그림 3.1.11(b)) 연중 평균 풍속은 여름에 2.2~5.0 m/s, 겨울에 2.7~4.7 m/s였다. 울릉도 바람은 연중 3, 4월에 가장 세게 불어 2008년 이후 4월 평균 풍속은 3.5~5 m/s로 분포하였다. 이는 안면도와 고산에서 겨울에 풍속이 가장 센 점과는 다른 특징으로 보인다. 풍속의 월 최댓값은 월평균보다 약 2~3배 높았고, 2015년 8월 14.9 m/s가 2008년 이후 가장 높은 일평균 풍속 자료이다. 울릉도의 2021년 풍향과 풍속을 바람장미로 나타내어 최근 13년(2008~2020년)과 비교한 결과, 2021년에는 1, 2월에 남서풍, 9, 10월에는 북동풍의 빈도가 높았다(그림 3.1.12). 특히, 2021년 2월에 남서풍의 풍속이 최근 13년보다 더 강하였다.

울릉도에서 측정한 기온의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기가 뚜렷하였다(그림 3.1.13). 최근 13년 동안 울릉도의 월평균 기온은 -2~27 °C 사이에 분포하였고, 일평균 최댓값은 2013년 8월에 31 °C였고, 최솟값은 2019년 1월에 -9 °C였다. 2021년 울릉도 기온의 월평균은 1.3~24.8 °C의 범위로 분포하였으며 1월, 5월, 8월 평균 기온은 최근 13년 평균과 비교하여 0.3~0.6 °C 낮았다(그림 3.1.14). 또 최근 13년의 월평균 중 최고 기온은 8월이나 2021년에는 7월 평균 기온이 가장 높았으며, 최근 13년과 2021년에 1월 평균 기온이 가장 낮았다. 2021년 1월의 최고 일평균 기온(8.6 °C)과 최저 일평균 기온(-7.9 °C)의 차이는 16.5 °C로 2008년 이후 기온의 변화가 가장 컸다.

울릉도에서 측정한 상대습도의 일평균으로 월평균, 월 최댓값과 최솟값을 표현하였을 때, 겨울에 낮고 여름에 높은 1년 주기를 보였다(그림 3.15). 상대습도의 월평균은 54~92%의 범위로 분포하였고, 월 최고 일평균은 100%로 2020년 9월에 나타났고, 월 최솟값은 2017년 4월에 22.5%로 가장 낮았다.

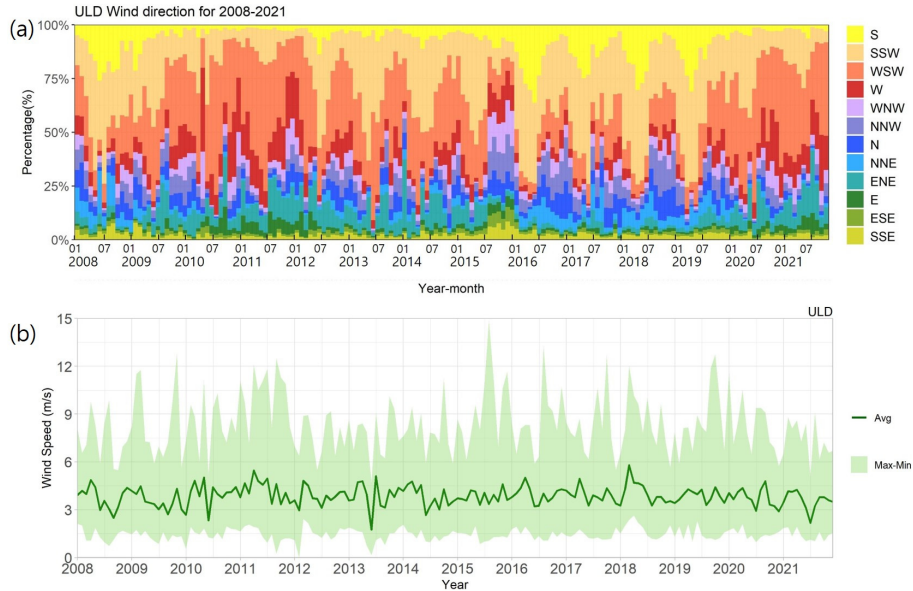


그림 3.1.11 2008~2021년 울릉도(ULD)에서 측정한 (a) 풍향 조성비율과 (b) 풍속 연변화.

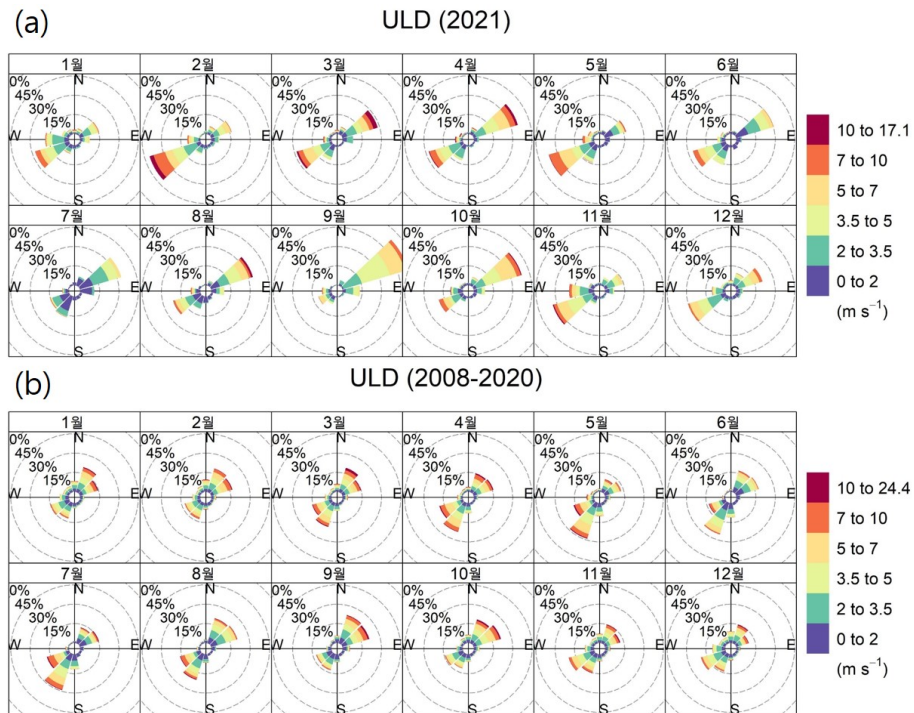


그림 3.1.12 2021년 울릉도(ULD)에서 측정한 (a) 풍향·풍속과 (b) 최근 13년(2008~2020년) 평균 풍향·풍속.

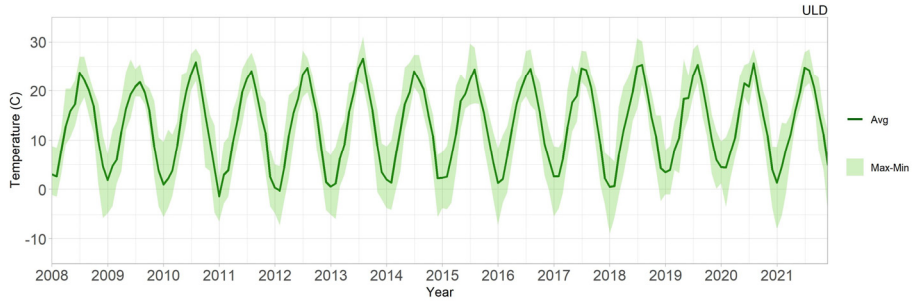


그림 3.1.13 2008~2021년 울릉도(ULD)에서 측정된 기온의 연변화.

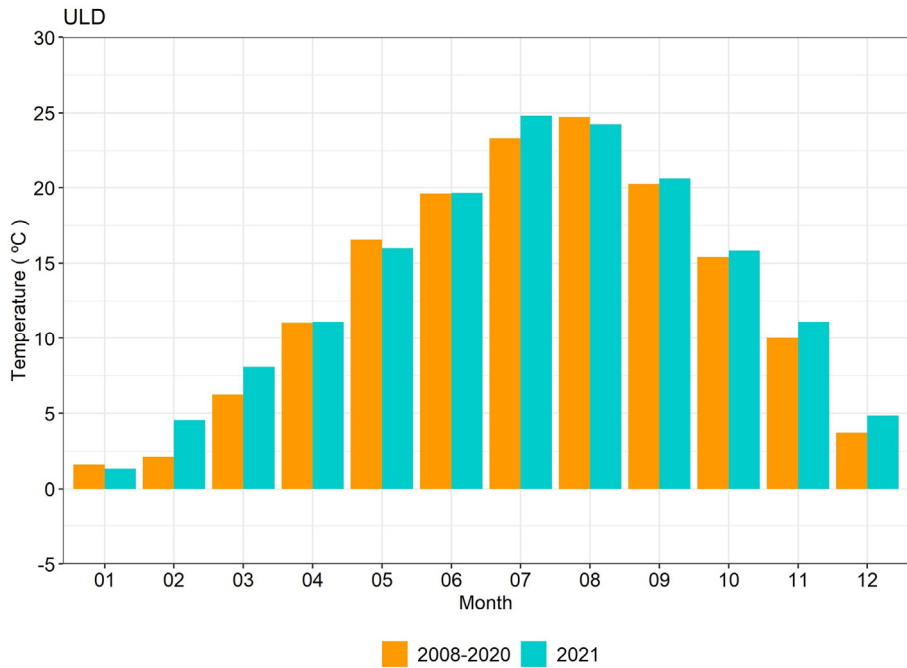


그림 3.1.14 울릉도(ULD)의 2021년 월평균 기온과 최근 13년(2008~2020년) 월평균 기온 비교.

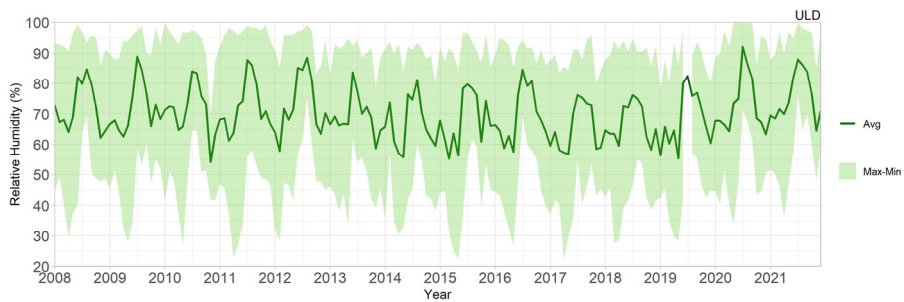


그림 3.1.15 2008~2021년 울릉도(ULD)에서 측정된 상대습도의 연변화.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제4장 온실가스

4.1 온실가스 감시 목적	33
4.2 이산화탄소(CO ₂)	34
4.3 메탄(CH ₄)	48
4.4 아산화질소(N ₂ O)	51
4.5 육불화황(SF ₆)	53
4.6 염화불화탄소(CFCs)	55
4.7 한반도 기후변화감시소: 원격관측	57
4.8 2021년 온실가스 특성	61



제4장 온실가스

- 이산화탄소(CO₂) 최근 10년간 유사 수준 (2.7 ppb/year)으로 증가
 - 안면도: 423.1 ppm, 고산: 421.5 ppm, 울릉도 420.8 ppm로 지난해에 비해 2.6~2.7 ppm 증가
- 메탄(CH₄) 최근 급속도로 증가
 - 안면도: 2005 ppb (2021년 증가율: 22 ppb/year, 최근 10년 증가율: 10 ppb/year, 2000년 대: 1 ppb/year)
 - 고산, 울릉도 모두 지난해 대비 14~16 ppb 증가
 - 전지구: 1896 ppb (2021년 증가율: 17 ppb/year, 최근 10년 증가율: 8 ppb/year, 2000년 대: 1 ppb/year)
- 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆) 등 배경농도 증가세 지속
 - ※ 몬트리올 의정서로 제한하고 있는 염화불화탄소류 (CFCs) 배경농도 감소 지속

안면도(1999~), 고산(1990~), 울릉도(2012~) 기후변화감시소에서 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆), 염화불화탄소(CFC-11, CFC-12, CFC-113) 등 7종을 관측하고 있다. 또한 안면도 기후변화감시소에서 원격관측장비(FTS)를 이용하여 대기의 총 CO₂를 관측하며, 남극세종과학기지와 광릉수목원을 위탁관측소로 지정하여 그 농도와 플럭스를 관측하고 있다.

CH₄는 온실가스 중 두 번째로 그 영향력이 크지만, 한번 배출되면 대기 중 체류시간이 다른 온실가스에 비해 짧기(약 9년) 때문에 정책적으로 메탄을 줄인다면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다. 2021년 우리나라는 국제메탄서약 가입국이 되어 2030년까지 전세계 배출되는 메탄의 양을 최소 30% 감축하겠다고 발표한 바 있다.

전 세계적으로 CH₄는 1999~2006년까지 0.0 ppb/year로 거의 증가하지 않다가 2007년부터 다시 증가하였으며, 최근 그 증가율이 가속화되고 있다. 한반도에서 가장 긴 관측역사를 가진 안면도의 경우 이와 유사하게 2000년대에는 1 ppb/year로 증가하였으나, 최근 10년 10 ppb/year를 나타냈으며, 지난해에는 22 ppb나 증가하였다. CH₄는 CO₂와 다르게 그 기원이 다양하며, 현재까지도 증가 원인에 대해 명확히 밝혀지지 않고 있다. 한반도에서 이와 유사한 증가를 2019년 나타냈으며, 이상 기온 현상으로 인해 토양의 CH₄ 배출이 강화되어 증가율이 높았음을 밝혔다(Kenea et al., 2021).



4.1 온실가스 감시 목적

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

주요 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O로 대기 중 온실가스 중 가장 많은 양을 차지한다. 이들은 산업화 이전에도 자연적으로 존재하였으며, 일정 농도 수준을 유지하였다. 이는 배출원과 소멸원이 모두 지표에 있으므로 배출한 만큼 지표에서 흡수할 수 있기 때문이었다. 그러나 산업화 이후 대기 중에 인위적으로 배출된 양이 증가하여 흡수 이후에도 많은 양의 온실가스가 남게 되었다. 이 증가한 농도가 온실효과를 일으켜 기후변화의 원인물질이 되고 있다.

2021년 세계기상기구 WMO에서는 배출된 온실가스가 흡수하고 남은 양을 일컫는 대기중 농도(Airborne fraction; AF)에 대해 다루었다. 이 값을 통해 우리는 지표의 배출과 흡수의 일정 균형을 이해할 수 있다. 지난 60년간 AF값은 약 0.42 수준으로 이는 인간 생활로 배출되는 CO₂ 중 42%가 해양과 생태의 흡수 이후 대기 중에 남아있음을 뜻한다. 이는 파리 협약에서 대기 온도 2°C를 높이는데 기여하는 온실가스의 배출과 소멸을 이해하는 데 도움이 된다. 이러한 정보는 정확한 감시를 통해서 얻을 수 있으며, 조밀한 관측망을 통해 이를 과학적으로 입증할 수 있다.

국립기상과학원의 온실가스 입체감시와 기상모델을 통한 준실시간 온실가스 추적시스템(INVERSE-KOREA)은 2021년 아시아 최초, 전세계 5번째로 세계기상기구의 통합 전지구 온실가스 과학정보시스템(WMO IG³IS: World Meteorological Organization Integrated Global Greenhouse Gases Information System)에 승인되었다. 국립기상과학원의 입체감시 자료를 통해 준실시간으로 배출원과 소멸을 추적할 수 있으며, 온실가스 배출/소멸 지역과 산업의 구분 등이 가능할 것으로 생각된다. 이를 통해 2050년 탄소중립에 대한 과학적 지원이 가능해질 전망이다.

4.2 이산화탄소(CO₂)

4.2.1 한반도 기후변화감시소: 지표관측

이산화탄소(CO₂)는 지구온난화를 유발하는 주요 원인물질로 인간의 화석연료 소비증가로 배출되는 대표적인 온실가스이다. CO₂의 전지구 평균 배경농도는 꾸준히 증가하고 있다. 일반적으로 인위적(화석연료 등) 및 자연적(해양, 토양의 유기활동, 생체 활동, 생체 소각 등)으로 CO₂가 배출되면 생태와 해양에서 약 50%가 흡수되고, 그 나머지가 대기 중에 잔존하는 것으로 알려져 있다. 또한 배출량이 증가할수록 생태와 해양의 흡수량이 줄어드는 시나리오가 발표되었다(IPCC, 2021).

인간 활동에 의한 지구 복사강제력은 산업화 이전 시기(1750년 이전)와 비교한 2019년 2.72[1.96~3.48] W/m²에 이르며 이 중 80%가 온실가스의 증가 때문으로 CO₂는 전체 온실가스 중 66%에 이르는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2021; WMO, 2021). 한반도 CO₂의 척도와 배경농도 산정 방법의 변경으로 모든 농도값이 재산정된 바 있으며, 이에 대한 설명은 서원익 등(2021)을 통해 발표하였다.

2021년 안면도에서 관측된 CO₂ 농도는 423.1 ppm으로 전년도에 비해 2.7 ppm 증가했다. 이는 고산, 울릉도독도 및 독도 무인감시소도 유사하게 증가한 값으로 최근 10년간과 유사 수준이다. 미국해양대기청에서 발표한 2021년 전지구 CO₂ 농도는 414.7 ppm으로 전년도보다 2.3 ppm 증가했다(표 4.2.1).

전지구 값을 포함하여 우리나라 감시소 모두 관측 이래 지금까지 꾸준히 CO₂ 농도가 증가하고 있으며, 그 증가 기울기가 유사하다. 특히 전지구와 안면도 모두 2000년대와 비교하여 최근 10년의 증가값의 평균이 증가하였으며, 대기중 CO₂의 증가가 가속화됨을 보인다. 1980년대 전지구 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 4.2.1).

그림 4.2.1과 같이 북반구에 위치한 우리나라 감시소 모두 전지구 평균값보다 높다. 또한 전지구와 우리나라 관측소 모두 식생이 활발하게 활동하는 여름철에 가장 낮은 값, 그 직전 봄철까지 최댓값을 보인다. 이는 북반구가 남반구에 비해 많은 인구가 분포하고 육상생태계가 발달하여 농도가 높고 계절변동이 크기 때문이다(Nevison et al., 2008). 유사한 이유로, 한반도 서쪽에 위치한 관측소가 동쪽에 위치한 관측소보다 높아 안면도 > 고산 > 울릉도 > 독도 감시소 순으로 농도가 높으며, 서쪽 관측지역이 서울 등 대도시와 동북아시아의 영향을 더 받았을 것으로 생각된다.



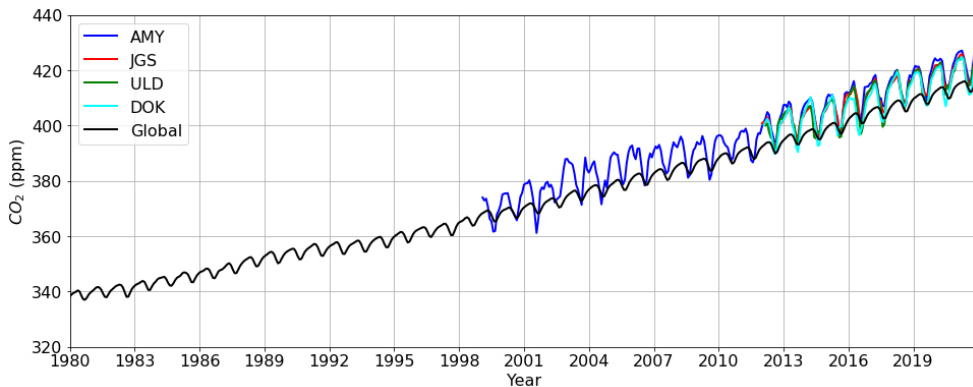
표 4.2.1 2021년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 독도(DOK)의 CO₂ 배경농도

	안면도 (AMY)	고산 (JGS)	울릉도 (ULD)	독도 (DOK)	전지구 ¹ (Global)
2021년 평균값(단위 : ppm)	423.1	421.5	420.8	419.6	414.7
2020년 대비 절대 증가값 ² (단위:ppm/year)	2.7	2.6	2.8	3	2.3
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2011~2020년, 단위:ppm/year)	2.7	-	-	-	2.4
과거 10년간 절대 증가값 평균 (2001~2010년, 단위:ppm/year)	2.2	-	-	-	2.0

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO는 통상 10월에 발표함

² 절대 증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

(a)



(b)

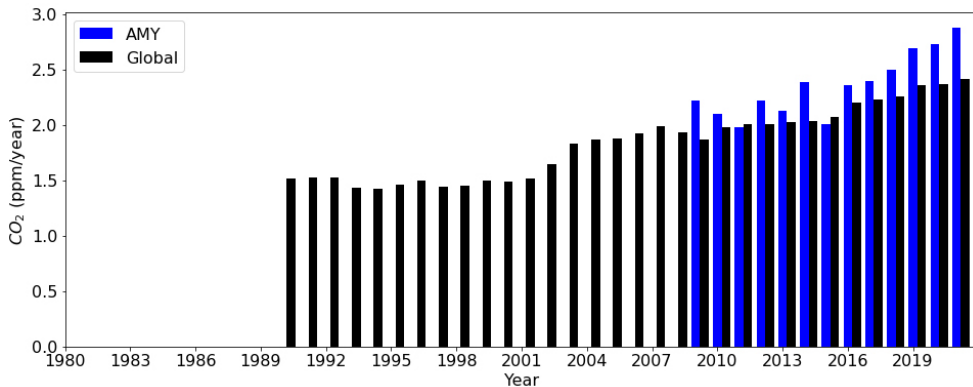
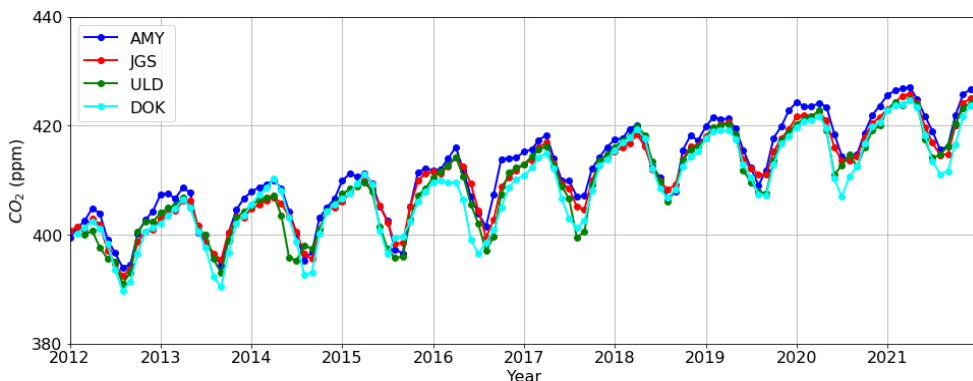


그림 4.2.1 (a) 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 독도(DOK)와 전지구(Global)의 CO₂ 배경농도.
(b) 매 10년간 증가값(Δ CO₂)의 평균.

그림 4.2.2는 2012년부터 2021년까지 최근 10년간 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 CO₂ 대기 배경농도 시계열이다. 안면도의 CO₂ 농도는 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 감시소가 400 ppm을 넘었다. 전지구 농도도 2016년부터 연평균이 400 ppm을 넘었다. 또한 IPCC 6차 보고서에서는 모든 관측소가 400 ppm을 넘어섰다고 발표했으며, 이를 근거해 CO₂ 복사강제력(409.9 ppm시 2.16 Wm⁻²)을 산출하였다.

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

(a)



(b)

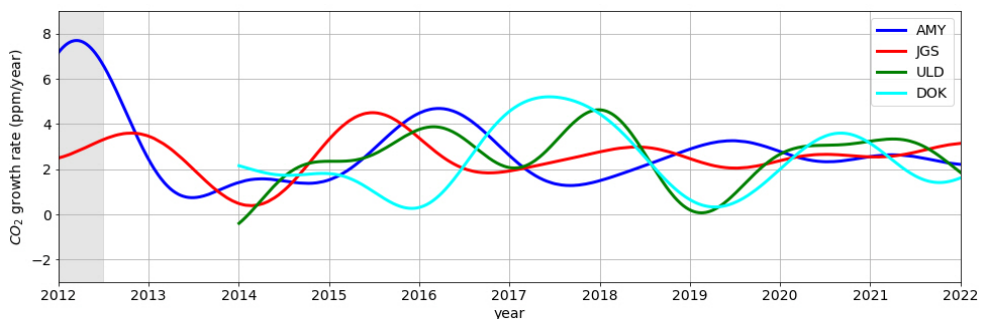


그림 4.2.2 10년간(2012~2021년)의 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 독도(DOK)의 (a) 대기중 CO₂ 농도변화와 (b) 그 증가율. 증가율의 회색기간은 안면도 관측장비 등 시스템의 변경에 따른 인위적 영향으로 인한 것임(Lee et al., 2019).



4.2.2 남극세종과학기지

남극세종과학기지(62.22°S, 58.78°W, 이하 세종기지)는 남극반도 끝단에 위치하며 2010년 1월부터 파장 스캔 공동감쇄분광기(Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy; WS-CRDS)를 이용한 CO₂ 농도가 관측되고 있다. 세종기지에서의 CO₂ 농도 관측시스템은 세종기지 본관동에서 남서쪽 약 180m 떨어져 있는 관측동에서 운영된다. 기지는 연중 북서풍계열이 우세한 지역에 위치하여 관측동은 기지의 풍하측에 위치하는 경우가 많아, 발전기 가동 등 기지 활동이 관측에 미칠 수 있다. CO₂ 농도 관측은 크게 WS-CRDS CO₂/H₂O 분석기(G1200, Picarro, Inc., USA, 이하 간단히 CRDS)와 제습 장치, 그리고 유량 조절 및 표준가스로 구성되어 있다(기상청, 2011). 2020년 1월 17일부터 냉동 제습장치가 재설치되어 사용되어왔으나 2021년 4월 24일에 냉동제습기에 물리적인 손상이 발생한 이후 현재까지 제습 과정을 생략하고 관측 중이다. 고장이 난 냉동 제습장치는 극지연구소로 반입 및 수리 후 2022/23년 하계 기간 재설치될 예정이다. 2021년 세종기지에서 교정용으로 사용된 표준가스는 국립기상과학원에서 제조된 표준가스(CO₂: 397.50 ppm, 412.00 ppm, 428.75 ppm; 2019년 공급)이며, 2021년 1월 22일부터 2021년 12월 8일까지 약 15일 간격으로 총 22회 표준가스 농도 측정이 이루어졌고, 측정 결과를 이용한 교정은 관측자료 후처리 시 적용되었다.

2~3초 간격으로 측정되는 CO₂ 농도 자료는 우선 30초 동안 관측한 자료로부터 평균과 표준편차가 계산된다. 평균으로부터 표준편차 2배 이상의 편차를 보이는 자료는 제외한 후 중앙값(median)이 30초 대푯값으로 정해진다. 그런 후 20개의 30초 대푯값으로부터 10분 평균이 산출된다. 산출된 10분 평균자료에 대해 표 4.2.2의 조건에 부합하지 않는 경우 제거되었다. 2021년 4월 24일~5월 12일은 세종기지의 정전과 장비의 문제로 결측되었다. 이 기간을 제외한 나머지 2021년 세종기지 CO₂ 농도 관측은 지속해서 수행되었으나 연중 CO₂ 농도 관측값이 한 시간 이내의 짧은 시간 간격에서 2 ppm 이상의 큰 폭으로 변동하였다. 따라서, 표 4.2.3과 같이 통계적 기법을 이용하여 10분 평균 CO₂ 농도에 대한 품질평가가 추가되었다. 통계적 기법의 기준값은 2020년 세종기지 CO₂ 10분 평균자료를 기준으로 경험적으로 산정하였다(그림 4.2.3(a)). 추가된 필터링 기준은 다음과 같다. CRDS가 위치한 관측동에 사람 출입 시 관측되는 CO₂ 농도가 급격히 증가하는 현상이 발생함에 따라 1) 관측동 출입 일지를 확인하여 관측동에 사람이 들어온 시간부터 사람이 나간 시간+2시간까지의 자료, 2) 10분 평균 CO₂ 농도 연속 값의 차이가 ±0.5 ppm 이상인 경우, 그리고 3) CO₂ 농도의 30일(현재 시간 기준 ±15일) 이동표준편차의 1.3배보다 현재값-30일(현재 시간 기준 ±15일) 이동중앙값의 절댓값이 큰 경우는 제거되었다.

그림 4.2.3(b)에 나타낸 바와 같이 두 번째 통계적 필터링 기준을 추가하여 CO₂ 농도를 재산정하였으나 여전히 단시간에 큰 변동을 보이며, 연중 변동 또한 기준과 다른 점 등 자료에 문제가

확인되었다. 약 15일 간격으로 주입되는 표준가스 기록을 확인하였을 때, 세종기지에 설치되어 있는 CRDS 관측값은 표준가스 3세트 모두 정상범위의 평균값을 보여 (1) 397.50 ppm, 2) 412.00 ppm, 3) 428.75 ppm) CRDS 장비에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 그러나 앞서 언급하였듯이 관측장비가 위치한 실험실에 사람이 출입함에 따라 CO₂ 농도가 증가하는 현상으로 미루어 보았을 때 다이어프램 펌프의 손상을 의심해 볼 수 있어 (KMA, 2018), 자세한 조사 후 필요시 펌프를 교체할 예정이다.

표 4.2.2 2021년 남극세종과학기지 CO₂ 농도 자료 필터링 기준

Criteria	Value
H ₂ O Threshold	< 1.0 %
Valid Wind Sector	55 ~ 355°
CO ₂ Variability(st dev.)	0.3 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 4.2.3 2021년 남극세종과학기지 CO₂ 농도 자료 필터링 추가 기준

Criteria	Value
Time elapsed after a person left	> 2 hours
Current data - Data from 10 minutes ago	< ± 0.5ppm
Moving standard deviation *1.3 < Current data - Moving median	Remove current data

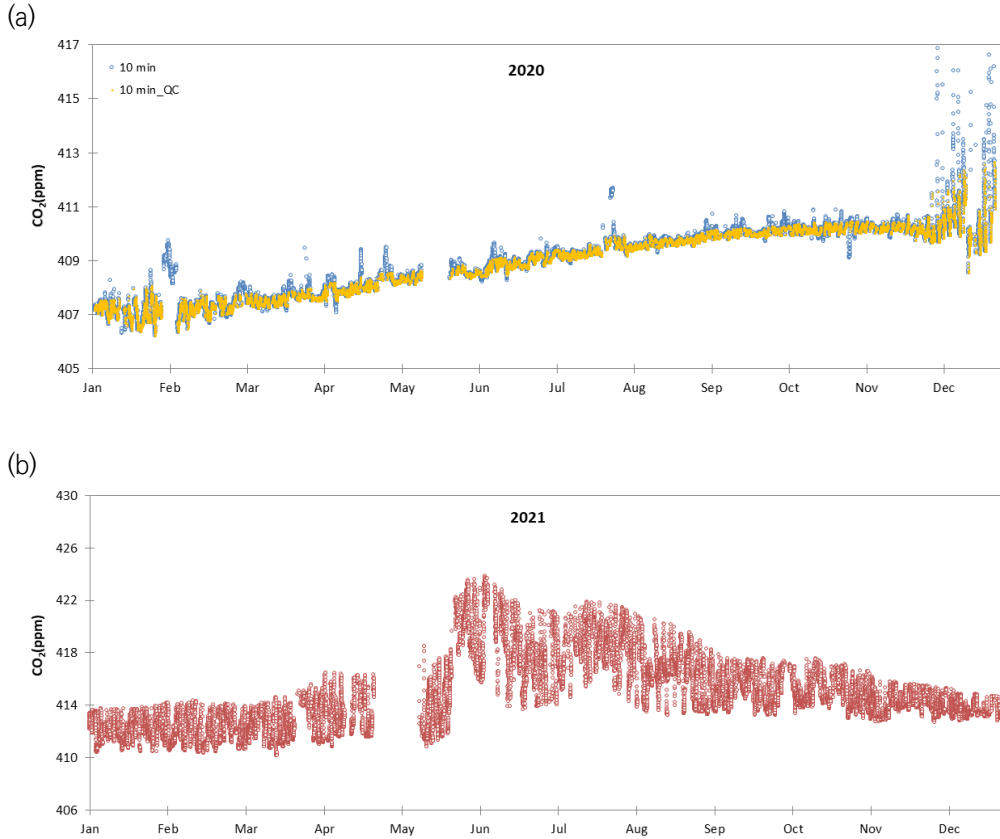


그림 4.2.3 (a) 표 4.2.2의 기준을 적용하여 필터링한 2020년 세종기지 10분 평균 이산화탄소 농도(파란색)와 표 4.2.2 및 4.2.3의 기준을 적용하여 필터링한 이산화탄소 농도(노란색). (b) 표 4.2.2 및 4.2.3의 기준을 적용하여 필터링한 2021년 세종기지 10분 평균 이산화탄소 농도. 모든 자료는 WMO-X2019 척도 기준으로 보정됨.

세종기지에서 교정을 위해 2010년부터 최근까지 사용된 표준가스는 WMO-X2007 척도를 기준으로 제조되었다. 최근, WMO-X2019 척도 사용이 요구됨에 따라 아래와 같은 식으로 CO₂ 농도를 보정하였다(Hall et al., 2021).

$$X_{2019} = 1.00079 * X_{2007} - 0.142 \text{ (ppm)} \quad \text{수식 4.2.1}$$

CO₂ 농도 산출에는 품질평가를 거친 10분 평균자료를 이용하여 시간 평균을, 시간 평균자료를 이용하여 일평 산출된다. 상위 시간 평균 산출을 위해 필요한 하위 시간 평균값의 수가 50% 이상 가용한 경우에만 상위 시간 평균이 산출된다. 10분 평균값을 구하기 위한 필터링 기준은 앞서 설명한 표 4.2.2. 및 4.2.3과 같다. 기존 세종기지의 월평균 및 연평균 CO₂ 농도 산정에는 각각 일평균 및 월평균으로부터 산출평균하는 방법을 사용했으나 WMO/GAW CO₂ 월평균 농도 산정 방식에 따라 2010년부터 2020년까지 세종기지 기존 월평균 CO₂ 농도를 재산정하였다. 월평균 및 연평균 자료는 단기변동성을 제거하기 위하여 첫 번째로 장기추세를 설명하는 다항식과 연 변동을 설명하는 고조파로 구성된 적합함수(수식 4.2.1)가 필요하며 (Thoning et al., 1989) 두 번째로 고주파 성분 제거를 위한 저역통과필터가 필요하다. 저역통과필터(수식 4.2.2)의 차단주파수는 (80 day/cycle)⁻¹ 로 설정하였다. 사용된 두 함수는 다음과 같다.

$$f(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \sum_{k=1}^4 [b_{2k-1}\sin(\frac{2\pi kt}{T}) + b_{k2}\cos(\frac{2\pi kt}{T})] \quad \text{수식 4.2.2}$$

$$H(f) = \exp[-\ln(2) * (\frac{f}{f_c})^6] \quad \text{수식 4.2.3}$$

수식 4.2.1에서 t 는 일 단위의 시간이며, T 는 365.25일이다. 수식 4.2.2에서 f 는 주파수이며 f_c 는 차단주파수이다(<https://gml.noaa.gov/aftp/user/thoning/ccgcrv/>). 2021년 자료는 앞서 언급하였듯이 CRDS 시스템의 물리적 결함이 있다고 판단하여 이 분석에서는 사용하지 않았다. 그림 4.2.4는 앞서 설명한 WMO-X2019 척도 보정 수식 및 수식 4.2.1과 4.2.2를 이용하여 재산정된 2010~2020년 기간의 세종기지 월평균 CO₂ 농도와 세종기지에서 남서쪽으로 약 400 km 떨어져 있는 Palmer 기지와 전 지구 (<https://gml.noaa.gov>), 그리고 월평균 CO₂ 농도의 비교이다. 2018년 이후 세종기지의 제습장치가 빈번하게 고장이 발생하여 이 분석에서는 제습과 무관하게 전 기간에 걸쳐 수증기가 효과가 실시간 반영된 CO₂_Dry 값을 활용하였다. 세종기지 CO₂ 농도는 Palmer 기지와 2010년부터 2016년까지 유사한 변동을 보였으나 2017년 관측중단 및 2018년 관측 재개 이후 이전보다 큰 차이를 보인다. Rella et al.(2013)에 따라 CO₂ 농도에 대한 수증기의 영향을 평가하였을 때, 제습장치가 고장이 난 2018년, 2019년, 그리고 2021년에 각각 평균 약 -1.39 ppm, -1.40 ppm, 그리고 -0.76 ppm의 CO₂ 농도 오차가 발생 될 수 있음을 확인하였다. 이는 CO₂_Dry 값이 아닌 CO₂ 값을 사용하면 제습이 안 된 기간 더 큰 차이를 가져올 수 있음을 의미한다. 추가적인 원인 분석을 위해 현재 교정식에 대해 조사중에



있다. KRISS 표준가스에서 KMA 표준가스로의 교체기인 2018년 이후 CRDS 보정에 주기적으로 사용된 표준가스는 총 3세트((1)KRISS1: 402.5 ppm, 409.8 ppm, 415.1 ppm (2) KRISS2: 398.0 ppm, 418.6 ppm, (2) KMA: 380.149 ppm, 405.128 ppm)이며, 본 보고서에서의 자료처리는 KMA 표준가스가 사용되었다. 하지만, 각 세트의 표준가스를 사용하여 교정된 CO₂ 농도 결괏값 사이의 차이가 크게 나타나 2017년 CRDS 수리 당시 자체의 교정식의 변화, 교정식 도출을 위한 표준가스 세트 사용 변경 등을 포함해 원인 파악을 위해 조사 중이다.

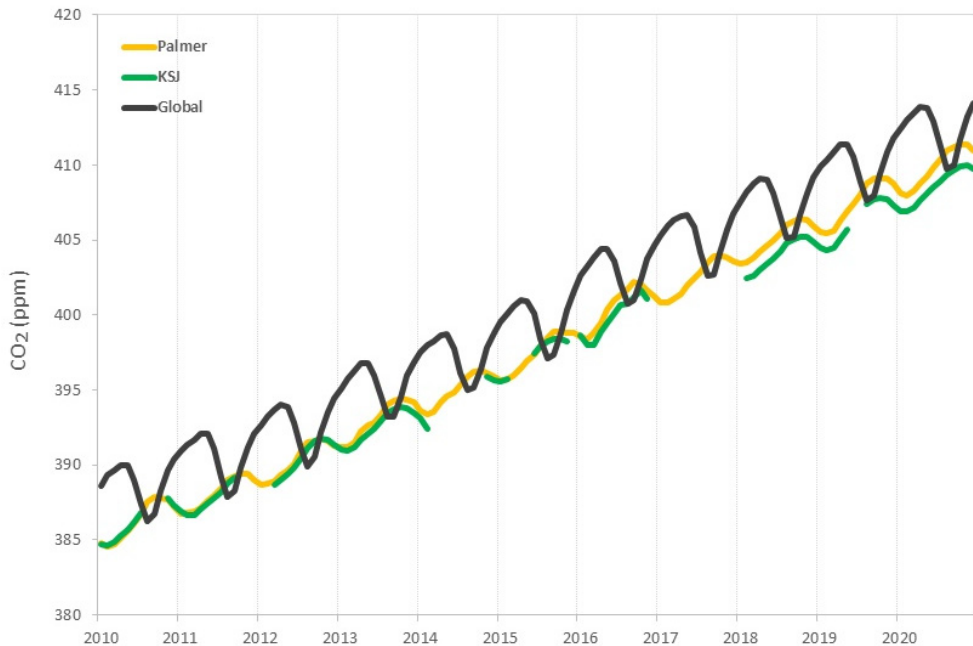


그림 4.2.4 남극세종과학기지, Palmer 기지, 그리고 전지구 월평균 CO₂ 농도의 변동.

4.2.3 산림생태계 이산화탄소(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(37.75°N, 127.15°E, 252m a.s.l.)에 위치한다. 광릉 산림은 550년간 훼손되지 않는 숲으로 국내에서 가장 잘 보존된 자연림으로 꼽힌다. 광릉 활엽수림 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.

이산화탄소(CO₂) 플럭스 관측을 위한 에디 공분산 시스템은 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(footprint), 접근성 등을 고려하여 플럭스 타워의 40m 높이에 설치되어 있다(그림 4.2.5). 에디 공분산 시스템은 삼차원 초음파 풍향풍속계(모델 CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 고속반응 폐회로 적외선 기체분석기(모델 EC155, Campbell Scientific Inc.)로 구성되어 있다. 삼차원 풍속과 CO₂ 농도는 10Hz로 관측하였고, 10Hz의 원자료(raw data)와 30분 평균자료를 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., USA)를 통해 CO₂ 농도분석이 초당 2회씩 이뤄지고, 전체높이 분석 시간은 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 기체흡입구 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. 2021년도 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO₂ 플럭스의 품질관리 후 자료 수득률은 42%, 프로파일 시스템에서 관측된 CO₂ 농도의 품질관리 후 자료 수득률은 97%로 작년과 비슷하거나 조금 높은 수준이었다.

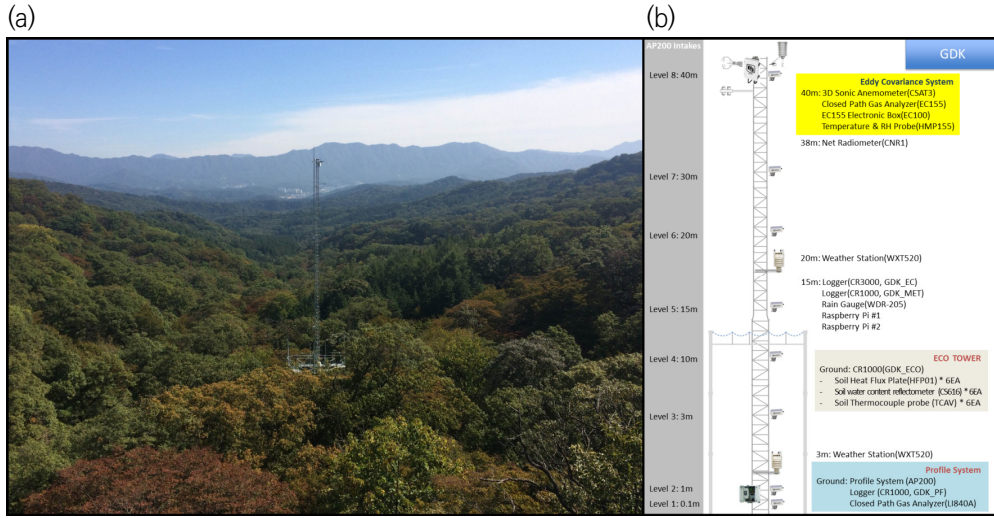


그림 4.2.5 (a) 광릉 활엽수림 타워의 모습과 (b) 관측장비 모식도.

그림 4.2.6은 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO₂ 플럭스의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 CO₂ 플럭스는 40m 높이에서 에디 공분산 시스템이 관측하는 발자국 영역(예를 들면 200~1000 m) 내를 대표하는 값이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5~9월) 동안 CO₂ 플럭스는 밤에는 양의 값(CO₂ 방출)을 갖고, 낮에는 음의 값(CO₂ 흡수)을 갖는 뚜렷한 일 변동을 보였다.

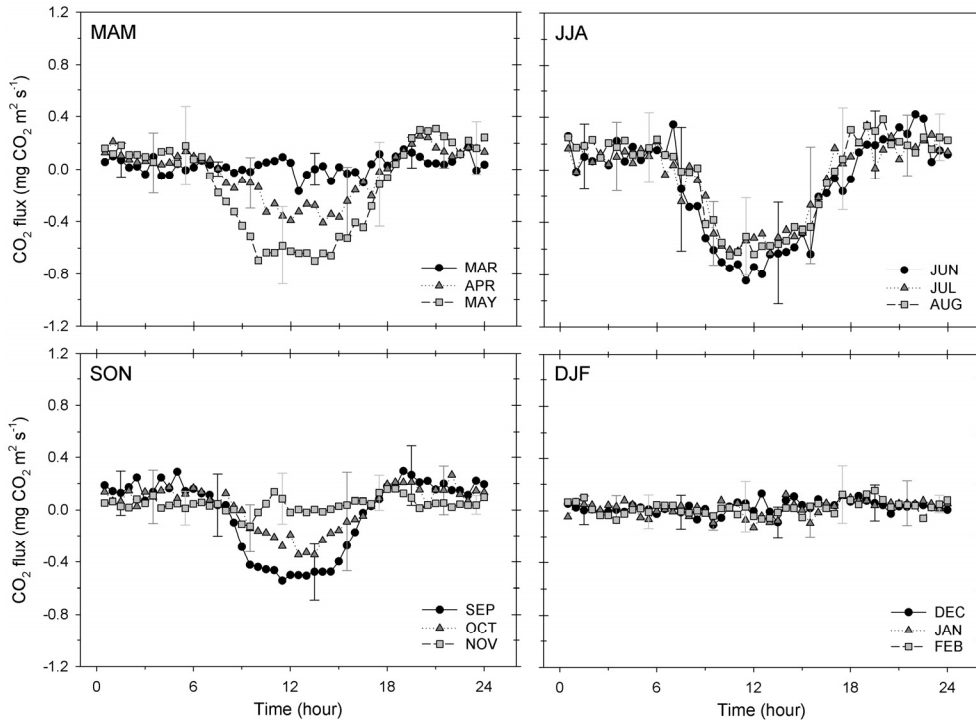


그림 4.2.6 광릉 활엽수림의 월별 CO₂ 플럭스의 평균 일 변동. 오차막대는 각 시간대의 가용한 자료들의 표준편차를 나타냄.

그림 4.2.7은 프로파일 시스템으로 관측된 CO₂ 농도의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 CO₂ 농도는 대기 배경농도 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.

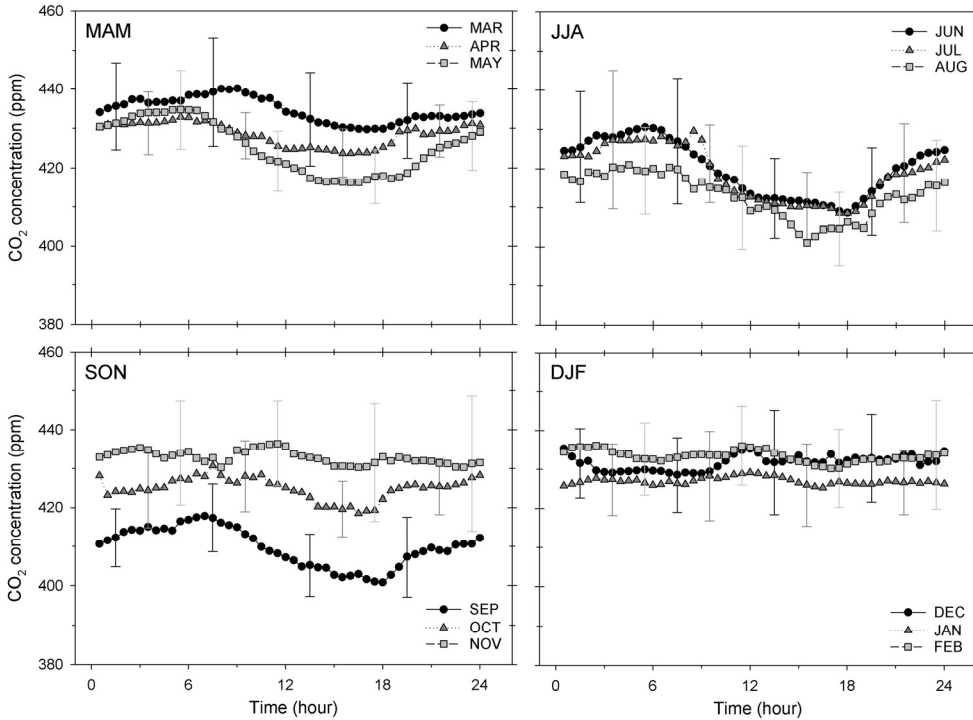


그림 4.2.7 광릉 활엽수림의 월별 CO₂ 농도의 평균 일 변동. 오차막대는 각 시간대의 가용한 자료들의 표준편차를 나타냄.

일적산 CO₂ 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료)는 $-6 \sim 6 \text{ g Cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 의 변동 범위를 보였다. 개엽 후인 4월 말부터 CO₂ 흡원으로 나타나다가 장마 기간 전천일사의 감소로 CO₂ 약한 흡원 또는 중립으로 변했다. 이후 다시 CO₂ 흡원으로 나타나다가 낙엽이 지기 시작하면서 다시 탄소 발원으로 바뀌었다(그림 4.2.8).

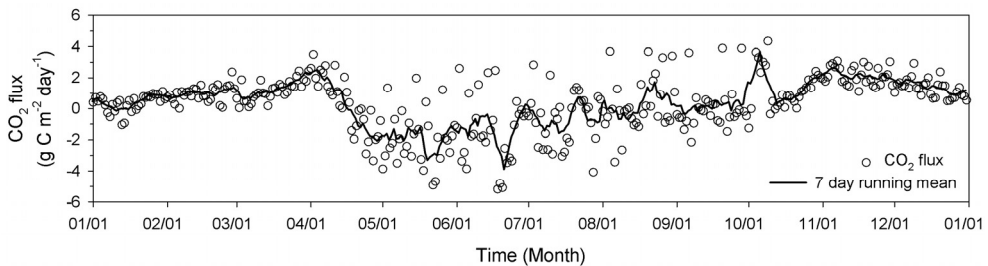


그림 4.2.8 광릉 활엽수림의 일적산 CO₂ 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료).

일평균 CO₂ 농도는 390~460 ppm의 변동 범위를 보였으며, 개엽(4월 중순)의 시작과 함께 꾸준히 감소하여, 식생의 활동이 최대인 여름에 최솟값을 보였다(그림 4.2.9). CO₂ 플럭스 및 농도의 계절변동은 식생 변화와 관계가 깊은데, 식생 계절변화를 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 4.2.10). 2021년에는 개엽이 4월 초순부터 시작하여 예년보다 빨랐다.

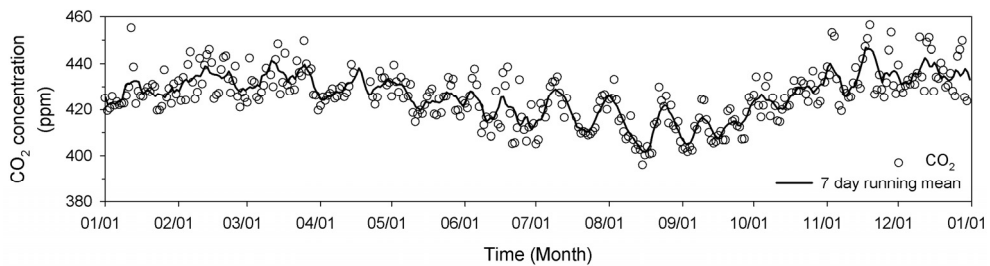


그림 4.2.9 광릉 활엽수림의 일평균 CO₂ 농도.

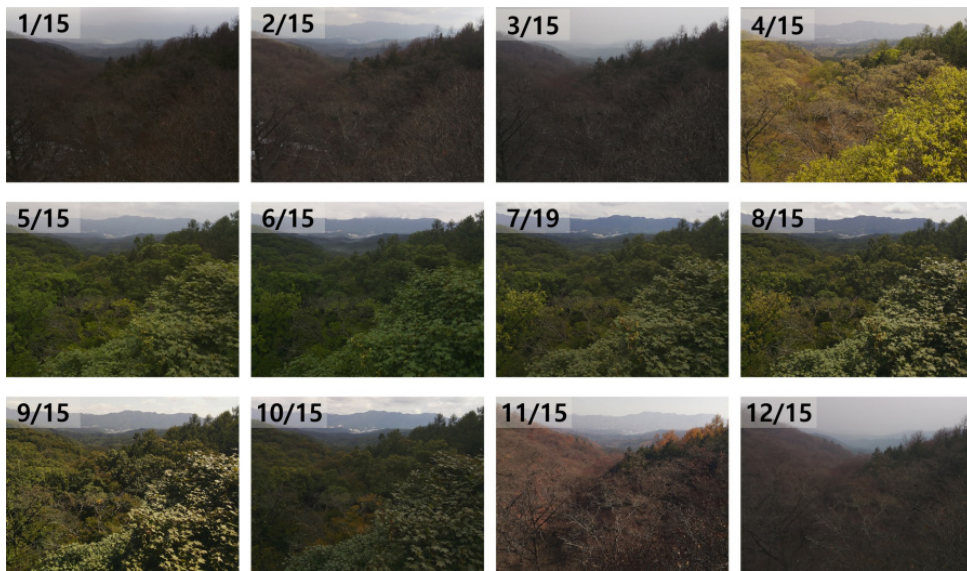


그림 4.2.10 광릉 활엽수림 타워에서 촬영한 타워 주변 경관(사진 좌측상단에 촬영 날짜 표기).



광릉 활엽수림 관측지는 산림에서 관측된 CO₂ 플럭스 중 국내에서 가장 긴 자료를 보유하고 있다(그림 4.2.11). 2006년부터 자료가 안정적으로 수집되어, 10년이 지난 현재도 산림과학원과 기상청의 협력 및 지원으로 장비와 타워 구조물들을 교체하면서 꾸준히 관측을 이어 나가고 있다. 광릉 활엽수림은 550년간 보존된 숲으로 중부 온대활엽수림의 극상(climax)에 가까운 것으로 알려져 있는데, 그 이유는 (1) 숲의 천이 과정의 극상 단계에서 나타나는 수종인 서어나무(*Carpinus laxiflora*)가 해당 숲의 우점종 중의 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($0 \text{ g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ 내외)을 이루는 것을 확인하였다(Kang et al., 2014).

다만 최근(2015년 이후)에는 지속적으로 탄소 발원으로 나타났는데 이는 기후요인뿐만 아니라 생태계 내부 요인으로 설명할 수 있다(Yang et al., 2021). 최근에 연간 전천일사가 지속해서 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, 생태계 호흡량의 증가가 광합성량의 증가보다 상대적으로 더 커져서 발원되었음을 나타낸다. 이렇게 생태계 호흡량이 증가한 또 다른 원인으로는 최근 광릉 활엽수림에 고사목 발생이 증가했기 때문으로 추측된다. 고사목이 증가한 이유에는 여러 가지가 있을 수 있으나, 2010년과 2012년에 광릉 활엽수림을 강타한 태풍 곤파스와 볼라벤이 주된 이유로 조사되었다(Korea National Arboretum, 2020). 2021년은 2019년, 2020년과 다르게 장마 기간의 높은 CO₂ 방출은 관측되지 않았는데, 이러한 원인으로는 평년보다 매우 적은 장마철 강수와 그에 따른 전천일사의 증가로 인해 광합성은 증가하였고, 생태계 호흡량도 2019년 이전 수준으로 낮아졌기 때문이었다.

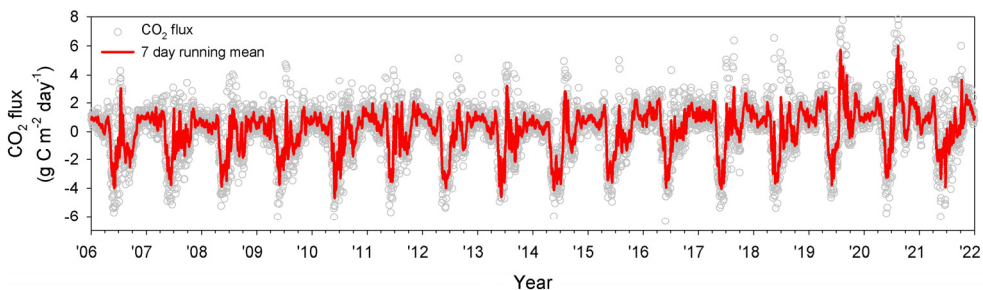


그림 4.2.11 광릉 활엽수림에서 관측된 2006~2021년 일적산 CO₂ 플럭스.

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 1.19[0.81~1.58] W/m²이며, 이 중 0.35[0.16~0.54] W/m²가 CH₄의 직접 배출이 아닌, 오존 등의 반응가스의 화학반응으로 생성된 CH₄의 복사강제력 값으로 전지구 온실가스 복사강제력의 16%에 기여하고 있다(IPCC, 2021; WMO, 2021). 남극과 북극에 아이스코어를 분석한 결과 현재 관측되고 있는 CH₄의 농도는 지난 650,000년 동안 최고의 농도로 나타났다(IPCC, 2021). 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). CH₄은 한번 배출되면 약 9년 정도 대기 중에 체류하고, 다른 온실가스 중에 비해 체류시간이 짧아서 정책적으로 배출량을 줄이면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다. 더불어 에어로졸의 경우 평균 복사강제력이 음의 값을 나타내 에어로졸을 줄일 시 복사강제력이 증가할 수 있으나, CH₄을 동시에 줄이면, 증가되는 복사강제력을 낮출 수 있다.

따라서 우리나라는 2021년 국제메탄서약에 가입하여 적극적으로 메탄의 배출을 줄이기 위해 노력하고 있다. 그러나 CH₄의 배출원은 습지, 바다, 대지의 사용, 쌀농사, 발효, 화석연료 등 인위적·자연적 요소가 다양하게 존재하는 반면, 소멸원은 주로 OH라디칼로 알려져 있어 주요 배출원을 파악하는 것이 중요하다.

한반도에서는 안면도 기후변화감시소에서 1999년부터 CH₄을 측정하기 시작하였다. 이후 고산과 울릉도에서 측정이 추가되어 한반도 3면을 둘러싼 CH₄에 대한 정보를 얻게 되었다.

전세계적으로 CH₄의 농도는 1999년부터 2007년까지 증가가 둔화(1 ppb/year)되었다가 다시 2007년부터 꾸준히 증가하여 최근 증가율은 8 ppb/year로 나타났다. 안면도도 결측된 기간이 많지만 이러한 경향성을 잘 반영한다(그림 4.3.1). 안면도는 2000년부터 2007년까지 평균 절대 증가값이 약 1 ppb/year로 관측되었으나, 최근 10년 동안은 10 ppb/year로 증가하였으며, 한반도 감시소는 2020년과 2021년 사이의 증가값 14~22 ppb/year로 나타나 최근 10년 보다 현저히 높다(표 4.3.1).

앞서 언급했듯이 CH₄의 기원은 다양하므로 국가 혹은 지역의 배출 특성에 따라 증가율이 상이할 수 있을 것으로 판단하나, 증가율 값의 차이를 고려하여도 2006년 이후 한반도를 포함한 전지구의 CH₄ 농도는 지속해서 증가하고 있다. CH₄의 이러한 증가는 OH라디칼의 변화 혹은 배출원의 변화가 영향을 미쳤을 것으로 최근 논문에서 발표된 바 있으며(Lan et al., 2021) 동아시아는 ENSO와 기온이 CH₄ 증가율과 관련있을 것으로 추측된 바 있다(Wang et al., 2021).



2021년 안면도의 메탄 농도는 2005 ppb로 최초 관측을 시작했던 1999년에 비해 128 ppb 증가하였으며, 산업화 이전의 농도를 722 ppb로 간주할 때 이 농도는 2.8배 증가한 값이다. 한반도 농도는 안면도가 고산과 울릉도보다 약 17~20 ppb 높다.

메탄의 계절변동은 여러 배출원과 소멸 원인 OH라디칼과 계절풍 등에 의해 일어난다. 특히 북반구에서 계절변동의 폭이 크며, 여름철 OH라디칼의 농도가 높아지면서 메탄과 반응하여 메탄의 농도는 낮아진다. 2021년 한반도 감시소에서는 7월에 가장 낮고 12월에 가장 높은 값을 보였다. 낮은 농도가 여름철에 나타나는 것은 거의 일정하지만, 높은 농도가 나타나는 것은 메탄의 기원인 습지나 생물성 연소 등과도 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 4.3.2(a)). 세 감시소의 증가율은 지속적으로 0~25 ppb의 범위 안에서 꾸준히 증가하고 있음을 보인다(그림 4.3.1(b)). 최근 급속한 증가율에 대한 분석은 4.8장에 상세 제시하였다.

표 4.3.1 2021년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 CH₄ 배경농도

	안면도 (AMY)	고산 (JGS)	울릉도 (ULD)	전지구 (Global)
2021년 평균값(단위 : ppb)	2005	1982	1988	1896
2021년 대비 절대 증가값 ¹ (단위 : ppb/year)	22	14	16	17
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2011~2020년, 단위 : ppb/year)	10	-	-	8
과거 절대 증가값 평균 (2000년 ~ 2007년, 단위 : ppb/year)	1			1

¹ 절대 증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

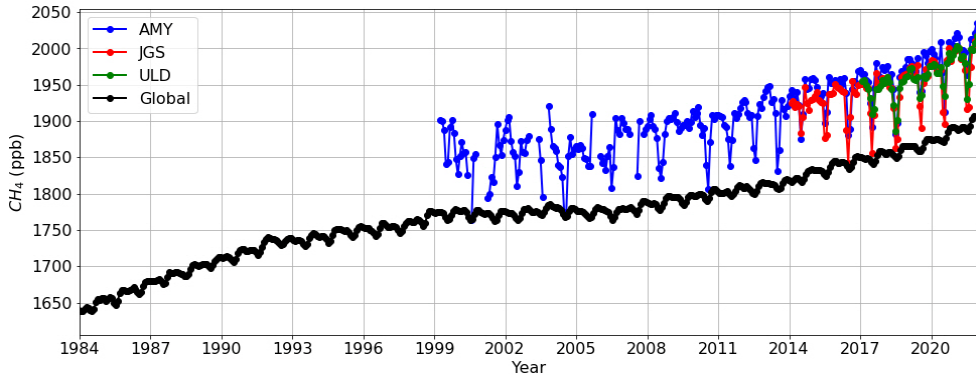


그림 4.3.1 안면도(AMY)의 고산(JGS), 울릉도(ULD) CH₄ 배경농도와 전지구(Global) 배경농도. 전지구는 미국해양대기청의 자료(<http://gml.noaa.gov/hats/data.html>)로 현재 2021년 9월까지만 제공된다.

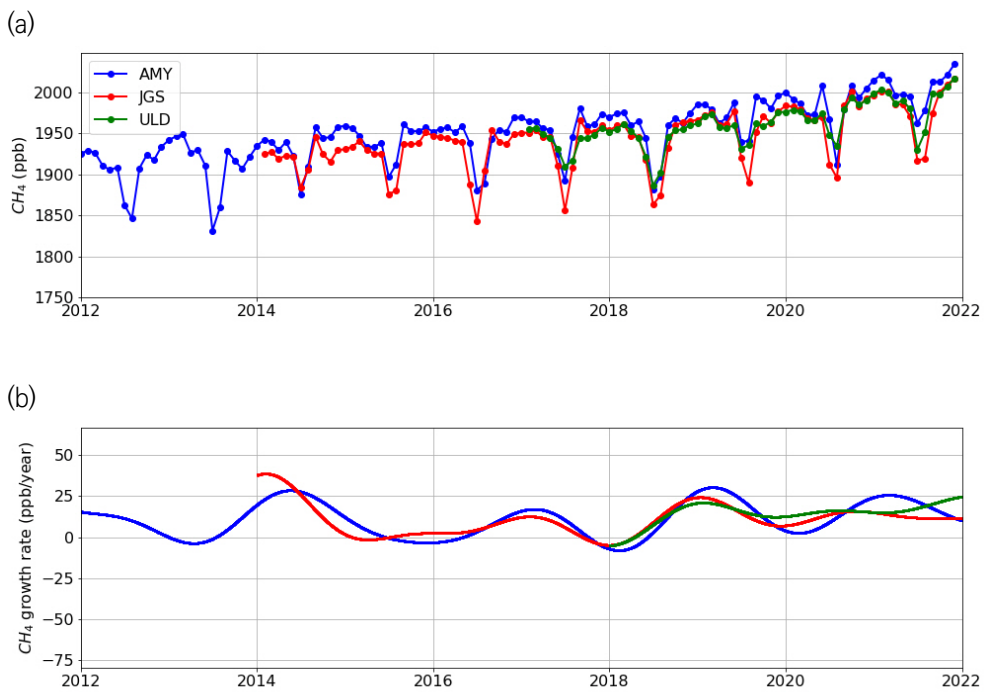


그림 4.3.2 최근 10년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 CH₄ (a) 배경농도와 (b) 증가율.



4.4 아산화질소(N₂O)

아산화질소(N₂O)는 대기중 체류시간이 약 121년 정도 되는 온실가스이며, 전체 온실가스의 복사강제력 중 7%를 차지한다(WMO, 2021). 보통 해양, 토양에서 배출되는 자연적 기원이 60%, 화석연료, 생물성 연소, 농업비료, 산업공정에서의 배출되는 인위적 기원이 40% 수준으로 알려져 있다. N₂O는 광분해에 의해 성층권에서 소멸되며 때론 오존층 파괴 과정의 촉발제(trigger)로 작용하기도 한다. 그러나 아직도 N₂O의 전체 순환에 대해서 이해하진 못하고 있다. 산업화 이전(1750년)에는 270 ppb 수준으로 존재했으나 현재는 약 1.2배 정도 증가한 수준으로 보고되고 있다.

한반도 농도는 335.3~336.1 ppb로 감시소 간 차이가 약 0.8 ppb 정도 나타났으며, 전년도 농도보다는 약 0.8~1.1 ppb 증가하였다. 지난 10년간 약 1.0 ppb 씩 증가한 것을 보았을 때 그 증가세가 유사하게 유지되고 있다.

현재 전지구 값은 9월까지만 제공되고 있어 값의 비교가 어려우나 증가율은 유사하게 관측되고 있다. 1980년도만 해도 북반구와 남반구의 농도 차이는 0.2 ppb로 유사하게 관측되었으나, 2010년대 들어 북반구가 남반구보다 1.4 ppb까지 증가하였다. 이는 북반구에 농업 활동이 활발해지면서, N₂O의 사용이 증가하였기 때문이다. 이와 비슷하게 안면도와 전지구 평균의 차이는 1999~2000년대 초반까지 0.3~0.6 ppb의 차이를 보였으나 근래 안면도, 고산, 울릉도 감시소 모두 전지구 평균보다 약 1.4~1.9 ppb 높다. 이는 한반도 감시소의 위치가 배출원의 영향이 크기 때문으로 판단된다. 한반도 내에서도 작은 차이지만 안면도, 고산, 울릉도 감시소 순으로 농도가 높게 나타난다. 최근 10년간 한반도의 N₂O 증가율은 0.0~2.0 ppb 범위를 유지하며, 지속적으로 증가하고 있다(그림 4.4.2).

표 4.4.1 2021년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 N₂O 배경농도

	안면도(AMY)	고산(JGS)	울릉도(ULD)	전지구(Global)
2021년 평균값(단위 : ppb)	336.1	336.0	335.3	334.3
2020년 대비 절대 증가값 ¹ (단위 : ppb/year)	1.1	1.3	0.8	1.3
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2011~2020년, 단위 : ppb/year)	1	-	-	1

¹ 절대 증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

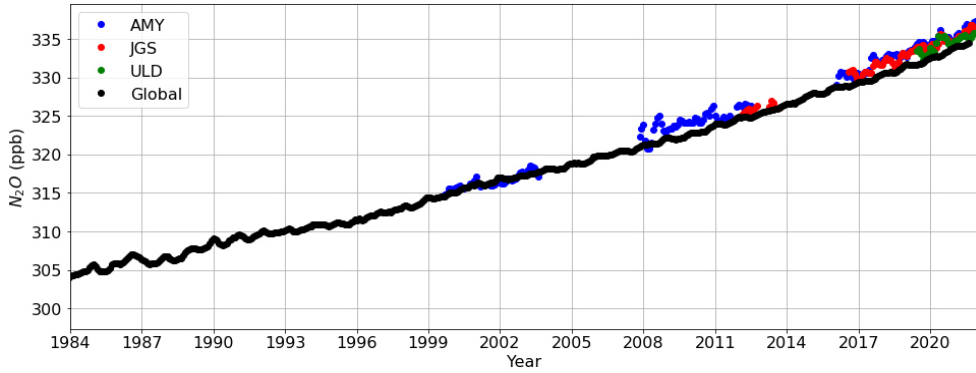


그림 4.4.1 안면도(AMY)의 고산(JGS), 울릉도(ULD) N₂O의 배경농도와 전지구(Global) 배경농도.

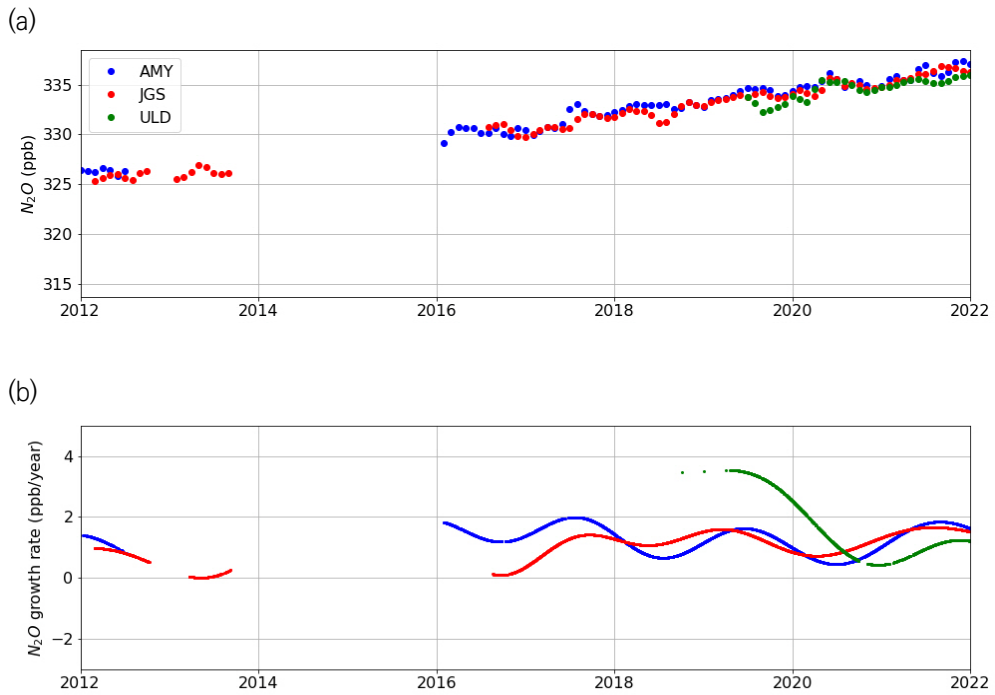


그림 4.4.2 최근 10년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 N₂O의 (a) 배경농도와 (b) 증가율.



4.5 육불화황(SF₆)

육불화황(SF₆)은 ppt(part per trillion; 1조 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 100년을 기준으로 지구온난화지수가 CO₂보다 23,500배가 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 체류 시간은 약 850년(580~1400년)으로 길며(Ray et al., 2017), 한번 대기로 배출되면 거의 선형으로 누적되어 빠르게 증가한다.

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

2021년 한반도의 육불화황 농도는 안면도, 고산, 울릉도 모두 11~11.2 ppt로 나타났으며, 전년도 대비 증가율도 0.5~0.7 ppt를 나타낸다(표 4.5.1). 지표의 배출원과 소멸원이 동시에 존재하는 온실가스의 경우 지역에 따른 값의 차이가 크게 존재하나, 육불화황의 경우 지표에 배출원은 있으나 소멸원이 없기 때문에 잘 섞인 배경농도에서는 한반도 관측소 간 차이값이 크지 않다. 반면 증가율은 최근 10년에 비해 가파르게 상승하고 있다.

전지구 또한 최근 10년보다 1 ppt 더 증가한 경향을 보였으며, 전지구 값은 우리나라에 비해 0.4~0.6 ppt 낮다. 북반구에 비해 활발하지 않은 산업활동으로 남반구에서의 육불화황 배출농도가 낮기 때문에 전지구의 평균값이 북반부 감시소인 우리나라나 보다는 낮다(그림 4.5.1). 안면도의 경우, 2021년 관측기기의 수리·점검 기간 등이 많이 포함되어, 향후 증가율에 대해 해석할 때 이 부분이 고려되어야 한다.

표 4.5.1 2021년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)와 전지구의 SF₆ 배경농도

	안면도(AMY)	고산(JGS)	울릉도(ULD)	전지구(Global)
2021년 평균값(단위 : ppt)	11.2	11	11.1	10.6
2020년 대비 절대 증가값 ¹ (단위 : ppt/year)	0.7	0.5	0.6	0.4
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2011~2020년, 단위 : ppt/year)	0.3	-	-	0.3

¹ 절대 증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

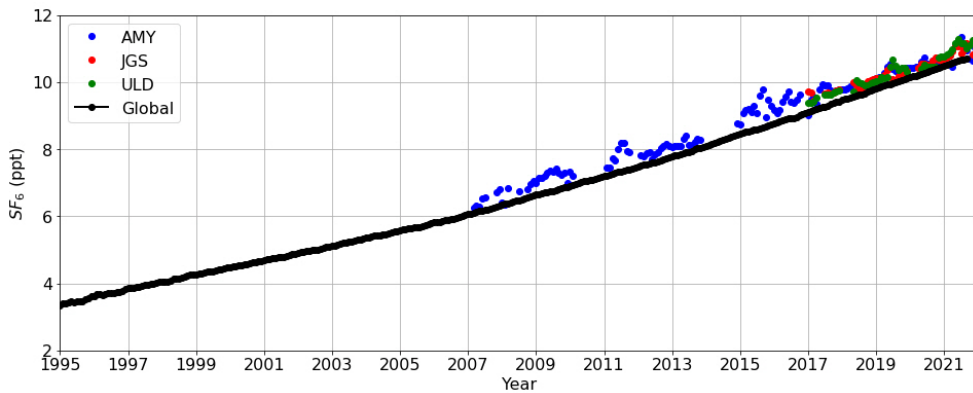


그림 4.5.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 전지구(Global)의 SF₆ 배경농도.



4.6 염화불화탄소(CFCs)

냉매제로 주로 사용은 염화불화탄소류(CFCs)는 주로 성층권에서 자외선에 의해 분해되며, 성층권의 오존층을 파괴하는 염소와 브로민이 포함되어 있어, 1990년대 몬트리올 의정서를 채택하여 규제를 시작하였다. 지표에는 CFCs의 소멸원이 없기 때문에 대기 중 체류시간이 CFC-11은 50년, CFC-12는 110년으로, CFC-113은 85년으로 비교적 길게 나타난다. 때문에 몬트리올 의정서에 따라 그 배출량을 줄이기 시작하였어도, 실제 대기 농도의 감소는 바로 반영되기 어렵다. 가장 체류시간이 짧은 CFC-11의 농도가 가장 배출량의 감소를 빠르게 반영하여 감소하기 시작하였으며, 체류시간이 가장 긴 CFC-12가 가장 늦게 대기 중 농도의 감소세를 보였다. 이러한 농도의 감소는 다른 온실가스 항목에서도 유사한 결과를 나타낼 것으로 판단되며, 체류시간이 긴 온실가스일수록 최대한 빠르게 배출량의 감소를 정책적으로 시작하여야 하고, 체류시간이 짧은 온실가스일 경우 정책적 효과를 빠르게 반영할 수 있음을 시사한다.

2021년 CFC-11의 연평균 배경농도는 221.6 ppt로 전년도에 비해 약 2.4 ppt 감소하였다. CFC-12는 493.3 ppt로 전년도에 비해 3.5 ppt 감소하였다. 두 항목 모두 최근 5년간의 감소세와 유사한 값을 나타내며 지속 감소하고 있다. CFC-113의 경우 2020년과 유사한 값(69 ppt)을 나타내 그 감소가 뚜렷하지 않음을 보였으며, 최근 5년간의 감소세와는 다른 결과를 보였다. 전 지구 농도와 한반도 농도를 비교하였을 때, 0.1~0.4 ppt 차이를 보이며 유사한 값을 나타냈으나, 전지구의 경우 CFC-11과 CFC-12가 지난 5년과 비교했을 때 감소세가 강화된 것으로 나타났으며, CFC-113은 유사 수준으로 줄어들고 있다. 따라서 CFC-113은 관측에서 오는 오차 영향성에 영향을 미쳤을 것으로 판단되어 향후 지속적 감시가 필요하다.

표 4.6.1 2021년 안면도(AMY)와 전지구(Global)의 CFCs 배경농도

	안면도(AMY)			전지구(Global)		
	CFC-11	CFC-12	CFC-113	CFC-11	CFC-12	CFC-113
2021년 평균값(단위: ppt)	221.6	493.3	69	221.7	493.2	68.4
2020년 대비 절대 증가값 ¹ (단위: ppt/year)	-2.4	-3.5	0.1	-2.3	-3.9	-0.6
최근 5년간 절대 증가값 평균 (2016~2020년, 단위: ppt/year)	-2.1	-4.1	-0.6	-1.4	-3.7	-0.6

¹ 절대증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

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

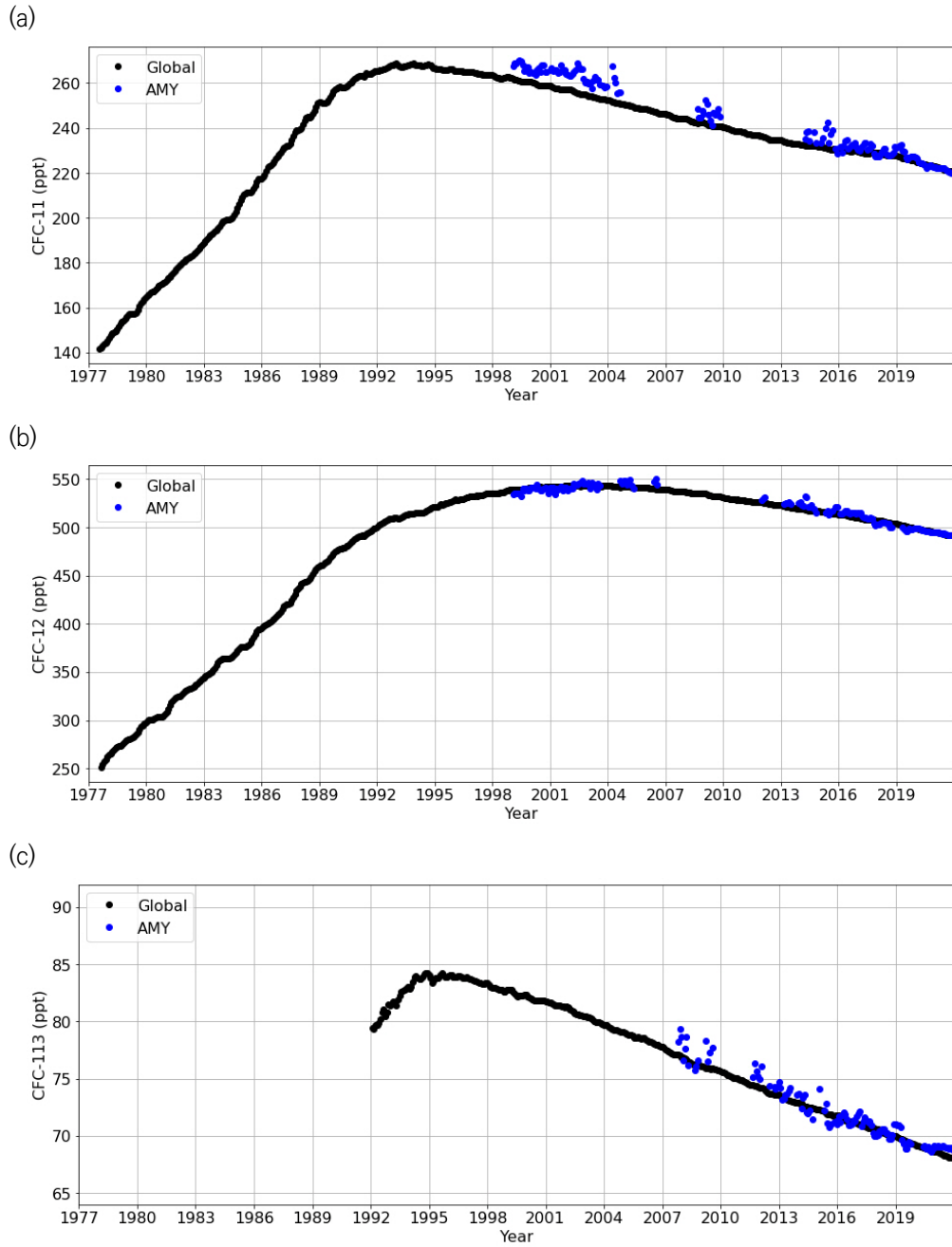


그림 4.6.1 안면도(AMY)의 (a) CFC-11, (b) CFC-12, (c) CFC-113의 배경농도와 전지구(Global) 배경농도.



4.7 한반도 기후변화감시소: 원격관측

안면도에서는 고분해 태양흡수분광간섭계(FTS)을 활용하여 대기 전층(지표~상층)의 온실가스 농도인 전량농도를 원격 관측하고 있다. 안면도 FTS는 근적외 영역 3800~11000 cm^{-1} 을 InGaAs 검출기로 측정하고 가시광 영역 11000~15000 cm^{-1} 은 Si 검출기로 측정한다. 그림 4.7.1에 검출기별 파수의 측정영역과 5종류(CO_2 , CH_4 , N_2O , CO , HF) 온실가스 및 산소(O_2)의 흡수밴드를 나타내었다. 표 4.7.1에서는 각 온실가스 종별 흡수밴드의 중심 파장과 파장폭 그리고 간섭하는 가스 종을 보였다.

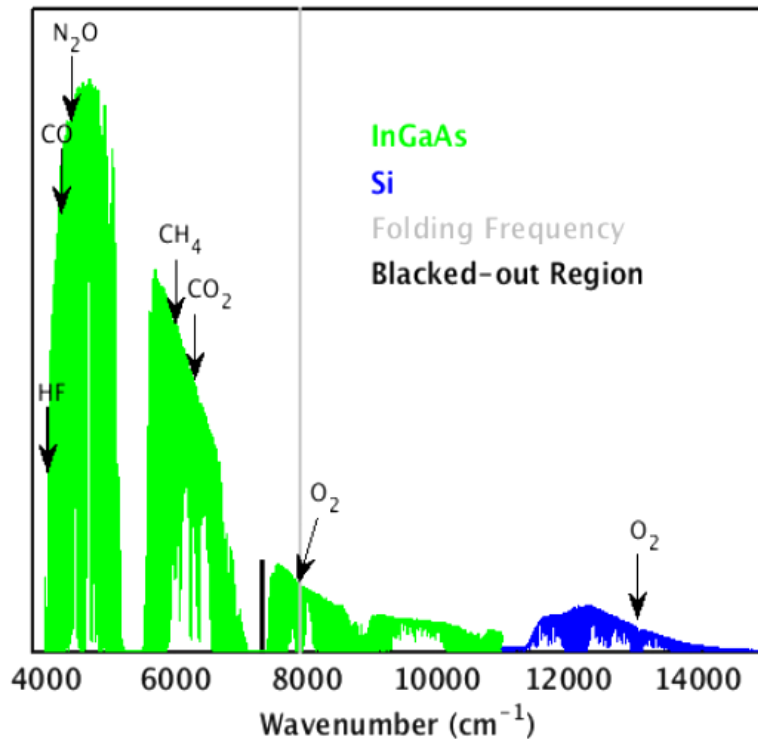


그림 4.7.1 안면도 고분해 태양흡수분광간섭계 (Fourier Transform Spectrometer)의 관측 파수영역 및 주요 온실가스 (CO_2 , CH_4 , N_2O , CO , HF) 흡수 밴드임. 녹색 영역은 InGaAs 소자의 적외선, 파란색 영역은 Si 소자의 가시광선 영역임.

(<https://doi.org/10.14291/tcon.ggg2014.documentation.R0/1221662>)

표 4.7.1 FTS 온실가스 흡수밴드의 중심 파장과 파장 폭, 그리고 간섭 가스 종(단위: cm⁻¹)

Target gas	Central wavenumber	Window width	Interfering species
CO ₂	6220.00	80.00	H ₂ O, HDO, CH ₄
	6339.50	85.00	H ₂ O, HDO
CH ₄	5938.00	116.00	H ₂ O, CO ₂ , N ₂ O
	6002.00	11.10	H ₂ O, CO ₂ , HDO
	6076.00	138.00	H ₂ O, CO ₂ , HDO
CO	4233.00	48.60	H ₂ O, CH ₄ , HDO
	4290.40	56.80	H ₂ O, CH ₄ , HDO
N ₂ O	4395.20	43.40	H ₂ O, CH ₄ , HDO
	4430.10	23.10	H ₂ O, CH ₄ , HDO, CO ₂
	4710.50	73.10	H ₂ O, CO ₂ , HDO
O ₂	7885.00	240.00	H ₂ O, CO ₂ , HF, O ₂
HF	4038.95	0.32	H ₂ O

FTS에서 전량농도를 산출하는 방법은 다음과 같다(Wunch et al. 2017). 각 흡수밴드별로 수식 4.7.1을 적용하면 해당 흡수밴드에 해당하는 가스의 칼럼 총량(VC_{gas})을 얻을 수 있다.

$$VC_{gas} = \int_{z_s}^{\infty} f_{gas}(z)n(z)dz \quad \text{수식 4.7.1}$$

여기에서 z_s 는 지표고도, $f_{gas}(z)$ 은 고도 z 에서 분석 대상 가스의 물분율 함수식, $n(z)$ 은 z 고도의 총 밀도 값이다. 이렇게 구한 가스의 칼럼 총량(VC_{gas})은 해당 가스 이외의 요인(즉, 시간, 태양광 경로, 대기압, 온도 등)에 의한 영향도 포함된 값이다. 지역별 계절별 상호비교를 위해서는 이러한 요인의 영향을 제거해야 한다. 평균 건조 가스 물분율을 산출하면 편리하다. 수식 4.7.2과 같이 가스의 칼럼 총량(VC_{gas})을 동시에 측정된 산소의 칼럼 총량(VC_{O_2})으로 나누고, 건조 공기 물분율 상수(0.2095)를 곱하면 칼럼에서 평균한 건조 가스 물분율(X_{gas})을 구할 수 있으며, 여기서 우리는 X_{gas} 를 FTS의 온실가스 전량농도라 한다.

$$X_{gas} = \frac{VC_{gas}}{VC_{dry\ air}} \approx \frac{VC_{gas}}{VC_{O_2}} \times 0.2095 - X_{H_2O} \times \frac{m_{H_2O}}{m_{air}^{dry}} \quad \text{수식 4.7.2}$$

여기서 m_{H_2O} 는 물의 평균 분자량 (18.02 g/mol⁻¹), m_{air}^{dry} 는 건조 공기의 평균 분자량 (28.96 g/mol⁻¹), $VC_{dry\ air}$ 는 건조 공기의 칼럼 총량이다. 오른쪽 두 번째 항은 수증기 효과를 제거하는 과정이며, 최종적으로 태양각과 지표 온도의 편차를 수정하는 과정을 거쳐 계산 된다.



2014~2021년(8년) 동안 XCO₂, XCH₄, XCO에 대하여 안면도 FTS 전량농도 연평균 변동을 표 4.7.2에서 보였다. 2021년부터 알고리즘 개선을 통해 추가 산출된 2014년부터 2021년까지의 XCO 농도를 포함하게 되었다. 2014년부터 2021년까지 평균 된 연 증가율은 3.1ppm/year(XCO₂), 9 ppb/year(XCH₄), 1.9 ppb/year(XCO)이다. 또한, 2021년 절대증가값은 (2020년 대비 2021년 전량농도 증가량) 2.5 ppm(XCO₂), 26 ppb(XCH₄), 2.6 ppb(XCO)이다(표 4.7.3). 우리나라 안면도의 온실가스 전량농도는 관측 이래로 꾸준히 증가하고 있으며, 지표관측과 유사한 증가 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 우리는 이러한 관측자료를 2021년부터 웹을 통하여 표출, 제공하고 있다(175.213.240.12:7856/GGMS).

표 4.7.2 2014~2021년 FTS 온실가스 전량농도의 연도별 및 총기간의 평균과 표준편차 값

Gases	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	총기간
XCO ₂ (단위: ppm)	396.9 ±2.6	399.3 ±3.0	403.0 ±2.7	406.0 ±2.4	409.0 ±2.5	412.6 ±2.5	416 ±2.9	418.5 ±2.6	407.7 ±2.7
XCO (단위: ppb)	99.4 ±14.7	102.7 ±14.9	105.4 ±10.7	100.1 ±10.3	104.5 ±14.8	107.9 ±14.0	109.9 ±10.5	112.5 ±12.4	105.3 ±12.8
XCH ₄ (단위: ppb)	1837 ±14	1844 ±15	1864 ±15	1859 ±13	1856 ±14	1872 ±11	1877 ±14	1903 ±12	1864 ±14

표 4.7.3 2021년 FTS 온실가스 전량농도 연평균 및 절대 증가값

Gases	내용	안면도 FTS 전량농도	안면도 지표(In-Situ) 농도	전지구 ¹ 지표(In-Situ) 농도
CO ₂	2021년 평균값 (단위: ppm)	418.5	423.1	413.7
	2020년 대비 절대 증가값 ² (단위: ppm/year)	2.5	2.7	2.3
CH ₄	2021년 평균값 (단위: ppb)	1903	2005	1896
	2020년 대비 절대 증가값 ² (단위: ppb/year)	26	18	17
CO	2021년 평균값 (단위: ppb)	112.5	-	-
	2020년 대비 절대 증가값 ² (단위: ppb/year)	2.6	-	-

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO는 통상 10월에 발표함.

² 절대 증가값 = 올해 연 평균값 - 전년도 연 평균값

안면도 FTS 전량농도 중 XCO₂의 8년 평균은 407.7 ppm으로 같은 기간 지표(In-situ)관측 평균 CO₂농도 413.9 ppm보다 약 6.2 ppm 낮은 값을 보였다. 2021년의 경우 FTS XCO₂ 농도 연평균 값은 418.5 ppm으로 CO₂ 지표(In-situ)관측 연평균 농도(423.1 ppm) 대비 4.6 ppm 낮은 수치를 보였다.

FTS는 혼합층이 높고, 대기가 잘 혼합된 관측조건 상층(약 100 km)까지 농도를 포함하여 관측하기 때문에 지상관측보다 상대적으로 낮은 값을 보이게 된다. 농도 측정과는 달리 연변동량에 해당하는 절대 증가값은 FTS의 XCO₂가 지표(In-situ)관측 CO₂와 유사하거나 큰 값을 보인다. 2021년도에는 FTS의 XCO₂는 2.5 ppm/yr로 지표(In-situ)관측의 CO₂ 농도 2.7 ppm/yr보다 약간 작은 값을 보였다. 농도 관측(FTS, In-situ)과 절대 증가값의 비교 결과를 종합하면, FTS 이산화탄소 전량농도(XCO₂)는 지표관측(CO₂)보다는 작지만, 그 증가값이 크기 때문에 초기에 나타난 두 값의 큰 차이가 계속 줄어들고 있으며, 2020년도 이후 그 차이가 유지되는 경향을 보인다(그림 4.7.2).

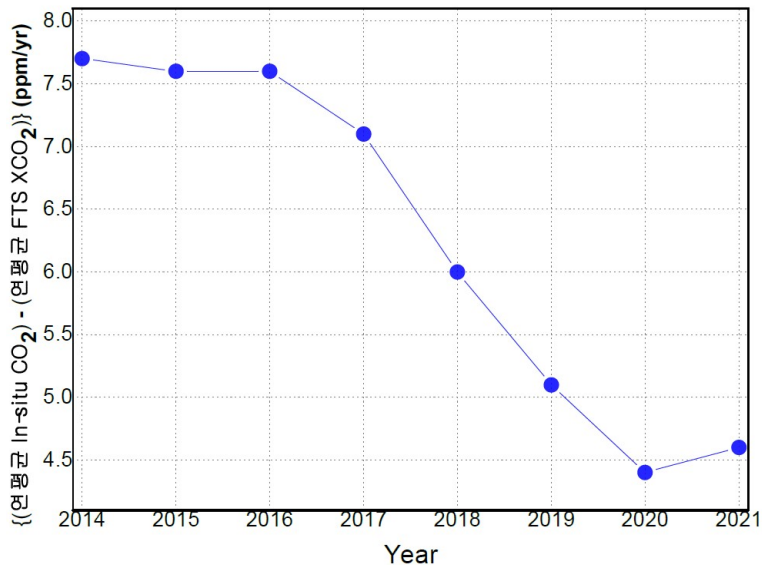


그림 4.7.2 연평균 CO₂ 지상관측 배경농도와 FTS 전량농도 차의 시계열.

또한 FTS의 연도별 절대 증가 값을 지표관측과 비교하면 년 변동 경향이 매우 유사하게 나타난다. 이는 FTS 관측이 어느 정도 배경농도의 년 변동 경향은 보여준다고 볼 수 있으며, 향후 품질검사 과정의 개선과 안정적인 자료 확보를 통해 배경농도 산정의 보조 정보로도 활용이 가능할 것으로 보인다. 향후 FTS의 정확도 향상을 위하여 지표(in-situ) 및 항공기 관측을 추가로 비교하는 방안을 마련할 예정이다. 특히 다양한 파장대를 이용하여 XCO₂와 XCH₄ 농도로부터 고도별 농도를 산출하고 항공기 관측을 이용하여 검증할 예정이다. 또한 현재까지는 XCO₂, XCH₄, XCO의 가스종에 대한 산출이 되었으나 2022년 이후부터는 알고리즘 개선을 통해 XN₂O, XHF 분석도 추가할 계획이다.



4.8 2021년 온실가스 특성

CH₄은 2006년까지 전지구적으로 감소 혹은 안정세를 보이다가 2007년부터 재증가하기 시작했으며, 최근 그 증가 속도가 가파르다. 2021년 CH₄ 농도는 한반도와 전지구 모두 전년도에 비해 14~22 ppb가 증가했으며, 최근 10년간과 비교하면 그 증가율이 2배 이상 가속화되었다.

CH₄의 증가요인에 영향을 미치는 여러 배출원을 분석하는 방법 중 메탄 동위원소 관측자료인 δ¹³C는 인위적 기원과 자연적 기원을 구분하는 중요정보를 제공한다. 예를 들어 연소활동(화석 연료, 생체소각 등) 같은 고온에서 배출된 CH₄의 경우, δ¹³C는 높은 값을 나타내며, 농업, 습지 등의 자연적 기원에서 기인한 CH₄의 δ¹³C는 낮은 값을 나타낸다.

한반도의 2021년 급격히 증가한 CH₄의 원인을 분석하기 위해 지난 2014년부터 2020년까지 안면도 기후변화감시소에서 관측한 CH₄과 δ¹³C의 값을 살펴보았을 때, CH₄이 증가할수록 δ¹³C 값은 감소하는 것으로 나타났다(그림 4.8.1). 이는 최근 한반도에서 증가하는 CH₄의 배출원이 생물학적 영향을 많이 받고 있음을 나타낸다. 한반도가 속한 동아시아는 벼농사, 습지 등의 생물학적 배출원의 영향이 크고(Jackson et al., 2020), 특히 기온이 높을수록 자연에 저장되어 있던 CH₄이 재방출하기 때문이다(Ito et al., 2022; Kenea et al., 2021; Wang et al., 2021). 전지구적으로도 생물학적 배출의 영향이 강화되고 있는 것으로 판단되고 있으며, 특히 열대지방과 습지 등의 재방출이 거론되고 있다(Nisbet et al., 2016; Lan et al., 2021). 따라서, 기후변화로 인해 기온이

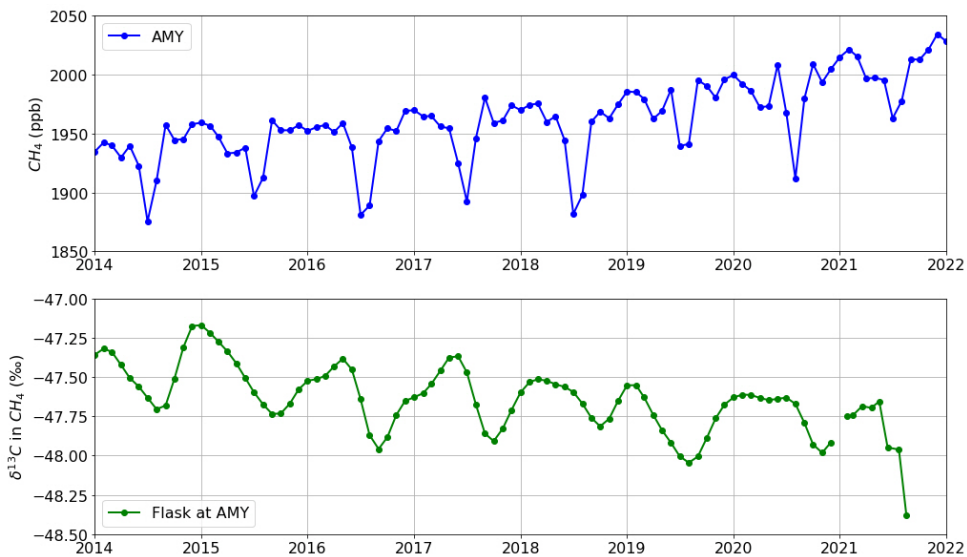


그림 4.8.1 안면도(AMY)에서 측정된 대기 중 CH₄와 δ¹³CH₄의 월평균 농도.

증가하면, 한반도 CH₄의 증가율이 가속화되고, 증가한 온실가스로 인해 기후변화가 강화되는 기후피드백 현상에 대한 연구가 필요하다. 대기 중 CH₄의 경향성을 추적하기 위해 기상청에서는 CO₂에 이어 2022년 CH₄의 관측자료를 실시간으로 제공하고자 한다(climate.go.kr).

또한 기상자료 및 기상모델의 활용, 동위원소 등의 관측을 통해 한반도 CH₄ 증가에 영향을 주는 국내외 원인을 분석하는 것도 중요하다. 기상청은 IG³IS(Integrated Global Greenhouse Gases Information System)을 통해 현재 보유하고 장기 관측자료와 기상모델을 이용하여 준실시간 관측값의 기원을 추적하는 연구를 진행 중이며, 대국민에게 그 자료를 공개할 계획이다.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제5장 반응가스

5.1 반응가스 감시 목적	66
5.2 지표오존(O ₃)	68
5.3 일산화탄소(CO)	70
5.4 질소화합물(NO _x)	72
5.5 이산화황(SO ₂)	74
5.6 2021년 반응가스 특성	76



제5장 반응가스

- 지표오존(O₃): 안면도 41.6 ppb (최근 10년 대비 -0.7%)
고 산 44.9 ppb (최근 8년 대비 3.7%)
 - 2021년 직달일사가 안면도에서 감소, 고산에서 증가한 영향으로 추측
- 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO₂)은 꾸준히 감소

5.1 반응가스 감시 목적

반응가스에는 지표오존(O₃), 일산화탄소(CO), 휘발성유기화합물(VOCs), 질소화합물(NO_x, NO_y), 그리고 이산화황(SO₂) 등이 있다. 이들은 자연 성분이기도 하지만 인위적으로 배출되기도 하며, 대기 내 화학반응에 관여하고 체류시간이 수 분~수 개월 정도이다. 따라서 전지구적으로 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, 2021). 반응가스를 포함한 단수명기후강제요인(Short-lived Climate Forcers; SLCFs)은 인위적 혹은 자연적으로 배출되어 대기 중 화학반응을 통해 머무르면서 직·간접적으로 기후변화에 영향을 주고, 기후변화는 다시 화학반응 속도 또는 순환 변화에 영향을 미치면서 대기 조성에 영향을 주게 된다(그림 5.1.1).

이렇듯 반응가스는 기후에 영향을 줄 뿐만 아니라 대기질에 직접 관련이 있고 풍향, 풍속, 기온, 습도 등의 기상 조건이 농도 수준에 영향을 주므로 기상자료와 함께 해석함으로써 감시소의 국지오염영향이나 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.



O₃, CO, NO_x, SO₂의 자료는 안면도에서 1998년부터, 고산에서 2012년부터 확보하고 있으며, 울릉도에서는 2015년부터 CO를 측정하고 있다. 2017년에 O₃과 CO는 세계기상기구 지구대기감시(WMO/GAW)에서 권고하는 관측지침을 참고하고 관측환경을 개선한 후 O₃과 CO 세계표준센터의 적합성 평가에서 좋은 결과를 얻었다(WCC-Empa, 2017(a); WCC-Empa, 2017(b)). NO_x는 GAW와 EMEP¹⁾에서 지원하는 ACTRIS²⁾의 관측지침을 참고하여(WMO, 2010, 2011, 2013) 기후변화감시소의 상황에 맞게 관측환경, 관측 방법 및 자료품질처리에 대한 매뉴얼을 작성하고 이에 따라 자료를 생산하고 있다(국립기상과학원, 2017). 이러한 과정에서 2014년 3월부터 2017년 3월 중순까지의 자료는 신뢰하기 어려워 본 보고서 부록의 통계표에서 제시하지 않았다.

Sources and processes contributing to SLCFs and their effects on the climate system

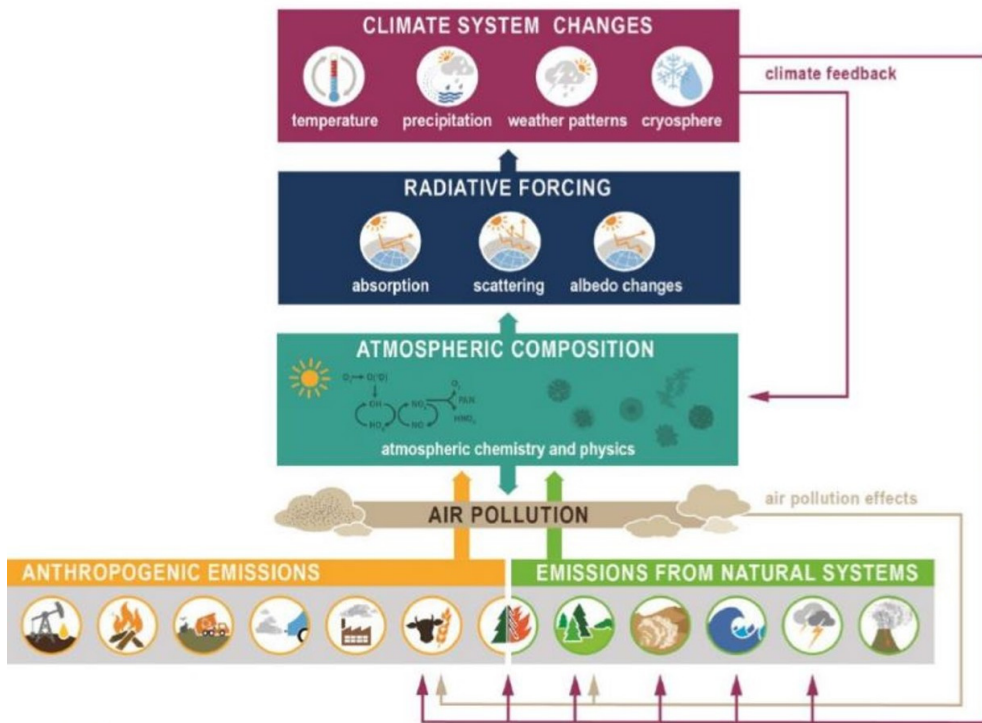


그림 5.1.1 반응가스를 포함한 단수명기후강제요인(Short-lived Climate Forces)과 기후시스템과의 상호작용(출처 : IPCC(WG1AR6), 2021).

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 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(VOCs)의 농도와 기온, 일사량 등이 지표 O₃의 생성에 관여한다. 지표 O₃는 강력한 산화제로 사람의 호흡기에 영향을 주고 식생의 성장과 광합성 활동을 저해하여 CO₂ 흡수를 방해하며, 화학반응 과정에서 CH₄와 반응하는 등 간접적으로 기후에 영향을 끼친다. 지표 O₃의 복사강제력 추정치는 전적으로 모델에 기반을 두고 있으며, IPCC의 5차 평가보고서와 달리 6차 평가보고서에서는 대류권과 성층권을 구분하지 않은 오존의 복사강제력(전지구 평균)을 0.47[0.24~0.71]W/m²로 제시하였는데 이는 CO₂와 CH₄ 다음으로 큰 값이다(IPCC, 2021).

안면도와 고산에서 측정된 지표 O₃는 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 복사한 해양 기단의 영향을 받아 지표 O₃ 농도가 낮게 나타났다(Yamaji et al., 2006). 2021년 안면도 지표 O₃의 월평균을 2017년 적합성평가 수감과 2018년 관측환경을 개선한 이후인 2017~2020년의 평균과 이 시기의 약 10년 전인 2007~2013년 동안의 평균, 그리고 안면도에서 최초로 반응가스 측정을 시작하였던 1998년부터 2004년까지 시기를 나누어 월평균으로 비교하였다(그림 5.2.1). 2021년 안면도 지표 O₃의 연평균은 41.6 ppb로 최근 3년(2018~2020년, 2017년 적합성 평가 이후의 측정값) 평균인 41.4 ppb와 비슷하였다. 월평균은 6월에 49 ppb로 가장 높았고, 12월에 31.7 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 5월 최댓값, 1월 혹은 12월 최솟값으로 나타나는 패턴과 유사한 분포를 보였다. 2021년 고산 지표 O₃의 연평균은 44.9 ppb로 최근 3년 평균인 43.2 ppb보다 조금 높았다. 월평균은 4월에 56.2 ppb로 가장 높았고, 8월에 27.5 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 4월 최댓값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷하였다. 과거 월평균 분포는 안면도와 고산이 유사한 패턴을 보였으나 2021년에는 고산 지표 O₃의 월평균 분포는 봄과 가을에 농도가 높은 쌍봉 분포가 뚜렷하였고, 안면도의 경우 가을 농도가 증가하지 않았다.

각 감시소에서 측정된 지표 O₃의 장기간 변화 경향을 그림 5.2.2에 나타내었다. 여기서 일평균 자료를 사용하여 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값을 나타내었다. 관측 기간 전체에 걸쳐 안면도와 고산의 월평균의 농도 수준과 월 최댓값, 월 최솟값의 분포범위가 유사하였다. 안면도와 고산의 지표 O₃의 연변화는 증가하거나 감소하는 경향이 뚜렷하지 않으며, 연중 가장 높은 농도를 보이는 5월 최댓값의 연변화는 2019년 이후 계속 90 ppb 이하로 나타났다.

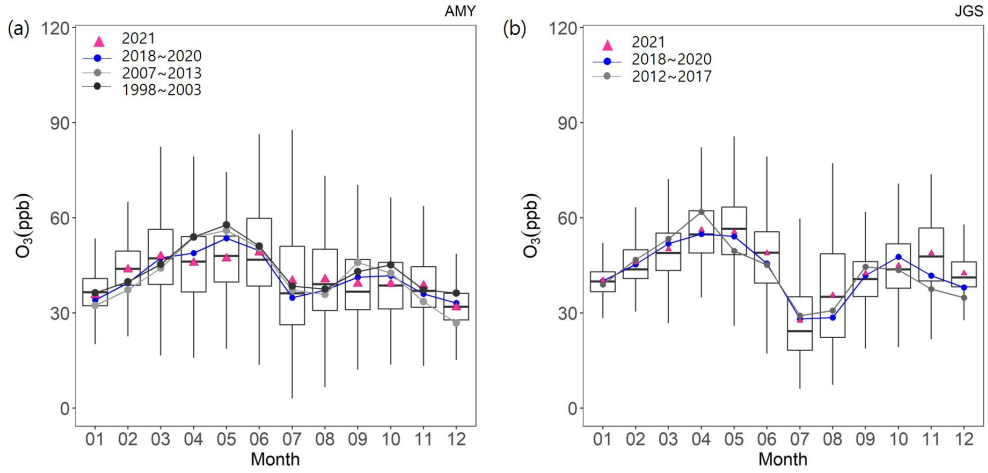


그림 5.2.1 2021년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 지표 O₃ 월변화. 2021년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 장기월평균(점-선).

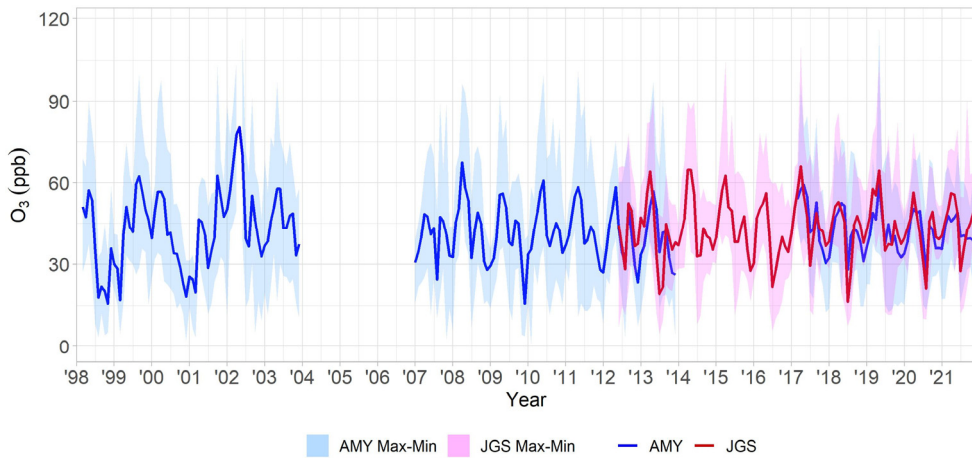


그림 5.2.2 안면도(AMY, 1998~2021년)와 고산(JGS, 2012~2021년)에서 관측한 지표 O₃의 연변화 경향(선은 월평균, 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

5.3 일산화탄소(CO)

대기 중에 존재하는 일산화탄소(CO)의 절반가량은 직접 배출된 것이고 나머지는 CH₄나 NMVOCs(Non-methane volatile organic compounds)의 대기 산화로 인한 것이며, O₃, CH₄와 대기 중 화학반응을 통해 간접적으로 기후변화에 양의 강제력을 가진다(IPCC, 2021). 전세계 GAW 감시소에서 공유한 CO 농도로 WDCGG(World Data Centre for Greenhouse Gases) 에서 계산한 2019년 전지구 평균은 93 ppb이고 북반구에서 인위적인 오염원 배출로 인해 남반구보다 높게 분포한다. CO는 대기 체류시간이 계절이나 지역에 따라 1~4개월 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, 울릉도에서 측정하고 있다. 2021년 안면도 CO의 연평균은 249.1 ppb로 최근 3년 평균인 270 ppb보다 약 22 ppb 낮았다. 월평균은 3월에 318.3 ppb로 가장 높았고, 7월에 159.5 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1월 최댓값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷한 분포를 보였다(그림 5.3.1).

2021년 고산 CO의 연평균은 188.6 ppb로 최근 3년 평균인 201.3 ppb보다 약 13 ppb 낮았다. 월평균은 2월에 237.6 ppb로 가장 높았고, 7월에 102.1 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1, 2월 최댓값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷하나, 2021년 1월은 과거 평균보다 낮았다.

2021년 울릉도 CO의 연평균은 177.8 ppb로 최근 3년 평균인 174.2 ppb보다 약 4 ppb 높았다. 월평균은 2월에 215.8 ppb로 가장 높았고, 7월에 123 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 2, 3월 최댓값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷하였다. 2021년에는 안면도, 고산, 울릉도 모두 7월에 가장 낮은 농도가 관측된 공통점을 보였고 특히 고산 7월 평균이 세 감시소 중 가장 낮았다. 또, 세 감시소 중 울릉도의 CO 변동 폭이 가장 좁았다.

각 감시소에서 측정한 일산화탄소의 장기간 변화 경향을 그림 5.3.2에 나타내었다. 이 그림에서 일평균 자료를 사용하여 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값을 나타내었다. 관측 기간 전체에 걸쳐 안면도, 고산, 울릉도의 월평균의 농도 수준과 월 최댓값은 안면도, 고산, 울릉도의 순서로 높게 분포하였다. 장기간 관측한 안면도 일산화탄소의 연변화를 보면 겨울철 월평균이 2011년 이후 점차 감소하였고, 이와 함께 월 최댓값의 수준도 감소하였으며 2019년 이후 뚜렷하게 감소하였다. 그에 비해 고산과 울릉도의 겨울철 월평균이 안면도와 비교하여 뚜렷하지 않으나 2019년 이후 미약하게 감소하였다.

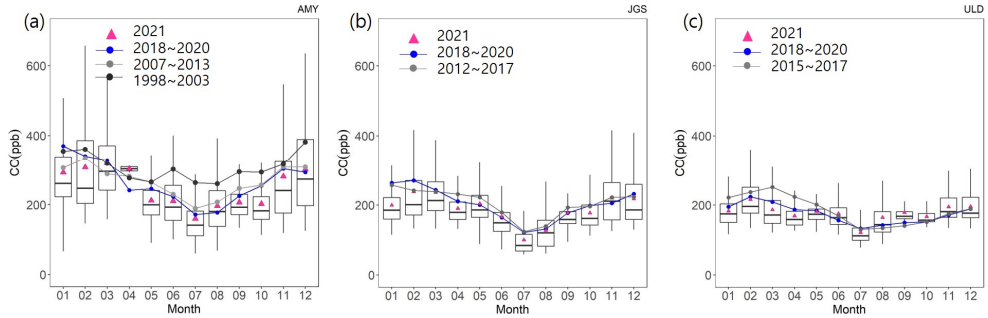


그림 5.3.1 2021년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD) 의 CO 월변화. 2021년 월별 분포(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 장기월평균(점-선).

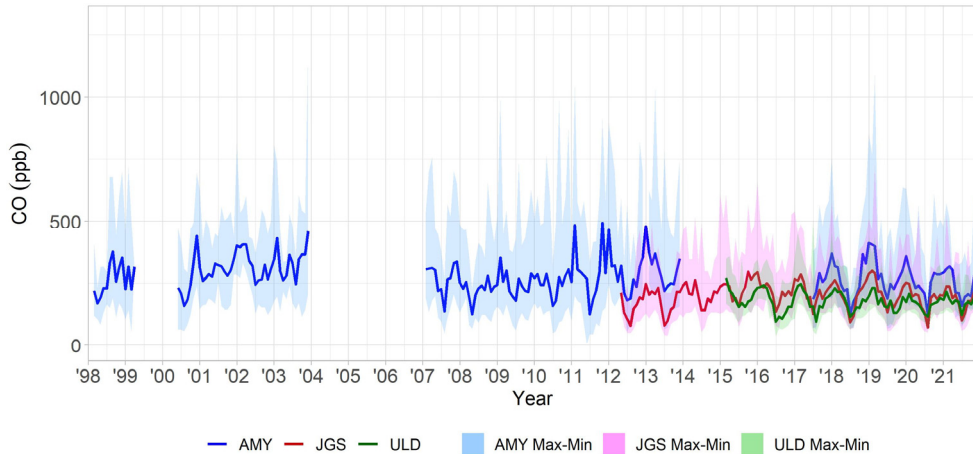


그림 5.3.2 안면도(AMY, 1998~2021년), 고산(JGS, 2012~2021년), 울릉도(ULD, 2015~2021년) 에서 관측한 CO의 연변화 경향(선은 월평균, 음영은 월 최대값과 월 최소값의 차이를 나타냄).

5.4 질소화합물(NO_x)

대류권에 존재하는 질소산화물(NO_x)은 O₃과 에어로졸의 전구물질로 반응성이 높아 대기 체류시간이 짧고(수 시간~수 일), 지역에 따라 고르지 않게 분포하며 가스상은 물론 에어로졸과도 상호작용을 하므로 기후에 미치는 순 영향을 파악하기 어렵다(IPCC, 2021).

NO_x는 자연적으로 대류권 상층에서 번개에 의해 생성되기도 하고, 토양, 식물 등의 질산염에서 광화학 활동으로 발생한다. 주요 배출원은 인위적으로 발전소, 석유계 자동차, 선박, 항공기 등에서 화석연료를 사용한 고온 연소와 산불, 산림 벌채 등의 저온 연소에서 발생한다. NO_x는 낮 동안의 빠른 광화학 반응으로 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 1.0 ppb 이하로, 해양이나 자유대기층(free troposphere)과 같은 배경 대기 지역에서는 0.1 ppb 수준으로 관측된다. 안면도와 고산에서 NO_x를 측정하고 있으며, 관측법과 관측 기간은 부록에 소개되었다.

2021년 안면도에서 측정한 NO_x의 연평균은 5.4 ppb로 최근 3년 평균인 5.8 ppb보다 조금 낮았다. 월평균은 장비의 장애가 발생한 6월을 제외하고, 3월에 9 ppb로 가장 높았고, 5월에 3.2 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1월 최댓값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 달랐다(그림 5.4.1). 반면에 고산 NO_x는 연평균 3.8 ppb로 최근 3년 평균인 4.3 ppb보다 조금 낮았다. 월평균은 3월에 6.4 ppb로 가장 높았고, 7월에 2.3 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 10, 11월 최댓값, 7월 최솟값으로 나타나는 패턴과 달랐다.

각 감시소에서 측정한 질소산화물의 장기간 변화 경향을 그림 5.4.2에 나타내었다. 여기서 일평균 자료를 사용하여 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값을 나타내었다. 관측 기간 전체에 걸쳐 안면도 월평균과 월 최댓값의 농도 수준이 점차 감소하였다. 고산 NO_x는 안면도에 비해 뚜렷한 계절 변동이 나타나지 않았다. 고산의 월 최댓값은 월평균과 마찬가지로 큰 폭의 변화가 없어 고산이 국지오염 영향이 적었던 걸로 판단된다.

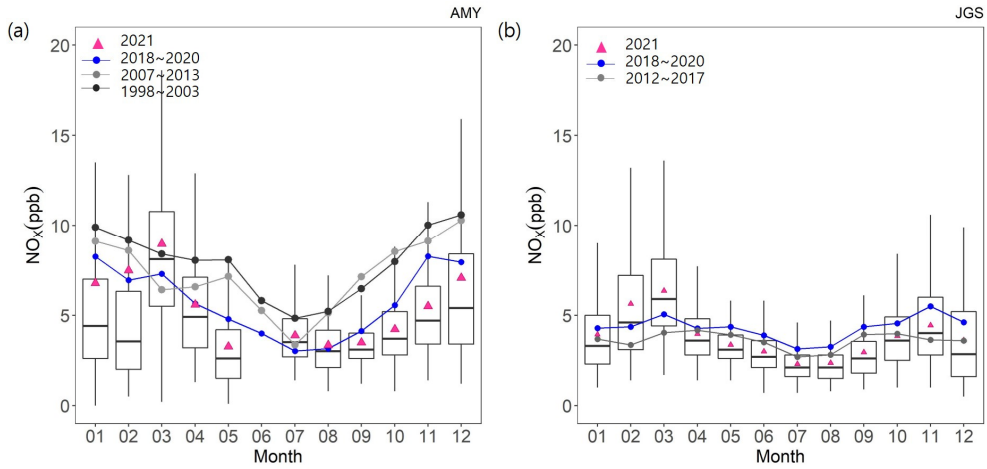


그림 5.4.1 2021년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 NO_x 월변화. 2021년 월별 분포(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 장기월평균(점-선).

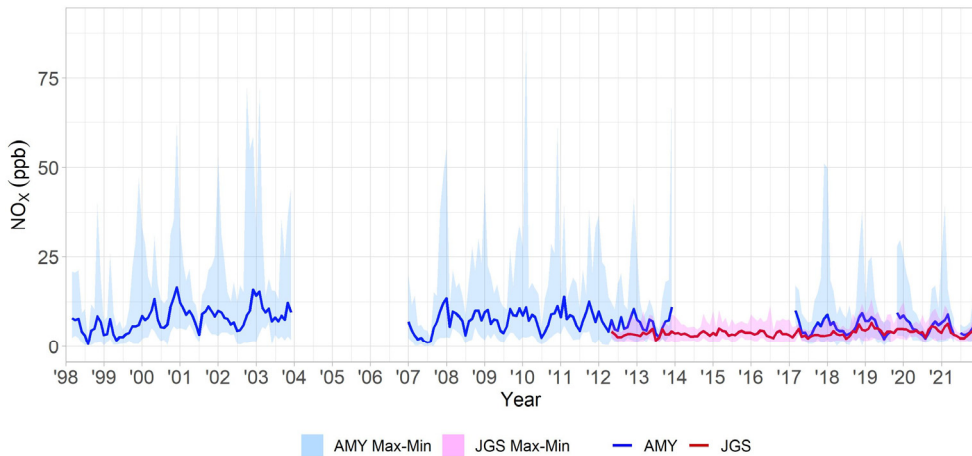


그림 5.4.2 안면도(AMY, 1998~2021년), 고산(JGS, 2012~2021년), 울릉도(ULD, 2015~2021년)에서 관측한 CO의 연변화 경향(선은 월평균, 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

5.5 이산화황(SO₂)

이산화황(SO₂)은 H₂SO₄의 주요 공급원이며, H₂O, O₃과 반응하여 H₂SO₄를 생성한다. H₂SO₄는 산성비를 유발하거나 새로운 입자를 형성하는 데 결정적인 역할을 한다. 1980년대부터 1990년대까지 산성비 등 산성강하물이 주요 환경문제였을 때 유럽과 북아메리카에서 대기오염 측정 네트워크와 대기배경지역에서 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). IPCC 6차 보고서에 따르면 동아시아에서 SO₂가 증가하다가 2005년경 이후 감소하였고, 2012~2013년에 동안 증가한 후 다시 급격히 감소하였다(IPCC, 2021).

SO₂는 화학반응을 거쳐 황산염 에어로졸을 생성하는 전구물질로 작용한다. 따라서 SO₂는 간접적으로 기후에 영향을 주는 요소로 지속적인 감시를 통한 장기 변화를 분석할 필요가 있다.

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

2021년 안면도에서 측정한 SO₂의 연평균은 0.9 ppb로 최근 3년 평균인 1.1 ppb보다 0.2 ppb 낮았다. 월평균은 1, 2월에 1.3 ppb로 가장 높았고, 6월에 0.5 ppb로 가장 낮아 과거 자료에서 1, 12월 최댓값, 7, 8월 최솟값으로 나타나는 패턴과 비슷한 분포를 보였다(그림 5.5.1). 2021년 고산 NO_x의 연평균도 0.7 ppb로 최근 3년 평균인 0.9 ppb보다 낮았다. 월평균은 2월에 0.9 ppb로 가장 높았고, 5월에 0.5 ppb로 가장 낮았다.

각 감시소에서 측정한 이산화황의 장기간 변화 경향을 그림 5.5.2에 나타내었다. 여기서 일평균 자료를 사용하여 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값을 나타내었다. 관측 기간 전체에 걸쳐 안면도 월평균과 월 최댓값의 농도 수준은 2008년에 최대였다가 감소하였고 다시 2012년에 증가한 후 점차 감소하였다. 이러한 경향은 중국의 대기 정책에 따른 배출량의 변화와 일치하였다(국립기상과학원, 2020년). 고산 NO_x는 안면도에 비해 뚜렷한 계절변동이 나타나지 않았다. 고산의 월 최댓값은 월평균과 마찬가지로 큰 폭의 변화가 없으며 2019년 이후 안면도와 고산의 SO₂ 농도는 비슷한 범위로 분포하였다.

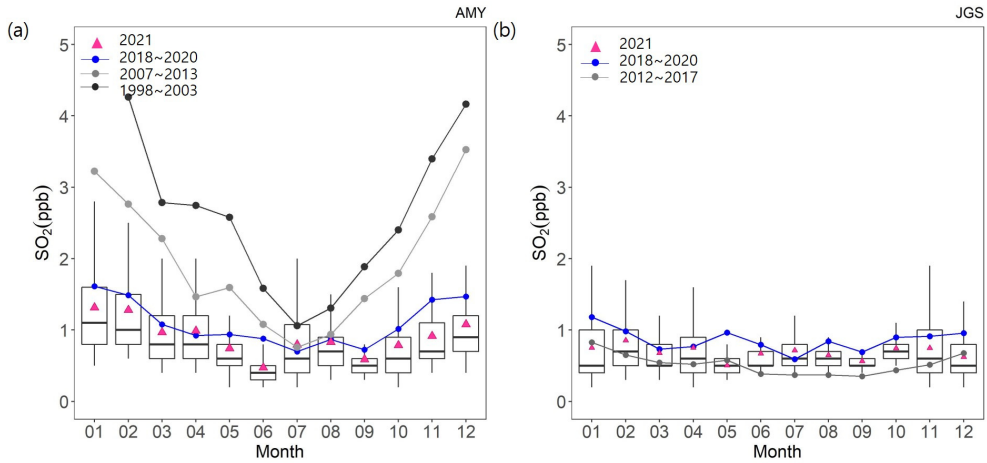


그림 5.5.1 2021년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 SO₂ 월변화. 2021년 월별 분포(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 장기월평균(점-선).

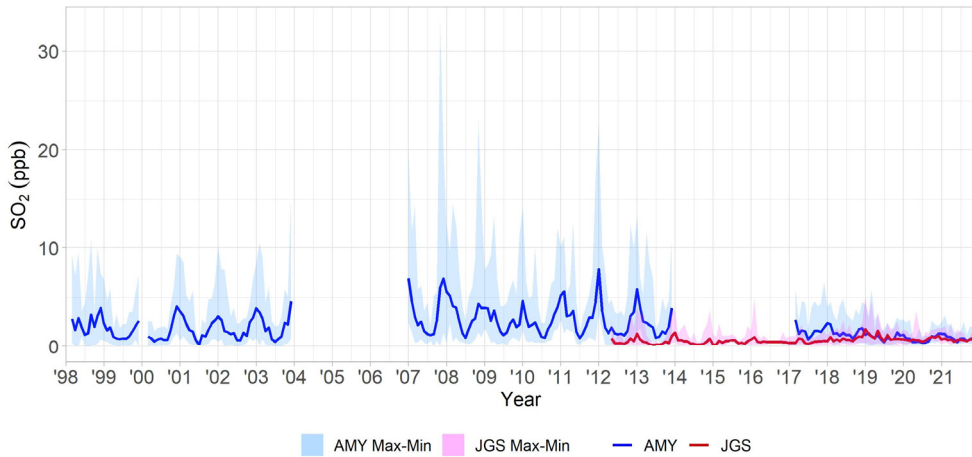


그림 5.5.2 안면도(AMY, 1998~2021년)와 고산(JGS, 2012~2021년)에서 관측한 SO₂의 연변화 경향 (선은 월평균, 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

5.6 2021년 반응가스 특성

2021년 지표 O₃ 연평균은 안면도에서 최근 10년과 비교하여 감소하였고, 고산에서는 최근 8년과 비교하여 증가하였다(표 5.6.1). 각 지점의 지표 O₃의 월분포 또한 직달일사의 월분포와 유사한 경향을 보였다(그림 5.2.1, 그림 7.2.1). 각 감시소에서 CO, NO_x, SO₂ 연평균은 지점 모두 과거 평균보다 감소하였고 고산에서 2021년 SO₂의 연평균은 과거 평균과 같은 수준이었다.

표 5.6.1 반응가스의 2020년과 최근 평균 비교

감시소 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2021년 (변화율)	최근 10년	2021년 (변화율)	최근 8년	2021년 (변화율)	최근 6년
O ₃	41.6±5.2 (-0.7%)	41.8±9.0	44.9±8.1 (3.7%)	43.3±10.5		
CO	249.1±56.3 (-12.2%)	283.7±74.7	188.6±41.3 (-9%)	207.2±48.5	177.8±22.5 (-0.7%)	179.1±38.4
NO _x	5.4±2.0 (-16.1%)	6.4±2.4	3.8±1.2 (-2.1%)	3.9±0.9		
SO ₂	0.9±0.3 (-51.9%)	1.9±1.3	0.7±0.1 (5%)	0.7±0.3		

* 최근 평균 : 안면도(2011~2020년, 2014.1~2017.2 안면도 관측환경 변화에 따른 무효처리), 고산(2013~2020년), 울릉도 (2015~2020년)

* 안면도 연구동 산설 후 장비 이전 기간 2004~2006년 무효처리, 그 외 2021년 부록2. 지구대기감시 관측자료 참조

2021년 안면도에서 관측된 O₃, CO, NO_x, SO₂가 전체 농도 중 최고값의 75% 수준의 고농도가 관측될 확률을 Uria-Tellaetxe et al.(2014)가 개선한 CBPF(Conditional Bivariate Probability Functions)로 나타내었다. 확률이 1에 가까울수록 해당 풍향의 방향으로 배출원이 존재할 가능성이 크다고 볼 수 있다. 안면도에서 O₃은 대체로 바다 방향인 남풍에서 서풍 계열의 바람일 때 고농도가 나타났고, 광화학적으로 활발한 봄에는 내륙의 영향도 받았다. CO, NO_x, SO₂는 겨울철(1월, 2월, 12월)에 고농도가 내륙과 바다에서 불어오는 방향에서 모두 고농도가 나타났고, 초봄에는 내륙 방향인 북동풍이 불 때 고농도가 나타났다.

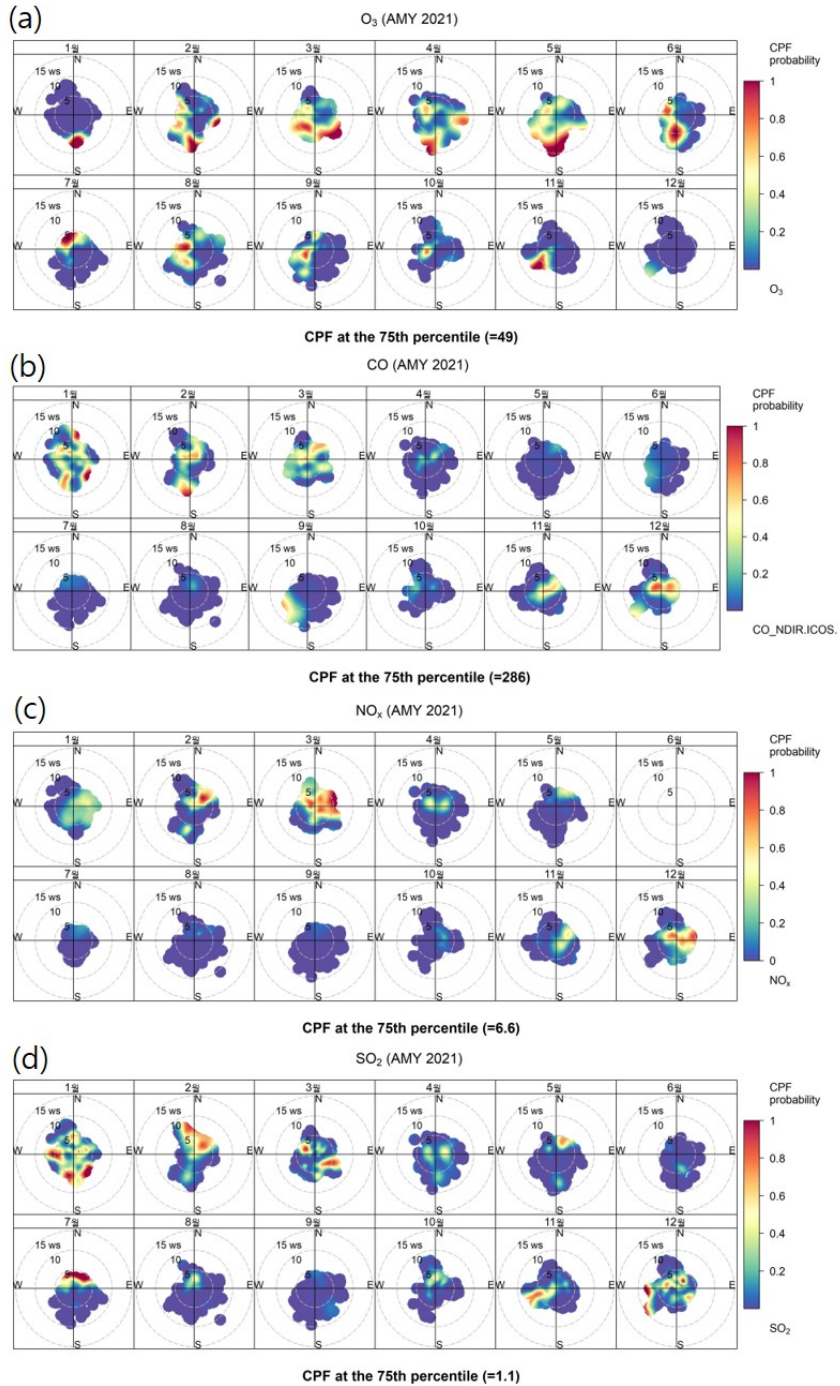


그림 5.6.1 안면도 (a) O₃, (b) CO, (c) NO_x, (d) SO₂의 2021년 월별 고농도 확률분포.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총 대기침적지구대기감시자료 분석

제11장 기타





제6장 에어로졸

6.1 에어로졸 감시 목적	80
6.2 에어로졸 물리 특성	84
6.3 에어로졸 광학 특성	89
6.4 에어로졸 화학 특성	103
6.5 2021년 에어로졸 특성	116



제6장 에어로졸

- PM10: 안면도 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고산 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 울릉도 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 - 3월과 5월 황사의 영향으로 고농도 관측
- 안면도 광산란계수, 광흡수계수: 2월 최대, 최근 증감 추세 뚜렷하지 않음.
- 안면도 총수농도의 월별 변동은 뚜렷하나, 연평균 증감 추세는 뚜렷하지 않음.

6.1 에어로졸 감시 목적

에어로졸은 공기 중에 떠 있는 고체 또는 액체 상태의 다양한 크기(수 nm~수십 μm)로 존재한다. 에어로졸은 대기 중으로 직접 배출되거나¹⁾, 배출된 입자나 가스가 대기 중 화학반응을 통해 생성된다²⁾. 배출된 에어로졸은 추가적인 화학반응, 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 강제력을 가지기도 한다. 에어로졸의 복사강제력은 다음과 같이 세 가지 효과로 구분된다.

- 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

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

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



1750년과 2019년 사이 에어로졸-복사 상호작용에 의한 직접 복사강제력의 전지구 평균은 $-0.3(-1.7\sim-0.3)$ W/m^2 이고(중간 신뢰도), 에어로졸-구름 상호작용 평균은 $-1.0(-1.7\sim-0.3)$ W/m^2 이며(높은 신뢰도), 에어로졸-복사 상호작용과 에어로졸-구름 상호작용을 모두 고려한 평균 강제력은 $-1.3(-2.0\sim-0.6)$ W/m^2 이며 중간 수준의 신뢰도를 가지는 것으로 보고되었다. 6차 평가 보고서에서 총 에어로졸 복사강제력 효과는 5차 평가보고서에 비해 증가하는 것으로 예측하였으나 불확도는 감소했으며, 이는 모델 예측과정에서 관측 분석이 영향을 주었기 때문이다(IPCC, 2021). 검명은 대기 중에 존재하는 동안 태양복사에너지를 흡수할 뿐만 아니라 눈과 얼음에 쌓여 지표의 알베도를 증가시키는 물질로 알려져 있다. 에어로졸이 기후에 미치는 영향에 대해서는 점차 과학적 이해 수준이 높아져 가고는 있지만, 에어로졸과 구름간의 상호 작용에 대한 부분은 여전히 과학적 이해도가 낮으며 시간적, 공간적 다양성이 크기 때문에 전지구적 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(그림 6.1.1).

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, 총대기 관측 및 연직 관측 등을 권고하고 있다. 전세계 약 90여 개의 에어로졸 감시소에서 기후변화와 직접 관련된 요소인 에어로졸 광학특성(광산란계수, 광흡수계수)과 물리특성(에어로졸 총수농도, 크기분포)의 최근 10년간 지역 및 전구의 변동성에 관한 연구 결과들이 발표되었다(Collaud Coen et al., 2020; Laj et al., 2020). 이 자료들은 에어로졸 세계자료센터(World Data Centre for Aerosols; WDCA)와 WMO/GAW 과학자문위원회의 품질확인을 거쳐 신뢰도가 확보된 것이며, 우리나라에서는 안면도 기후변화감시소 자료(2007~2017년)가 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 유의한 변동이 보이지 않았으며, 우리나라 안면도에서는 변동이 없는 것으로 분석되었다(그림 6.1.2(b)).

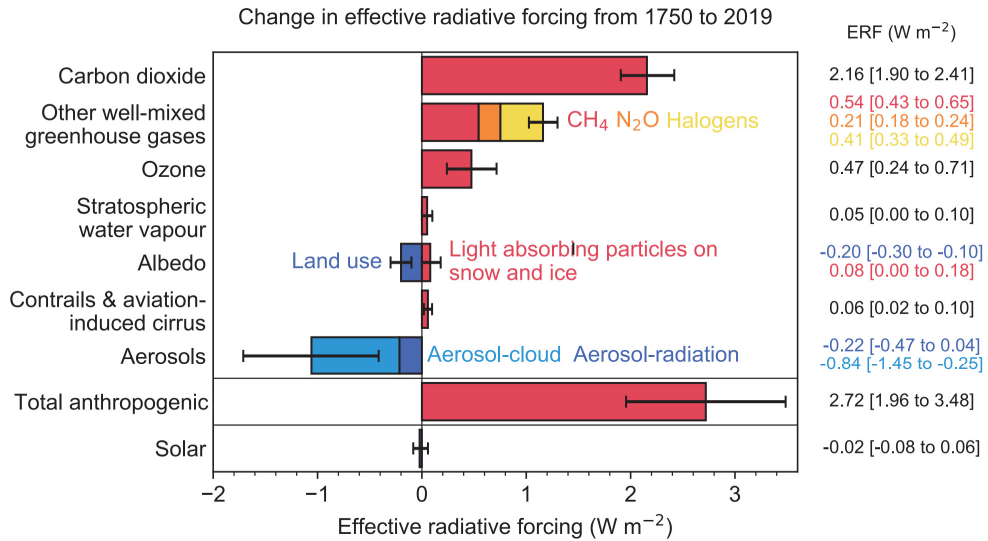
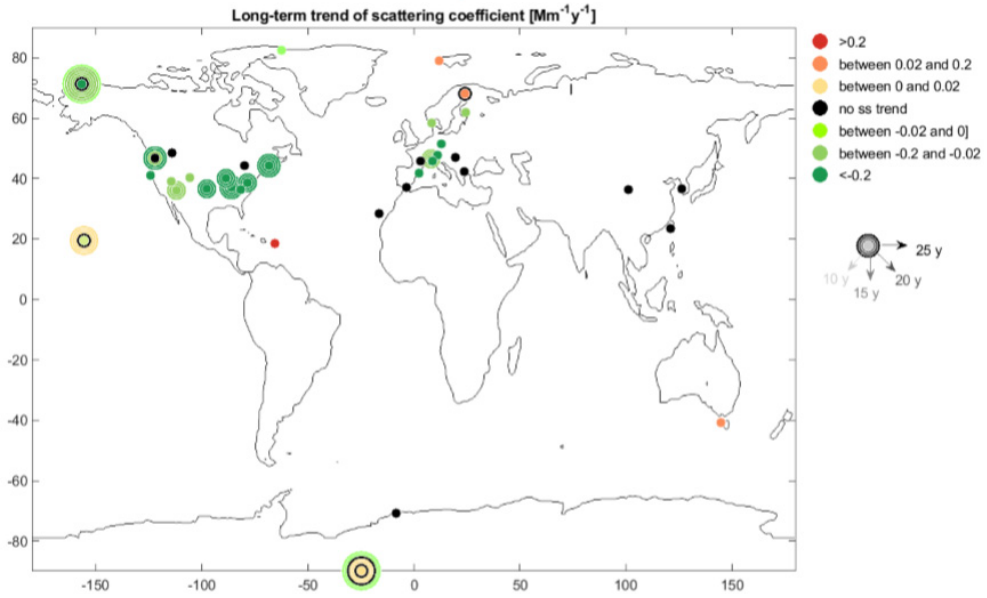


그림 6.1.1 1750~2019년까지 대기조성물질의 복사강제력(출처: IPCC, 2021).



(a)



(b)

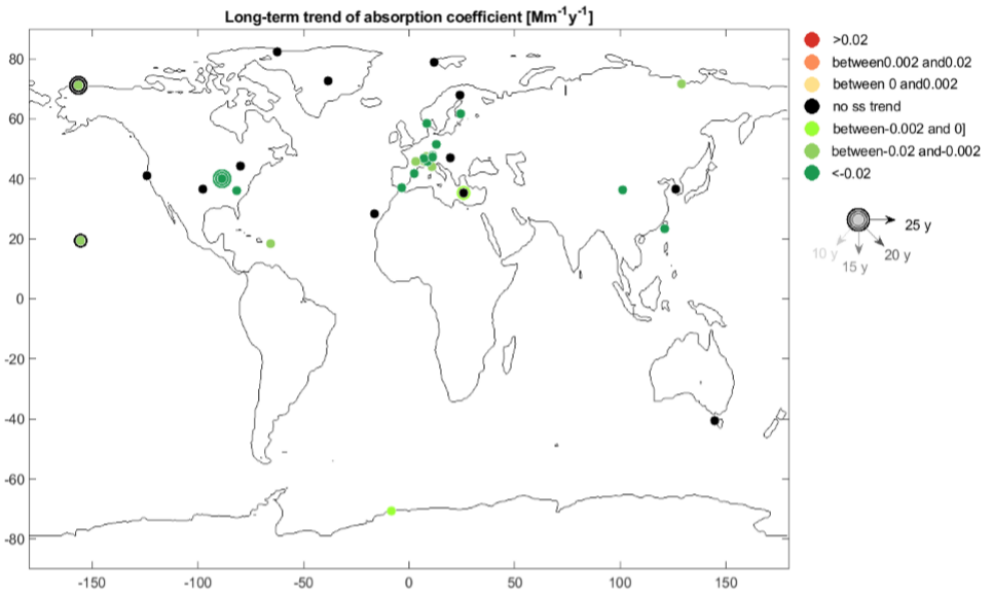


그림 6.1.2 (a) 에어로졸 광산란계수, (b) 에어로졸 광흡수계수의 장기 변동 경향. 지역에 따라 유의미한 변동 경향이 없거나(검정), 통계적으로 유의미하게 감소(초록) 또는 증가(주황) 경향을 나타냄(출처: Collaud Coen et al., 2020).

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 관측하며, 이 장비는 국내 황사 관측망의 기본 관측장비로 운영되며 자료가 실시간 공개되고 있다. 응결핵계수기(Condensation Particle Counter; CPC, 0.01~3.0 μm), 공기역학계수기(Aerodynamic Particle Sizer; APS, 0.5~20.0 μm), 전자기유도입자계수기(Scanning Mobility Particle Spectrometer; SMPS, 0.01~1.0 μm) 등을 이용하여 에어로졸 총수농도와 크기별 수농도를 측정한다.

6.2.1 PM10 질량농도

안면도에서 측정한 PM10 질량농도의 2021년 월평균은 16~59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이에 분포하며 3월과 5월을 제외하고 최근 10년간(2011~2020년) 월별 평균보다 낮았다. 9월의 평균 농도가 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았고, 3월 평균이 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연중 가장 높았다(그림 6.2.1(a)).

2021년 고산의 PM10 질량농도 월평균은 20~86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이로 안면도보다 높으며, 최근 10년(2011~2020년)간 월별 평균에 비해 3월과 5월의 평균이 높았는데, 안면도와 고산 모두 잦은 황사의 영향으로 해석된다(그림 6.2.1(b)).

울릉도에서 관측한 PM10 질량농도 월평균은 11~44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 안면도, 고산과 비교하면 약 40%~50% 낮은 수준이다. 월별로는 3월에 가장 높고, 7월에 가장 낮았으며, 3월과 5월 황사의 영향이 반영된 것으로 보인다(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: 3.6E-06). 2019년에는 2013년 이후 최댓값이 관측되었으며, 2021년 안면도 PM10 질량농도 연평균은 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 과거 10년 평균(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 수준이었다(그림 6.2.2). 2021년 고산의 PM10 질량농도 연평균은 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2011년 관측 이후로 증감 추세가 뚜렷하지 않다(p -value: 0.115). 반면, 안면도는 고산의 최초 관측 연도인 2011년 이후에도 감소 추세를 보여(-0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{year}$, p -value: 0.045), 2017년부터는 안면도와 고산의 PM10 연평균이 유사하게 관측되고 있었으나 2021년에는 고산의 연평균이 안면도에 비해 약 10% 높았다. 2021년 울릉도의 PM10 질량농도 연평균은 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 안면도, 고산에 비해 약 36~42% 낮은 수준이었다.

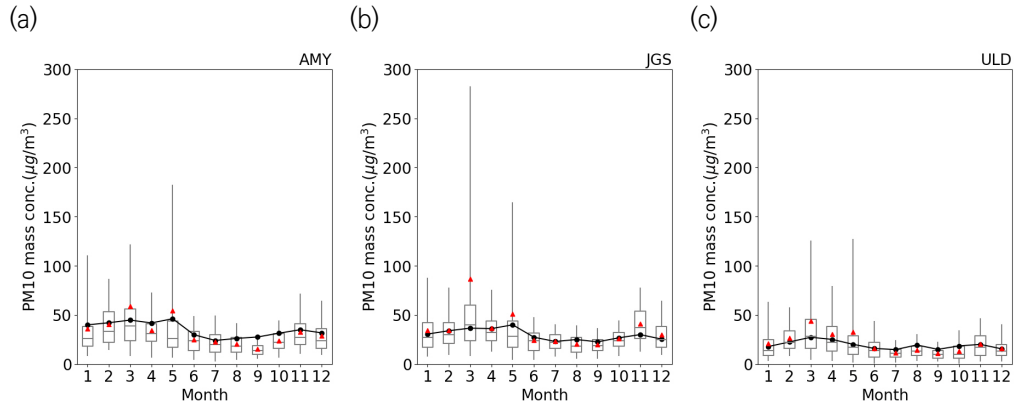


그림 6.2.1 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD)의 PM10 질량농도 월변화. 2021년 월별 분포(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간 값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년(안면도, 고산), 2019~2020년(울릉도) 월평균(점-선)(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

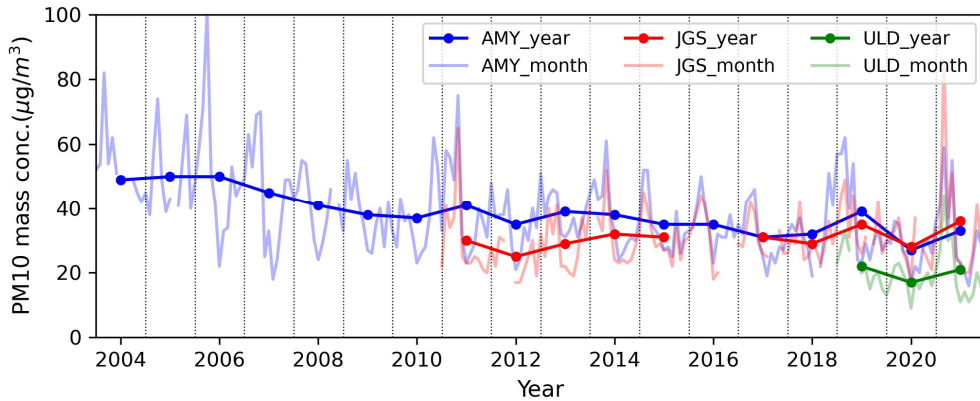
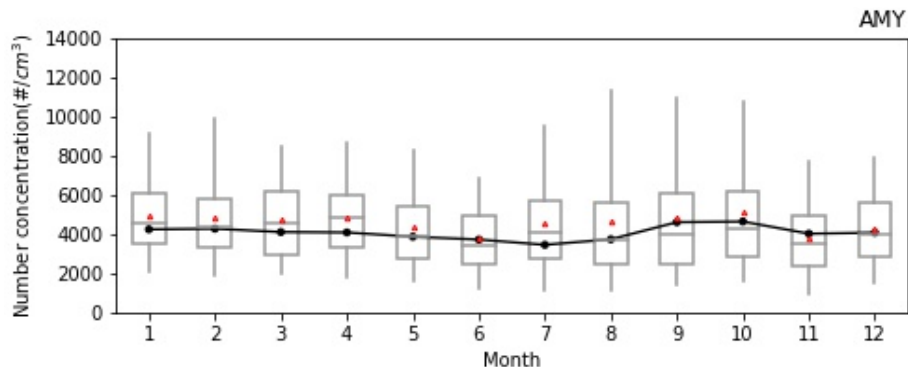


그림 6.2.2 안면도(AMY)와 고산(JGS), 울릉도(ULD) PM10 질량농도의 연변화(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

6.2.2 에어로졸 총수농도

에어로졸 수농도와 크기분포는 모든 에어로졸 과정에 있어 가장 기본이 되는 정보이다. 고산에서는 응결핵계수기를 이용하여 총수농도를 측정하며(0.01~3.0 μm), 안면도에서는 전자기유도입자계수기에서 측정한 크기별 수농도와 총수농도(0.01~1.0 μm)를 측정한다. 안면도와 고산에서 측정한 총수농도의 월 변동을 그림 6.2.3에 보였다. 2021년에 관측된 안면도의 월별 총수농도는 11월을 제외하고 최근 10년(2011~2020년)의 월평균과 비슷하거나 높았다(그림 6.2.3(a)). 2021년 안면도의 총수농도 연평균은 4590개/cm³으로 최근 10년(4041개/cm³)에 비해 13.6% 높고, 고산의 연평균은 3864개/cm³로 최근 9년 평균(4039개/cm³)보다 4.3% 낮았다. 고산의 월별 총수농도는 최근 9년(2012~2020년) 월평균에 비해 4월에는 높고, 8~12월에는 낮았다(그림 6.2.3(b)). 11월에는 에어로졸 세계표준센터 국제비교실험 참가로 인해 관측이 중단되었다. 한편, 두 감시소 모두 연평균 총수농도의 연간 변화 추세는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었다(그림 6.2.4).

(a)



(b)

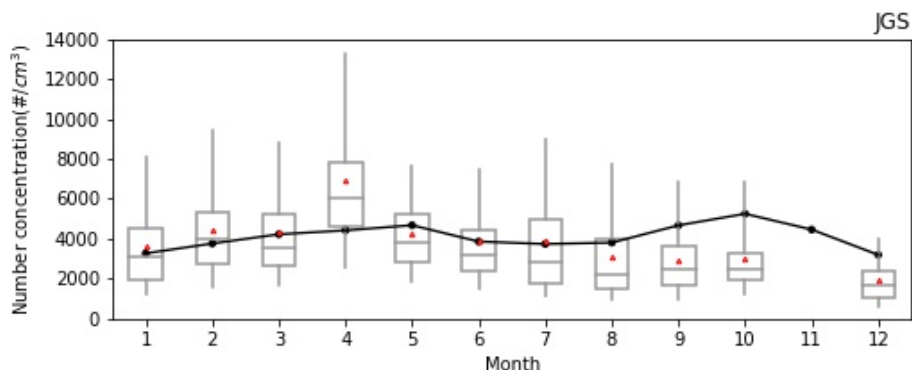


그림 6.2.3 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS)의 총수농도 월변화. 2021년 월별분포(상자의 세로실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년(안면도), 2012~2020년(고산) 월평균(점-선)(단위: #/cm³).

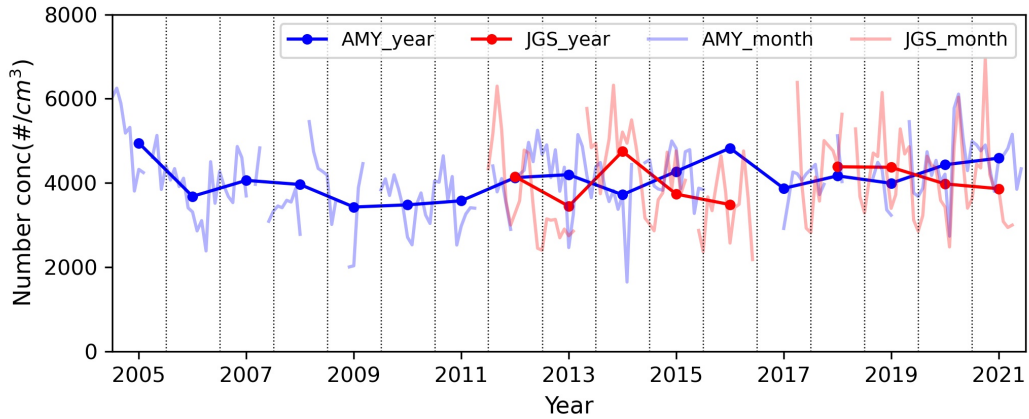


그림 6.2.4 안면도(AMY)와 고산(JGS) 총수농도의 연변화(단위: #/cm³).

6.2.3 에어로졸 크기 분포

2021년에 관측된 안면도, 고산, 울릉도의 입자 크기별 부피농도 분포(0.5~20.0 μm)를 그림 6.2.5에 보였다. 세 감시소 모두 미세입자 영역(1.0 μm 이하)과 조대입자 영역에 피크가 관측되는 이산형(bi-modal) 분포를 보였으며, 3월과 5월의 황사로 인해 조대입자 영역에서 고농도가 자주 관측되었다. 하반기에 울릉도는 다른 지점보다 농도가 낮았다.

그림 6.2.6은 안면도에서 측정한 미세입자 크기별 수농도 분포이며, 월별로 뚜렷한 차이가 관측되지 않았다.

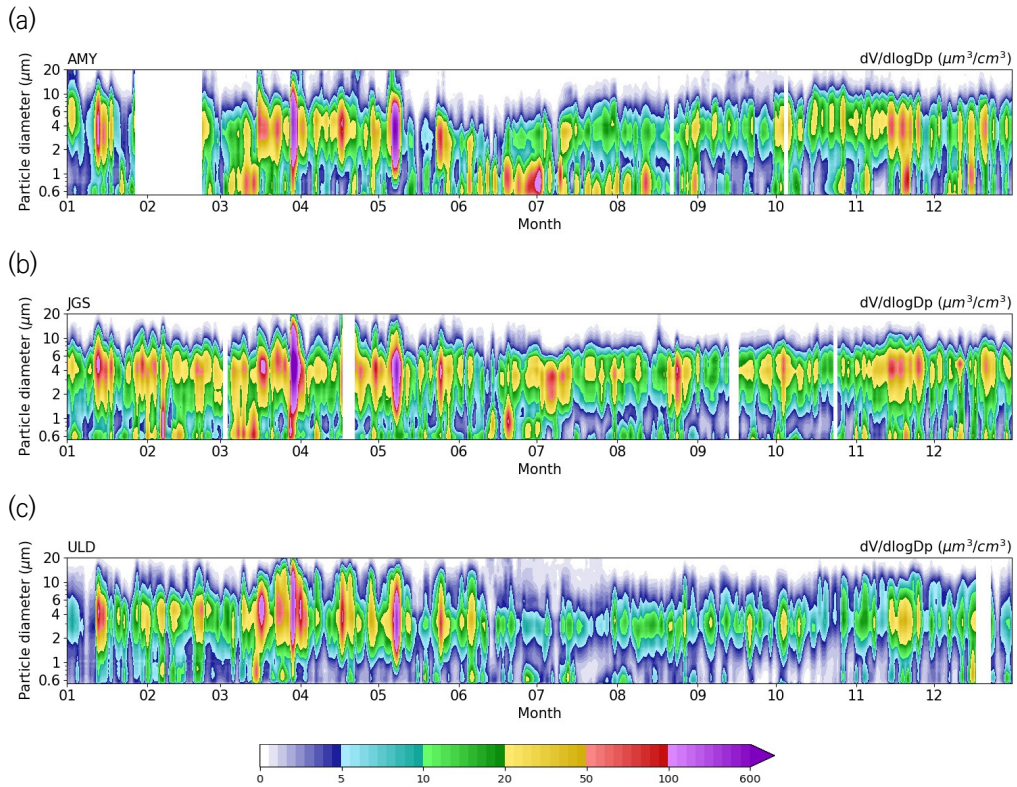


그림 6.2.5 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD)의 2021년 크기별 부피 농도(단위: $\mu m^3/cm^3$).

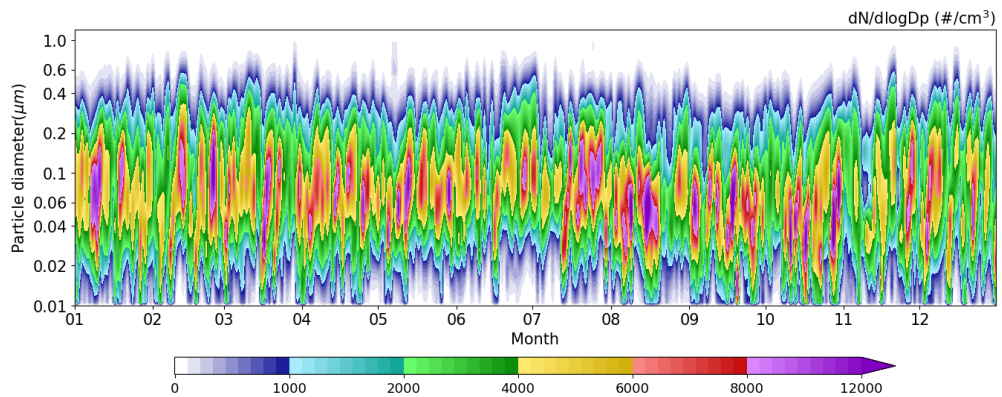


그림 6.2.6 2021년 안면도(AMY) 미세먼지 크기별 수농도 분포(단위: $\#/cm^3$).



6.3 에어로졸 광학 특성

6.3.1 에어로졸 광산란계수

2021년 안면도의 월평균 에어로졸 광산란계수(550 nm)는 34.4~117.4 Mm^{-1} 이며, 월평균 최댓값과 최솟값은 각각 2월과 9월에 관측되었다(그림 6.3.1). 2021년의 월평균 에어로졸 광산란계수는 과거 10년 평균(2011~2020년)에 비해 월별로 12%~38% 낮게 관측되었으나, 2월과 3월은 과거 평균과 비슷하였다. 2021년 월평균 최댓값이 관측된 2월과 3월, 11월에는 월평균이 중간값보다 높고, 상자의 수염(75%~95% 자료)이 길어 광산란계수에 영향을 주는 에어로졸 고농도 사례가 있었을 것으로 추정할 수 있으며(그림 6.3.1), 이는 그림 6.2.7(a)의 크기별 부피농도에서 일부 확인 가능하다. 2021년 연평균 에어로졸 광산란계수는 74.8 Mm^{-1} 으로 관측 이래 가장 낮은 2020년 평균(74.4 Mm^{-1})와 유사하다. 에어로졸 광산란계수의 연평균은 2003년 이후로 관측 전체 기간에 대해서는 감소하는 추세를 보이거나(-5.3 $Mm^{-1}/year$), 2016년 이후의 증감 추세는 통계적으로 유의미하지 않게 분석된다(선형회귀식 기울기: -5.5, 표준오차 0.82, p -value: 0.107).

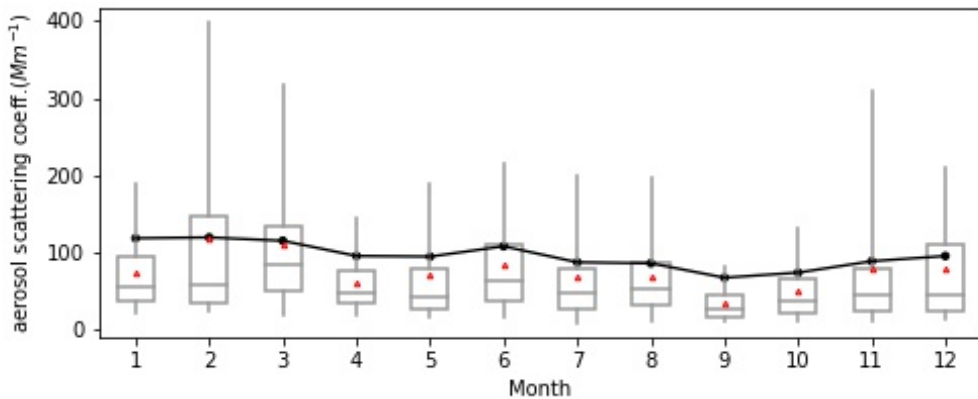


그림 6.3.1 2021년 안면도(AMY)의 550 nm 광산란계수의 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선)(단위: Mm^{-1}).

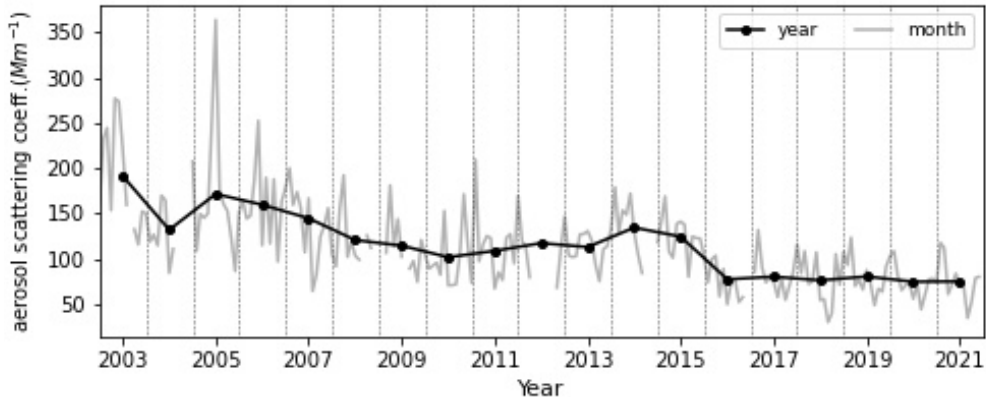


그림 6.3.2 안면도(AMY) 에어로졸 광산란계수(550 nm)의 연변화(단위: Mm^{-1}).

2021년 안면도에서 측정된 월평균 에어로졸 산란옹스트롬 지수를 그림 6.3.3에 보였다. 에어로졸 산란옹스트롬 지수(450~700 nm)의 월평균은 1.20~1.82이며 최근 10년 평균과 비교할 때 7월을 제외하고 모든 월평균이 낮았다. 특히, 1~5월 사이에 산란옹스트롬 지수가 특히 낮았는데, 이는 그림 6.2.5(a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 잦은 황사의 영향으로 보인다(그림 6.3.3). 에어로졸 산란옹스트롬 지수 연평균은 2016년부터 낮아져 최근 5년(2015~2020년)과 비슷한 1.46이었다(그림 6.3.4).

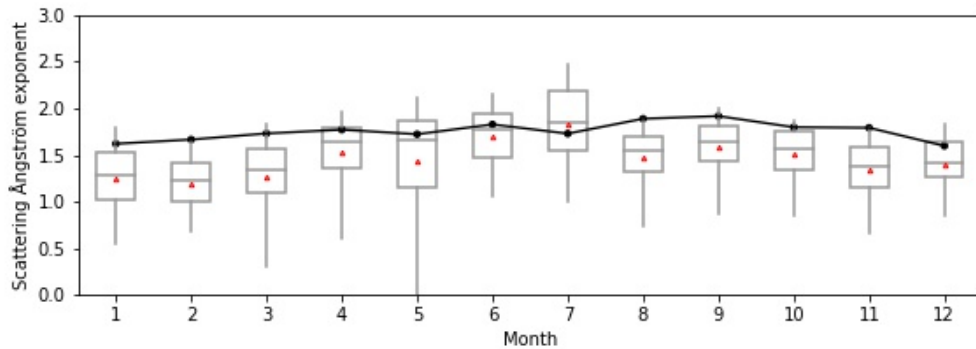


그림 6.3.3 안면도(AMY) 에어로졸 산란옹스트롬 지수(450~700 nm) 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균) 와 2011~2020년 월평균(점-선).

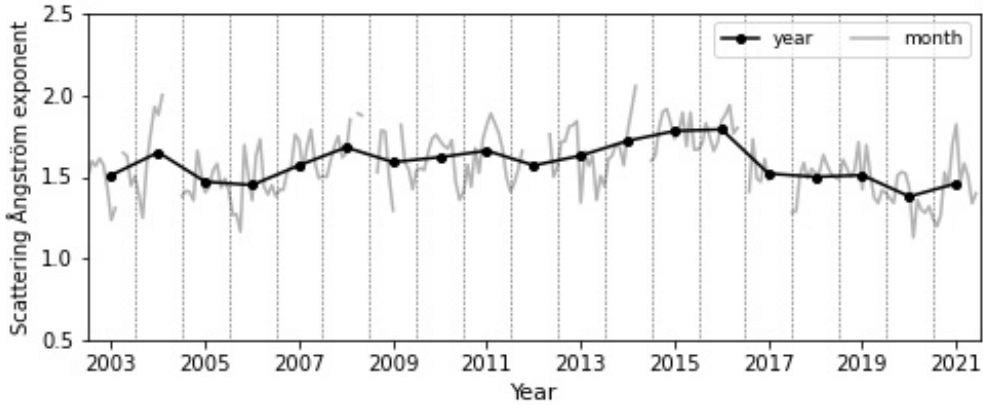


그림 6.3.4 안면도(AMY) 에어로졸 산란옹스트롬 지수(450~700 nm)의 연변화.

6.3.2 에어로졸 광흡수계수

2021년 안면도 기후변화감시소에서 측정한 광흡수계수(550 nm) 월평균은 3.2~11.6 Mm⁻¹으로 관측되었으며, 광산란계수와 같이 2월에 가장 높고 9월에 가장 낮았다. 월평균을 최근 10년(2011~2020년) 월평균에 비해 2월을 제외하고 낮거나 비슷했다(그림 6.3.5).

안면도에서 관측한 에어로졸 광흡수계수(550 nm)의 연평균은 2012년에 9.4 Mm⁻¹로 가장 높았고 2018년까지 점차 감소하다가 이후 점차 감소하다가 2019년에는 8.2 Mm⁻¹로 2016년 수준으로 다시 높아졌다. 2021년 평균은 6.2 Mm⁻¹로 최근 10년(2011~2020년, 8.0±1.3 Mm⁻¹) 비해 약 20%로 감소하였으며, 2010년 관측 이후 2021년까지 증감 추세가 뚜렷하지 않았다 (*p*-value: 0.089)(그림 6.3.6).

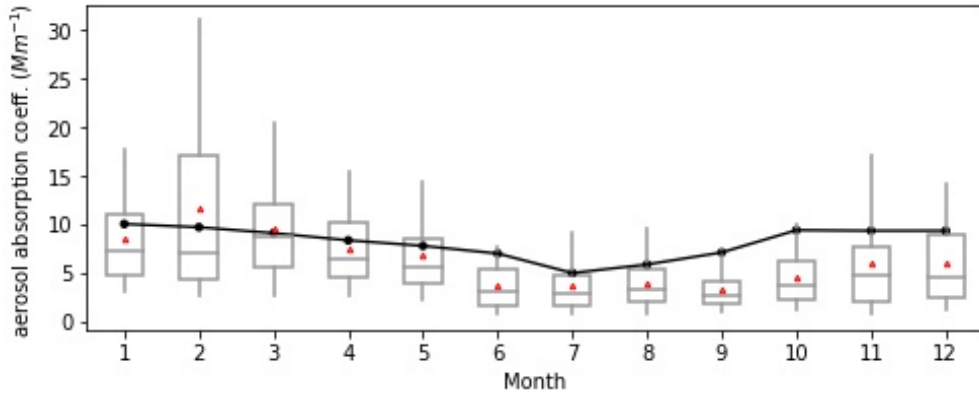


그림 6.3.5 안면도(AMY) 에어로졸 광흡수계수(550 nm, Mm^{-1})의 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선).

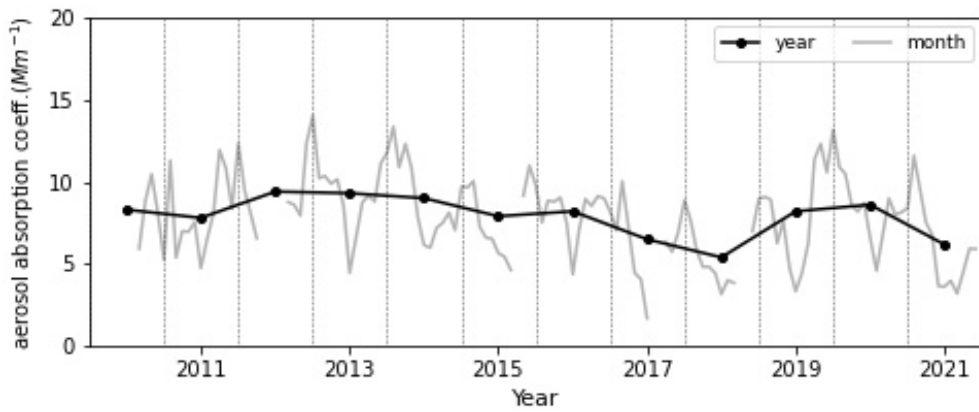


그림 6.3.6 안면도(AMY) 에어로졸 광흡수계수(550 nm, Mm^{-1})의 연변화.



6.3.3 에어로졸 광학깊이(AOD)

에어로졸 광학깊이(Aerosol Optical Depth; AOD)는 태양복사가 대기의 상하에서 지표까지 도달하는 동안 대기 중 에어로졸에 의해 감쇄 정도를 나타내는 척도로써, 에어로졸과 복사강제력의 평가에 중요하게 활용되는 요소이다. AOD는 태양광도계(Sun-Photometer)나 필터복사계(Filter Radiometer) 등의 관측기기를 이용하여 태양으로부터 스펙트럼을 통과하여 관측함으로써 산출된다.

안면도 기후변화감시소에서는 AOD 산출을 위하여 4개의 파장(862 nm, 500 nm, 412 nm, 368 nm)을 관측하는 정밀필터복사계(Precision Filter Radiometer; GAW-PFR)를 2010년 11월에 설치하였고, 2011년 12월에는 고산과 울릉도에 추가로 설치하였다. 광주(광주과학기술원) 위탁관측소는 2007년부터 500nm 파장을 포함한 CIMEL 社 태양광도계(Multiband photometer, CE318)를 이용하여 AOD를 산출하고 있다. AOD는 에어로졸의 양에 대체로 비례하며, 옹스트롬 지수는 에어로졸의 크기와 반비례 관계를 나타낸다.

정밀필터복사계(안면도, 고산, 울릉도)는 세계기상기구(WMO) 세계복사센터(PMOD/WR C3)의 산하기관인 세계 광학두께 연구 및 교정 센터(World Optical Depth Research and Calibration Centre; WORCC) 품질 관리프로그램을 적용하여 구름 제거 알고리즘 등을 사용하였다. 2021년에 제 5차 필터복사 국제비교실험(5th Filter Radiometer Comparisons, 주최: PMOD)에 참여하였으며, 나라별 장비 관측 비교 및 산출자료 비교를 통해 필터복사계 성능 및 자료품질 신뢰도를 확인하였다. 통계 방법은 1시간 동안 관측자료가 30% 이상인 자료를 시간 평균하였으며, 시간 평균을 이용해 일 평균 및 월, 연평균을 산출 계산하였다. 자료품질이 의심되는 파장 AOD는 다른 파장의 자료로부터 역법칙을 이용하여 산출하였다.

가. 안면도, 고산, 울릉도

안면도 AOD 및 옹스트롬 지수의 월 변동성을 그림 6.3.7와 그림 6.3.8에 나타내다, 최근 10년의 AOD 분포를 보면 6월에 가장 높고, 4분기(9~12월)에 대체로 낮았다 2021년 안면도 AOD는 6월이 가장 높았으며, 9월이 가장 낮았다. 2021년 월평균 AOD는 7월을 제외하고 최근 10년 보다 낮거나 비슷했다. 월평균이 1월, 3월, 7월, 11월이 고농도의 에어로졸 관측이 되어 연평균과 비슷하거나 높게 산출되었으며, 고농도 에어로졸 관측 달을 제외한 나머지 월은 최근 AOD 10년(2011~2020년) 평균보다 낮았다. 2021년 옹스트롬 지수는 1월과 3월, 5월에 최근 10년 평균보다 낮았는데, 이는 빈번하게 관측된 황사의 영향으로 풀이된다(제6장 2절 1항, 제6장 2절 3항, 제6장 5절).

3) The Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center

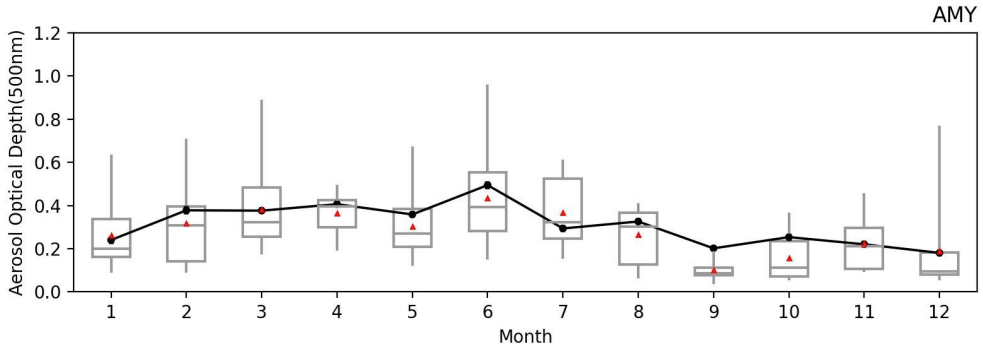


그림 6.3.7 2021년 안면도(AMY) AOD 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선).

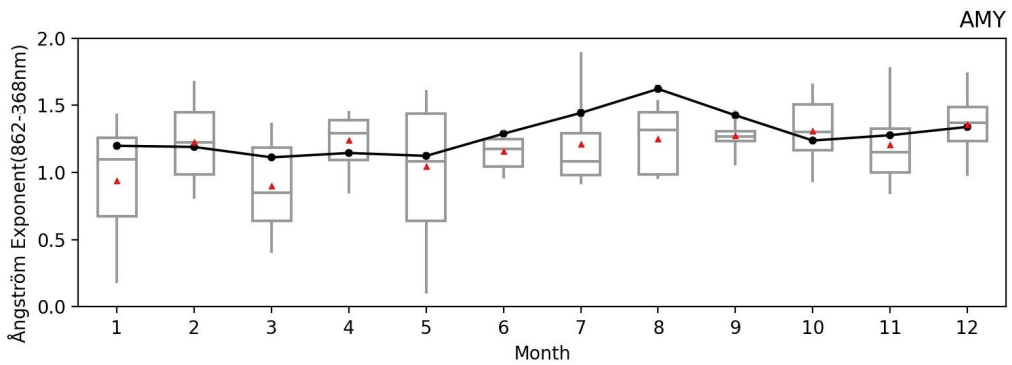


그림 6.3.8 2021년 안면도(AMY)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선).



고산에서 관측한 AOD와 옹스트롬 지수의 월 변동성을 그림 6.3.9과 그림 6.3.10에 나타내었다. 2021년 작은 황사 영향으로 3월의 AOD가 가장 높았다. 최근 9년(2012~2020년) 평균 대비 2021년에는 4월, 6~10월을 제외하고 높거나 비슷하게 관측되었다. 고산의 최근 9년(2012~2020년)과 2021년 평균 옹스트롬 지수는 겨울 및 봄철에 낮고 여름, 가을에는 높았다.

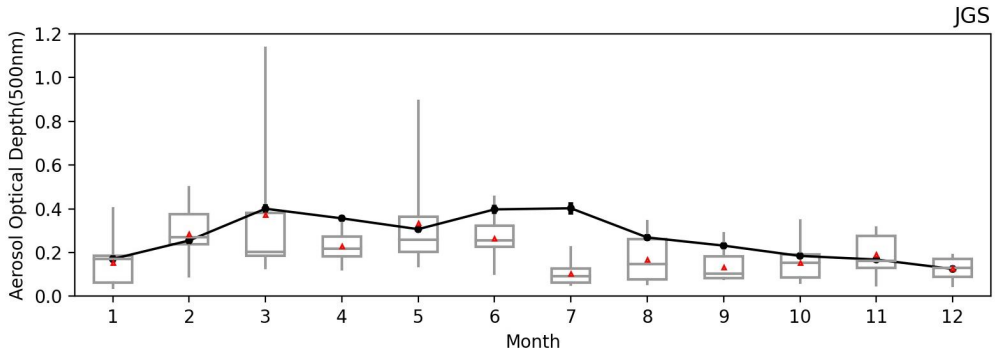


그림 6.3.9 2021년 고산(JGS)의 AOD 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2012~2020년 월평균(점-선).

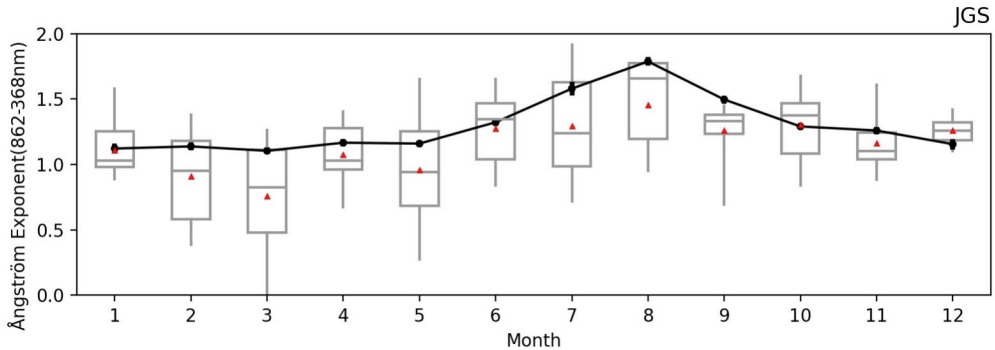


그림 6.3.10 2021년 고산(JGS)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2012~2020년 월평균(점-선).

그림 6.3.11과 6.3.12은 울릉도의 AOD와 옹스트롬 지수의 월 변동성을 나타내고 있다. 최근 10년 평균 및 2021년 연평균 자료의 경우 유효자료 수가 충분치 않으나 경향을 참고하기 위하여 제시하였다.

2021년에는 황사가 발생한 3월의 AOD가 가장 높고 옹스트롬 지수는 가장 낮았다. 1월, 3월, 7월을 제외하고 월평균은 최근 9년 평균에 비해 낮게 관측되었으며, 옹스트롬 지수는 1월, 3월, 9월을 제외한 높거나 비슷한 값을 나타내었다.

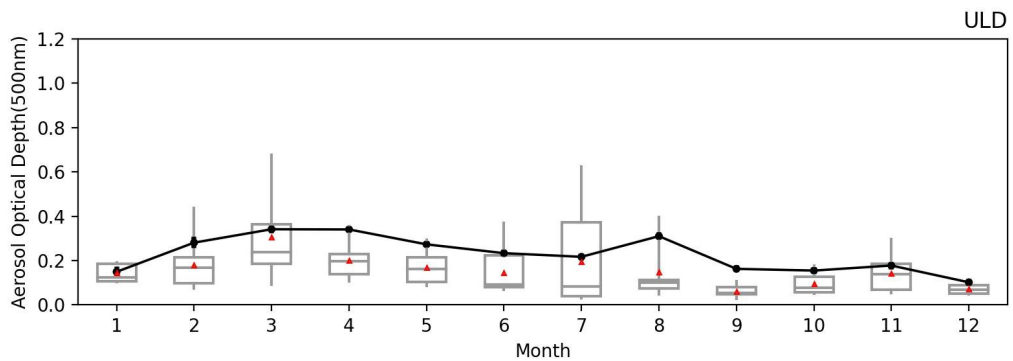


그림 6.3.11 2021년 울릉도(ULD)의 AOD 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2012~2020년 월평균(점-선).

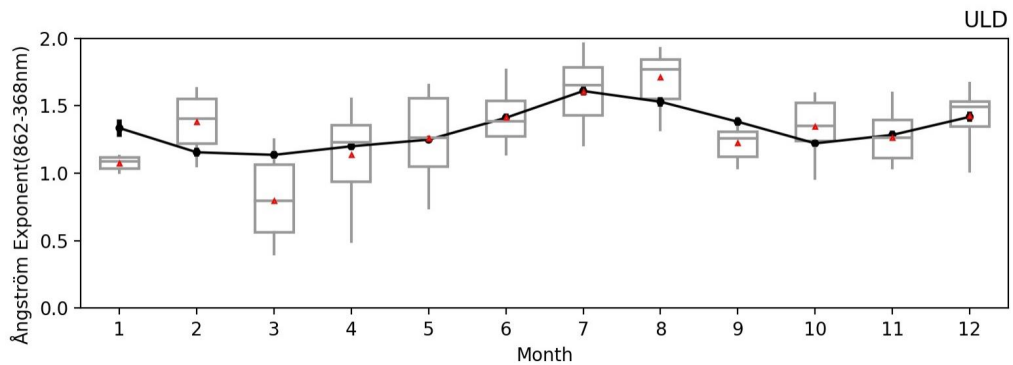


그림 6.3.12 2021년 울릉도(ULD)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2012~2020년 월평균(점-선).



그림 6.3.13과 그림 6.3.14은 안면도, 고산, 울릉도에서 관측된 AOD 및 옹스트롬 지수의 월 평균과 연평균을 나타내었다. 산출 결과 안면도와 고산은 비슷한 경향이며, 울릉도의 경우 연평균을 대표하기에는 자료가 부족하여 월평균만 제시하였다. 대체로 여름의 경우 농도가 낮아 평균값이 높고, 황사 및 조대입자가 많은 고농도 발생한 봄철 및 겨울철에는 낮은 값으로 산출되었다. 세 감시소 모두 연평균 AOD의 장기 변화 추세는 유의미지 않은 것으로 분석되었다.

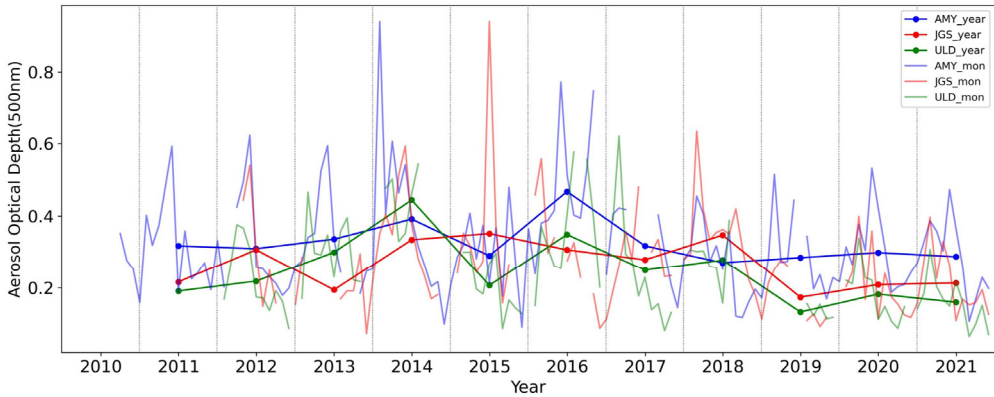


그림 6.3.13 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) AOD의 연변화.

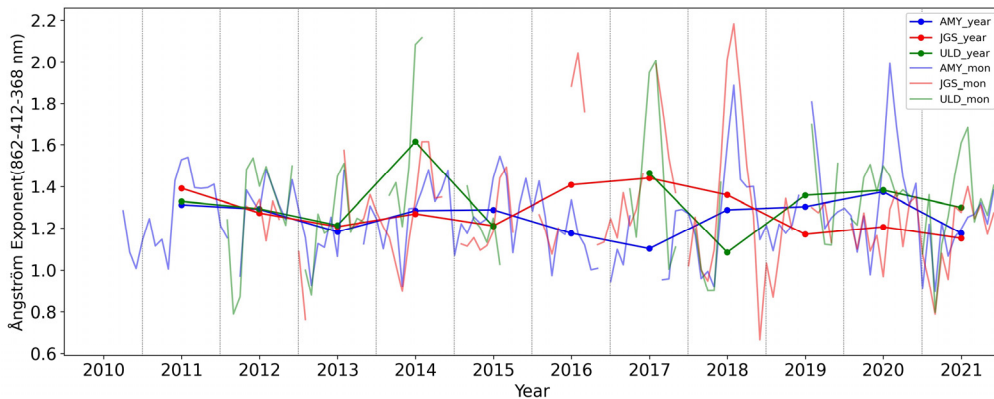


그림 6.3.14 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) AOD의 연변화.

나. 광주(광주과학기술원) 위탁관측소

광주(광주과학기술원) 위탁관측소는 광주광역시 북구 소재의 광주과학기술원 내에 위치 (35.22828°N, 126.84314°E)하고 있다. 에어로졸 광학깊이는 지표부터 대기 상부까지 존재하는 에어로졸에 의하여 감쇄되는 태양복사를 측정할 척도로써, 대기 중에 존재하는 에어로졸, 특히 미세먼지 농도 산출에도 해당 정보를 활용할 수 있다.

2004년부터 2006년까지 4개의 파장(440, 675, 870, 1020 nm), 2007년부터 2011년까지 7개의 파장(340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 nm), 2012년부터 현재까지 8개의 파장(340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640 nm)대를 이용하여 에어로졸 광학깊이를 측정하고 있으며, 에어로졸 광학깊이 산출물에 대한 정확성 및 신뢰도 향상을 위하여 매년 하반기에 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)에 태양광도계 검·교정을 의뢰하여 진행하고 있다. 광주 위탁관측소에서 측정된 에어로졸 광학깊이 데이터는 NASA의 Aerosol robotic network (AERONET)에 자동으로 전송되어 AOD 산출 알고리즘(Giles, David M et al., 2019)을 통하여 Level 1.0, 1.5, 2.0의 에어로졸 광학깊이 값이 제공되고 있다.

그림 6.3.15은 2007년부터 2021년까지 광주 위탁관측소 500 nm의 AOD 값을 나타내었다. 모든 AOD 데이터는 AERONET에 등재된 Level 2.0 데이터를 이용하여 분석을 진행하였다.

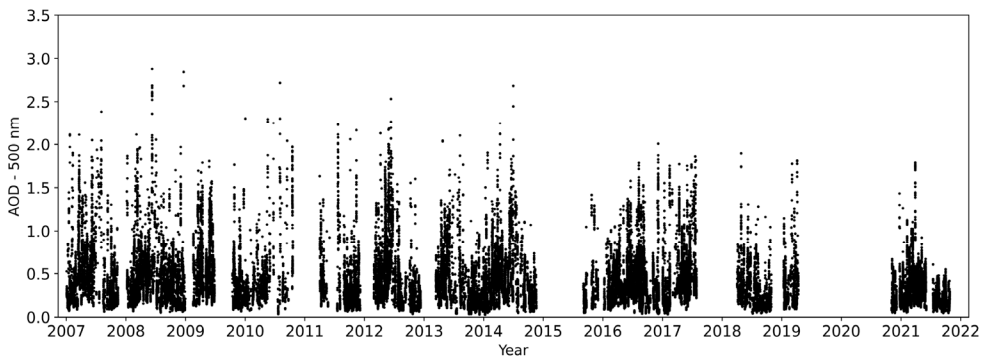


그림 6.3.15 2007~2021년 광주의 AOD(500 nm).



그림 6.3.16은 2007년부터 2021년까지 광주 위탁관측소에서 500 nm 파장대에서 측정된 연도별 평균한 AOD 값을 파란색으로, 광주지역의 PM10과 PM2.5의 연평균 농도변화는 에어코리아의 최종확정 측정자료를 이용(2021년 하반기는 실시간 측정자료를 이용)하여 각각 빨간색과 초록색으로 나타내었다. 그래프에서 점(• 모양)은 연평균 값을 나타내며, 선(— 모양)은 연평균 추세를 나타낸다. 측정 기간 중 기기 검·교정 및 유지보수를 위하여 측정이 이루어지지 않았던 기간을 고려하여 연도별 평균 AOD 값의 변화를 보았을 때, 해를 거듭할수록 AOD 값은 점차 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 연도별 평균 PM10과 PM2.5 농도가 점차 감소하는 경향과 동일하게 나타났음을 확인할 수 있었다.

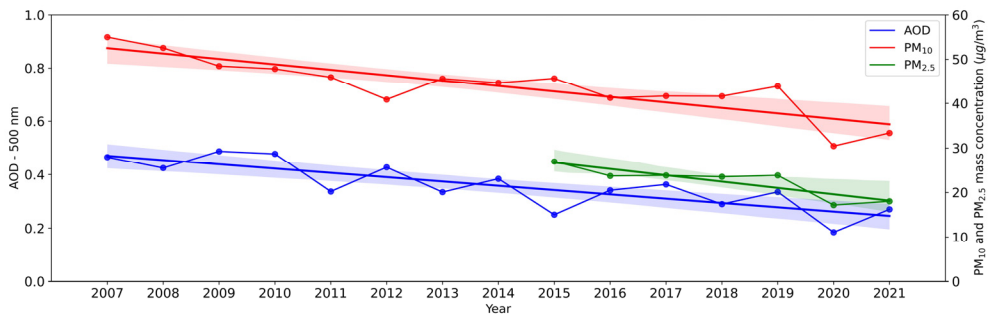


그림 6.3.16 2007~2021년 광주의 연평균 AOD(500 nm)와 연평균 PM10, PM2.5 질량농도.

그림 6.3.17은 2007년부터 2021년까지 광주 위탁관측소에서 500 nm 파장대에서 측정된 AOD 값의 월별 변동을 보여주며, 그림 6.3.18는 동일 기간 광주 위탁관측소에서 측정된 에어로졸 옹스트롬 지수(Ångström exponent, 440~870 nm)의 월별 변동을 보여준다. 그래프의 노란색 점이 월평균 AOD 값과 옹스트롬 지수를 나타낸 것이다. 월평균 AOD 값이 6월에 가장 높은 것을 확인할 수 있었으며, 그 이유는 여름철 상대적으로 높은 상대습도와 불안정한 대기로 인하여 대기 중에서 2차 생성 및 에어로졸의 흡습 성장이 활발하게 일어난 것을 기인하여 나타난 현상으로 보인다(Li et al., 2015; Yang et al., 2020). 전체적인 변화로는 6월에 가장 높은 AOD 값을 나타낸 후 겨울인 12월로 갈수록 그 값이 점점 낮아지다 다시 상반기에 증가하는 경향을 나타내는데, 그 이유는 봄철에 있는 황사 및 미세먼지의 영향이 작용한 것으로 보인다. 옹스트롬 지수는 AOD 측정 결과와 다르게 3월에 가장 낮은 값을 나타낸 뒤 계속 증가한 후 8월에 최댓값을 보이고 다시 감소하는 경향을 보였다. 앞서 언급하였듯이, 옹스트롬 지수와 에어로졸의 크기는 서로 반비례 관계이며 이에 따라 3월에 봄철 황사로 인한 조대입자의 영향을 많이 받아 옹스트롬 지수가 연중 가장 낮은 달로 나타났다. 따라서 상반기에는 봄철 황사와 같은 현상으로 인한 조대입자의 영향을, 하반기에는 상대적으로 작은 미세입자의 영향을 받은 것으로 사료된다.

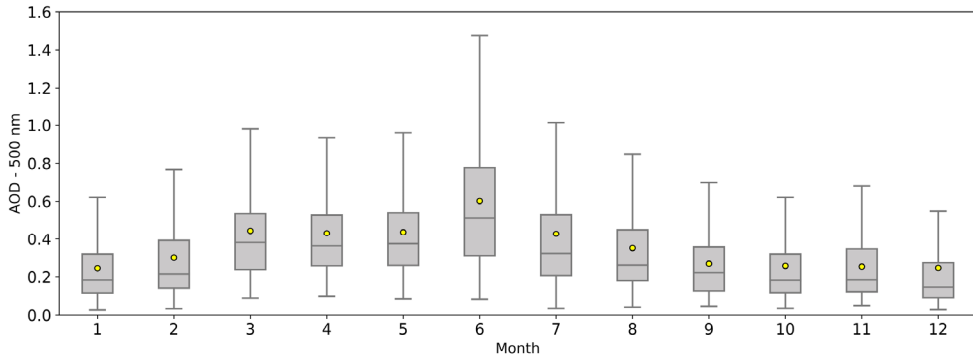


그림 6.3.17 2007~2021년 광주의 AOD(500 nm) 월변화(상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균).

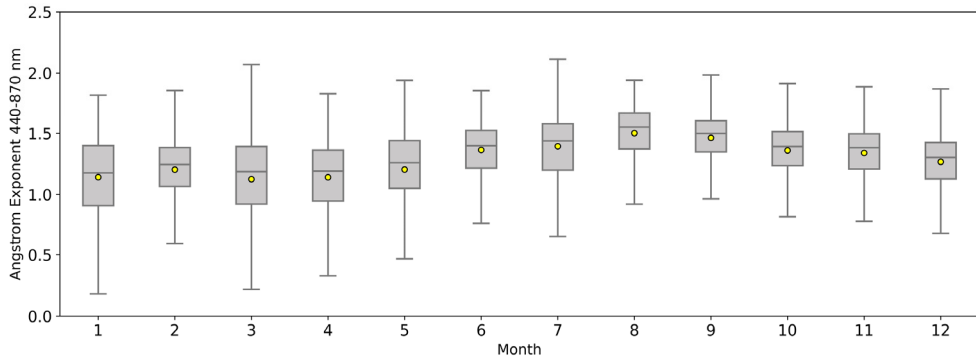


그림 6.3.18 2007~2021년 광주의 앙스트롬 지수(440~870 nm) 월변화(상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균).



6.3.4 에어로졸 연직분포

대기 중 부유물질의 연직광학특성을 감시하기 위하여 안면도 기후변화감시소에서 에어로졸 라이다(Light Detection and Ranging; LIDAR)를 운영하고 있다. 에어로졸라이다는 강수 시나, 정기 점검 또는 장애 시에도 관측을 중단하여 2021년의 자료 취득률은 약 87% 수준이다.

그림 6.3.19과 그림 6.3.20은 각각 2021년 안면도 에어로졸라이다 원시자료로부터 생산한 후방산란신호, 편광소멸도의 연직 일평균 시계열이다. 후방산란신호는 대기 중에 부유물질이 많거나 구름이 있을 경우 큰 값으로 관측되며, 편광소멸도는 비구형 입자 비중이 높고 비구형 정도가 클수록 값이 커지는데 대체로 빙정 상태의 구름이나 황사 탐지에 유용하다. 2021년 1월에서 5월 지표 부근(1 km 이하)에서 상대적으로 강한 신호가 관측되었다.

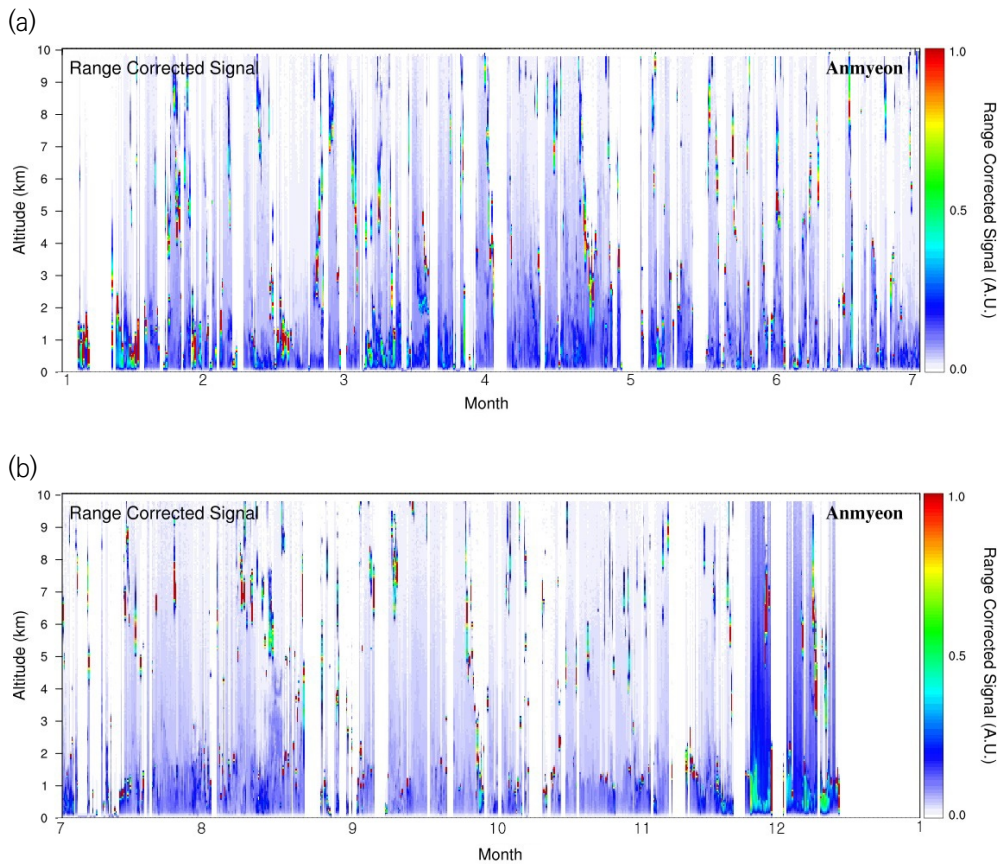


그림 6.3.19 2021년 안면도(AMY) 에어로졸 라이다 후방산란강도((a) 상반기, (b) 하반기).

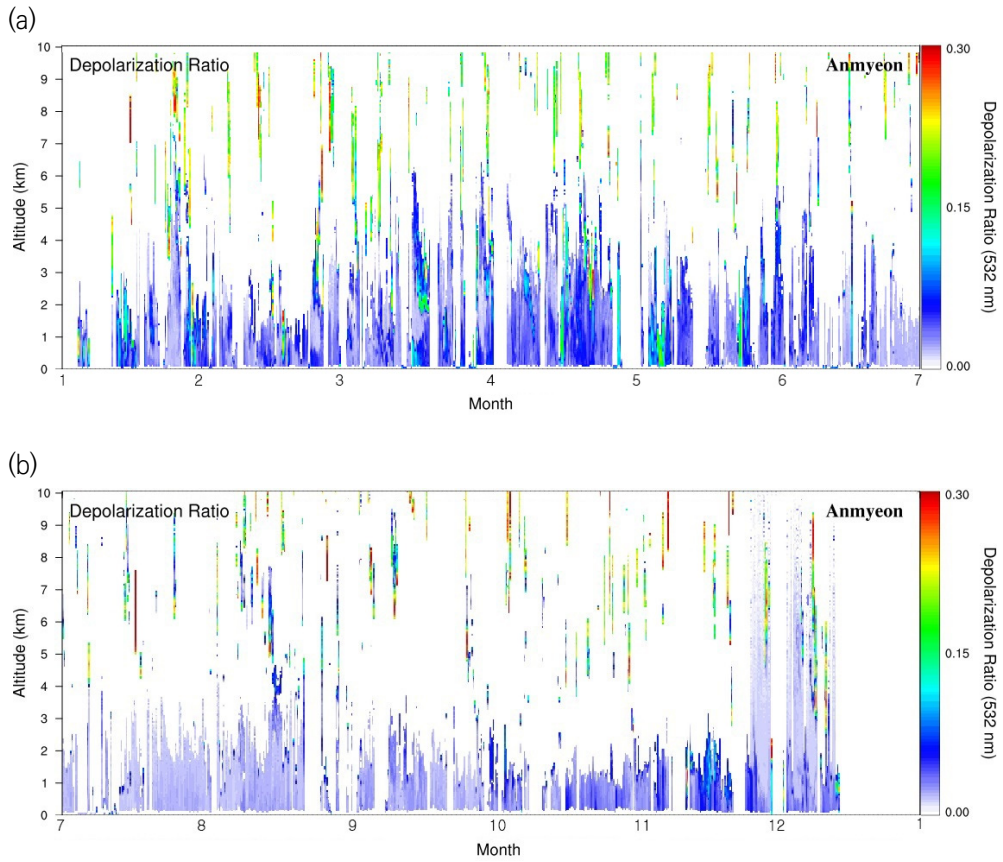


그림 6.3.20 2021년 안면도(AMY) 에어로졸 라이다 편광소멸도((a) 상반기, (b) 하반기).



6.4 에어로졸 화학 특성

6.4.1 수용성 이온성분

2016년도에 발간한 “WMO/GAW Report No.227”에 따르면, 저용량(Low Volume Sampler)의 PM10, PM2.5을 6일 간격(24시간 동안) 매 1회씩 채취하도록 권고하여, 기상청 기후변화 감시소에서는 이를 준수하여 안면도에서 6일 간격으로 PM10(직경 10 μm 이하인 에어로졸), PM2.5(직경 2.5 μm) 이하인 에어로졸을 포집하였다. 2021년 1월부터 2021년 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 측정한 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 대기환경 권고기준이 연평균 PM10 질량농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2021년도 안면도에서 채취한 PM10 중 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 시료는 약 16개, $40 \sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 5개의 시료이다. 특히, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 이온의 총 농도값을 보인 시료는 2월6일, 11일, 20일, 11월 19일의 시료, 고농도의 연무 사례로 보이며, 이 기간 NO_3^- 성분이 다른 성분에 비해 높은 농도와 조성비를 보였다.

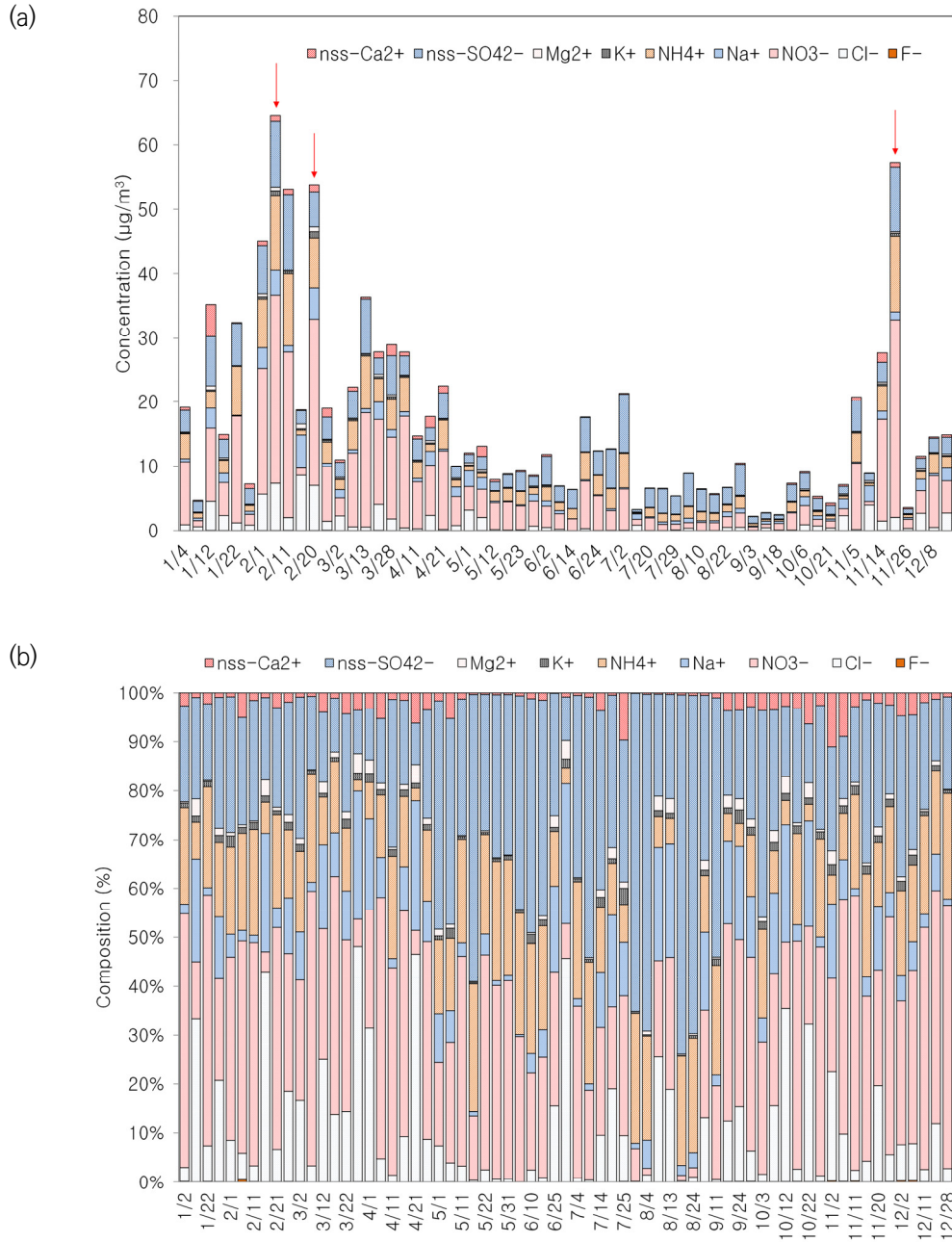


그림 6.4.1 안면도(AMY) 2021년 PM10 수용성 이온성분의 (a) 농도, (b) 조성비.

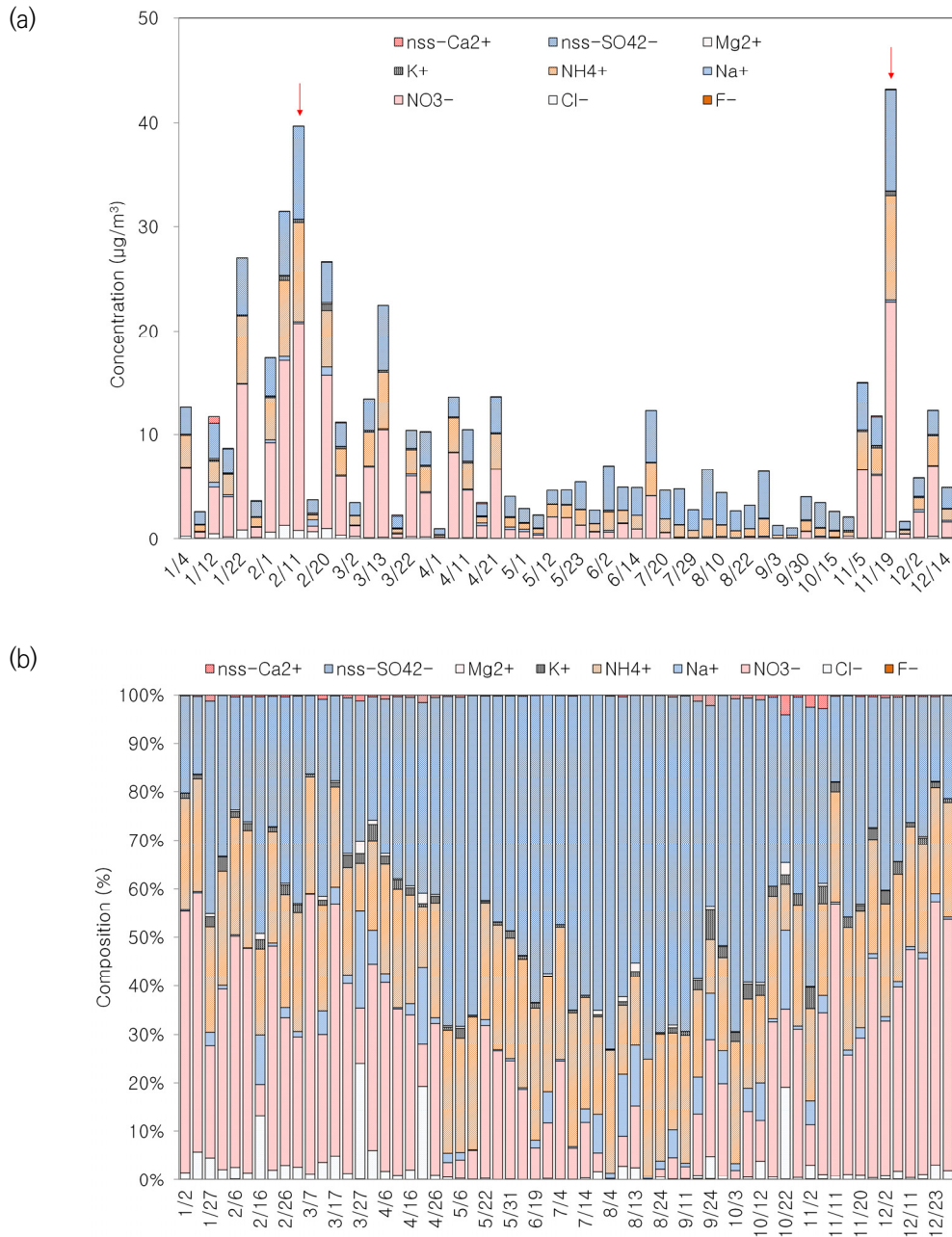


그림 6.4.2 안면도(AMY) 2021년 PM_{2.5} 수용성 이온성분의 (a) 농도, (b) 조성비.

안면도에서 측정된 PM10, PM2.5의 이온성분에 대한 전체 기간(2008~2021년)까지 총 14년간의 자료를 그림 6.4.3~6.4.4에 나타내었다. 이 중 최근 10년 평균자료(2011~2020년)와 2021년 자료를 비교하였다.

PM10에서 이차오염물질(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)중 nss-SO_4^{2-} 이 최근 10년간 평균 농도는 $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년은 $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균 농도보다 약 1.6배 정도 낮은 값을 보였다. NO_3^- 의 농도를 보면, 최근 10년 평균과 2021년도는 각각 7.0 , $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NH_4^+ 성분은 각각 3.2 , $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 최근 10년 평균 농도보다 이차오염물질은 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-} 은 2021년, NO_3^- 은 2020년, NH_4^+ 은 2016년에 낮은 경향을 보였다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 최근 10년간 평균 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년은 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균 농도보다는 1.1배 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)), 이차오염물질(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 2021년의 이차오염물질의 평균조성비는 각각 81.8%, 80.1%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 연도에 상관없이 1.3~4.7%를 보였다.

PM2.5에서 이차오염물질(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)중 nss-SO_4^{2-} 이 최근 10년 평균은 $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년은 $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년보다 약 1.8배 높은 농도를 보였다. 연도별로는 2011년이 가장 높고, 상대적으로 2021년에 낮은 경향을 보였다. NO_3^- 의 농도를 보면, 최근 10년 평균 농도가 $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년은 $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균 농도의 약 1.3배정도 높았다. 연도별로는 2008년에 가장 높고, 2017년에 가장 낮았다. NH_4^+ 성분은 2021년은 각각 3.0 , $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균 농도보다 낮은 값을 보였다. 연도별로는 2014년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 경향을 보였다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 최근 10년간의 평균 농도와 2021년은 각각 0.2 , $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균 농도의 약 4.6배 낮았다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 상대적으로 2019년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외의 성분은 2021년 Na^+ , Cl^- , K^+ , F^- , Mg^{2+} 성분이 최근 10년 평균 농도보다 낮은 값을 보였다(그림 6.4.4(a)). 연도별 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과(그림 6.4.4(b)), 연도별 이차오염물질(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)의 조성범위는 73.0%~95.6%이며, 2019년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 조성비를 보였다. 최근 10년과 2021년 이차오염물질의 조성비는 각각 91.7%, 94.8%로 나타났다. 반면에 해양기원 성



분들(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, 2021년 이차오염물질의 조성비가 다른 성분들에 비해 높았으나 최근 10년보다 낮았다.

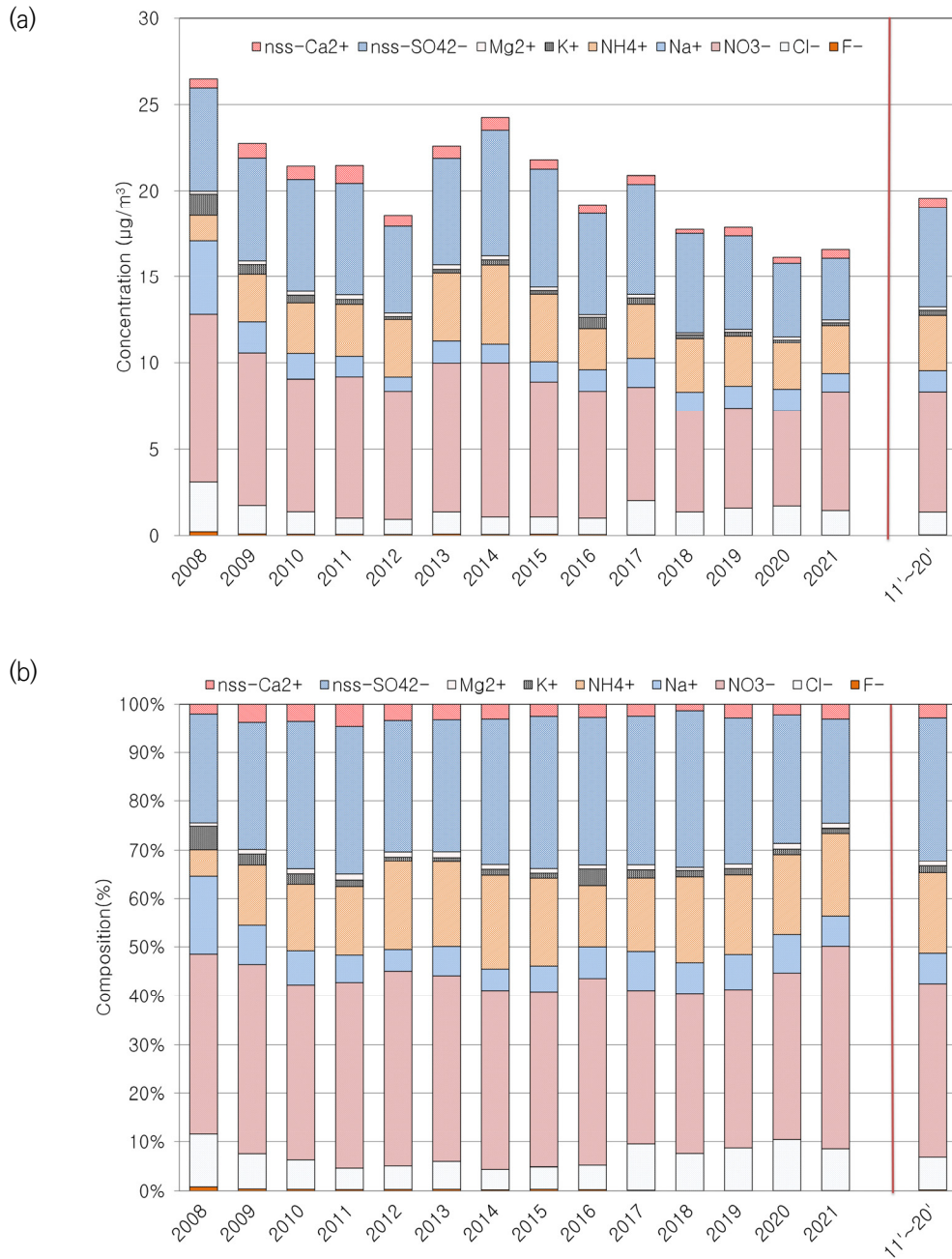


그림 6.4.3 2008~2021년도 안면도(AMY) PM10 수용성 이온성분의 연평균 (a) 농도, (b) 조성비.

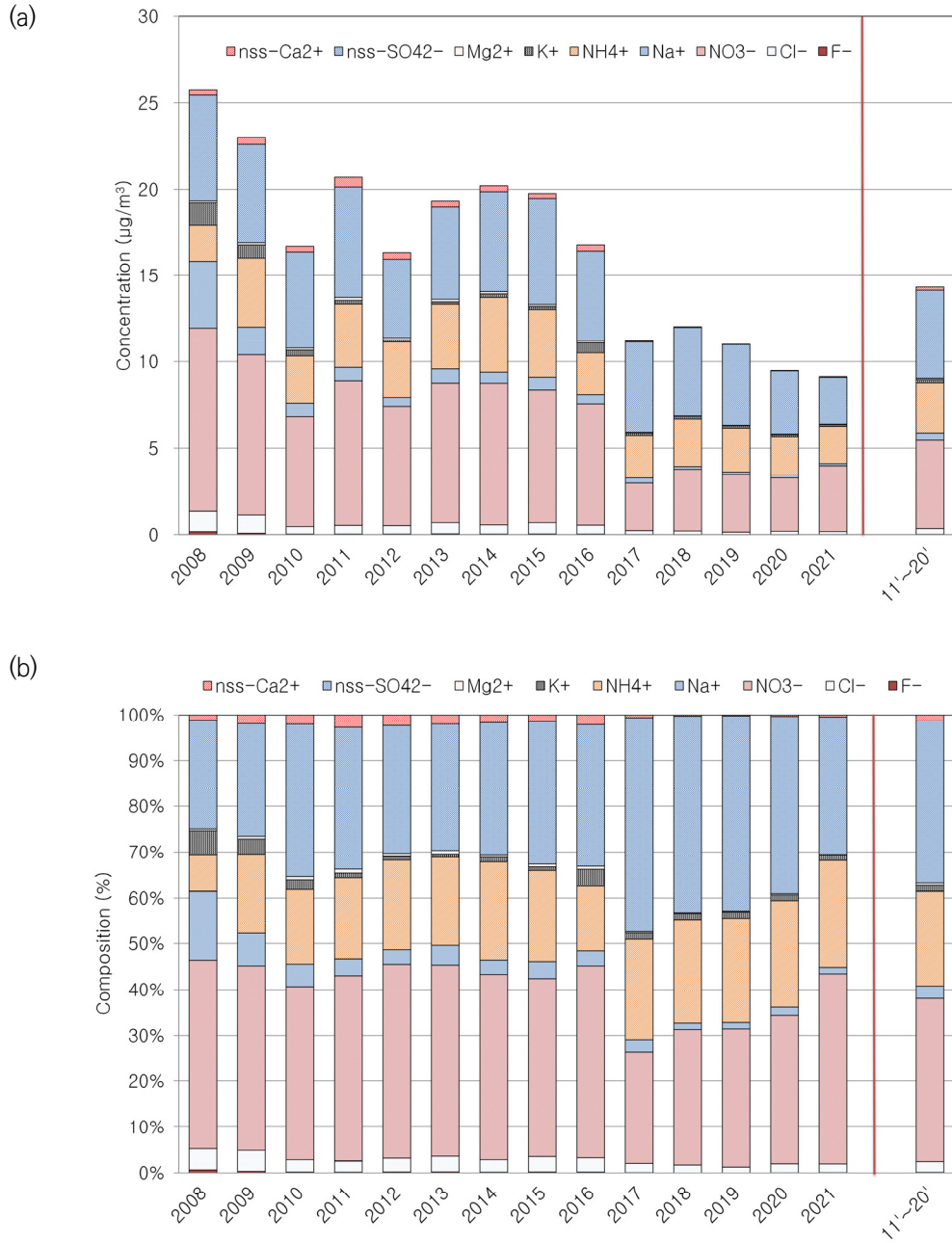


그림 6.4.4 2008~2021년도 안면도(AMY) PM_{2.5} 수용성 이온성분의 연평균 (a) 농도, (b) 조성비.

안면도에서 측정된 PM10, PM2.5 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 6.4.5~6.4.6과 같다. 여기서 PM10, PM2.5 이온성분의 계절별 평균 농도는 2011년부터 2020년까지 최근 10년간 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해연도 1,2월의 데이터를 평균하였고, 당해연도 12월의 자료는 사용하지 않았다. PM10, PM2.5 모두 여름철에 가장 낮고, 겨울철에 가장 높으며, 특히 NO₃⁻성분에 대한 영향이 큰 것으로 확인되었다. PM10에서 봄, 가을, 겨울철에 nss-Ca²⁺성분이 PM2.5보다 높은 농도를 보여 이는 황사의 영향으로 판단된다.

PM10에서 이차오염물질(nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺)의 최근 10년(2011~2020년)간과 2021년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 6.4.5(a)), nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺성분의 겨울, 봄, 여름, 가을철 농도 범위는 각각 2.4~7.1, 2.6~12.4, 2.0~4.8 µg/m³로 조사되었다. nss-SO₄²⁻성분의 2021년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 5.1(n=17), 3.1(n=16), 3.9(n=16), 2.4(n=13) µg/m³, NO₃⁻의 2021년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 12.4(n=17), 8.2(n=16), 2.6(n=16), 5.4(n=13) µg/m³, NH₄⁺의 2021년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 4.8(n=17), 2.8(n=16), 2.0(n=16), 2.0(n=13) µg/m³로 나타났다. 최근 10년의 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺성분일 때 봄철, 2021년에는 겨울철에 높은 것으로 조사되었다. 또한 토양 성분인 nss-Ca²⁺은 최근 10년간의 계절별 농도 범위는 0.3~0.7 µg/m³, 2021년 계절별 농도 범위는 0.1~0.8 µg/m³로, 앞서 말한 이차오염물질과 같은 계절에 높은 농도를 보였다.

PM10의 이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과(그림 6.4.5(b)), 이차오염물질(nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺)의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 78.0%, 82.8%, 88.1%, 78.5%로, 2021년은 각각 78.7%, 80.8%, 90.5%, 80.0%로, 최근 10년과 2021년 모두 여름철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다. 그리고 해염기원 성분들 성분(Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺)들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 17.4%, 12.5%, 9.0%, 16.4%를 보였고, 2021년의 계절별 조성비는 각각 17.3%, 14.2%, 7.7%, 15.7%로 나타나, 겨울철에 높은 농도를 보였다. 이는 해염성분이 겨울철에 농도가 증가하는 이유는 일반적으로 풍속이 증가하며, 대기의 수직적인 혼합이 매우 활발해지기 때문으로 알려져 있다(Carmichael *et al.*, 1997). 마지막으로 토양 기원의 nss-Ca²⁺ 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 2.6%, 3.2%, 1.7%, 3.2%, 2021년 조성비는 2.9%, 3.8%, 1.0%, 3.0%를 보여 봄철에 황사에 영향으로 높은 조성을 보인 것으로 보인다.

PM2.5에서 이차오염물질 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺의 최근 10년(2011~2020년)간과 2021년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 6.4.6(a)), 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 각각 2.1~5.8, 0.7~7.5, 1.4~3.5 µg/m³로 조사되었다. nss-SO₄²⁻성분의 2021년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 3.4(n=18), 2.1(n=18), 3.2(n=12), 2.7(n=10) µg/m³, NO₃⁻의 2021년 겨울,



봄, 여름, 가을철은 각각 7.5(n=18), 3.2(n=18), 0.7(n=12), 3.6(n=10) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NH_4^+ 의 2021년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 3.5(n=18), 1.7(n=18), 1.4(n=12), 2.0(n=10) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 세 성분 모두 2021년에는 겨울철에 높은 것으로 조사되었고, 이는 PM10과 같은 결과를 보였다. 토양 성분인 nss-Ca^{2+} 은 최근 10년간과 2021년의 계절별 농도를 비교해 보면, 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.10~0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.01~0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년은 봄철에, 2021년에는 겨울철에 가장 높았다.

PM2.5의 이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과(그림 6.4.6(b)), 이차오염물질(nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+)의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 90.0%, 91.7%, 95.4%, 91.7%로, 겨울과 여름철에 높은 경향을 나타내었다. 또한, 2021년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 93.7%, 95.8%, 97.5%, 95.9%로 나타내었다. 그리고 해염기원 성분들 성분(Na^+ , Cl^- , Mg^{2+})들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 7.3%, 5.6%, 3.0%, 5.0%를 보였고, 2021년의 계절별 조성비는 각각 4.7%, 2.5%, 1.6%, 4.7%로 나타내었다. 그리고 토양 기원의 nss-Ca^{2+} 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 1.1%, 1.5%, 0.9%, 1.4%, 2021년 조성비는 0.4%, 0.5%, 0.2%, 0.4%를 보였다.

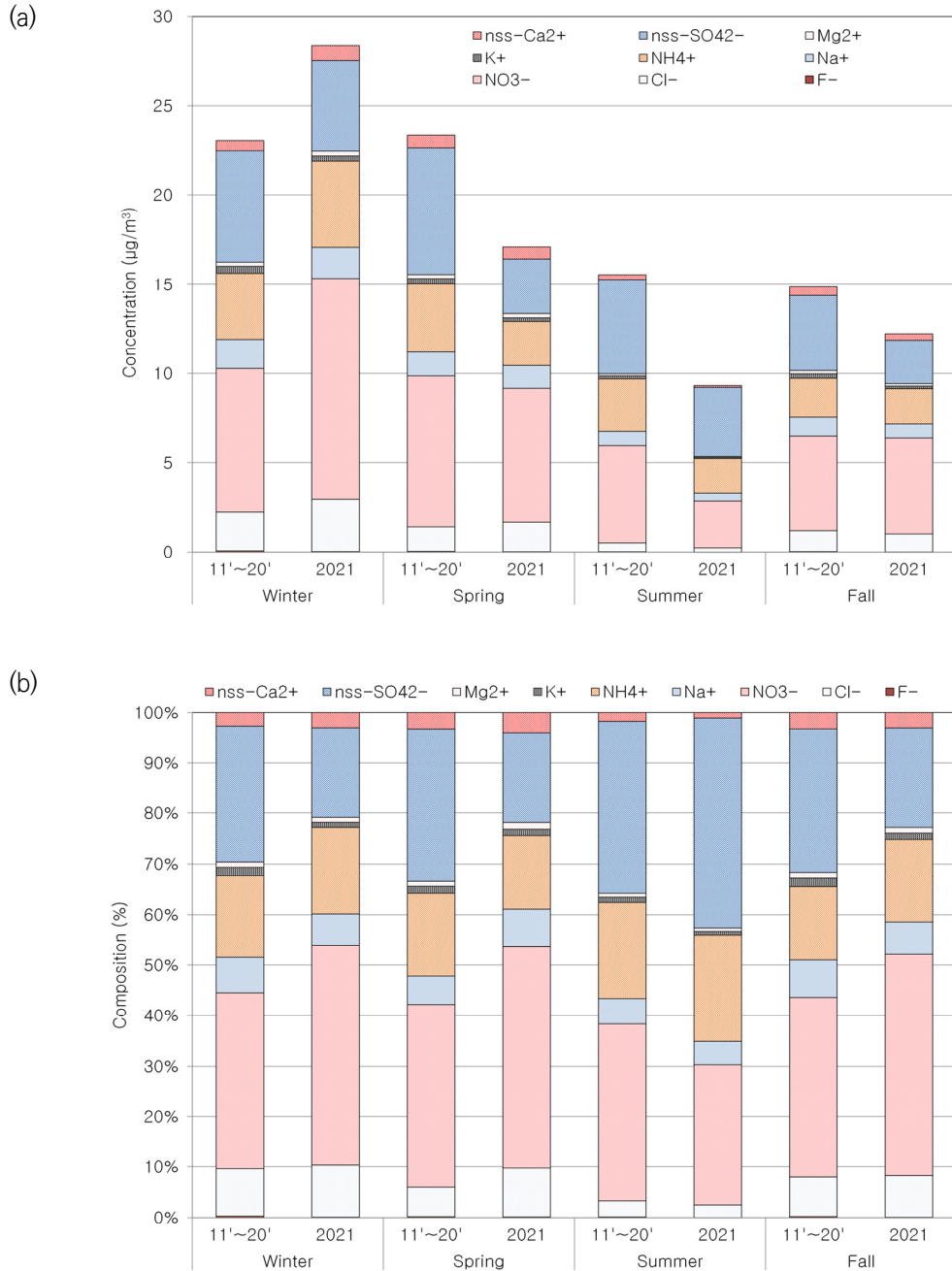


그림 6.4.5 안면도(AMY) 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 PM10 수용성 이온성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성비.

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

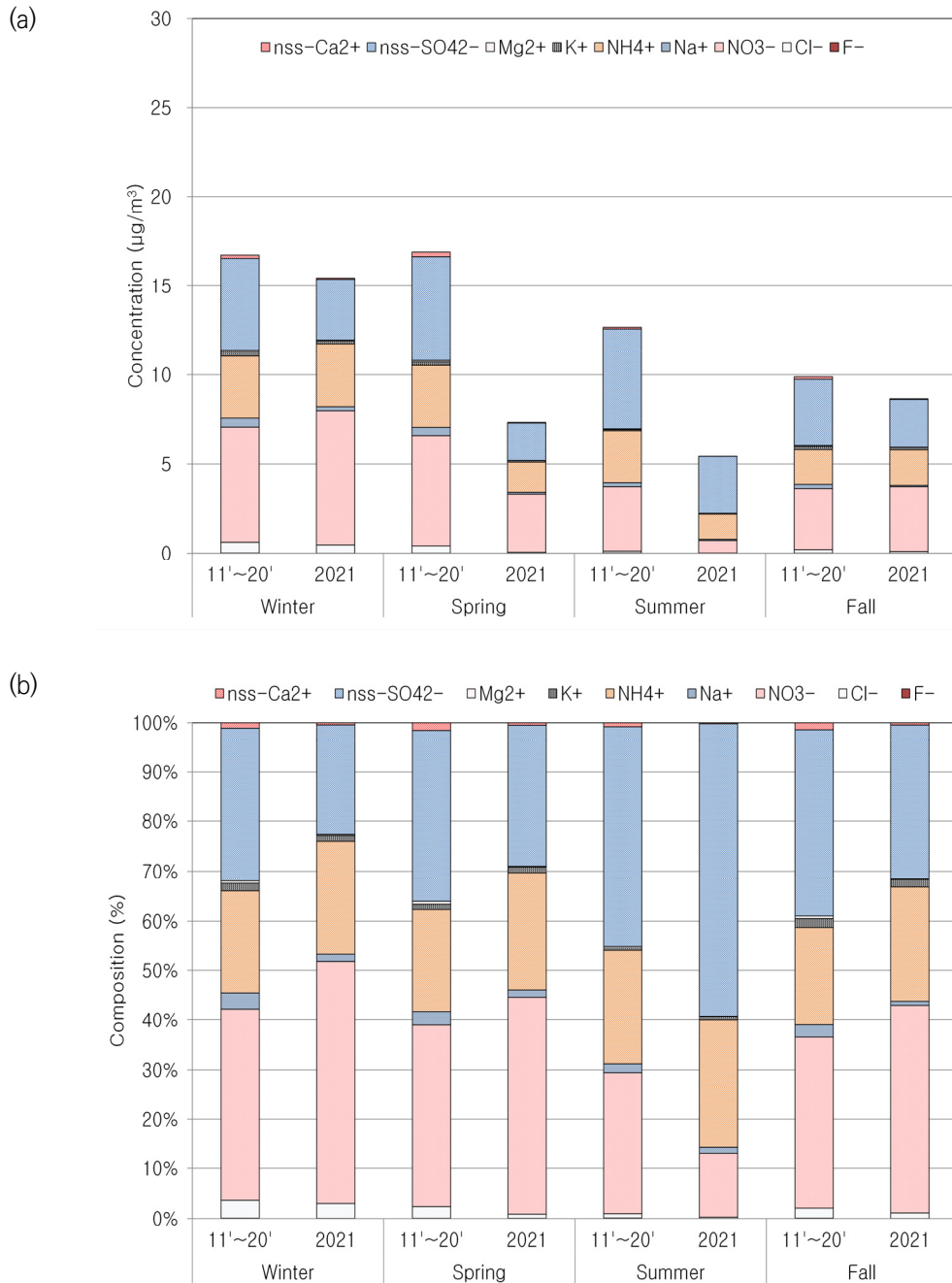


그림 6.4.6 안면도(AMY) 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 PM_{2.5} 수용성 이온성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성비.

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

6.4.2 PM10, PM2.5 원소 성분 특성

2021년 1월부터 2021년 12월까지 안면도에서 PM10, PM2.5 시료를 채취하여 원소 성분 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 원소 성분의 연도 및 계절별 농도와 조성비는 그림 6.4.8~6.4.9와 같다.

그림 6.4.8은 2018년부터 2021년 약 4년간의 원소 성분을 분석하여 연평균 자료로 나타내었다. 2018~2020년 PM10과 PM2.5 모두 S성분의 농도가 가장 높았으나, 2021년에는 Na성분이 가장 높은 농도를 보인 것으로 조사되었다. 이는 해염과 토양 영향을 동시에 받은 것으로 보이며, 오염원 분석 등을 통해 추가적인 연구가 필요하다. PM10과 PM2.5 모두 S, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na 성분의 조성비가 약 92.6~98.0%를 차지하는 것으로 확인되었다. 특히 PM2.5에서 S의 조성비가 약 48.5%~68.2%를 차지하여 가장 높은 조성비를 보였다.

PM10과 PM2.5의 계절별 원소 성분을 그림 6.4.9에서 살펴보면, PM10, PM2.5에서 S인 황 성분이 대부분 계절에서 가장 높은 농도를 보였다. PM10 원소 성분 중 S 성분이 약 31.3%, PM2.5 원소 성분 중 약 61.3%로 여름철에 높은 농도를 보였다. 특히 PM10에서의 Al, K, Ca, Mg, Fe, Ti 등과 같은 토양에서 발생한 성분이 봄철에 71.1%의 높은 조성을 보여 2021년 봄철에 발생한 황사의 영향으로 판단된다.

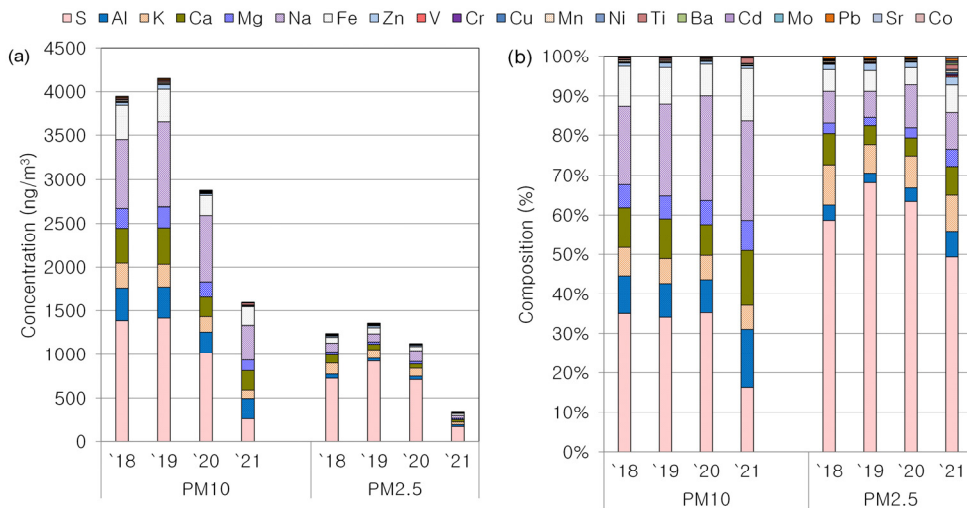


그림 6.4.8 2018~2021년 안면도(AMY)에서 측정된 PM10, PM2.5 원소 성분 (a) 농도, (b) 조성비.

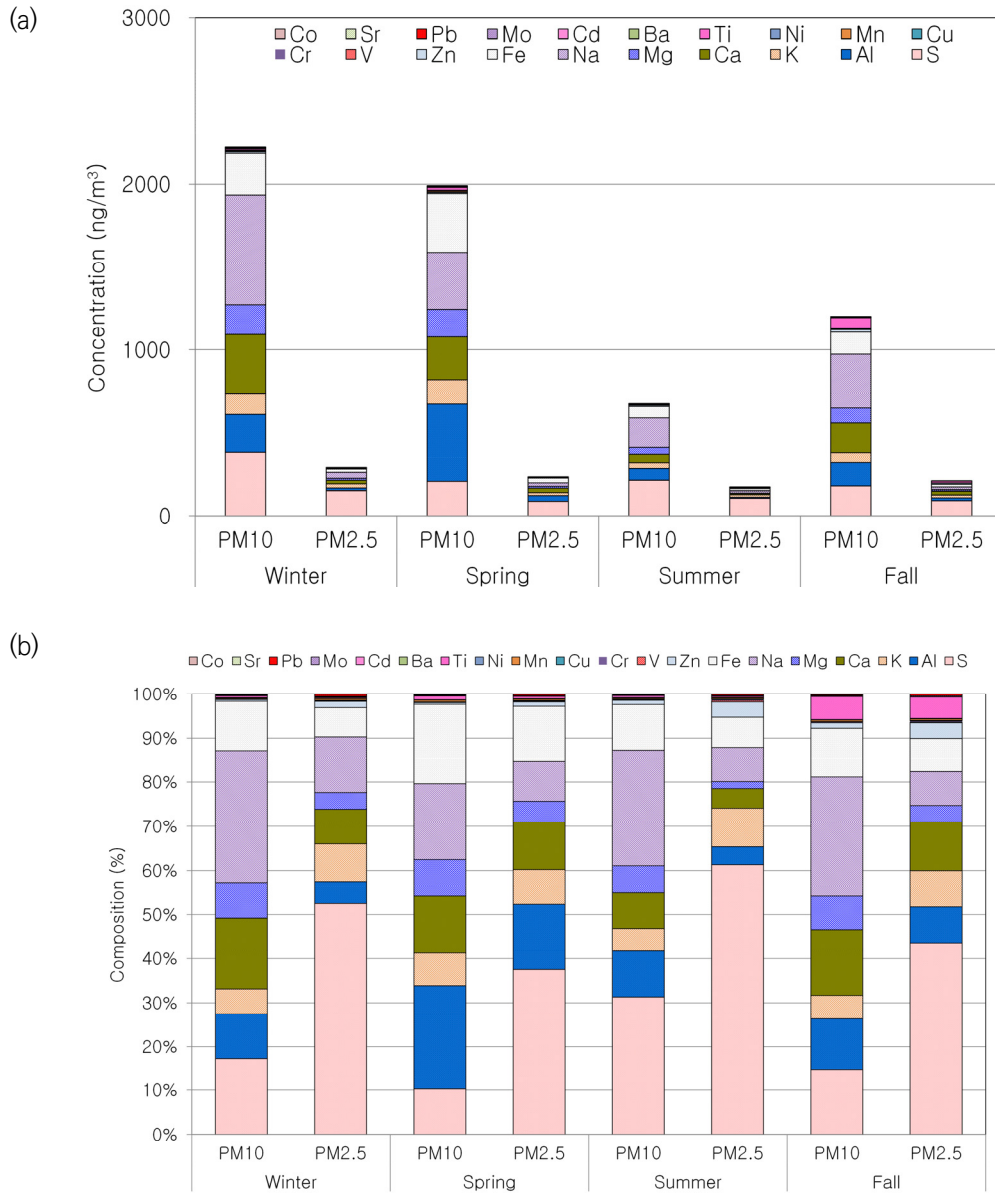


그림 6.4.9 안면도(AMY) 2021년 PM10, PM2.5 원소 성분의 계절별 평균 (a) 농도, (b) 조성비.

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

6.5 2021년 에어로졸 특성

6.5.1 고농도 에어로졸

2012년 이후 국내 황사 관측일수는 감소하는 추세였으나(국립기상과학원, 2021), 2021년에는 이례적으로 총 9회의 황사가 관측되었고, 5년 만에 황사경보가 2회나 발표되는 등 짙은 황사도 출현하여 기후변화감시소에서 관측된 에어로졸 농도에 영향을 주었다. 황사경보가 포함된 사례일은 3월 28일~4월 1일, 5월 7일~9일이었다. 안면도, 고산, 울릉도 지역의 3월 평균 PM10 질량농도는 각각 59, 86, 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5월 평균은 각각 55, 51, 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 황사 사례일을 제외하면 3월은 41, 39, 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5월 32, 31, 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 즉, 황사로 인해 안면도와 울릉도의 PM10 월평균 농도는 각각 18~23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 증가한 반면, 고산에서는 20~47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사로 인한 PM10 농도 증가분이 가장 컸다.

3월 28일에서 4월 1일 사이 관측된 황사는 몽골과 중국 내몽골고원에서 발원하여 산둥반도, 랴오둥반도를 거쳐 우리나라에 유입된 것이다(김정은 등, 2022). 그림 6.5.1은 3월 28일~4월 1일 동안 안면도, 고산, 울릉도의 입자크기별 부피농도와 PM10 질량농도, 그리고 안면도의 에어로졸 광학 특성이다. 입자크기별 부피농도의 경우 고산과 울릉도에서는 1 μm 이상의 조대입자 영역을 중심으로 증가하였으나 안면도에서는 APS가 관측하는 대부분 크기의 입자가 모두 증가하였다. 지점별 PM10 최댓값은 안면도, 고산, 울릉도에서 각각 746 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3월 30일 3시), 1,812 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3월 29일 22시), 591 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3월 29일 10시)로, 고산의 농도가 가장 높았다. 이 농도는 각 지점의 2021년 연평균의 각각 23.0, 50.3, 28.1배에 해당하는 값이다. 안면도 광산란 계수(550 nm)는 2021년 연평균의 9.8배에 해당하는 734 Mm^{-1} 까지 증가하였으나 산란용스트롬지수는 -0.14로 황사 발원지와 유사하게 0에 가까운 값을 보이는 등 황사의 광학적 특성이 뚜렷하게 관측되었다(Andreae et al., 2002; Valenzuela et al., 2015). 광흡수계수는 최대 27 Mm^{-1} 로 연평균의 3.1배 수준으로 증가하였으며, 이는 토양에 포함된 산화철이 가시광선의 짧은 파장을 강하게 흡수하기 때문으로 해석된다. 3월 28일(28일 09:00~29일 09:00)과 29일(29일 09:00~30일 09:00)에는 안면도에서 관측한 PM10 중 이온성분의 질량농도가 30~45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도이고, 특히 NO_3^- 의 성분이 각각 12.6과 21.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 우세하였다. 또한 토양에서 기원한 칼슘 이온(Ca^{2+})은 3월 28일과 29일에 각각 1.7, 4.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연평균(0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 각각 3.4, 8.0배에 해당하는 농도였다(그림 6.5.2). 3월 28일과 29일에 PM10 원소 성분의 질량은 10~35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었고, 이 중 토양에서 기원한 성분(Al, K, Ca, Mg, Fe, Ti)이 3월 28일과 29일에 각각 87.2%, 92.6%를 차지하였다.



5월 7일과 8일 황사는 고비사막에서 발원하여 산둥반도를 거쳐 우리나라에 영향을 준 사례이다. 안면도, 고산, 울릉도에서 관측된 크기별 부피농도를 보면 $1\ \mu\text{m}$ 이상의 입자가 증가한 것을 볼 수 있다. PM10 질량농도는 안면도, 고산, 울릉도에서 각각 $840\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5월 7일 24시), $555\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5월 7일 22시), $390\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5월 8일 6시)로 안면도에서 가장 높았으며 이들 농도는 지점별 연평균의 25.5, 15.4, 18.6배에 해당한다. 안면도 광산란계수와 광흡수계수 최댓값은 각각 $783\ \text{Mm}^{-1}$, $29\ \text{Mm}^{-1}$ 로 3월 고농도 황사 시와 유사하며, 산란옹스트롬지수는 -0.38 로 3월 고농도 황사와 같이 조대입자가 우세한 특성을 보였다. 5월 7일(7일 09:00~8일 09:00)과 8일(8일 09:00~9일 09:00) 안면도 PM10 이온성분의 질량은 $30\sim 35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고, 3월 황사와 다른 점은 Ca^{2+} 뿐 아니라 Na^+ , Cl^- 성분의 농도가 높다는 점이다. 이때의 안면도 풍속은 약 $4\sim 10\ \text{m/s}$ 로 서쪽에서 강한 풍속에 의해 해염성분이 유입된 것으로 판단된다. Ca^{2+} 는 약 $12\sim 22\%$ 에 불과한 반면 Na^+ , Cl^- 의 조성은 이온 성분 전체의 $40\sim 50\%$ 를 차지하였다. 원소 성분의 질량농도는 $15\sim 58\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었고, 토양 기원 성분(Al, K, Ca, Mg, Fe, Ti)의 조성비는 5월 7일과 8일에 각각 90.7% , 78.5% 로 3월 황사 사례와 유사하였다.

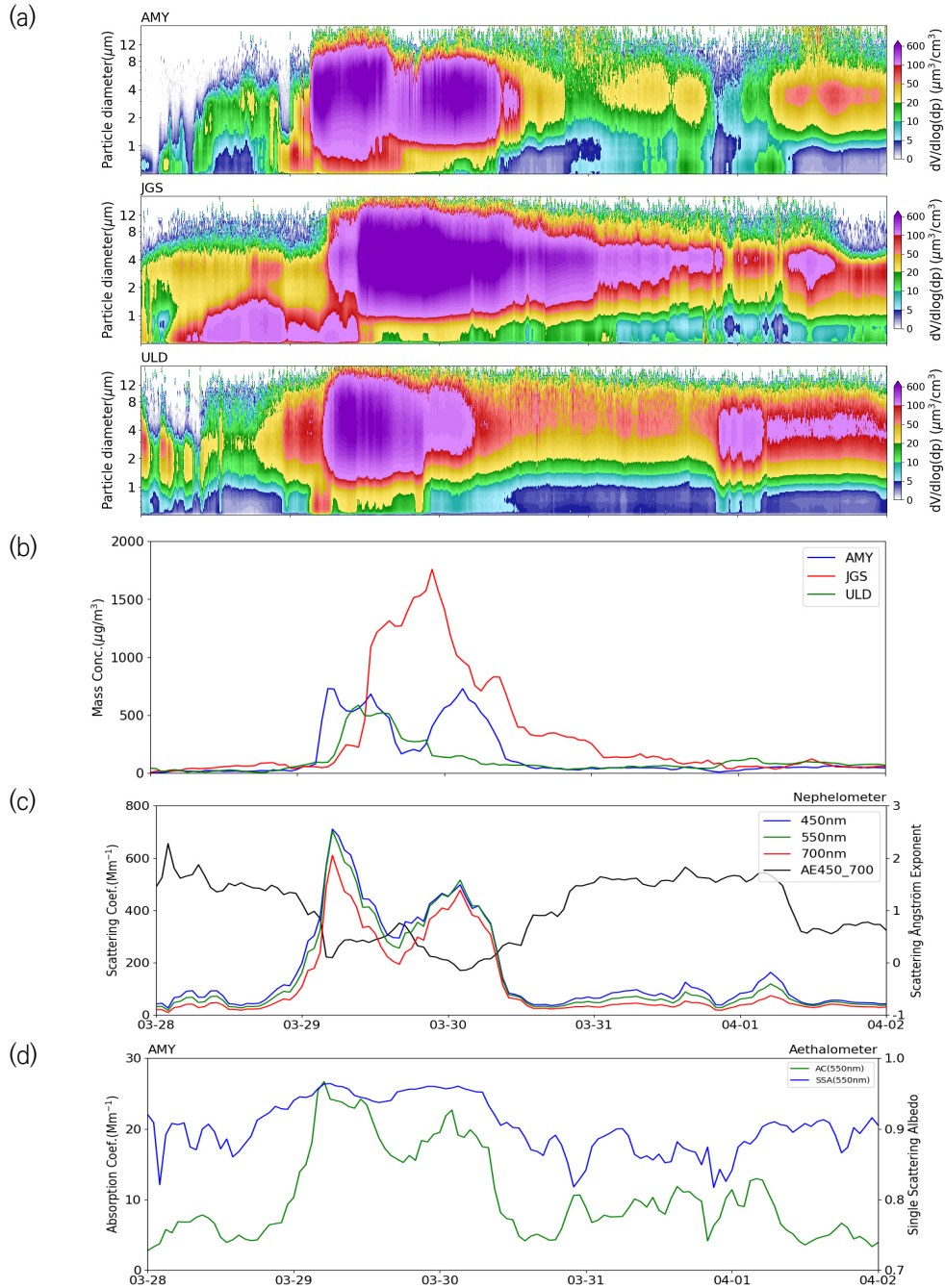


그림 6.5.1 3월 28일~4월 1일 사이 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)에서 관측된 (a) 크기별 에어로졸 부피농도, (b) PM10 질량농도, 안면도에서 관측된 (c) 광산란계수와 산란옹스트롬지수, (d) 광흡수계수와 단일산란알베도(각 550 nm).

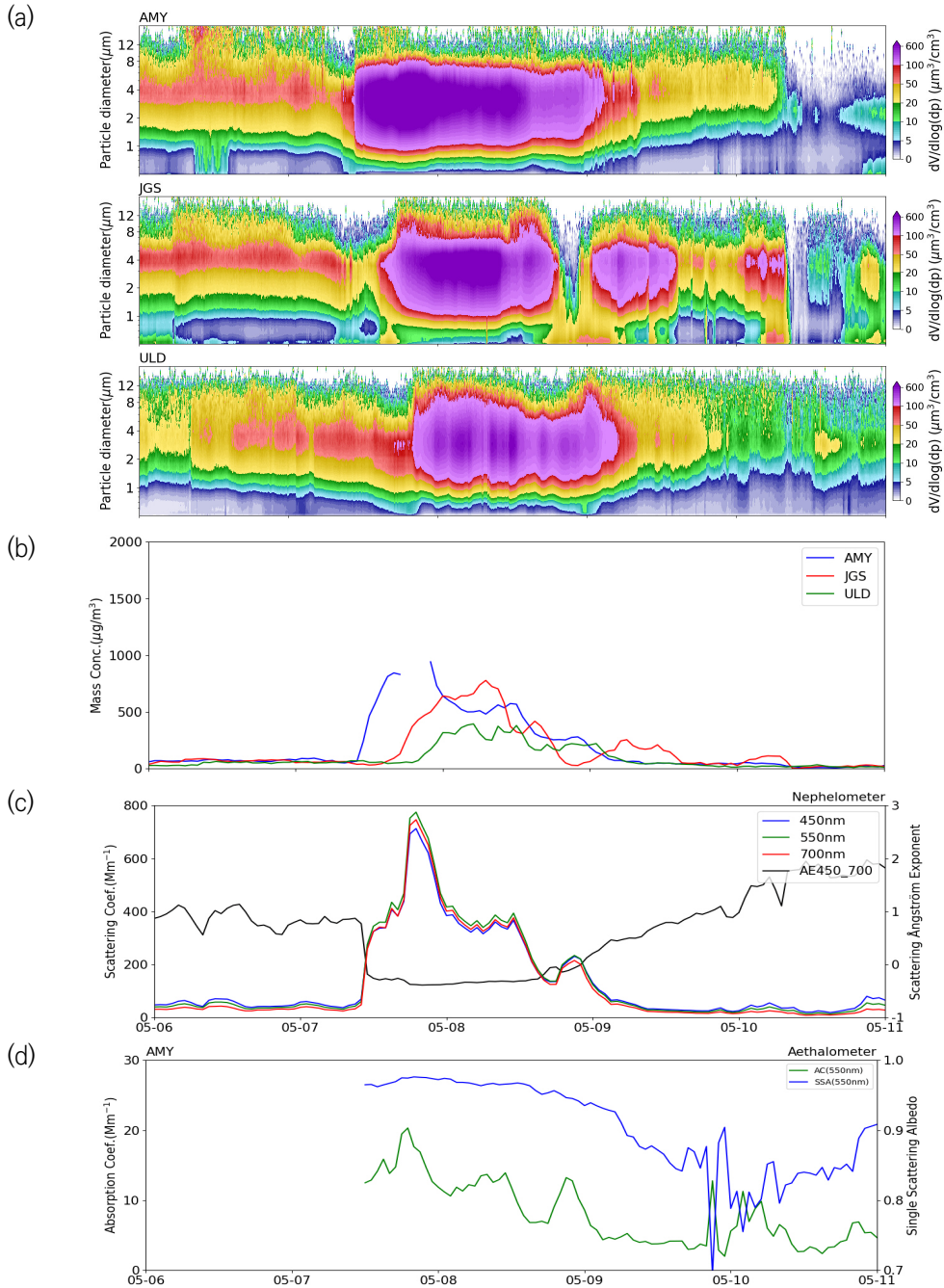


그림 6.5.2 5월 6일~10일 사이 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)에서 관측된 (a) 크기별 에어로졸 부피농도, (b) PM10 질량농도, 안면도에서 관측된 (c) 광산란계수와 산란Ångström지수, (d) 광 흡수계수와 단일산란알베도(각 550 nm).

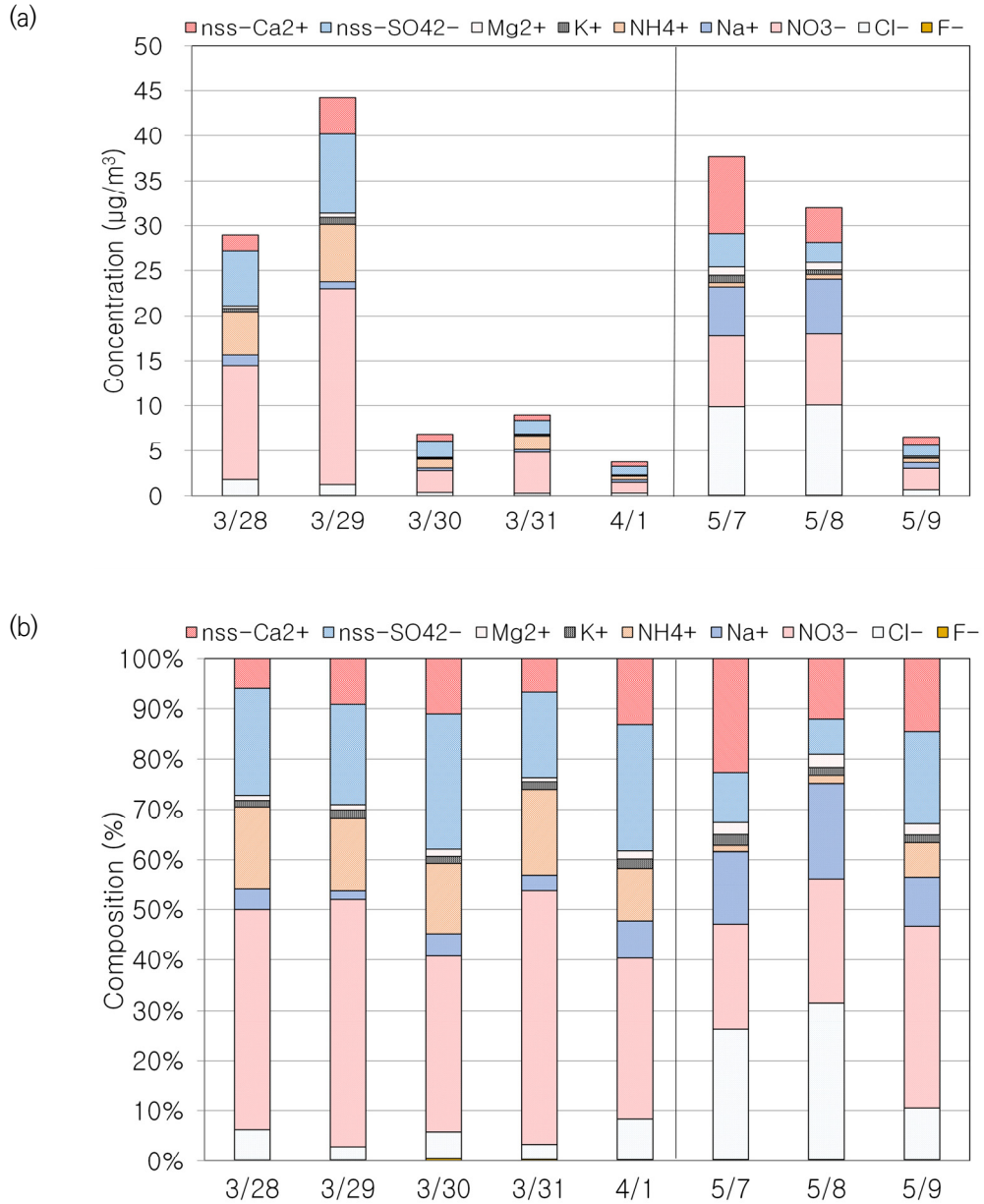


그림 6.5.3 안면도(AMY) 고농도 에어로졸(황사) 사례의 PM10 이온성분의 (a) 농도와 (b) 조성비.

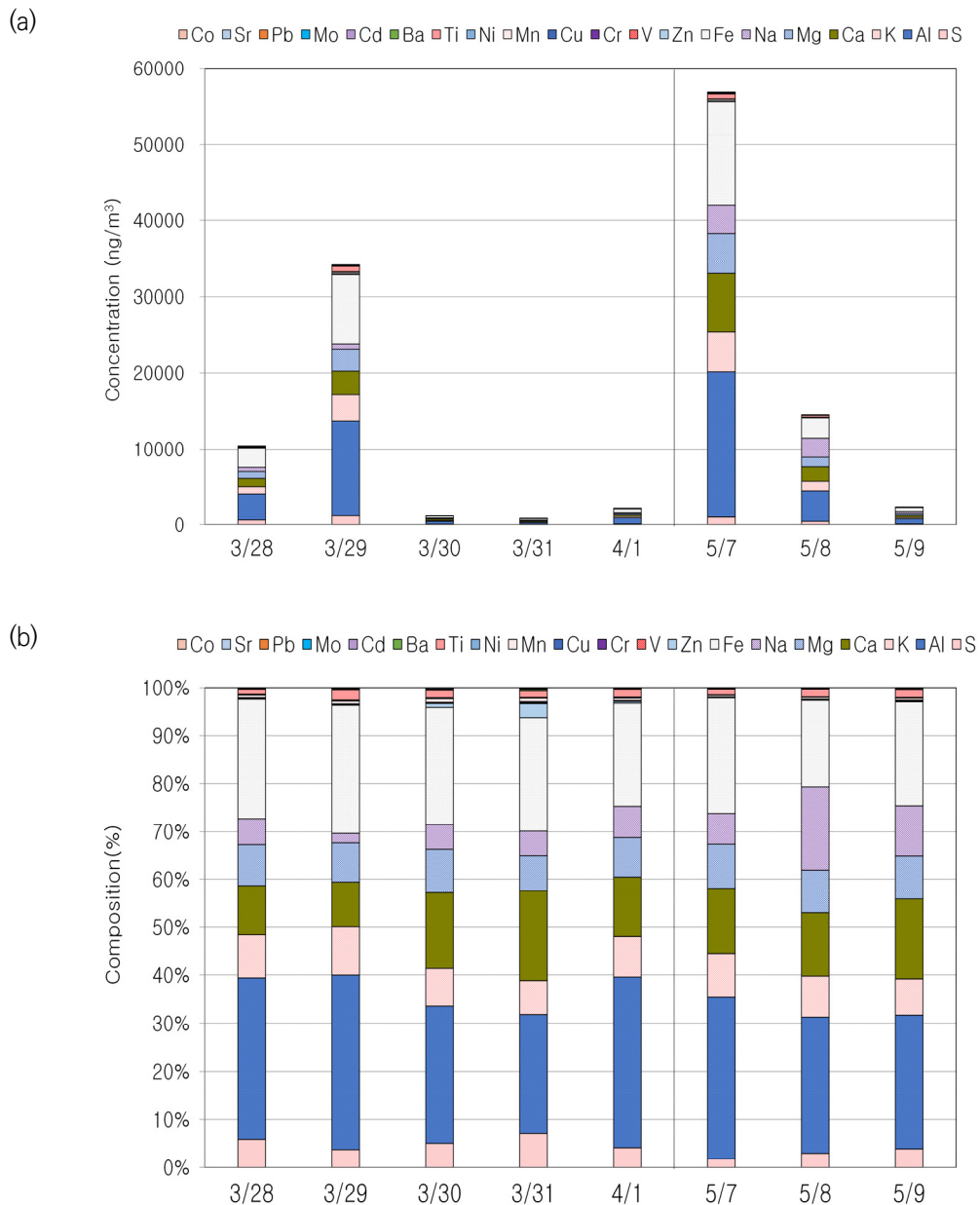


그림 6.5.4 안면도(AMY) 농도 에어로졸(황사) 사례의 PM10 원소성분의 (a) 농도와 (b) 조성비.

6.5.2 화학성분의 발생기원 분석

2021년 PM10의 발생기원을 살펴보기 위하여 수용성 성분을 이용하여 주성분 분석(PCA, Principal component analysis)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 지역의 2021년 최근 10년(2011~2020년)과 2021년의 발생원 성분을 분류하였다.

최근 10년은 황산암모늄과 질산암모늄에 의한 영향이 약 27.2%, 해염 25.0%, 토양 22.7%, 생물성 연소 관련으로는 11.3%로 나타났다. 그러나 2021년에는 해염과 생물성 연소가 가장 큰 비중을 차지했고, 그다음으로는 황산암모늄과 질산암모늄, 토양순으로 나타났다.

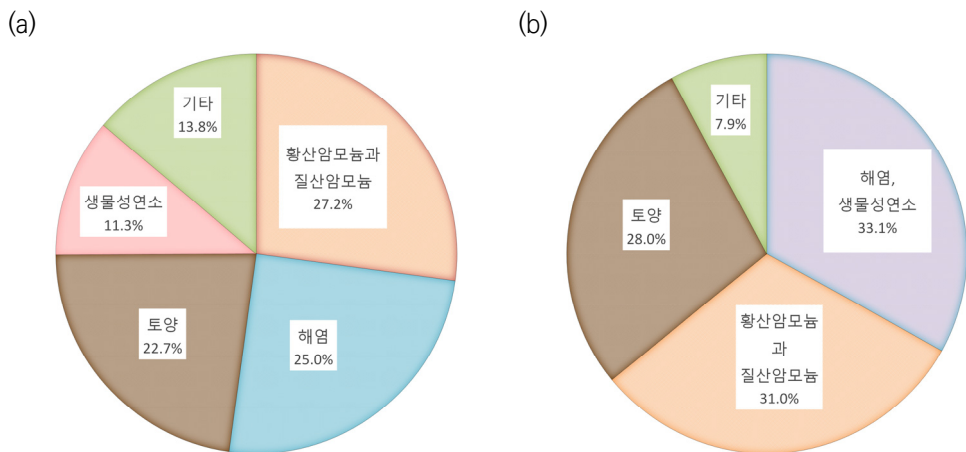


그림 6.5.5 안면도 PM10 에어로졸의 (a) 최근 10년(2011~2020년), (b) 2021년 발생원 분석.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제7장 대기복사

7.1 대기복사 감시 목적	126
7.2 직달일사, 산란일사	127
7.3 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)	129
7.4 지구상향복사, 지구하향복사	131
7.5 순복사	133
7.6 2021 대기복사 특성	134



제7장 대기복사

- 태양하향복사(전천일사) : 안면도 173.6 W/m² (최근 10년 대비 +1.1%)
고 산 165.7 W/m² (최근 10년 대비 +3.3%)
- 태양하향복사는 안면도의 경우 여름철 길었던 일조시간의 영향으로, 고산은 일조시간의 전반적인 증가로 인해 다소 높았음.

7.1 대기복사 감시 목적

태양에너지는 지구상에 살아가는 생명체들의 필수 에너지원이자 대기를 움직이는 1차 원동력이다. 모든 물체는 온도에 따른 복사에너지를 방출하며 빈의 변위법칙에 의해 온도가 높은 물체일수록 짧은 파장의 복사에너지를 방출한다. 이에 따라 표면온도가 약 6000K에 이르는 고온의 태양은 단파장의 에너지를, 약 300K의 지구는 장파 에너지를 방출하게 된다. 한편, 태양에서 방출된 에너지는 지구 대기를 통과하면서 구름 또는 대기 구성 성분들에 의해 산란 및 반사되거나 흡수된 이후 나머지 일부가 지표까지 도달하게 되는데, 이러한 과정을 통해 지구로 전달된 에너지는 지표면과 대기를 가열시켜 지구 또한 복사에너지를 방출하게 된다. 장기적으로 지구 전체가 방출하는 에너지는 태양으로부터 받은 에너지의 총량과 균형을 이룬다.

인간 활동은 지구 대기의 구성성분에 변화를 일으켰고 이는 지구복사 평형에 영향을 미쳐 기후변화를 발생시키게 되었다. 특히 산업화에 따른 인위적 오염물질의 배출은 과거와는 비교할 수 없는 속도로 대기 조성물질에 급격한 변화를 일으키게 되었고, 이에 따른 기후변화는 인류의 생존을 위협하고 있다. 기상청에서는 이러한 기후변화에 대응하기 위한 목적으로 지구복사와 태양복사 요소를 각각 관측하는 대기복사의 관측을 수행하고 있다.

복사자료는 크게 태양복사와 지구복사로 나뉘며, 이들 각각의 상향·하향복사(총 4개 요소), 태양 하향복사의 두 요소인 직달일사와 산란일사, 그리고 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. 관측자료는 1분 간격으로 기록되어 품질검사 과정을 거쳐 시간 단위로 분석이 수행되며 자료의 단위는 W/m²이다.



7.2 직달일사, 산란일사

직달일사는 대기 중에서 산란 또는 흡수되지 않고 태양으로부터 직접 입사되는 복사량을 말한다. 직달일사는 태양추적장치를 통해 태양을 지향하여 관측하며, 센서에 도달하는 광경로 상의 구름 및 대기 구성성분 등의 영향을 받는다. 산란일사는 태양복사가 지표면에 도달하기 전에 최소 한 번 이상 산란된 복사를 뜻하며, 차폐판을 이용해 직달일사를 차단하여 관측한다. 산란일사 또한 구름과 대기 구성 성분 등의 영향을 받지만, 직달일사와는 달리 광경로보다는 주변 입자 분포 특성에 따라 강도가 달라진다.

그림 7.2.1은 안면도와 고산의 2021년 직달일사, 산란일사 월평균을 최근 10년 평균(2011~2020년)과 비교한 것이다. 안면도의 직달일사 월평균 최대는 4월의 180.1 W/m^2 , 최소는 1월의 103.7 W/m^2 으로 각각 최근 10년 평균보다 3%와 2% 낮았다. 고산의 경우 월평균 최대는 4월의 178.9 W/m^2 , 최소는 1월의 83.3 W/m^2 으로 각각 최근 10년 평균보다 9%, 23% 높았다. 2021년의 직달일사는 전체적으로는 최근 10년 평균과 비슷한 월변동을 보였으나 안면도는 봄철에는 다소 낮고 여름철에 높았던 반면, 고산은 봄철에 다소 높고 여름철에 낮았다.

산란일사의 경우 안면도는 6월에 129.1 W/m^2 의 최댓값과 12월에 45.4 W/m^2 의 최솟값을 보였고 이는 각각 최근 10년 평균보다 5.8%, 11.9% 높은 수치였다. 고산의 경우에도 마찬가지로 6월에 126.3 W/m^2 의 최댓값과 12월에 49.2 W/m^2 의 최솟값을 보였으며, 이들은 모두 최근 10년 평균보다 약 3%가량 높았다. 2021년의 산란일사 또한 직달일사와 마찬가지로 전체적으로 최근 10년과 비슷한 월변동을 보였지만 고산에서 7월 다소 낮은 값을 보였다.

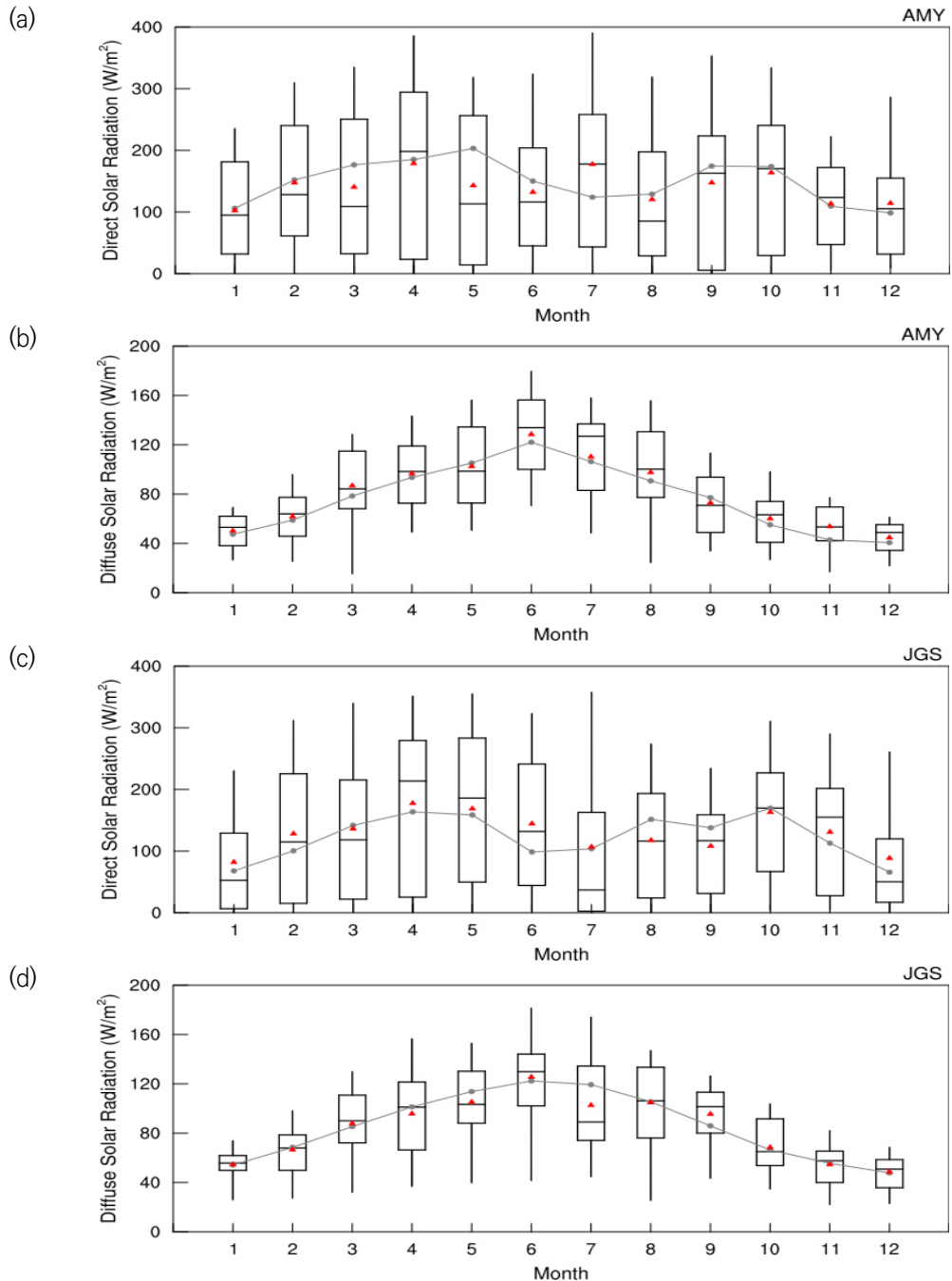


그림 7.2.1 2021년 안면도(AMY)의 (a) 직달일사, (b) 산란일사와 고산(JGS)의 (c) 직달일사, (d) 산란일사 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간 값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선).



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 계산할 수 있다(전천일사 계산값 = 직달일사 × cos(태양천정각) + 산란일사). 이렇게 계산된 전천일사는 직접 관측한 전천일사 값과 상호비교하여 자료품질 관리에 활용하고 있다. 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 2021년 안면도의 태양상향복사와 태양하향복사 월평균과 고산의 태양하향복사 월평균을 나타낸 것이다. 안면도의 태양상향복사 월평균 최대는 7월의 45.1 W/m², 최소는 12월의 19.7 W/m²이었고, 태양하향복사의 월평균 최대는 7월에 243.5 W/m², 최소는 1월에 95.8 W/m²이었다. 고산의 2021년 태양하향복사 최대는 6월의 236.4 W/m²였으며, 최소는 12월의 85.1 W/m²로 나타났다.

2021년 태양상향복사와 태양하향복사는 안면도의 경우 직달일사와 마찬가지로 최근 평균 대비 5월에 낮고 7월에 높았고, 고산에서는 6월에 높고 8월에 낮은 모습을 보였다. 한편, 2021년 12월 안면도에서는 자료 수신체계 및 관측환경 개선을 위해 대기복사 데이터 로거를 이원화하는 작업을 수행하였으며, 이 과정에서 태양하향복사 관측장비를 노장에서 옥상으로 이전하였다.

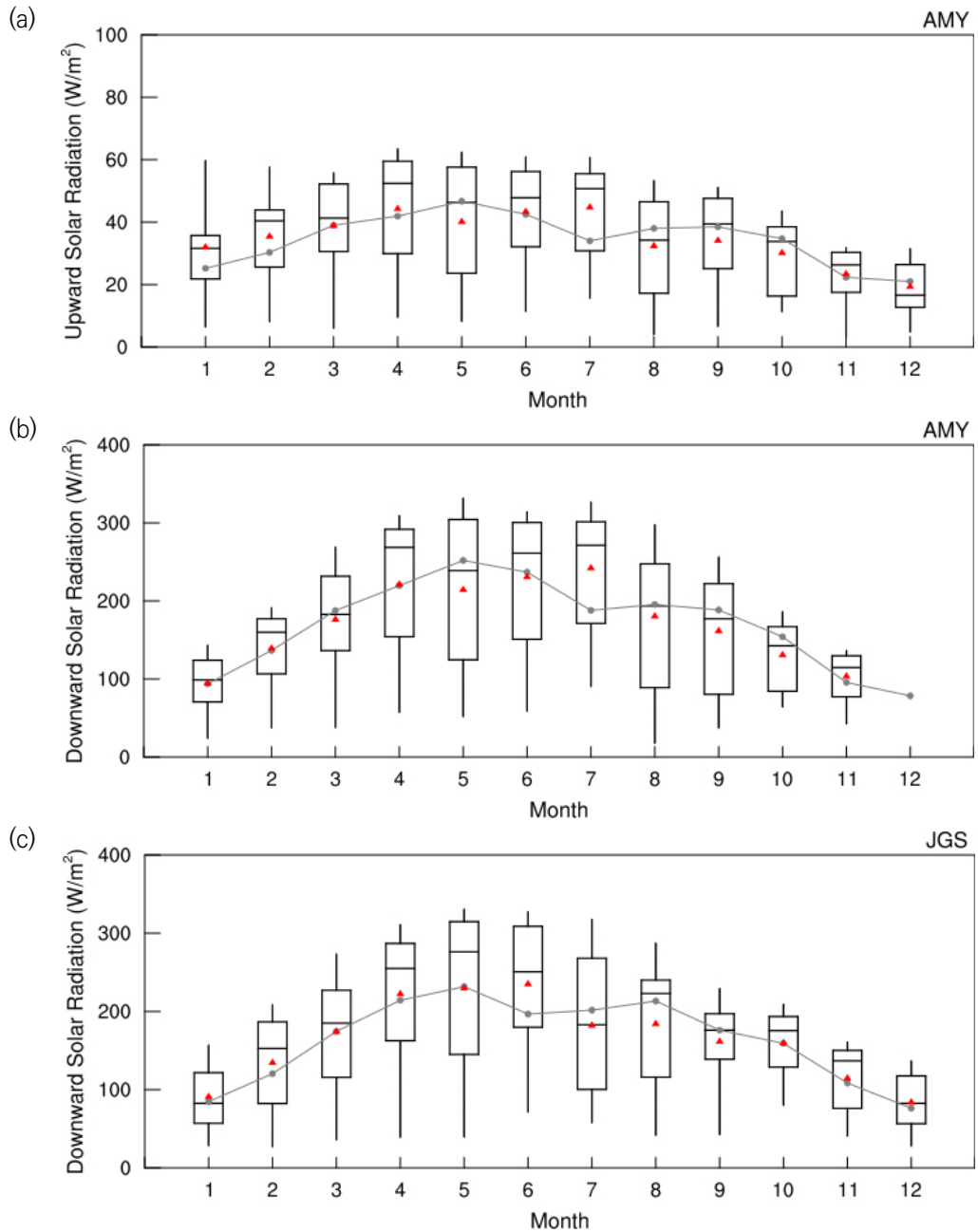


그림 7.3.1 2021년 안면도(AMY)의 (a) 태양상향복사, (b) 태양하향복사와 고산(JGS)의 (c) 태양하향복사 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간 값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선).



7.4 지구상향복사, 지구하향복사

지구상향복사와 지구하향복사는 각각 지표에서 대기로, 대기에서 지표로 방출되는 장파복사 에너지를 의미한다. 지구상향복사는 지면 온도의 영향을 크게 받는 반면, 지구하향복사는 기온과 습도의 연직분포, 운량 등 다양한 기상 특성들의 영향을 받는다. 지구복사는 태양복사에 비해 일변화 폭이 적고, 하층운이 지속적으로 있는 경우나, 기온 역전현상이 있을 시를 제외하고는 지구상향복사량이 하향복사량보다 큰 특성을 갖는다. 지구복사요소들은 현재 안면도에서만 관측하고 있으며, 2021년에는 데이터 로거 장애로 인해 지구상향복사는 8월에서 12월까지, 지구하향복사는 8월에서 10월까지 월평균이 계산되지 않았다. 그림 7.4.1은 2021년 안면도 지구복사의 월평균 분포를 나타내며, 월평균이 계산된 기간 내에서 지구상향복사는 최근 10년 평균에 비해 2~4월은 다소 높았으나 6~7월에는 상당히 낮은 값을 보였다. 지구하향복사의 경우 전체적으로 최근 10년 평균과 비슷했으나 봄철에 다소 높았다. 2021년에는 북극 기온이 평년보다 낮은 가운데 강한 극 소용돌이와 제트기류가 고위도 지역에 형성되어 찬 공기를 가두는 역할을 하면서 찬 대륙고기압의 강도가 약해 봄철 평년 대비 높은 기온이 나타났고, 이로 인해 봄철 지구복사요소들이 상대적으로 높았던 것으로 추정된다.

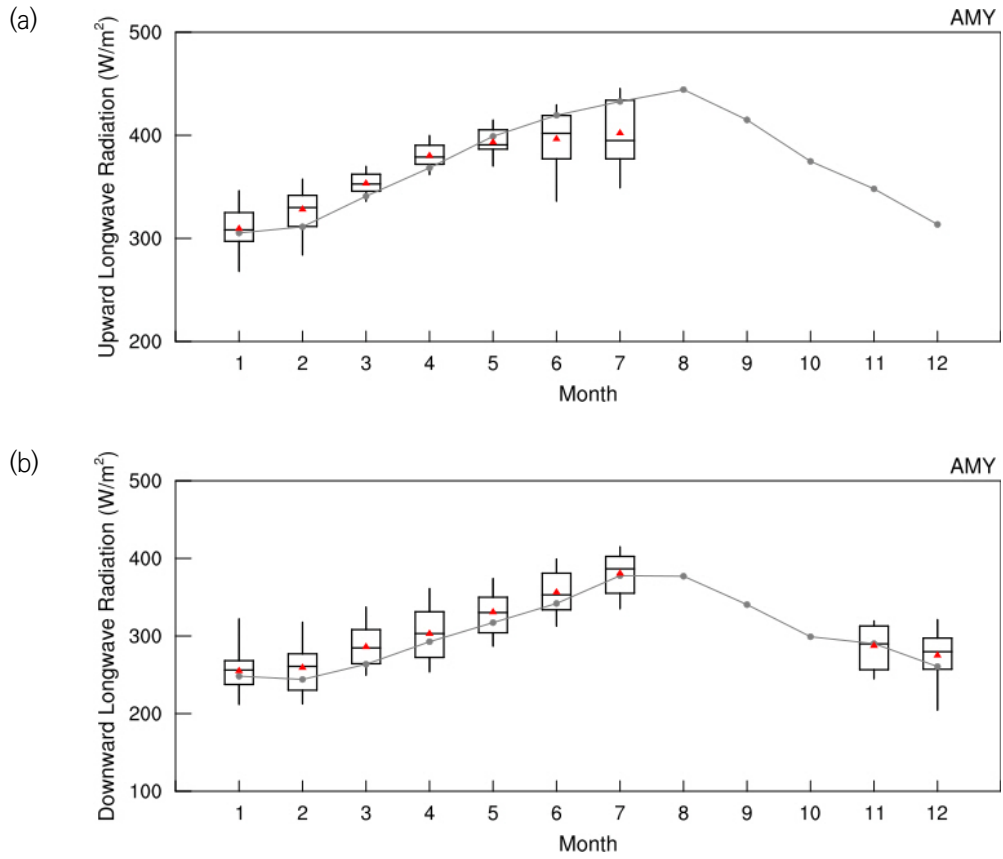


그림 7.4.1 2021년 안면도(AMY)의 (a) 지구상향복사, (b) 지구하향복사의 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선).



7.5 순복사

순복사는 태양과 지구 사이의 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 여름에 높고, 겨울에 낮은 특성을 갖는다. 또한 열대 및 아열대 지역과 적도 부근에서 일별 순복사는 일 년 내내 양의 값을 가지는 반면, 그 외 지역에서는 양의 값과 음의 값이 계절에 따라 다양하게 나타난다. 맑은 날의 일 중 순복사량 변화는 태양 고도각이 증가함에 따라 서서히 증가하여, 정오에 최대가 된다. 그림 7.5.1은 2021년 안면도 순복사의 월평균 분포를 나타내며, 지구복사와 마찬가지로 데이터 로거 불안정으로 인해 9월과 10월 월평균이 계산되지 않았다. 월평균이 계산된 기간 내에서 최대는 7월에 145.1 W/m², 최소는 12월에 4.3 W/m²으로 나타났다.

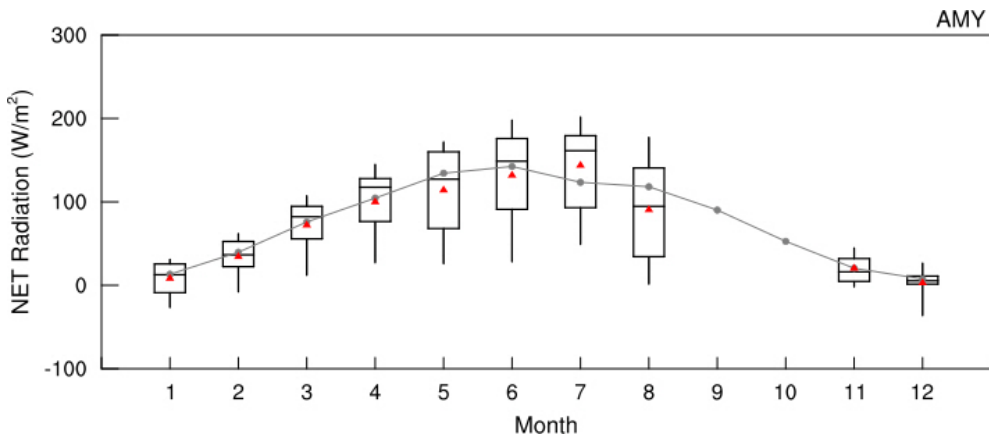


그림 7.5.1 2021년 안면도(AMY) 순복사의 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2011~2020년 월평균(점-선).

7.6 2021년 대기복사 특성

안면도의 태양상향복사, 태양하향복사, 직달일사, 산란일사, 순복사(지구상향복사와 지구하향복사는 결측으로 연평균 미산출) 평균값은 각각 35.2 W/m^2 , 173.6 W/m^2 , 141.5 W/m^2 , 81.2 W/m^2 , 73.2 W/m^2 으로 최근 10년 대비 1.8%, 3.6%, -5.4%, 5.1%, -6.3%의 차이를 보였다. 고산의 경우에는 태양하향복사, 직달일사, 산란일사 평균값이 165.7 W/m^2 , 130.7 W/m^2 , 84.8 W/m^2 으로 최근 10년 대비 2.6%, 7.1%, -0.2%의 차이를 나타냈다.

대기복사자료는 구름, 강수량과 일조시간 등의 영향을 크게 받으며, 2021년 강수량과 일조시간의 월변화를 살펴보면 그림 7.6.1과 같다. 강수량과 일조시간은 안면도와 고산 기후변화 감시소에서 가장 가까운 종관기상 관측소의 자료를 활용하였으며, 안면도의 경우 기후변화감시소에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129) 자료를, 고산은 감시소에서 약 4 km 떨어져 있는 고산(185) 자료를 각각 사용하였다.

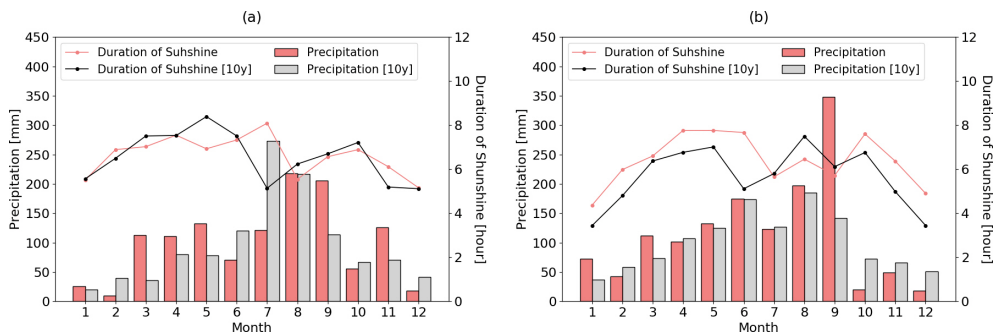


그림 7.6.1 2021년 (a) 서산, (b) 고산(JGS)의 월 강수량과 월별 일평균 일조시간. 회색 막대와 검은색 실선은 각각 강수량과 일조시간의 최근 10년 평균값.

2021년 서산의 연 강수량은 1207.3 mm로 최근 10년 대비 4.5% 증가했고, 일조시간은 일평균 6.6 시간으로 최근 10년 대비 0.9% 증가했다. 2021년 안면도의 태양복사 요소들은 직달일사를 제외하면 최근 10년 대비 다소 높은 모습을 보였으며, 이는 최근 10년 평균보다 길었던 일조시간의 영향을 일부 받은 것으로 보인다. 고산의 경우 연 강수량은 1387.9 mm로 최근 10년 대비 14.2% 증가했고 일조시간은 일평균 6.4시간으로 최근 10년 대비 12.3% 증가했다. 2021년 고산은 최근 10년 평균 대비 증가한 일조시간의 영향으로 태양복사 요소들의 연평균값이 대체로 높게 관측된 것으로 추정된다.

월별 주요 특성을 살펴보면, 2021년에는 북극 기온이 평년보다 낮은 가운데 강한 극소용돌이와 제트기류가 고위도 지역에 형성되어 찬 공기를 가두는 역할을 하면서 찬 대륙고기압의 강도가



약해 3월 이례적으로 높은 기온이 나타났고, 이에 따라 봄철 지구복사요소들이 상대적으로 높았던 것으로 추정된다. 한편, 같은 기간 주기적인 기압골과 남서쪽에 발달한 저기압으로 인해 강수가 잦았으며 이것이 3월과 5월 안면도의 낮은 직달일사 관측값에 영향을 미친 것으로 보인다. 여름철의 경우 6월에는 남부지방을 중심으로 평년보다 높은 기온을 나타냈고, 고산에서는 짧은 장마로 인해 최근 평균보다 길었던 일조시간의 영향으로 직달일사와 전천일사가 상당히 높았다(그림 7.6.1). 그리고 7월은 중순부터 하순까지 무더위가 지속되어 최근 평균에 비해 안면도의 강수가 큰 폭으로 줄었고 일조시간이 증가해 산란일사를 제외한 태양복사요소들이 상당히 높게 관측되었다. 가을철인 9월에는 14호 태풍 찬투로 인해 짧은 기간 고산에 굉장히 많은 양의 강수가 내렸으며, 그 영향으로 인해 태양복사 관측값도 전체적으로 조금 낮았다. 그러나 일조시간은 최근 10년 평균보다 조금 낮은 수준이었기 때문에 연평균 태양복사요소 관측값에는 미친 영향은 크지 않은 것으로 사료된다.

2021년까지 관측된 대기복사 관측값의 변화를 살펴보면 그림 7.6.2과 같다. 안면도와 고산의 대기복사는 눈에 띄는 경향성을 보이지 않고 있으며, 태양복사 성분은 안면도가 고산보다 조금 더 높은 관측값을 나타낸다. 일반적으로 위도가 낮을수록 태양천정각이 낮아 태양복사가 강하지만 고산의 경우, 안면도에 비해 강수가 많고 일조시간이 낮아 연중 태양복사량은 오히려 낮게 나타난 것으로 사료된다.

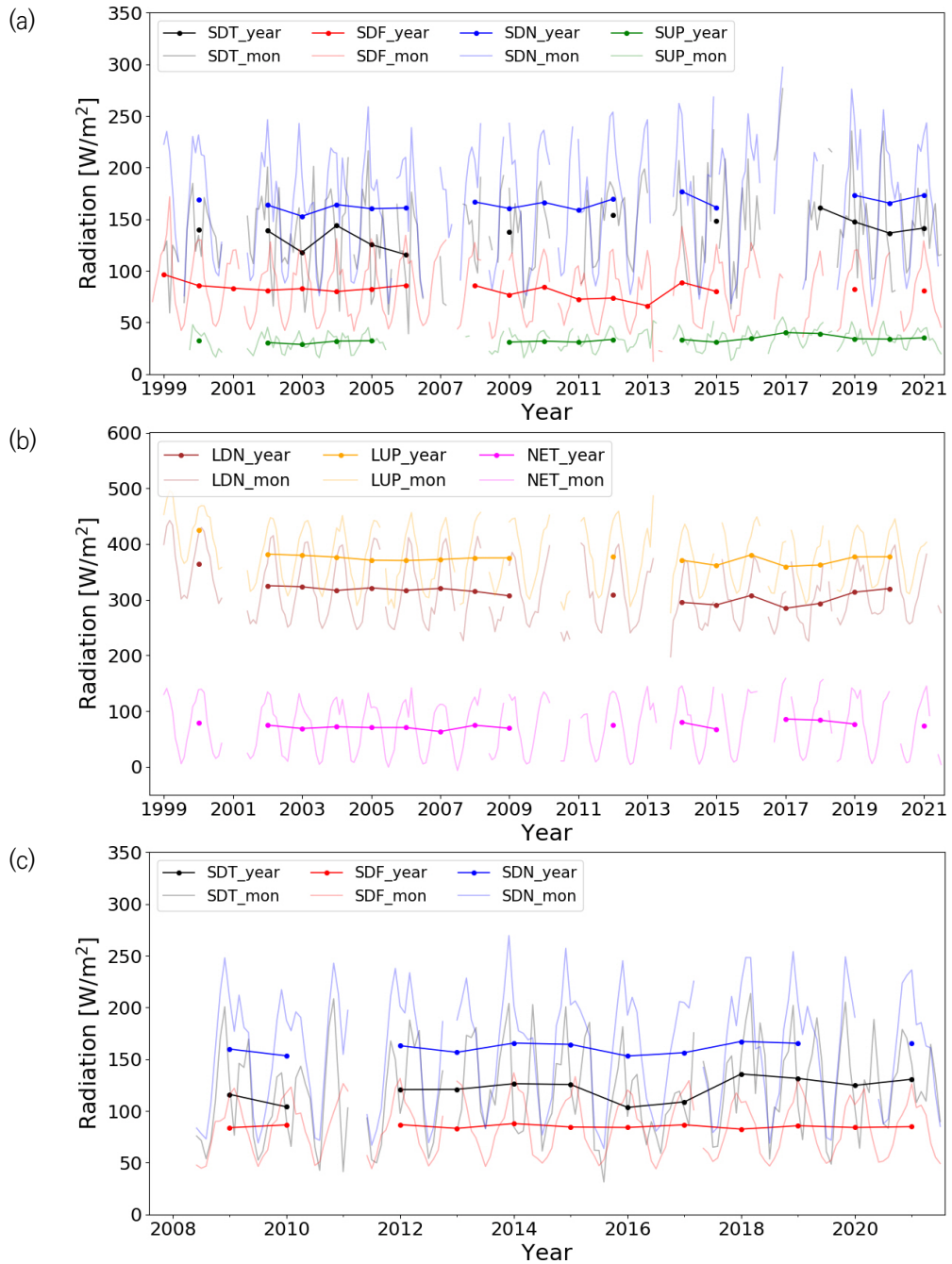


그림 7.6.2 대기복사 관측기간 동안의 (a, b) 안면도(AMY)와 (c) 고산(JGS) 복사량 변화(SDT: 직달일사, SDF: 산란일사, SUP: 태양상향복사, SDN: 태양하향복사, NET: 순복사, LUP: 지구상향복사, LDN: 지구하향복사).

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총 대기침적지구대기감시자료 분석

제11장 기타

2021 지구대기감시 보고서





제8장 성층권오존

8.1 성층권오존 감시 목적	140
8.2 오존전량	142
8.3 오존연직분포	151
8.4 남극오존홀	160
8.5 2021년 성층권오존 특성	164



제8장 성층권오존

- 오존전량 : 포항(오존존데) 309 DU (최근 10년 대비 +0.6%)
- 봄철 성층권-대류권 상호교환이 악화되었음에도 불구하고, 당해 성층권오존은 전반적으로 고농도 유지

8.1 성층권오존 감시 목적

대기 중 오존(O₃)은 연직적으로 성층권오존과 대류권오존으로 구분되며, 각기 다른 성격으로 지구 생태계에 영향을 미친다. 성층권에서 오존은 6~8 ppm의 높은 농도로 오존층을 형성하며, 태양으로부터 유입되는 유해 자외선을 차단해 생태계를 보호한다. 또한, 상당량의 태양에너지를 흡수하여 지구 대기의 복사에너지 평형 및 대기대순환과도 직접적인 연관성을 갖기 때문에 기후 변화 감시를 위해 필수적으로 살펴야 할 인자이다(Williamson et al., 2014; WMO 2019). 반면, 대류권에 분포하는 오존은 성층권과 달리 주로 배기가스에서 배출되는 질소산화물(NO_x)이나 휘발성 유기화합물(VOC)의 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 대류권과 상호 영향을 미치기 때문에 연직적인 분포 또한 매우 중요하다.

성층권오존은 대개 태양 자외선이 강한 열대지방에서 가장 많이 생성되지만, Brewer-Dobson 순환이라 불리는 전지구적 오존 순환을 통해 극지방으로 서서히 수송되어 오존층의 두께는 중위도와 고위도에서 두껍고, 저위도에서는 상대적으로 얇다(Butchart., 2014; Hu et al., 2017).

성층권오존은 산업화 과정에서 인위적으로 발생하는 염화불화탄소(CFCs)와 오존을 파괴시키는 기타 할로겐화 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 전세계적인 오존변화 대응협의체가 구성되어 오존층을 보존하기 위한 몬트리올 의정서가 1987년 채택되었다. 이를 통해 전세계적으로 오존고갈물질의 사용이 제한되었고, 그 결과 오존은 현재 점차 회복되는 추세를 보인다(WMO 2019; SPARC/IO3C/GAW, 2019). 그러나 여전히 남극과 북극에서는 오존홀이 나타나고 있으며, 이는 대기대



순환을 통해 전지구적으로 영향을 미치고 있다. 또한 그 밖의 지역에서도 오존 고갈물질들로 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 항목이며, 지상 관측망 또는 위성을 통한 전지구적 관측이 수행되고 있다.

기상청에서는 성층권오존의 감시를 위해 단위면적 상공에 분포하는 오존의 전체 양을 뜻하는 오존전량과 오존의 연직분포를 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 전세계 오존관측소들과 공유하고 있다.

8.2.1 안면도, 고산

안면도와 고산에서 관측한 2021년의 오존전량은 그림 8.2.1에 나타난 바와 같다. 그림에 표시된 빨간색과 회색 점은 각각 안면도, 고산에서 관측한 2021년 오존전량 월평균과 최근 평균(안면도: 2013~2020년, 고산: 2011~2020년)을 의미한다. 2021년에는 안면도와 고산 모두 장비 장애로 인해 관측이 중단되어 해외 제조사를 통한 수리 및 검교정을 수행하였으며 안면도의 경우 1~7월, 고산은 2월~12월까지 관측이 시행되지 않았다. 안면도 장비는 7월부터 관측이 재개되었으나 소프트웨어 및 태양 초점 문제로 안정화되지 못해 정상적인 자료의 수가 적었고, 이에 따라 11월에는 월평균이 계산되지 못했다. 월평균이 계산된 기간 내에서 안면도는 10월(280.6 DU)에 가장 낮은 월평균을 보였으며 일반적으로 높은 농도가 나타나는 봄철에 관측이 수행되지 않았기 때문에 최댓값은 산정하지 않았다. 2021년에는 관측이 수행된 기간 내에서 8월 안면도의 오존전량이 최근 평균보다 다소 낮았다.

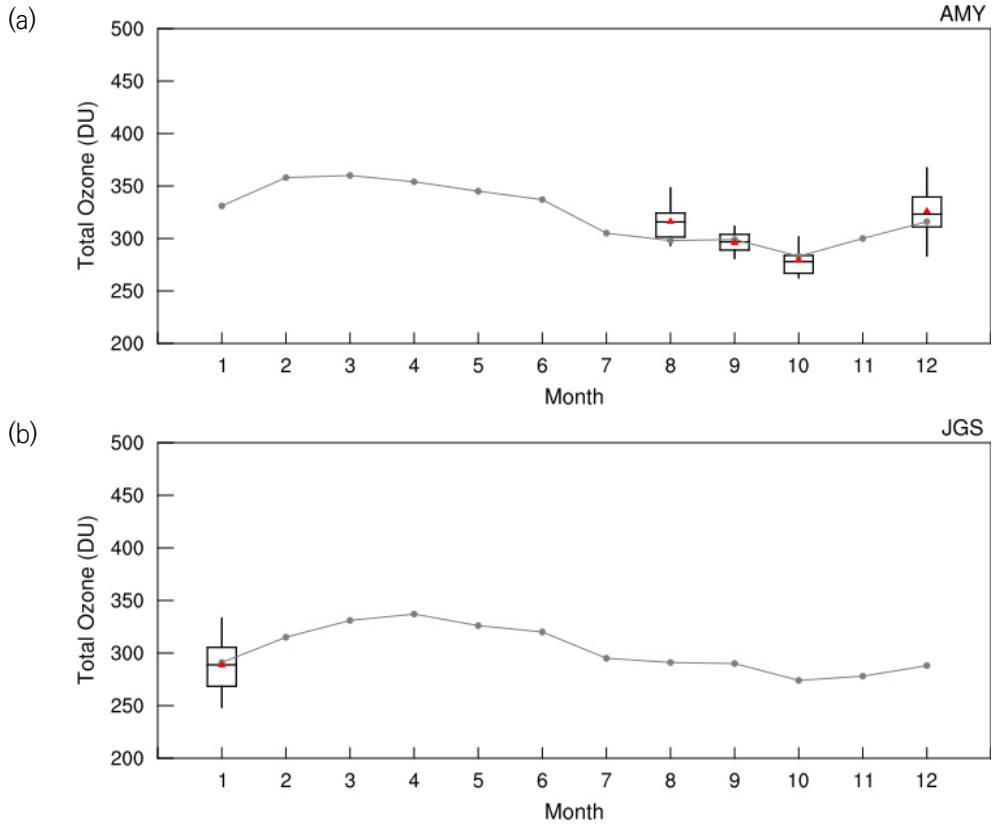


그림 8.2.1 2021년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS) 오존전량의 월별분포(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 2013~2020년(안면도), 2011~2020년(고산)의 월평균(점-선).

그림 8.2.2(a), (c)는 각각 안면도와 고산의 일 오존전량을 시계열로 나타낸 것으로서 오존전량이 매년 규칙적인 계절변동을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 2021년 안면도의 오존전량 최솟값은 262 DU(10월 16일)이며, 봄철의 결측으로 인해 최댓값은 산정하지 않았다.

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 비율을 의미한다. 2021년에는 일일 증가율과 감소율이 가장 크게 나타나는 봄철에 관측이 수행되지 않아 최댓값과 최솟값은 산정하지 않았다.

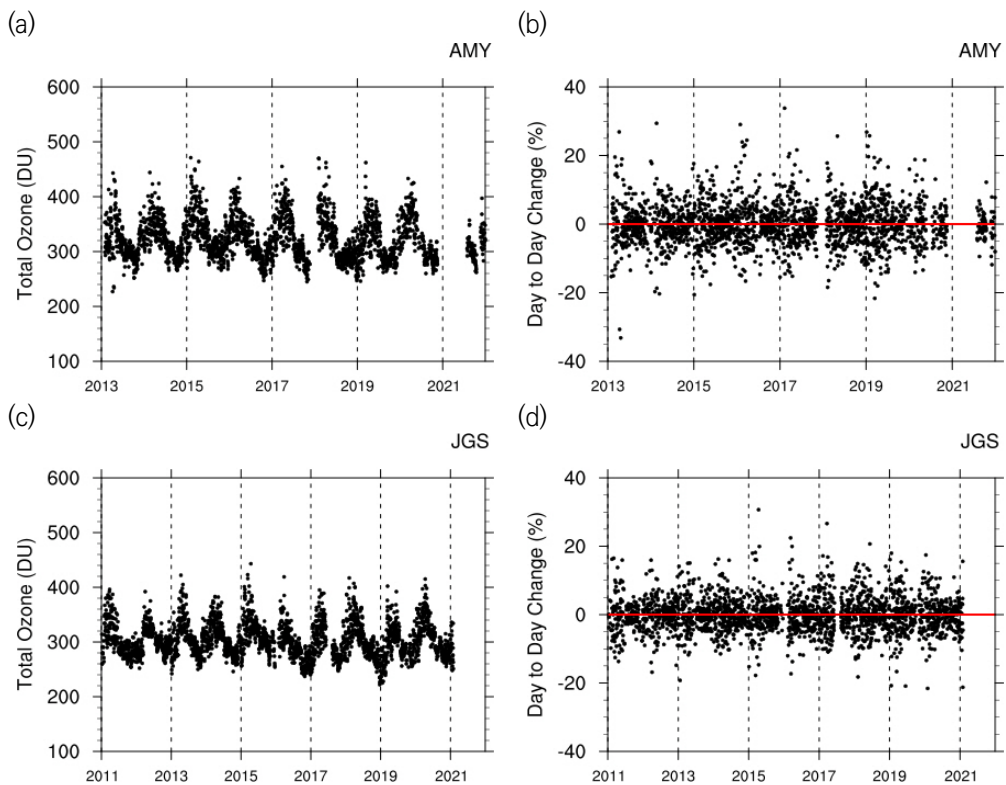


그림 8.2.2 안면도(AMY)의 (a) 오존전량, (b)일 일차변화율과 고산(JGS)의 (c) 오존전량, (d) 일일차변화율 시계열.



표 8.2.1은 오존전량의 일일차 변화율 절댓값의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 일일차 변화율 절댓값은 주로 안면도는 4월에 고산은 3월에 가장 높은 값을 나타낸다. 2021년에는 두 지점 모두 봄철에 관측이 이루어지지 않아 최댓값은 산정할 수 없었다. 한편, 안면도에서 최근 평균 가장 작은 변화율을 보였던 9월에는 올해 역시 1.8%가량으로 매우 작은 변화율을 나타냈다.

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) (2021년)	-	-	-	-	-	-	-	3.2 (2.7)	1.8 (1.0)	2.7 (2.9)	-	4.4 (3.2)	-
	Absolute (Stddev.) (2013-2020년)	5.2 (4.7)	7.2 (5.5)	6.5 (4.9)	7.6 (6.7)	5.1 (4.1)	4.7 (3.3)	4.0 (3.2)	2.7 (2.2)	2.5 (1.9)	2.6 (2.1)	4.2 (2.8)	4.8 (3.8)	4.7 (3.7)
	Increase (2021년)	-	-	-	-	-	-	-	4.8	1.9	3.7	-	3.5	-
	Decrease (2021년)	-	-	-	-	-	-	-	-3.3	-1.8	-2.2	-	-5.3	-
	Absolute (Stddev) (2021년)	5.7 (5.3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
고 산	Absolute (Stddev.) (2011-2020년)	5.0 (4.0)	5.0 (3.9)	5.4 (4.3)	4.9 (4.1)	4.0 (3.1)	4.3 (3.3)	2.3 (1.8)	2.2 (1.7)	2.3 (1.7)	2.3 (2.0)	2.8 (2.0)	4.1 (2.9)	3.7 (2.9)
	Increase (2021년)	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Decrease (2021년)	-7.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Absolute (Stddev) (2021년)	5.7 (5.3)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

8.2.2 서울(연세대학교) 위탁관측소

연세대학교 오존관측소는 2004년부터 오존 관측시스템의 자동화를 통해 객관적인 관측 방법을 구축하여, 더욱 정확한 관측자료를 생산하고 있다. 1997년 Brewer 분광광도계(SCI-TEC, #148)가 설치되어 자외선과 오존 전량을 동시에 관측하고 있고, 2012년에 오존과 이산화질소를 중점으로 관측하는 Pandora가 설치되었다. 이들 자료는 Dobson 오존 분광광도계에서 관측된 오존 전량과의 비교, 검증 자료로 사용되어 한반도 상공의 오존 전량 관측의 정확도 향상에 기여하고 있다. 이 관측소는 2004년부터 기상청 지구대기감시 위탁관측소로 지정되어 운영되고 있다. 대기 중의 연직 오존전량의 90% 이상이 성층권 오존층에 분포되어 있기에 오존 전량의 변화는 오존층의 변화를 의미한다. 여기에서는 2021년도 한반도 상공의 오존층 변화를 과거 장기간 참조 값(1984~2019년)과 비교 및 분석을 수행하였다.

그림 8.2.3(a)는 2021년도 서울 상공의 일 오존 전량의 시계열, 그림 8.2.3(b)는 서울 상공 오존 전량의 장기평균 연변화(1984~2021년)를 나타낸 것이다. 기상 및 장비 보정으로 인한 결측 기간 동안의 관측자료는 OMI-TOMS 오존전량 관측자료로 재구성하였다. 2021년의 일 최댓값은 5월 28일에 438 DU, 일 최솟값은 10월 14일에 260 DU로 나타났다. 6월과 10, 11월에는 평년보다 낮은 오존 전량을 나타냈으며 그 외의 기간에는 평년보다 높은 오존 전량을 보이는 등 기존 패턴과는 다른 모습을 보였다. 특히 2021년 5월 평균 오존 전량은 364 DU로 평년 5월 오존 전량 331.3 DU 비해 33 DU 가량 큰 차이를 보였다.

오존 전량의 연(계절) 변화를 보게 될 경우, 그림 8.2.3(b)와 표 8.2.2에서 보는 바와 같이 서울 상공의 1984~2020년까지의 연평균 오존 전량은 316.7 DU로 나타났으며, 3월에 최대인 361.7 DU, 9월에 최소인 277.5 DU로 월평균 기준으로 연교차가 84 DU이며 연평균 오존 전량 기준으로 26%의 변동폭을 보였다. 그리고 오존량의 변동은 5월에 표준편차가 19.5 DU로 가장 심하고, 9월에 10.7 DU로 가장 안정한 변동을 나타내었으며, 계절변화의 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.

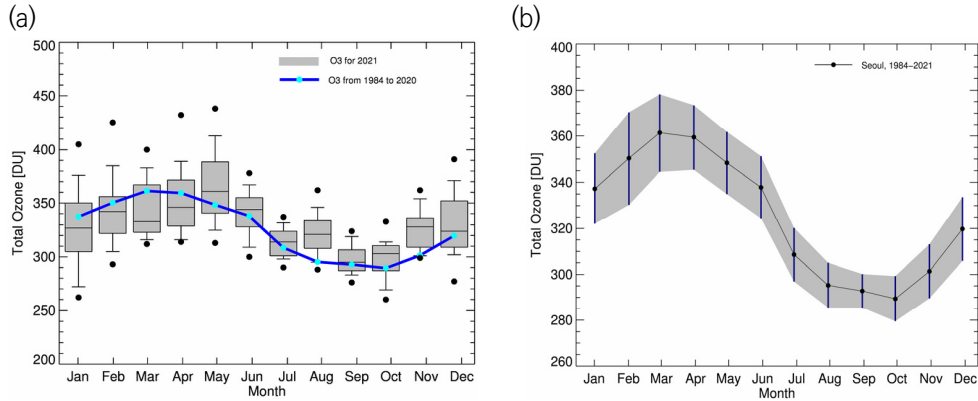


그림 8.2.3 서울 상공 오존전량의 (a) 2021년 중 월별 오존전량 특성 변화 (상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 (b) 1984~2021년 월평균(점-선).

표 8.2.2 서울 상공의 장기 오존전량 및 참조값(1984~2020년)과 2021년 값과의 비교, 장기기후 평균값 (1984~2021년) 및 극값(최대와 최소), (단위 : DU)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
참조값 (Ref. 84-20)	337.5	349.7	361.7	338.6	331.3	318.4	291.5	279.9	277.5	291.1	301.9	320.8	316.7
2021	326	344	345	341	364	351	314	322	298	298	325	329	330
Diff (%)	-3.4	-1.6	-4.6	0.7	9.9	10.2	7.7	15.0	7.4	2.4	7.7	2.6	4.2
기후값 (Avg. 84-21)	337.2	349.6	361.3	338.6	332.1	319.3	292.1	281.1	278.1	291.3	302.5	321.0	317.0
Stdev	15.3	18.0	17.5	15.3	19.5	13.5	13.0	11.2	10.7	12.2	12.4	12.9	6.6
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)

2021년의 연평균 오존전량은 330 DU로 나타났다. 이는 과거 참조 값(1984~2020년)의 316.7 DU에 비해서 약 4.2% 증가하였으며, 월별로는 8월에 최대 증가 15.0%를 보이고, 3월에 -4.6%로 최대 감소를 보였다. 2021년의 연교차는 5월의 364 DU와 9월의 298 DU로 66 DU의 연교차를 보인다. 이는 과거 참조 값의 연교차인 84 DU보다 낮게 나타났다.

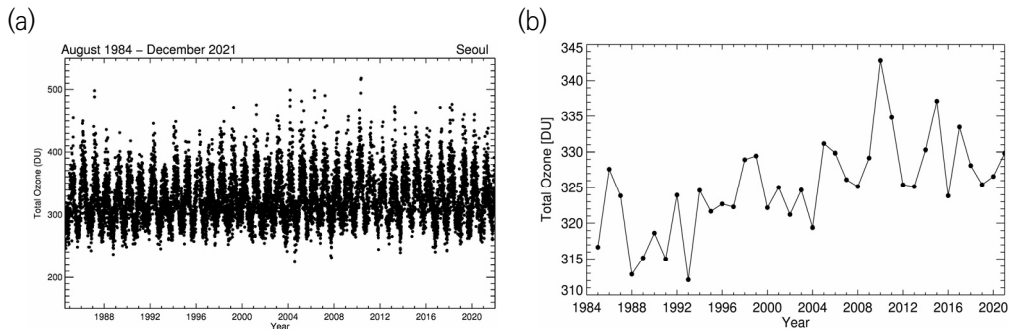


그림 8.2.4 (a) 1984년부터 2021년까지 일 오존전량의 장기 시계열 및 (b) 1985년부터 2021년까지 연평균 값의 경년 변화.

그림 8.2.4(a)는 1984년부터 2021년까지의 일 오존전량의 장기간의 시계열을 나타낸 그림이다. 서울 지역의 오존은 매년 규칙적인 계절변동이 나타나며, 최대 극값은 2010년 5월 11일의 518 DU이며, 최소 극값은 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(1985~2020년)동안 연평균 오존전량이 가장 높았던 시기는 2010년도로 343 DU이었으며, 최소값은 1993년에 나타난 312 DU이었다. 경년변화 수준의 오존전량의 장기변화는 태양활동도(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 오존 전량으로 일 일차 변화율(Day To Day Change; DTDC)을 계산하여 그림 8.2.5(a)에 나타내었다. 일 일차변화율은 전일 오존량에 대한 그다음 날 오존량의 차이에 대한 변화율로 정의하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 오존전량의 일 일차변화율은 -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 8.2.3은 서울 지역의 오존전량 일 일차변화율에 대한 증가 및 감소율, 절댓값의 월평균 변화량이다. 이 표에서 오존전량의 변동은 겨울과 봄철에 5% 이상의 변화를 보이면서 상대적으로 변화가 크게



나타나고 있으며, 여름과 가을에는 그 변화가 5% 미만으로 상대적으로 변화가 작게 나타났다. 전 기간의 일 일차변화율은 평균 5.3% 변화하는 것으로 나타났다. 그리고 일 일차변화율의 증감 경향에서 증가 경향의 평균은 6.4%, 감소 경향의 평균은 -5.5%로, 오존전량의 일 일차변화는 감소 경향보다는 증가 경향이 더 큼을 알 수 있다.

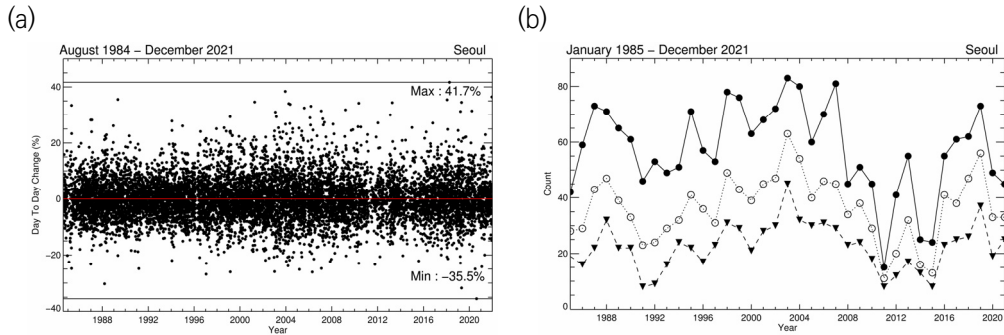


그림 8.2.5 서울 지역 오존 전량의 일 일차변화율의 (a) 시계열 및 (b) 증가 경향의 일 일차변화율에 대한 관측 횟수.

표 8.2.3 서울 지역의 오존전량 일 일차변화율에 대한 월평균, 연평균(1984~2021년)

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	7.3	7.6	7.7	10.2	6.8	5.4	5.7	5.4	4.2	4.7	5.4	6.7	6.4
Stddev.	2.2	2.0	2.1	16.7	1.6	1.7	2.7	2.1	1.6	2.5	1.2	1.7	3.2
Decrease	-6.4	-6.8	-6.7	-7.4	-5.5	-5.2	-5.6	-4.8	-4.0	-4.0	-4.8	-5.5	-5.5
Stddev.	1.9	1.8	1.9	4.9	1.0	1.0	2.1	1.8	1.1	1.4	1.0	1.3	1.8

총관 규모 기상장은 매년 여러 자연 진동으로 그 기상장의 패턴이 변화하게 되므로 오존전량의 변화에도 이러한 영향을 미치게 된다. 따라서 오존전량이 급변할 때 대해서 경년변화가 다르게 나타날 수 있으며, 이는 오존전량의 장기 변화 경향을 분석하는 데에 영향을 미칠 수 있다. 특히 오존전량의 급증은 오존층의 시간적인 변화뿐 아니라 오존층보다 하층에 있는 고도에서의 오존량의 변화, 2차 오존피크 등에 의해서도 민감하게 변화하기 때문에(Park et al., 2012) 증가 경향을 보이는 일 일차변화율의 경년변화는 오존전량의 경년변화 및 장기 변화 경향을 파악하는 데 있어서 매우 중요한 분석이다. 그림 8.2.5(b)는 일 일차변화율에 대한 관측 횟수를 나타낸 것

이다. 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측 횟수를 볼 경우, 2011년에 15회로 최소로 나타났으며, 2003년에 84회로 최대로 나타났다. 10% 이상 증가한 관측 횟수의 경우에는 1991년과 2011년에 8회로 최소로 나타났으며, 2003년에 46회로 최대로 나타났다. 2021년도의 경우, 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측 횟수는 45회, 7.5% 이상 증가한 관측 횟수는 33회, 10% 이상 증가한 관측 횟수는 25회이다. 그림 8.2.4(b)의 오존전량의 연평균 경년변화와 비교할 경우, 오존전량의 증가를 나타내는 일 일차변화율의 관측 횟수는 대체로 오존전량의 연평균 경년변화와 유사한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 오존전량의 연변화 경향은 오존층의 장기적인 회복 경향의 영향뿐 아니라 단기적인 오존량의 급변에도 영향을 일부 받는 것으로 보인다.



8.3 오존연직분포

오존의 수평, 연직적 이동을 추정하고 각 대기권의 오존이 상호 미치는 영향을 이해하기 위해 서는 오존의 연직분포에 관한 연구가 대단히 중요하다(Kim et al., 2000). 오존 연직분포는 연직 공기기동에 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 상공)에서 최고 농도 때를 형성하며, 성층권하부·대류권상부(9~16 km)에서 성층권-대류권 상호 교환이 발생한다. 그 과정에서 성층권의 고농도 오존이 대류권으로 유입되어 오존이차피크(Second Ozone Peak; SOP)를 형성하며, 때때로 지표까지 영향을 주기도 한다(Hocking et al., 2007). 포항 기후변화감시소에서는 ECC(Electrochemical Concentration Cell Ozonesonde) 오존존데를 이용한 오존의 연직분포 관측을 1995년부터 현재까지 이어오고 있다. 서울(숙명여자대학교) 위탁관측소에서는 마이크로파 수신기를 이용하여 2008년부터 연직오존을 관측하고 있으며, 서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 오존분광광도계를 이용하여 Umkehr 방법(Petropavlovskikh et al., 2011)으로 연직오존 자료를 생산하고 있다.

8.3.1 포함

오존존데 관측은 WMO 권고에 따라 주 1회의 관측 주기로 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(potassium iodide, KI) 용액의 화학반응을 활용한다. 사전준비 절차를 통해 센서에 투입된 KI 용액은 존데가 비양하면서 흡입되는 공기 중의 오존과 반응하여 전류를 발생시키는데, 이때 발생하는 전류를 측정하여 오존량을 추정한다(Komhyr and Harris., 1971; Kivi et al., 2007; Smit et al.; 2007). 2021년은 총 53회의 오존존데 관측이 실시되었고, 이 중 30 km까지 관측을 성공한 40회를 분석에 이용하였다. 2021년에는 오존존데 수신기 노후화로 인한 수리 및 교체 작업으로 인해 전년도에 비해 비양 성공 횟수가 다소 줄었다. 그림 8.3.1은 2021년 포항 상공의 월평균 연직 오존 분포를 나타낸 그림이다. 가장 높은 농도의 오존은 주로 20~26 km에 분포하며, 2021에는 1~5월 사이에 높게 나타났다. 특히, 2월에 성층권의 오존농도가 높았으며, 대류권-성층권 상호교환이 주로 일어나는 9~16 km 고도의 농도가 높았던 반면, 3~5월에는 다른 해에 비해 해당 층의 농도가 오히려 낮게 나타났다. 대류권에 해당하는 9 km 이하의 고도에서는 4~6월, 10월에 농도가 높았으며, 7월에는 많은 강수로 인해 농도가 낮았다.

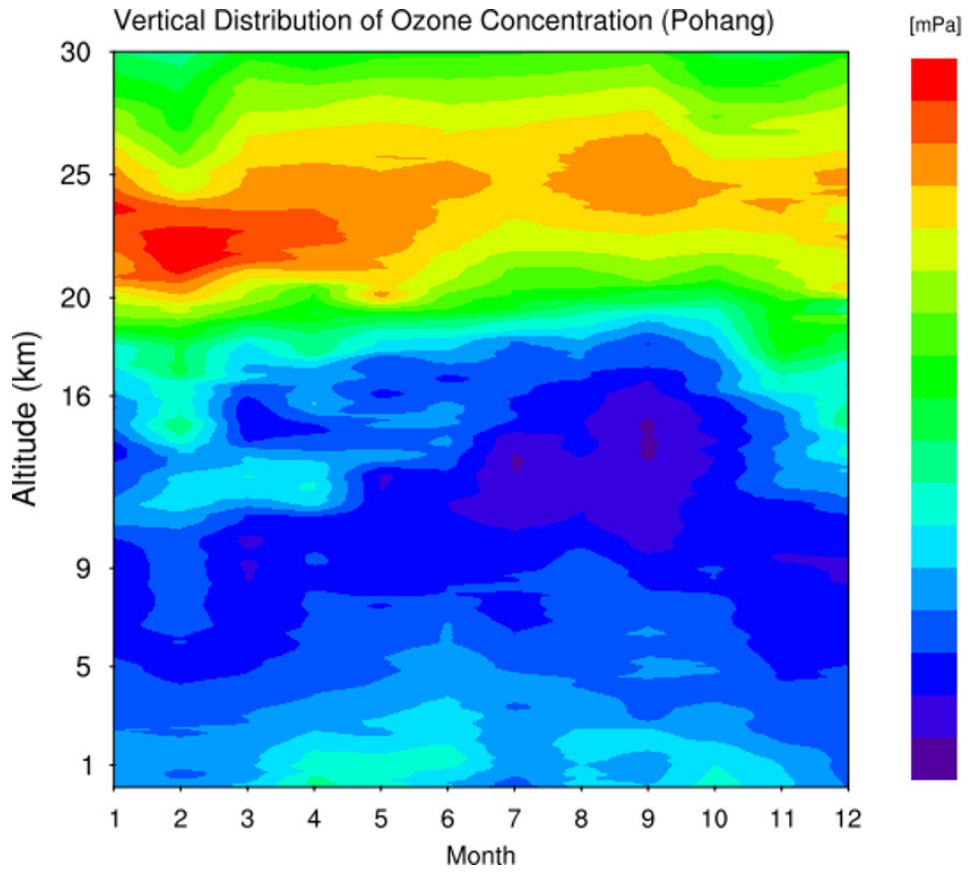


그림 8.3.1 2021년 포항지역의 오존농도 연직분포.



8.3.2 서울(숙명여자대학교) 위탁관측소

숙명여대에서는 마이크로파 수신기를 이용하여 성층권오존의 연직분포를 관측하고 있다. 숙명여대 과학관에 설치된 마이크로파 수신기는 오존에서 방출된 110.836 GHz 전파를 수신하고 있으며, 24시간 연속 관측자료를 생산한다. 지상에서 수신하는 마이크로파 대기 신호는 대기 기압이 증가할수록 스펙트럼 너비가 점점 증가하는 특성을 보이기 때문에 높은 대기압을 보이는 대류권 영역의 오존 전파 신호는 탐지가 안되며, 지상의 마이크로파 수신기는 성층권 이상의 영역의 오존 연직분포를 관측할 수 있다. 마이크로파 전파 신호는 대기 분자 자체에서 발산되는 신호이기 때문에 주야간 모두 관측이 가능하여 높은 시간 분해능으로 오존의 연직분포 변동을 계속적으로 관측할 수 있는 장점이 있다.

아래 그림에서 좌측의 8개 스펙트럼은 2021년 12월 8일 10시 (협정세계시 기준)에 수신한 오존 전파 스펙트럼 관측자료를 보여주고 있으며, 천정 기준 관측 각도에 따라 대기 전파 경로 차이에 의해 스펙트럼의 관측 신호 레벨이 다르게 나타난 것을 볼 수 있다. 이렇게 서로 다른 각도에서 측정된 이유는 대류권의 영향을 배제하기 위함이며, 좌측 스펙트럼에서 대류권 영향을 배제한 성층권오존의 전파 스펙트럼을 보여준다.

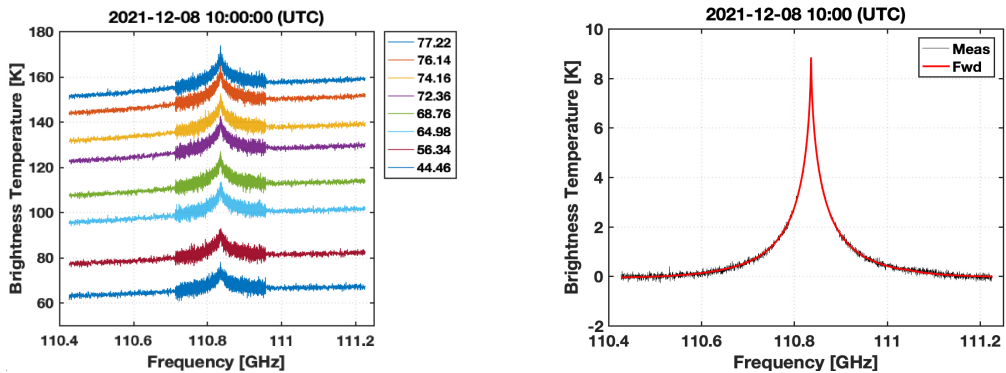


그림 8.3.2 (좌측)마이크로파 수신기로 관측한 여러 관측각도에 따른 오존 스펙트럼. (우측)대류권 보정 후의 오존전파스펙트럼(검정) 및 대기전파모델로 계산한 오존전파스펙트럼(빨강).

2021년 관측한 성층권오존의 월평균 연직분포를 분압인 mPa의 단위로 다음 그림에 나타내었다. 마이크로파 수신기는 약 50~60 km 고도까지 분포하는 오존농도를 관측할 수 있으며, 다음 그림에서는 오존이 주로 분포하고 있는 16~40 km 까지를 나타내었다. 오존은 22 km 부터 25 km 고도에서 최대 농도가 분포하고 있다. 성층권오존의 월평균 최대 농도는 10월을 제외하고 약 14 mPa 수준을 보였으며, 10월에 12.6 mPa로 연중 최소 농도로 관측되었다. 월별 최대 농도는 아래 표에 나타내었다.

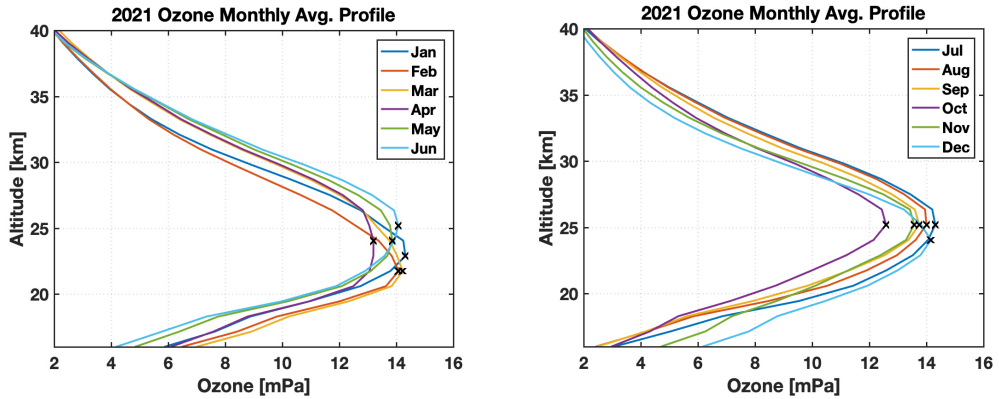


그림 8.3.3 2021년 서울 상공의 오존 월별 평균 연직분포. 월 평균 최대 농도를 엑스(x)로 표시함.

표 8.3.1 서울 상공의 오존 월별 최대 농도

월	1월	2월	3월	4월	5월	6월
최대농도 [mPa]	14.3	14.1	14.2	13.2	13.9	14.1
월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
최대농도 [mPa]	14.3	14.0	13.7	12.6	13.6	14.2

2013년 6월부터 관측한 서울 상공의 성층권오존 연직분포를 다음 그림에 나타내었다. 성층권 오존은 계절적 변동이 강하게 나타나는 가운데, 12월부터 오존층의 고도가 낮게 분포되며 최대 농도를 보임을 확인할 수 있다.

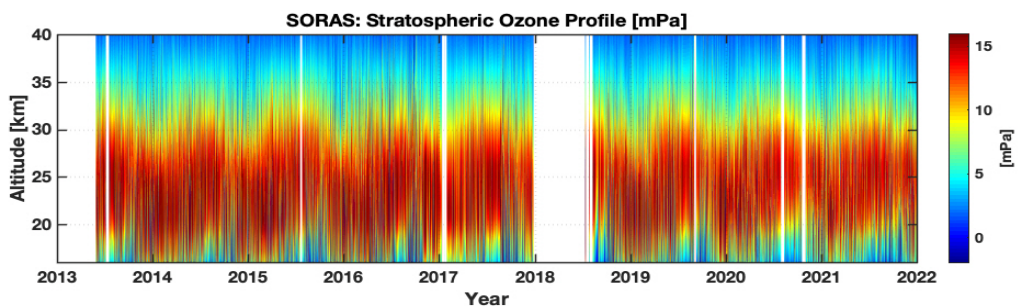


그림 8.3.4 2013~2021년 서울 상공 성층권 오존의 연직분포 변동.

고도 20~24 km 구간과 25~29 km 구간의 오존농도의 변동성을 살펴보면, 24 km 이하의 농도는 최대치가 나타나는 구간이므로 앞서 밝힌 바와 같은 연초에 최대치를 보이는 특성을 나타내나, 25 km 이상의 고도에서는 연초에 최저 농도를 보이다가 3월 이후에 오존농도가 점점 증가



하는 추세를 확인할 수 있다. 이는 대기 순환에 의해 오존농도가 변동함을 의미한다. 또한 마이크로파로 관측한 결과를 검증하기 위해 AURA 위성의 MLS 관측 결과를 아래 그림에 같이 나타내었다. 25~29 km 구간의 고도 평균 농도 변동을 보면, 2019년 이후의 오존농도의 변동성이 과거에 비해 커졌으며, 연초에 나타나는 연중 최저 농도 또한 감소하여 과거와 다른 추세가 관측되었다.

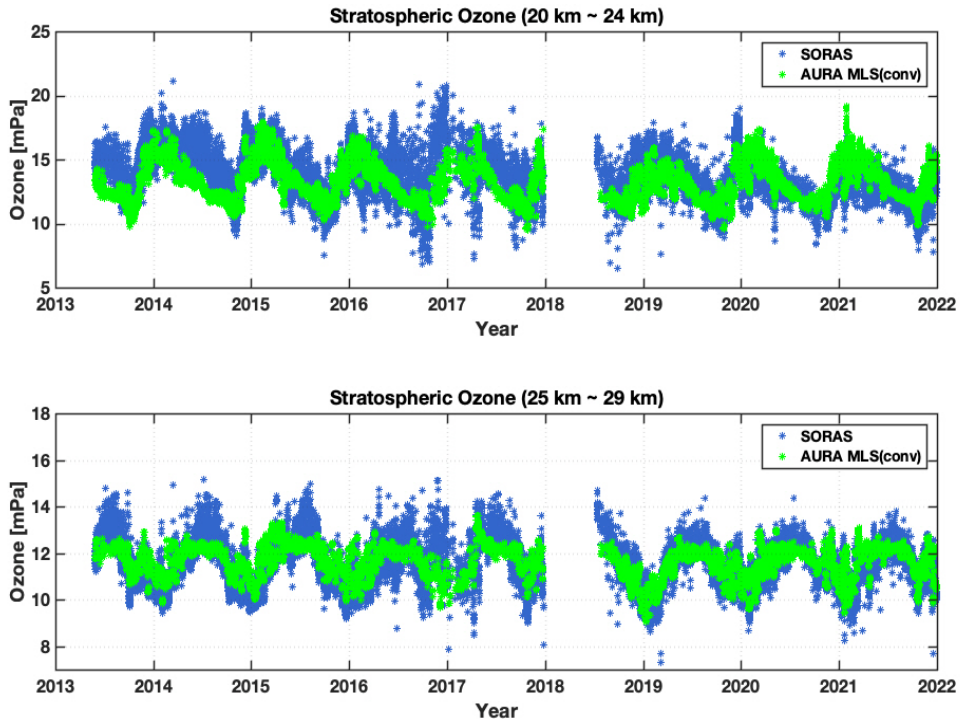


그림 8.3.5 마이크로파 수신기 및 위성으로 관측된 (a) 20~24 km 고도 및 (b) 25~29 km 내 오존 평균 농도 변동 비교(파랑-마이크로파 수신기 / 연두-AURA 위성의 MLS 관측장비).

8.3.3 서울(연세대학교) 위탁관측소

연세대학교 오존관측소에서는 1986년부터 Umkehr 방법으로 Dobson 및 Brewer 분광광도계를 이용하여 연직오존 분포를 관측하고 있다. 날씨가 맑을 때, 오전에는 해가 뜨기 직전부터 태양천정각이 60° 이하가 될 때까지, 그리고 오후에는 태양천정각이 60° 일 때부터 일몰 무렵 태양 천정각 90° 부근이 될 때까지 관측하여 0~60 km까지 총 10개의 층에 대한 오존량을 산출한다. 이 때, 태양천정각 별 관측값이 기후값과 비교하여 큰 차이를 보이면 에어로졸 또는 구름 등의 영향을 받았다고 판단하여 이후 분석에서 제외시켰다. 2021년 한 해 동안 Dobson 분광광도계를 통해 총 206번의 Umkehr 관측이 있었다. 표 8.3.2는 1986년부터 2021년까지 각 층 별 월평균 오존량을 나타낸 것이다. 표 하단의 연평균 값을 보면 19~28 km(Umkehr 4, 5번 층) 고도의 성층권에서 약 134.7 DU의 오존량을 함유하고 있는데, 이는 평균 오존전량의 약 41.3%로 전체 고도 중 가장 많은 오존을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 표 8.3.3는 Umkehr로 관측한 오존연직분포 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 오존농도와 연관 지어 생각해 볼 수 있다(대기환경연보, 2020).



표 8.3.2 서울 오존 고도별 연평균 관측값 (단위 : DU)

연도	Ozone Layers (km)										오존 전량 (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
2021	48.4	22.3	37.5	69.1	65.6	44.5	23.9	10.1	3.3	1.5	326.2
평균	34.9	24.9	44.6	75.7	66.4	43.5	22.6	9.2	3.2	1.4	326.4
(%)	10.7	7.6	13.7	23.2	20.3	13.3	6.9	2.8	1.0	0.4	100

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 자료임.

표 8.3.3 서울 오존전량 월평균 관측값 (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	31.1
1988	330	331	347	360	320	322	285	285	287	271	301	319	313	27.5
1989	316	325	350	344	354	321	301	286	288	285	292	320	315	25.1
1990	347	337	348	351	337	319	293	279	282	298	298	334	319	27.0
1991	335	337	333	343	325	309	299	298	295	295	300	312	315	18.4
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	17.0
1994	357	350	380	339	356	337	294	290	307	292	296	299	325	31.8
1995	332	349	361	344	361	338	297	283	286	283	305	323	322	29.9
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	29.6
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	31.8
2001	364	330	381	353	354	338	299	297	284	284	301	312	325	33.1
2002	324	331	349	333	334	339	304	299	301	297	316	328	321	17.5
2003	366	366	372	348	344	342	310	297	283	291	282	297	325	34.8
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	34.2
2006	330	336	379	373	342	352	319	292	301	292	318	325	330	28.5
2007	342	349	382	381	351	333	313	294	286	281	299	324	328	34.5
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	28.7
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	1.6
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	28.9
2015	342	389	382	358	350	348	320	316	306	300	313	323	337	29.1
2016	356	372	355	358	332	339	308	304	292	275	293	305	324	31.8
2017	315	355	376	368	367	352	328	305	306	281	310	339	333	30.5
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	34.2
2020	339	350	368	381	434	323	324	301	298	282	290	320	327	43.8
2021	326	344	345	341	364	351	314	322	298	298	325	329	330	20.3
평균	337	350	362	339	332	319	292	281	278	291	303	321	317	
표준편차	15.3	18.0	17.5	15.3	19.5	13.5	13.0	11.2	10.7	12.2	12.4	12.9	6.6	

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄
 ※ 괄호()안의 값은 결측으로 인하여 OMI 결과를 사용하여 환산한 자료임.

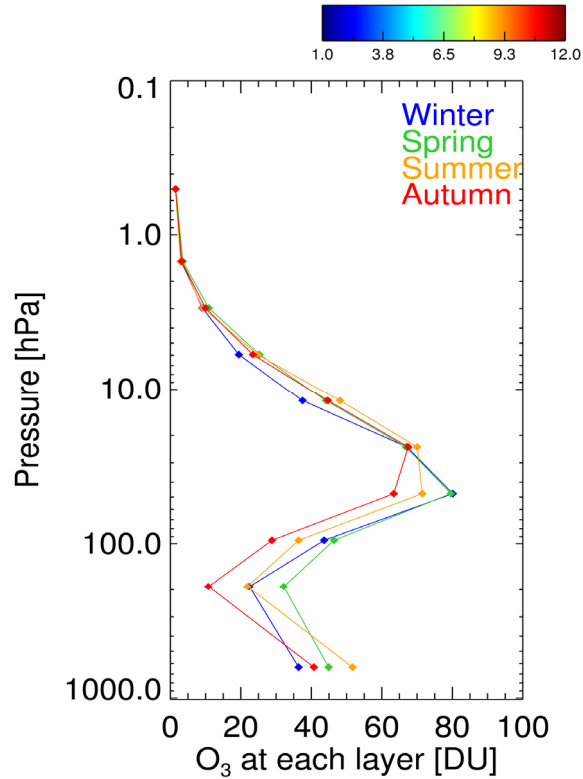


그림 8.3.6 2021년 서울 오존 연직분포의 계절 평균.

그림 8.3.6은 2021년 오존 연직 분포의 사계절 분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 여름철의 19~28 km (Umkehr 4, 5번 층)에서 최대의 오존 분포를 보인다. 한편 하부 성층권과 상부 대류권 (Umkehr 2, 3번 층)에서는 봄에 가장 큰 오존 분포를 보이며 가을로 가면서 오존량이 감소하고 있는 패턴을 보이고 있고, 그 변동 폭도 상부 성층권에 비해 더 컸다.

8.4 남극오존홀

1980년대 초기부터 매년 남극 봄철에 관측되어 온 오존홀 내 오존 전량은 다른 시기 농도의 약 반 정도까지 줄어든다(Solomon et al., 1999). 남극 성층권 오존홀 발생은 봄철 유해 자외선의 증가(Cordero et al., 2022)에 따른 생물에 미치는 영향(Fuentes-Leon et al., 2020)뿐만 아니라 남극 진동을 통해 봄과 여름 기온에 남극의 지표 기온에 영향을 미치기 때문에 중요한 감시의 대상이 된다. 최근 여러 연구 결과들은 남극 오존홀이 회복되고 있음을 보여주고 있으며(Koo et al., 2018; Weber et al., 2018), 21세기 내에 오존홀은 사라질 것으로 기대되고 있다(WMO, 2018). 그러나 최근 유엔 환경계획(UNEP)에 보고되지 않는 새로운 CFC-11의 방출이 있는 것으로 추정되며(Montzka et al., 2018), 그 방출이 계속된다면 성층권오존 회복이 지체될 수도 있어 성층권 오존농도에 대한 지속적인 감시가 요구된다.

남극장보고과학기지(74° 37.4'S, 164° 12.0'E, 이하 '장보고기지')에서는 2015년부터 고위도 남극대륙 연안 성층권의 오존농도의 연직분포 변화를 감시하기 위해 오존존데를 이용한 관측이 수행되고 있다. 오존 센서(ECC6AB, Science Pump Corporation, USA)는 라디오존데(RS41, Vaisala, Finland)와 연결, 1,200g의 기상관측용 풍선(TOTEX)에 접속되어 관측 당일 2330 UTC에 비양된다. 관측자료는 라디오존데를 통해 1초마다 지상 수신장치로 자료가 보내져 약 100분 동안 기록된다. 상층 기온이 풍선 운영의 최저 온도(-80°C)보다 낮거나, 다른 요인으로 인해 목표 고도에 도달하지 못하는 경우가 발생하기도 하여 오존존데 비양 전 풍선은 기름 피막 처리가 된다. 남극 고위도에 위치한 장보고기지에서 5월 8일부터 8월 7일까지는 태양이 뜨지 않는 극야 기간이며, 이 기간 성층권 기온은 매우 낮아 극성층권 구름이 형성되어 오존홀 형성 조건이 갖추어 진다. 2021년에는 총 25회의 오존 존데 관측이 수행되었는데 그 중 2회는 고도가 낮았거나(10월 10일, 약 13 km) 오존 농도값이 정상 범위를 벗어나(10월 22일) 이번 분석에서는 제외하였다. 3월 13일(23 km)과 8월 19일(23 km) 오존존데 비양고도는 상대적으로 낮았고, 나머지 21회는 약 25 km 고도 이상까지 비양되었다.

월별 비양 횟수는 1~7월에는 월 1회, 8월에는 3회, 오존홀 생성 기간을 포함하는 9~10월에는 5회, 11월에는 4회, 그리고 12월에는 1회이다(그림 8.4.3). 오존존데의 관측 중 이동 거리는 8월 약 27 km에서 10월의 220 km 이상이었으며, 이동 방향은 상층 편서풍의 영향으로 동쪽이었다.

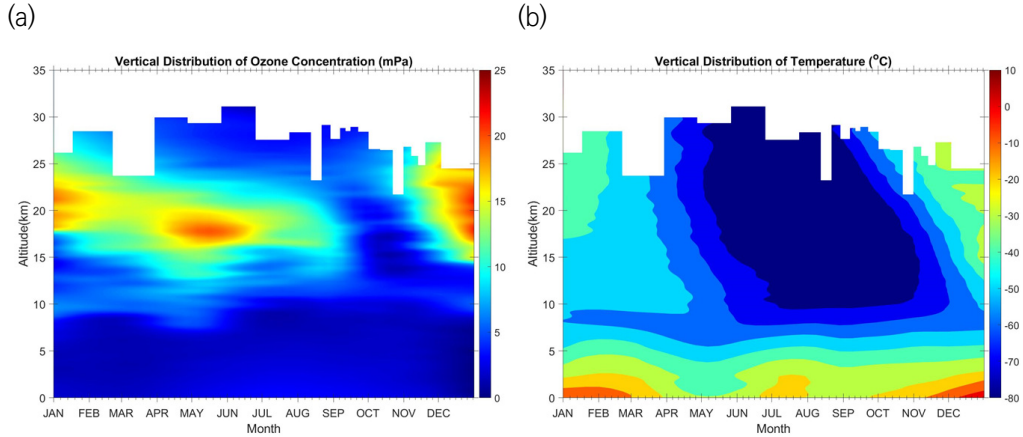


그림 8.4.1 2021년 장보고기지에서 관측된 연직 (a) 오존농도와 (b) 기온의 연변동.

그림 8.4.1은 2021년 1월부터 12월까지 총 23회의 오존존데 관측 결과이며 장보고기지서부터 성층권까지의 연직 오존농도 및 기온의 연변동을 보여준다. 오존농도가 최대가 되는 고도는 하계 기간은 20 km 부근인데 반해, 3월부터 8월까지 최대농도가 나타나는 고도가 약 17 km 까지 낮아지다가 9월과 10월에는 유사 고도의 농도가 매우 낮아지는 오존홀이 발생하였다. 연직 기온의 경우, 극야가 시작되는 5월 초 이후 약 -80 °C 전후의 극저온이 25~30 km 고도에서 나타나기 시작하여 오존홀이 발생하는 9월은 약 10 km 고도까지 극저온이 내려온 후 10월 말 극저온은 사라졌다. 그림 8.4.2는 미국 NASA Ozone Watch에서 제공한 위성으로 관측된 2021년 남극 상공 오존홀의 변화이다. 오존홀은 8월 중순부터 빠르게 성장하여 9월 7일 최대 면적(2500만 km²)을 기록한 이후 감소하다 12월 하순에 완전히 사라졌다. 이 기간에 기록된 오존 최저 농도는 92 DU(10월 7일)이다. 한편, 오존존데로 관측된 장보고기지에서는 8월 24일 ~ 9월 4일까지 오존 전량이 점차 줄어들었으며, 남극 오존홀 면적이 최대가 되는 시기(9월 7일)와 비슷한 9월 9일부터 오존홀이 관측되었다(그림 8.4.3). 10월 27일 오존 전량은 최저값(138.6 DU)을 기록하였으며, 11월 10일(196 DU) 이후 오존홀은 더 이상 관측되지 않았다. 두 결과를 비교해 보면, 2021년 장보고기지에서의 오존홀은 남극 오존홀 발생 후 약 한 달 뒤 관측되었고, 남극 오존홀 소멸보다 약 한 달 일찍부터 관측되지 않았다.

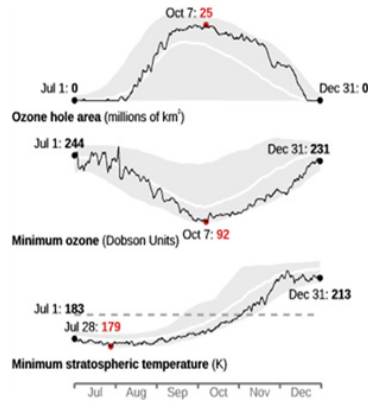


그림 8.4.2 2021년 7~12월 남극 성층권 오존홀의 면적, 최저 오존 전량 및 성층권 최저 기온 변동 (출처: NASA Ozone Watch).

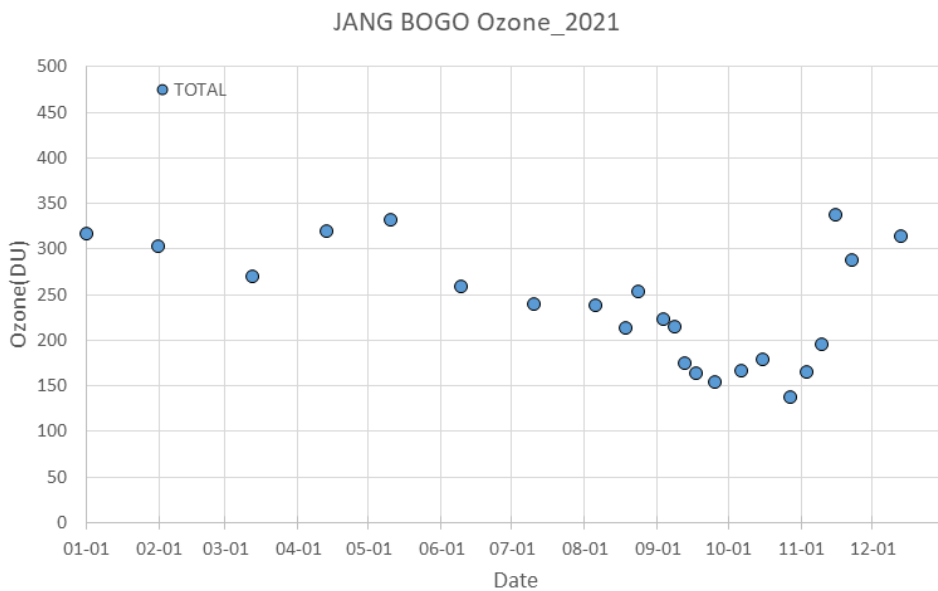


그림 8.4.3 장보고기지에서 오존존데로 관측된 2021년 오존 전량의 연변동.

미국 NASA Ozone Watch에서 제공한 1979년부터 2021년까지 오존홀 면적과 최저 오존농도의 관측에 의하면, 오존홀 면적은 1992년 2000만 km²를 넘어선 이래 2006년 최대 면적 2700만 km²을 기록하였으며, 최근까지 2000만 km² 이상을 유지하였다. 다만, 특정해 특히, 2019년은 930만 km²로 1984년 이래 최소 면적이 나타나기도 하는 등 변동이 심하였다. 2021년 남극 오존홀은 2020년과 비슷하게 농도는 낮으면서 면적은 넓은 특징을 보인다. 그림 8.4.4는



2015년에서 2021년까지 장보고기지에서 8~11월의 오존 전량의 변동이다. 이 기간 중 가장 강한 오존홀은 2015년에 관측되었다. 즉, 220 DU보다 낮은 경우가 87%(23회 중 20회)이었으며, 또한 가장 낮은 농도인 118 DU가 2015년 11월 16일 관측되었다. 두 번째로 강한 오존홀은 2021년 관측되었다. 15회 관측 중 9회에 오존홀이 관측되었으며, 가장 낮은 농도인 138.6 DU가 10월 28일 관측되었다. 2015년, 2020년 그리고 2021년은 다른 해와는 달리 오존홀이 11월 상순~중순까지 관측이 되어 강한 오존홀은 낮은 농도와 함께 지속 기간도 길었음을 보여준다. 2020년 오존홀은 11월 중순까지 관측되었으나 오존 전량 변동이 큰 반면, 2021년은 11월 상순까지 안정적인 오존 전량 변동이 관측되었다. 이는 장보고기지가 오존홀의 가장자리에 위치하여 극소용돌이의 위치에 큰 영향을 받기 때문이다. 오존홀 관측 종료 시점 변동이 매년 큰 만큼 향후 11월 관측을 NASA에서 제공하는 위성 관측자료를 기반으로 계획된 관측 외에 추가 관측 여부를 결정하는 것이 오존홀 감시에 효과적일 것으로 보인다.

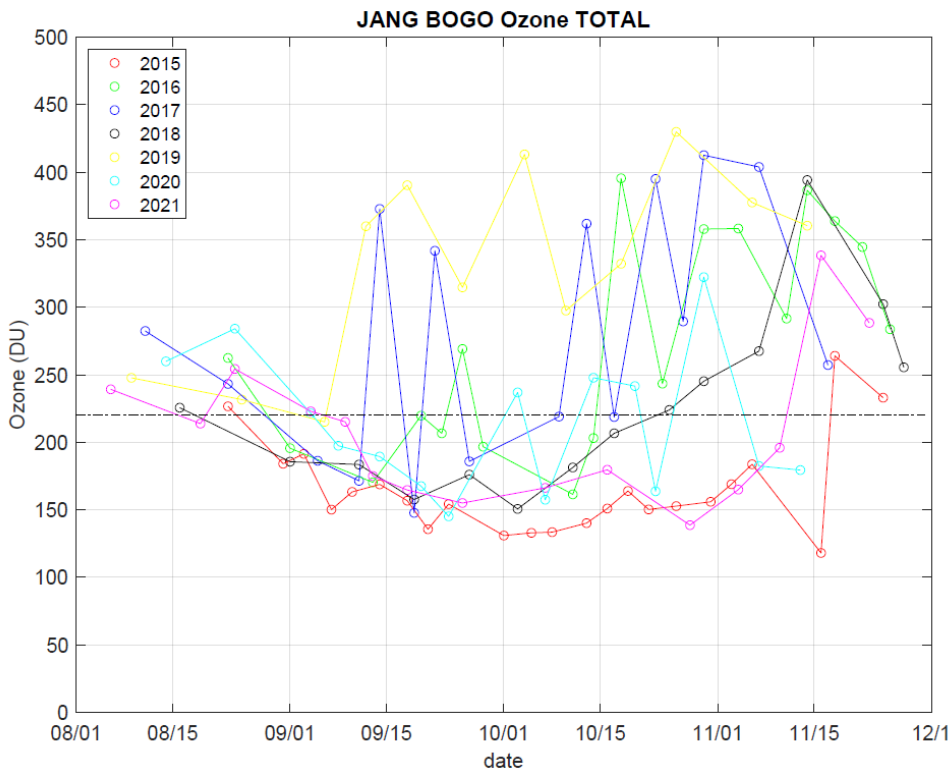


그림 8.4.4 장보고기지에서의 2015~2021년 8~11월의 오존 전량 변화(검은색 점선은 오존 전량이 220 DU를 가리킴).

8.5 2021년 성층권오존 특성

오존전량은 1994년부터 2017년까지는 포항에서 관측되었으며, 안면도와 고산에서 각각 2013년과 2011년부터 관측을 이어오고 있다. 그림 8.5.1은 현재까지 각 지점에서 관측된 연평균 오존전량을 위성에서 관측된 북위 30~40° 평균값과 비교하여 나타낸 것이다. 포항의 경우 현재 오존분광광도계를 통한 오존전량 관측은 수행되지 않고 있지만, 하층의 오존존데이터와 상층 오존 기후값 자료를 결합하여 오존전량을 산출하였다. 포항과 안면도, 고산 지점 모두 대체로 위성에서 관측된 위도 평균값보다 높은 관측값을 나타내고 있다. 이는 오존전량이 대체로 고위도 지역에서 높은 농도를 가지며, 한반도 지역이 북극진동으로 인해 위도 평균보다 고위도 기류의 영향을 크게 받는 것에 기인한다. 또한, 한반도는 기후적으로 한대 기단과 아열대 기단의 경계에 위치하기 때문에 안면도와 고산의 평균적인 농도는 약 20 DU의 비교적 큰 차이를 보인다. 2021년의 경우 안면도와 고산의 연평균은 산정되지 않았지만, 위성 평균자료 및 포항 오존존데이터를 통해 전년도보다는 다소 증가한 것으로 추정된다.

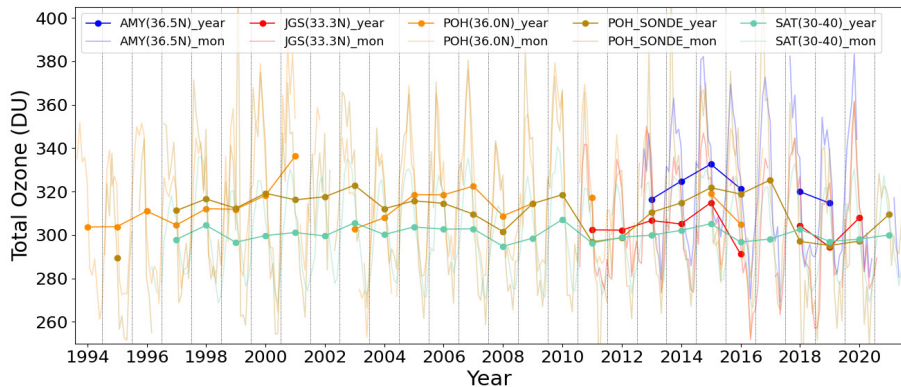


그림 8.5.1 포항(오존분광광도계와 오존존데), 안면도, 고산 지점과 위성(2004년 이전: TOMS/EP-TOMS, 2004~2011년: OMI/Aura, 2012년 이후: OMPS/Suomi-NPP)에서 관측된 북위 30~40° 지역의 연평균 오존 시계열.

전지구 오존 평가보고서(WMO, 2019)와 성층권오존 장기경향 분석 보고서(SPARC/IO3C/GAW, 2019)에 의하면, 1989년 몬트리올 의정서 발효 이후 1997년을 전후하여 오존전량은 약한 회복세를 보였지만 일부 지역을 제외하면 통계적으로 유의미한 수준의 변화는 나타나지 않고 있다. 그러나, 상층 오존에서 상대적으로 뚜렷하게 나타나는 오존의 회복 경향으로부터 성층권오존의 회복이 진행되고 있다는 결론을 내리고 있다. 그러나 성층권 하부에서의 오존 변화는 지역과 고도별로 큰 차이를 나타내고 있으며, 여전히 많은 불확실성을 갖고 있다. 또한 기후변화



와 맞물려 최근의 오존 변화는 더욱 복잡한 양상을 나타내며 국제적으로 다양한 연구가 진행되고 있다. 한반도를 포함하는 동아시아의 경우에도 오존전량의 변화 추세는 통계적으로 유의하지 않은 수준에서 약한 증가세를 나타내며, 특히, 한반도와 만주 지역은 동일 위도대에 비해 상대적으로 높은 증가세를 보이고 있다(Shin et al., 2021).

포항에서 관측된 2021년의 연직오존의 경우, 연평균과 월평균을 최근 10년 평균(2011~2020년)과 비교해 살펴보면 그림 8.5.2와 같다. 2021년의 오존 연직분포의 연평균은 9~14 km, 그리고 20~25 km 고도에서 최근 평균보다 눈에 띄게 낮은 값을 보였고, 지상에 가까운 최하층에서는 최근 평균보다 다소 높았다. 최근 평균 대비 2021년 월별 관측값 차이를 살펴보면, 9~14 km 고도에서는 3~5월에 주로 낮은 값이 나타났으며 이는 그림 8.3.1에서 확인한 바와 같이 봄철 성층권-대류권 상호교환이 최근 평균보다 약하게 나타난 것에 기인한다. 2021년 이상 기후보고서에 의하면 봄철 강한 극소용돌이로 인해 북극의 찬 공기가 고립되어 평년에 비해 찬 대륙고기압의 강도가 약했고, 이에 따라 고위도의 고농도 오존을 포함한 공기가 충분히 남하지 못한 것으로 추정된다. 한편, 오존층에 해당하는 20~25 km 고도의 경우 2021년 전반적으로 평균보다 높은 농도를 유지하였으며, 특히 1월과 9월에 최근 평균보다 높았다. 한편 8월에는 안면도에서 최근 평균보다 상당히 높은 농도가 관측되었는데(그림 8.2.1) 포항의 오존존대를 통해 같은 기간 연직오존을 살펴보면 성층권 전반적으로 높은 농도를 나타낸 것을 확인할 수 있다.

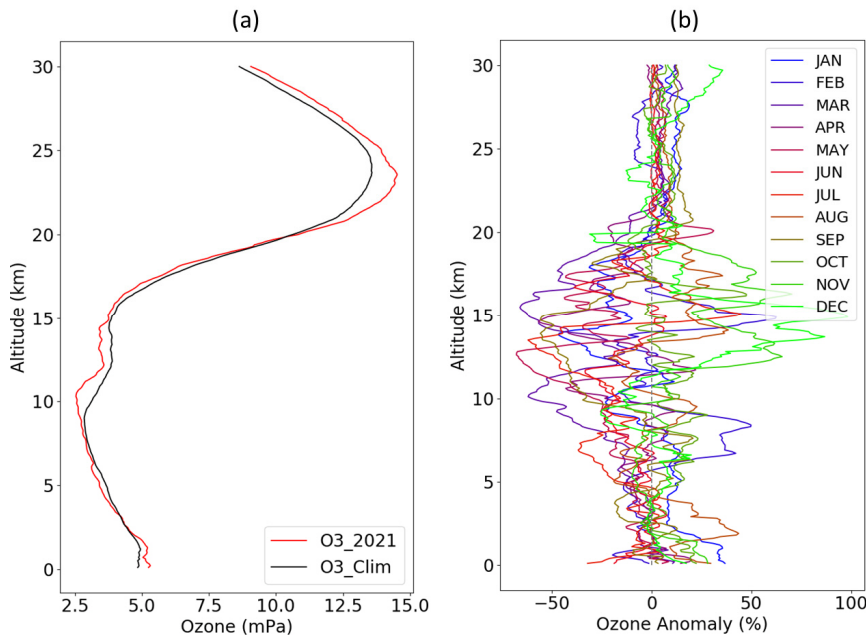


그림 8.5.2 최근 10년 (2011~2020년)과 2021년 포항지역 연직 오존농도의 (a) 연평균과 (b) 월별 편차.

포항에서 1995년부터 2021년까지 오존존데로 관측된 오존 분포를 살펴보면 그림 8.5.3과 같다. 연직적으로 오존은 주로 봄철 16~25 km 고도에서 최대농도가 나타나며, 비슷한 기간에 9~16 km 고도에서도 오존이 높은 농도로 분포하는 것을 확인할 수 있다. 성층권오존은 전지구 오존순환으로 인해 북반구 지역에서는 봄철에 최댓값을 보이며, 동아시아 지역의 경우 같은 기간 제트류가 남하하여 대류권계면 근처에서는 남북 또는 연직적인 공기혼합이 강하게 발생한다. 따라서 오존이차피크는 봄철에 주로 발생하게 되며 대류권 상층으로 유입된 고농도 오존은 강할 경우 대류권 하부까지도 영향을 미친다. 오존이차피크가 뚜렷하게 나타나는 경우에 그 경로를 역추적하면 그 기원지가 극 지역으로 치우치고 있다고 보고되고 있다(Park et al., 2012; Shin et al., 2020). 한편, 연직 분포의 장기적인 변화를 살펴보면, 동아시아 산업화에 따라 대류권 오존 농도의 증가가 두드러지게 나타난다. 또한, 오존농도가 가장 높은 20~25 km 고도에서는 2017년 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. 이 밖에도 오존농도는 매우 다양한 요인들에 의해 직, 간접적으로 영향을 받기 때문에 농도변화의 정확한 원인을 이해하기 위해서는 추가적인 관측자료의 확보와 지속적인 연구가 매우 중요하다.

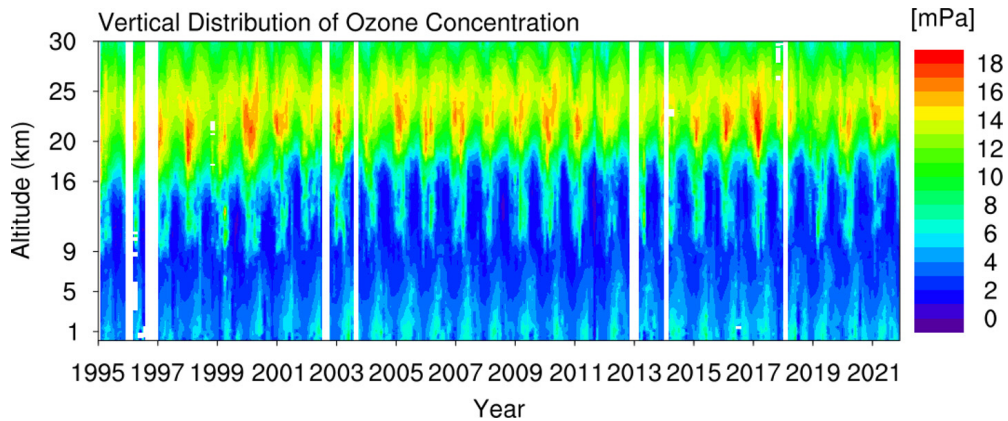


그림 8.5.3 포항 지점에서 관측된 연직오존 시계열.



제9장 자외선

9.1 자외선 감시 목적	170
9.2 자외선A	171
9.3 자외선B(홍반자외선)	172
9.4 서울 자외선 복사량	173
9.5 2021년 자외선 특성	175



제9장 자외선

- 자외선A 일누적 복사량 : 안면도 0.79 MJ/m^2 (최근 10년 대비 +10.6%)
고 산 0.74 MJ/m^2 (최근 9년 대비 + 3.8%)
- 자외선B 일최대 복사량 : 안면도 0.137 W/m^2 (최근 10년 대비 +10.0%)
고 산 0.149 W/m^2 (최근 9년 대비 +11.3%)
- 자외선A와 자외선B 모두 여름철 길었던 일조시간의 영향으로 증가

9.1 자외선 감시 목적

자외선은 파장에 따라 자외선A(320~400 nm), 자외선B(280~320 nm), 자외선C(100~280 nm)로 구분된다. 파장이 짧은 자외선C는 대기 상층에서 모두 흡수 또는 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 일으킬 수 있을 뿐 아니라 가축, 물고기, 농작물의 생육에도 크게 피해를 준다. 이와 동시에 자외선B는 인체의 비타민D 합성에 도움을 주는 긍정적인 효과도 있으므로 개인 건강과 날씨에 따라 자외선 노출량을 적절히 조절하는 것이 매우 중요하다(곽민경과 김재환, 2011).

자외선 복사는 태양 천정각, 고도, 지구와 태양 간 거리 등의 기하학적 요인과 오존 및 기타 미량가스, 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 자외선B(홍반자외선)를 각각 관측하고 있으며, 지구대기감시를 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 깊숙이 침투하여 피부 노화 등의 장기적인 피부 손상을 일으킬 수 있기 때문에 일 누적값의 분석이 중요하다. 따라서, 자외선A는 MJ/m² 단위의 일평균 누적값으로 분석된다. 2021년도 자외선A 일 누적 복사량의 최댓값은 울릉도 1.59 MJ/m²(6월 19일), 안면도 1.69 MJ/m²(7월 15일), 포항 1.47 MJ/m²(7월 27일), 고산 1.55 MJ/m²(7월 19일) 이었다. 그림 9.2.1은 2021년 자외선A의 일 누적 복사량 월 변화를 최근 평균값과 같이 비교하여 나타낸 것이며, 최근 평균은 관측 시작 연도의 차이로 인해 지점마다 상이한 평균 기간을 갖는다(안면도, 포항: 2011~2020년/ 고산, 울릉도 : 2012~2020년). 각 지역별 최근 평균값 대비 2021년 월평균 값은 고산을 제외한 세 지점에서 7월에 최근 평균보다 높았으며, 이러한 특성은 안면도와 울릉도 가장 두드러졌다. 일 누적 복사량의 월평균 최댓값은 울릉도 1.08 MJ/m², 고산 1.12 MJ/m², 안면도 1.26 MJ/m², 포항 1.05 MJ/m²으로, 고산을 제외한 모든 지역에서 7월에 가장 높았다. 여름철인 6~7월에는 일사는 강하지만 강수의 영향으로 다소 낮아지는 경향을 보이지만 2021년에는 이러한 특성이 거의 나타나지 않거나 약한 모습을 보였다.

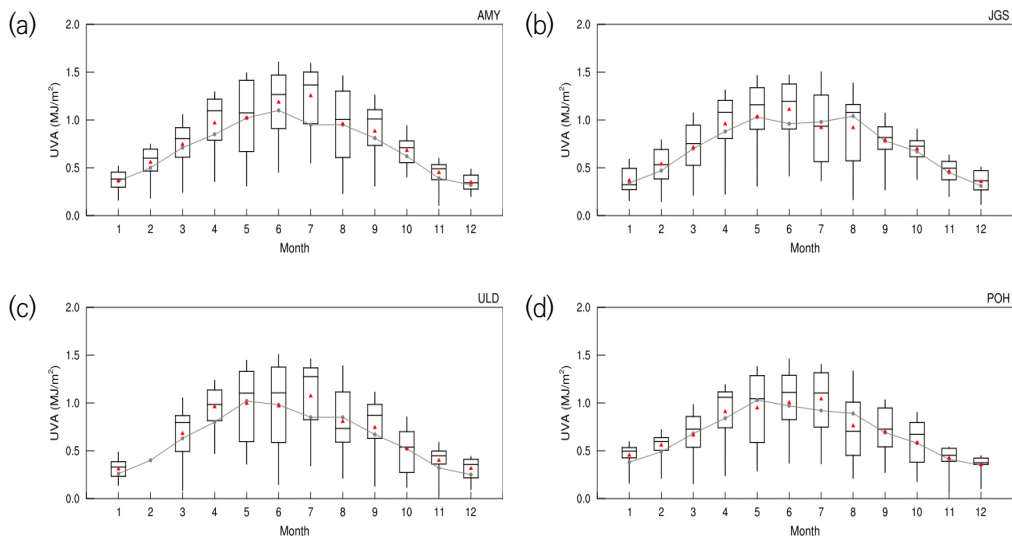


그림 9.2.1 2021년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD), (d) 포항(POH) 자외선A 일 누적 복사량의 월 변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 장기월평균(점-선).

9.3 자외선B(홍반자외선)

UV-Biometer를 이용해 관측하는 자외선B는 홍반에 대한 가중함수가 적용된 홍반자외선(Erythemal ultraviolet, EUV) 복사량이다. 자외선B의 관측 단위는 MED이며, MED는 유해 자외선 파장영역(280~320 nm)의 최소 홍반점 조사(Minimum Erythemal Dose; MED)를 나타내는 값으로 1 MED는 210 J/m²의 복사량 값으로 환산된다. 자외선B는 지속시간도 중요하지만 높은 자외선 값일수록 인체에 미치는 영향이 크기 때문에 일 최댓값 분석이 중요하다. 2021년 자외선B 일 최대 복사량의 최댓값은 울릉도 0.293 W/m²(7월 4일), 안면도 0.300 W/m²(7월 15일), 포항 0.257 W/m²(7월 18일), 고산 0.296 W/m²(6월 3일)으로 나타났다. 그림 9.3.1은 자외선B 일 최대 복사량의 월변화를 최근 평균값과 비교하여 나타낸 그림이다. 최근 평균값은 관측 기간의 차이로 인해 안면도, 포항은 2011~2020년, 고산, 울릉도는 2012~2020년을 평균하였다. 최근 평균에 의하면 자외선B는 겨울에 낮고, 여름에 높은 계절 변화를 뚜렷하게 보이고 있으며, 일 최대 복사 월평균은 주로 7~8월에 가장 높게 나타난다. 지점별 월평균 변화를 살펴보면 안면도(0.240 W/m²)와 울릉도(0.232 W/m²), 포항(0.203 W/m²)은 7월에, 고산(0.225 W/m²)은 6월에 가장 높았다. 2021년의 경우 자외선B 일 최대 복사의 월평균은 포항을 제외한 전 지점에서 대체로 최근 평균보다 높았고, 안면도의 경우 봄철과 초여름 큰 폭으로 높았다.

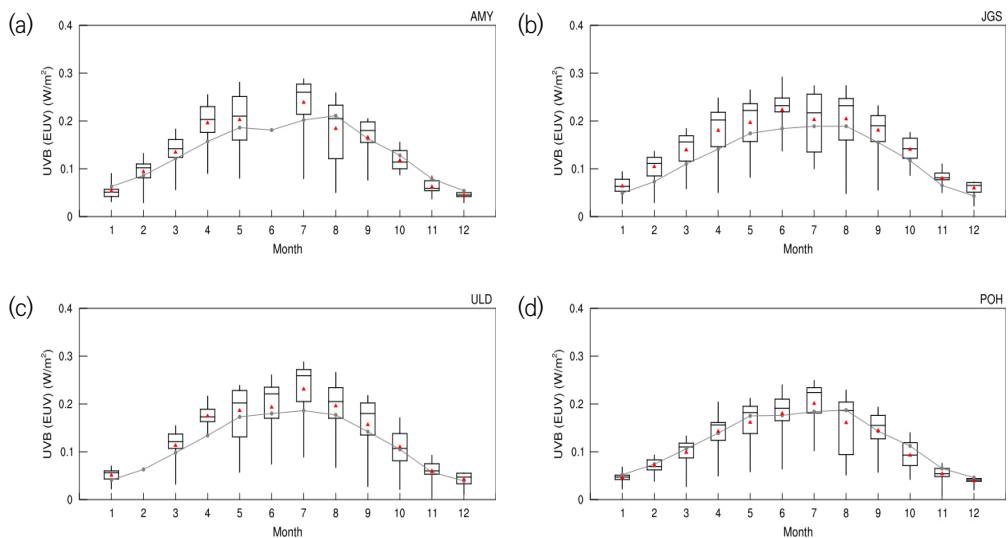


그림 9.3.1 2021년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD), (d) 포항(POH) 자외선B(홍반자외선) 복사량의 일 최댓값 월변화(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 삼각형은 평균)와 장기월평균(점-선).



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. 2019년도 관측은 장비의 통신 연결과 관측에 중요한 부품인 slitmask의 이상으로 2018년 3월 8일부터 관측이 중단된 이후 2019년 8월 29일부터 관측이 재개되었으나, 표준원기와의 검보정 이후 장기간이 경과하여 관측자료의 품질에 대한 신뢰도가 낮다(Dobson 분광광도계와의 오존 전량 비교 결과 상관계수가 0.81로 나타남). 따라서 본 보고서에서는 Brewer 분광광도계의 자외선 복사량 관측자료 대신 Ozone Monitoring Instrument(OMI)의 자외선 복사량 관측자료를 이용해 2021년의 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 가중합수를 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 가중합수를 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 7~8월에 나타났다.

그림 9.4.2은 EUV의 2020년 월 평균값과 장기평균값(2004~2021년)을 각각 나타낸 것이다. 장기평균값은 6월에 최댓값(3.2 kJ/m^2)을 가지며, 12월에 최솟값(0.61 kJ/m^2)을 가지며, 이는 2021년 6월에 월평균 최댓값이 나타난 것(3.67 kJ/m^2)과 12월에 최솟값이 나타난(0.69 kJ/m^2) 경향과 일치한다. 이와 같은 수치로 보았을 때, 평년 대비 변동의 폭이 더 커진 것으로 보인다.

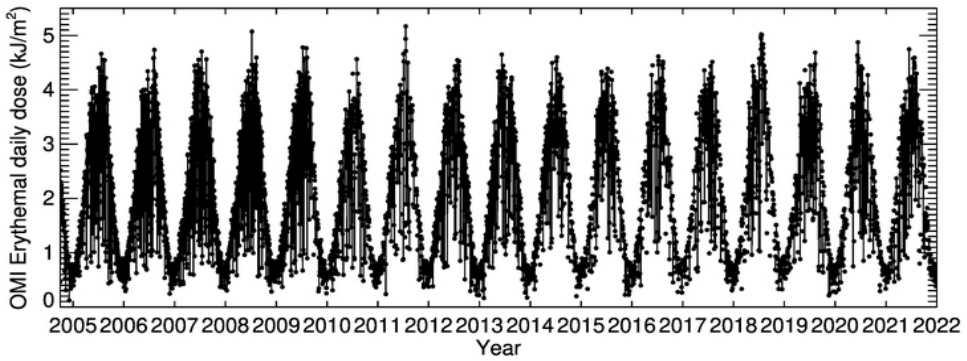


그림 9.4.1 서울 상공 일 적산된 홍반 자외선의 시계열(2004.10~2021.12).

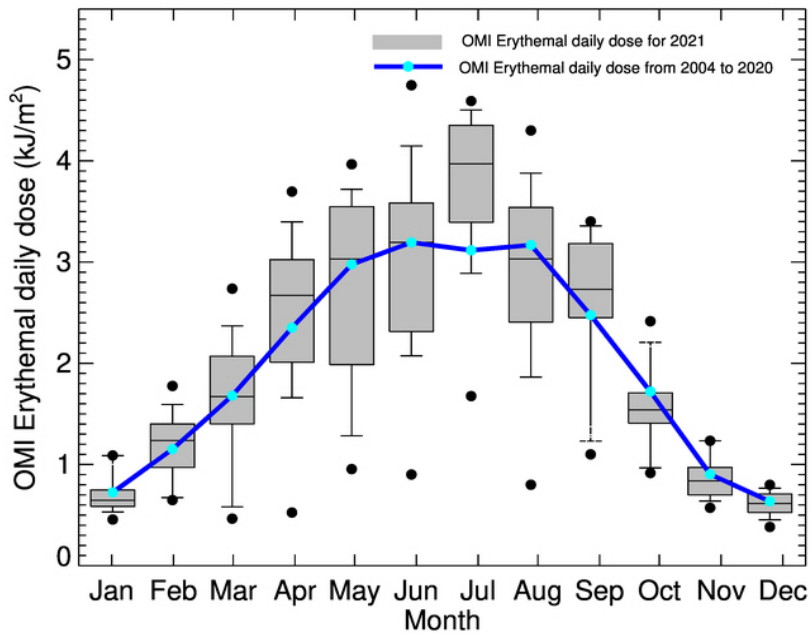


그림 9.4.2 서울 상공 일 적산된 홍반 자외선의 2021년 중 월별 복사량 변화(회색 박스 플롯 2021년의 홍반 자외선(상자의 세로 실선 양끝 5%, 95% 값, 상자 양끝 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 검은 점은 최댓값 및 최솟값) 및 1984~2020년 장기 월평균(점-선).



9.5 2021년 자외선 특성

자외선A 일 누적 복사량의 연 평균값은 울릉도 0.71 MJ/m², 안면도 0.79 MJ/m², 포항 0.71 MJ/m², 고산 0.74 MJ/m²으로 각각 최근 평균(안면도, 포항: 2011~2020년, 고산, 울릉도: 2012~2020년) 대비 12.0%, 10.6%, 3.5%, 3.6%의 변화를 보였다.

자외선B 일 최대 복사량의 연 평균값은 울릉도 0.139 W/m², 안면도 0.137 W/m², 포항 0.117 W/m², 고산 0.149 W/m²였으며, 각각 최근 평균(안면도, 포항: 2011~2020년, 고산, 울릉도: 2012~2020년) 대비 17.4%, 11.1%, -3.8%, 10.5%의 변화를 보였다.

자외선A와 자외선B는 각각 일 누적값과 일 최댓값으로 분석이 수행되며, 일 누적값으로 분석되는 자외선A의 경우, 일조시간의 영향을 크게 받는다. 반면, 일 최댓값으로 분석되는 자외선B의 경우 일조시간과 함께 태양광의 강도가 상당히 중요하게 작용하며 대기 중 오존농도 또한 크게 영향을 미칠 수 있다. 감시소의 기상 특성을 함께 살펴보기 위해 안면도의 경우 기후변화감시소에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129)의, 고산은 감시소에서 약 4 km 떨어져 있는 고산(185)의 종관기상관측자료를 이용하였다. 포항과 울릉도는 기후변화감시소와 인접한 포항(138)과 울릉도(115) 지점의 기상자료를 이용하여 자외선 관측값과 비교하였다(그림 9.5.1). 2021년은 일조시간의 경우 봄철 고산과 여름철 안면도에서 눈에 띄게 높았으며, 강수량은 3월 안면도와 여름철 전 지점에서 상당히 높았다.

2021년의 자외선A 일누적 복사량은 전 지점에서 최근 평균 대비 높은 관측값을 보였다. 고산을 제외한 전 지점에서 7월에, 고산에서는 6월에 최근 평균보다 눈에 띄게 높은 관측값을 보였다. 2021년도 이상기후보고서에 의하면, 7월 중국 북동부 부근 상층 기압능이 강화되어 평년보다 북쪽에 북태평양고기압이 발달하였고, 덥고 습한 공기의 유입과 맑은 날씨로 인해 폭염과 열대야가 지속되었다. 이에 따라 안면도와 포항, 울릉도에서 각각 최근 평균보다 58.4%, 27.4%, 9.2% 많은 일조시간을 기록했으며(그림 9.5.1), 이에 따라 자외선A 또한 높은 관측값을 보인 것으로 생각한다. 한편, 고산의 경우 7월이 아닌 6월에 자외선A의 최댓값이 관측되었고, 같은 기간 일조시간이 최근 평균 대비 51.6% 높았음을 확인할 수 있다. 한편, 3월에는 라니냐로 인한 서태평양 해수 온도가 높게 유지되면서 강수가 많았고 특히 안면도에서 최근 평균보다 두 배 이상의 강수가 내렸으나 일조시간은 비슷한 수준을 유지해 자외선A는 오히려 더 높은 값을 보였다.

자외선B의 경우에도 자외선A와 마찬가지로 대체로 여름철에 최근 평균 대비 높은 값을 나타냈으며, 안면도와 울릉도에서 높은 값을 보였다. 또한, 안면도와 울릉도, 포항은 7월에 고산은 6월에 높은 값을 보였다. 이는 역시 7월의 폭염과 열대야의 영향으로 볼 수 있다. 자외선B는 일 최댓값으로 분석되어 자외선A에 비해 일조시간의 영향을 덜 받기 때문에 대개 일조시간이 적더라도

일사가 강한 7월에 가장 높은 값을 보인다. 그러나 2021년의 경우에는 7월에 대부분의 지역에서 최근 평균보다 일조시간이 길어 자외선A 또한 7월에 최댓값을 보였고, 이에 따라 자외선A와 자외선B가 더욱 유사한 월변화 특성을 보인 것으로 이해할 수 있다.

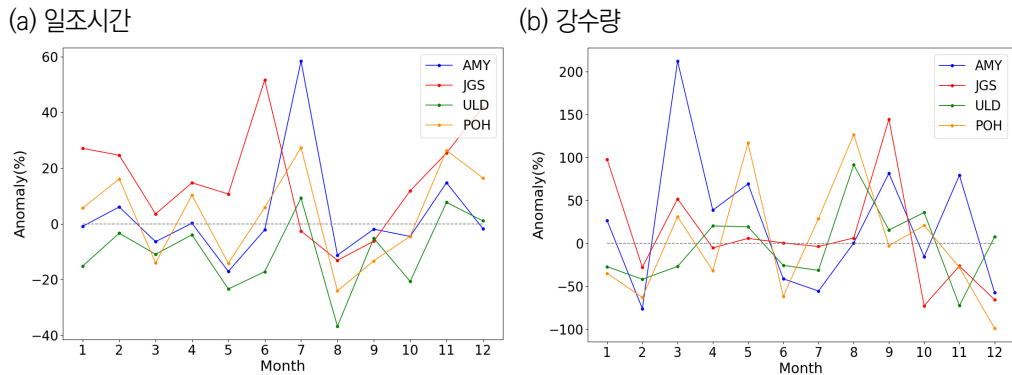


그림 9.5.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 포항(POH) 네 지점의 최근 평균(2011~2020년) 대비 2021년 (a) 일조시간 및 (b) 강수량의 월별 변화량.

각 기후변화감시소에서 관측된 자외선A와 자외선B의 변화는 그림 9.5.2과 같다. 지점별로 비교해 봤을 때, 태양천정각이 가장 낮은 저위도에 위치한 고산에서 자외선A와 자외선B 모두 전체적으로 높은 관측값이 나타났으며, 이 같은 위도에 따른 지역적 특성은 특히 일 누적값으로 분석한 자외선A에서 뚜렷했다. 그러나 자외선은 위도 이외에도 구름 및 대기 구성성분의 영향을 크게 받기 때문에 일부 지역에서는 고위도 지역에서 오히려 더 높은 복사량이 측정되는 모습도 볼 수 있다. 자외선은 2013년 이래로 다소 증가하는 특성을 보였지만 증가세가 뚜렷하진 않았다.

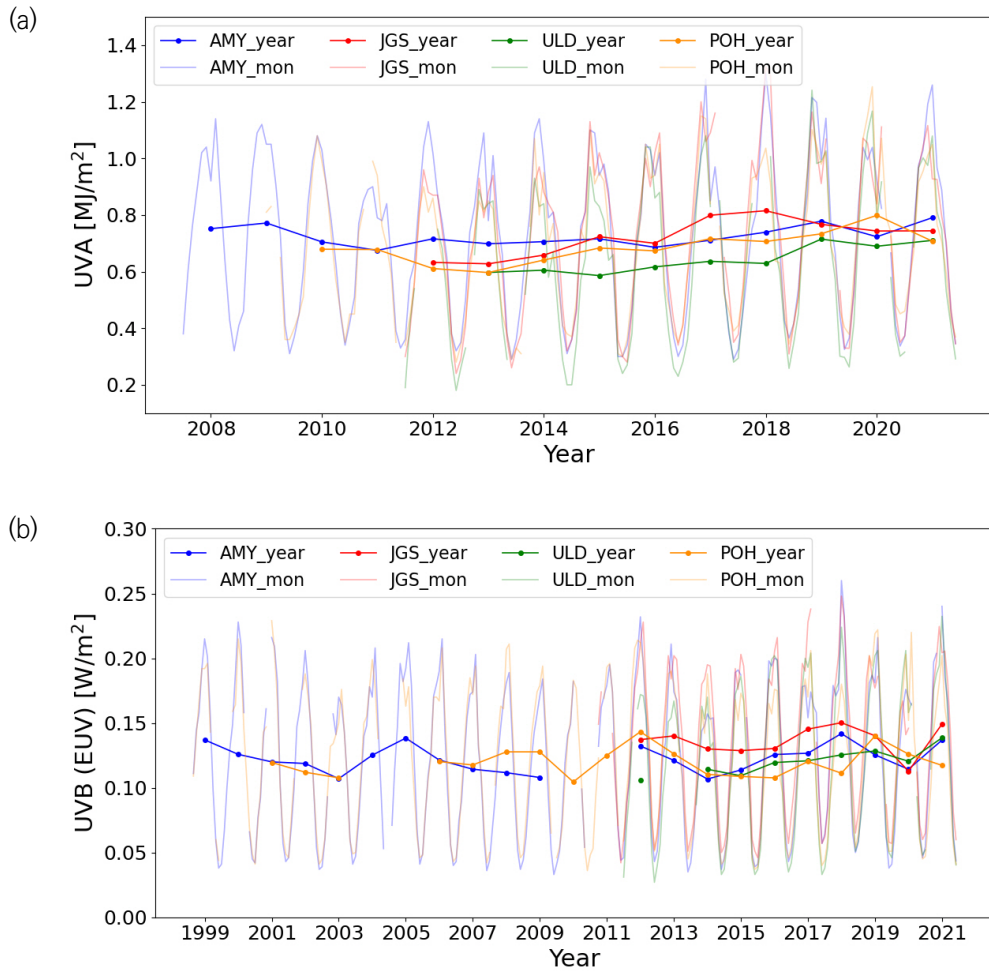


그림 9.5.2 지점별 (a) 자외선A와 (b) 자외선B(홍반자외선) 월별/연별 관측값의 변화(안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD), 포항(POH)).

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타





제10장 총대기침적

10.1 총대기침적 감시 목적	180
10.2 2021년 강수채취율	182
10.3 pH(산성도)	185
10.4 전기전도도	188
10.5 강수이온성분	190
10.6 총대기침적량	201
10.7 2021년 강수성분 특성	206



제10장 총대기침적

- 습성침적: 안면도 8863.0 mg/m²/year (최근 10년 대비 +23.2%)
고 산 9063.1 mg/m²/year (최근 10년 대비 -13.4%)
울릉도 23145.6 mg/m²/year (최근 10년 대비 -9.3%)
- 건성침적: 안면도 3966.8 mg/m²/year (최근 10년 대비 +7.9%)
- 습성침적 성분 중 붓철에 토양성분(Ca²⁺)이 황사영향으로 최근 10년보다 높은 농도를 보임

10.1 총대기침적 감시 목적

10.1.1 총대기침적 감시의 목적

대기 중에 부유하는 오염물질은 습성침적과 건성침적의 형태로 지면에 도달하게 된다. 습성 침적은 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 제거하게 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 자유낙하는 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 부피 가중평균을 고려해야 하며, 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 강수채취율

강수채취율이란 총강수량 중 채취한 강수량의 비율을 의미하며, 2021년 강수채취율은 안면도 98.8%, 고산 97.8%, 울릉도 96.4%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(2011~2020년)과 2021년의 단순 평균강수량 그래프이다. 최근 10년간의 평균강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 917.1 mm, 1399.2 mm, 1540.1 mm이며, 2021년 감시소의 강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 1089.0 mm, 1480.0 mm, 1532.6 mm로 최근 10년의 약 118.8%, 105.8%, 99.5%이며, 울릉도를 제외한 나머지 감시소는 최근 10년보다는 많은 강수량을 보였다.

또한, 2021년 강수량과 최근 10년 강수량을 단순 평균한 값을 계절별로 비교하였다(그림 10.2.3). 세 감시소 모두 여름철에 최대 강수량을 나타냈으며, 최근 10년과 비슷한 강수량을 보였다. 안면도, 고산 감시소는 봄철을 제외한 나머지 계절에 높은 강수량을 보였다. 그러나 울릉도 감시소는 최근 10년보다 다 감소하는 경향을 나타냈다.

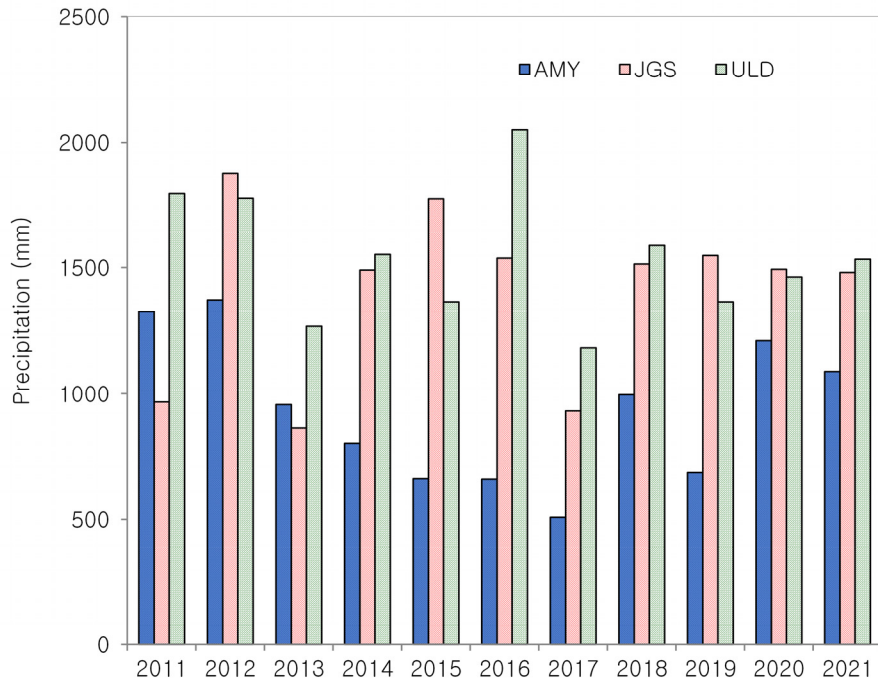


그림 10.2.1 2011~2021년까지 연도별 총 강수량(mm)(안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)).
*고산: 2020년 4월 일부 고산기상대 AWS 자료 사용

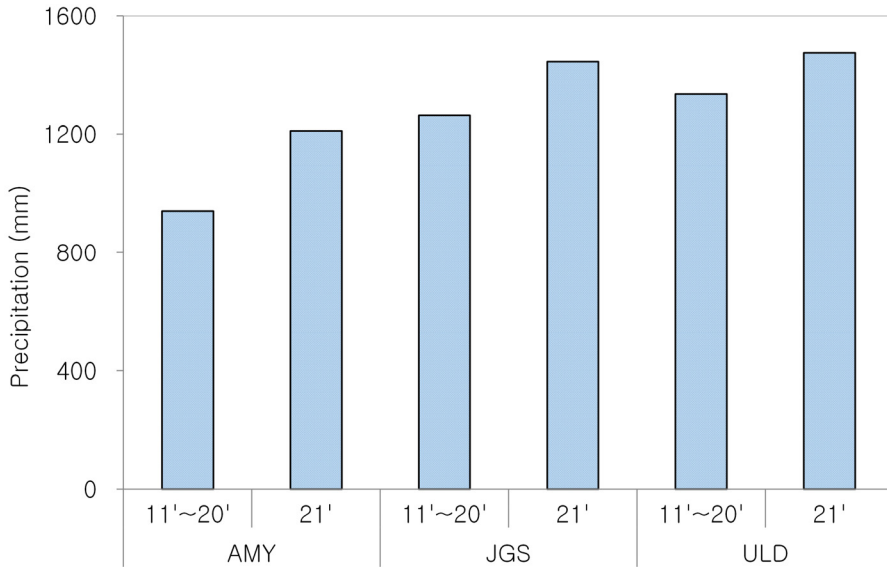


그림 10.2.2 감시소별 최근 10년(2011~2020년) 평균 강수량(mm)과 2021년 총 강수량(mm) 비교 (안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)).

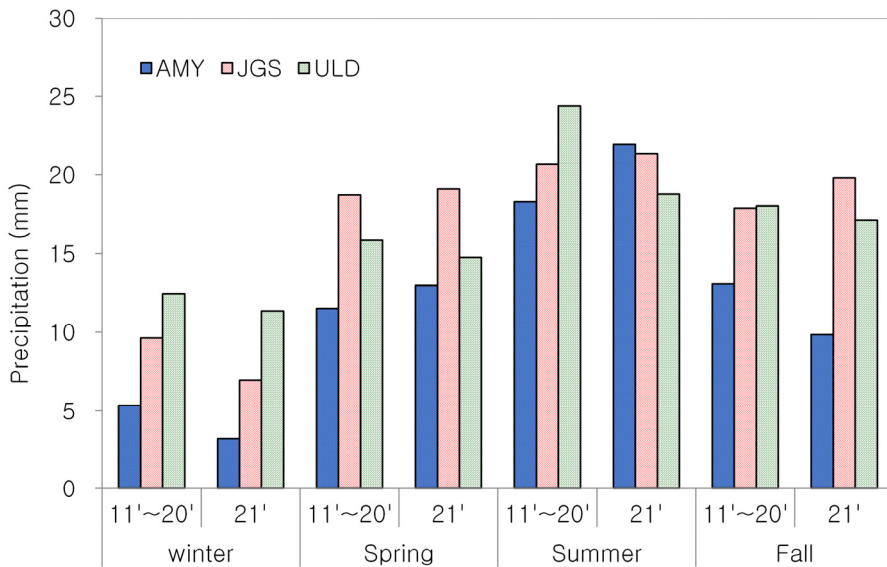


그림 10.2.3 계절별 최근 10년(2011~2020년) 강수량과 당해 연도 단순 평균강수량(mm) (안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)).



10.3 pH(산성도)

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료를 최근 10년(2011~2020년), 2021년의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 pH를 비교하였다.

안면도, 고산, 울릉도 강수의 부피가중평균 pH를 최근 10년 자료를 확인한 결과 각각 4.78, 4.93, 4.81이며, 2021년도 강수의 부피가중평균 pH는 안면도 5.32, 고산 5.19, 울릉도 5.09로 전지역 모두 pH가 5 이상으로 최근 10년 평균 농도보다 약간 높은 것으로 조사되었다(표10.3.1, 그림10.3.1(a)). 또한, 최근 10년간의 계절별 부피가중평균의 pH와 2021년의 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 4.44로 가장 낮은 값을 나타냈다. 반면에 여름철의 2021년 안면도와 고산 강수의 pH가 5.58, 5.45, 울릉도 강수 pH는 가을철에 5.24로 가장 높은 값을 보였다.

감시소별 강수에 대한 pH 구간별 발생 빈도는 그림 10.3.2와 같다. 최근 10년(2011~2020년) 강수 pH 분포와 전체 기간 자료에서, 모든 지역인 안면도, 고산, 울릉도에서 pH 4.5~5.0 구간에서 최대빈도가 나타났다. 2021년에는 울릉도는 최근 10년(2011~2020년) 분포와 유사한 경향을 보였으나, 안면도에서 pH 6.0 구간, 고산은 pH 4.5~5.0 구간, pH 5.5~6.0 구간에 최대 빈도수를 보였다. 이는 2021년 황사에 영향으로 pH가 5.5 이상으로 많이 나타난 것으로 보인다. 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, 고산지역은 최근 10년보다 알칼리물질인 NH_4^+ , Ca^{2+} 성분의 농도에 의해 pH가 높아진 것이라 판단된다.

표 10.3.1 2021년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 강수의 부피가중평균 pH(산성도)

기 간	감시소	안면도(AMY)	고 산(JGS)	울릉도(ULD)
2021년		5.32	5.19	5.09
최근 10년 (2011~2020년)		4.78	4.93	4.81

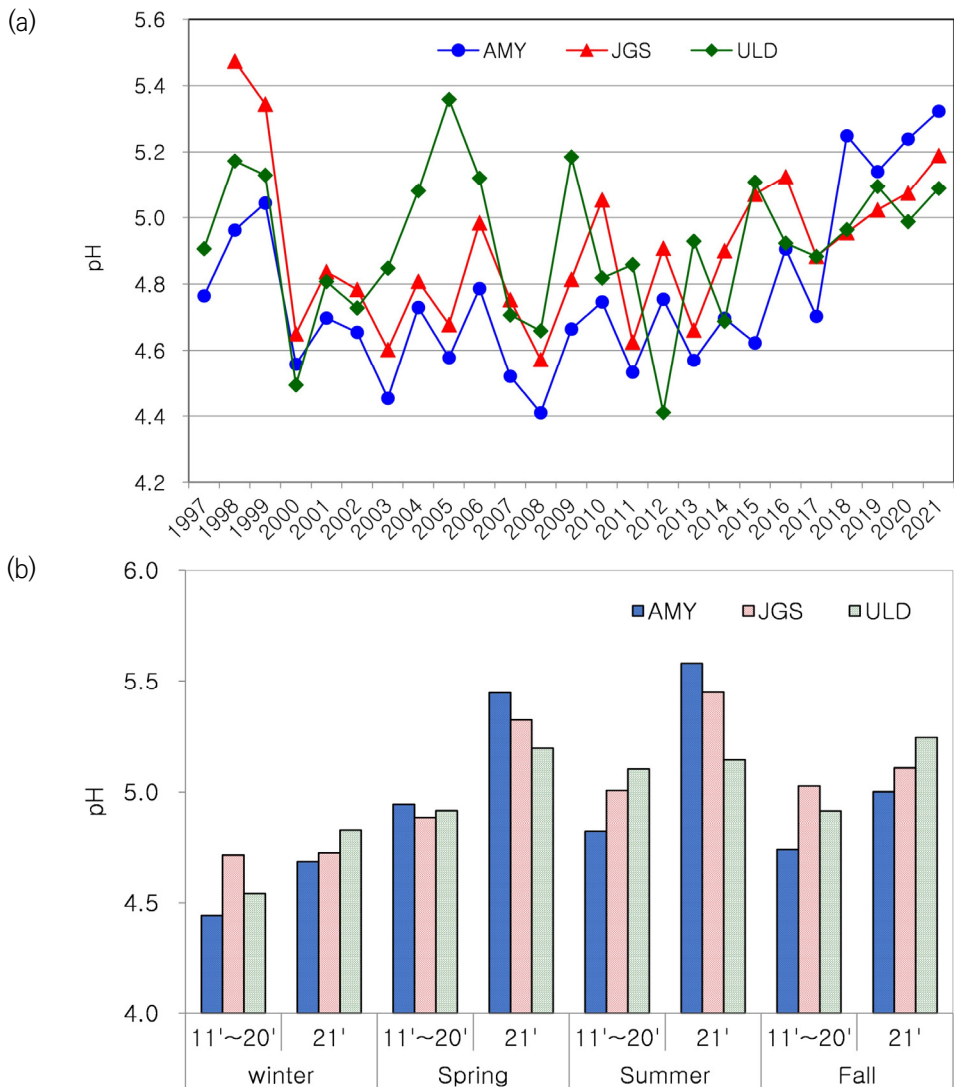


그림 10.3.1 (a) 연도별, (b) 계절별 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 부피가중평균의 pH(산성도) 변화.

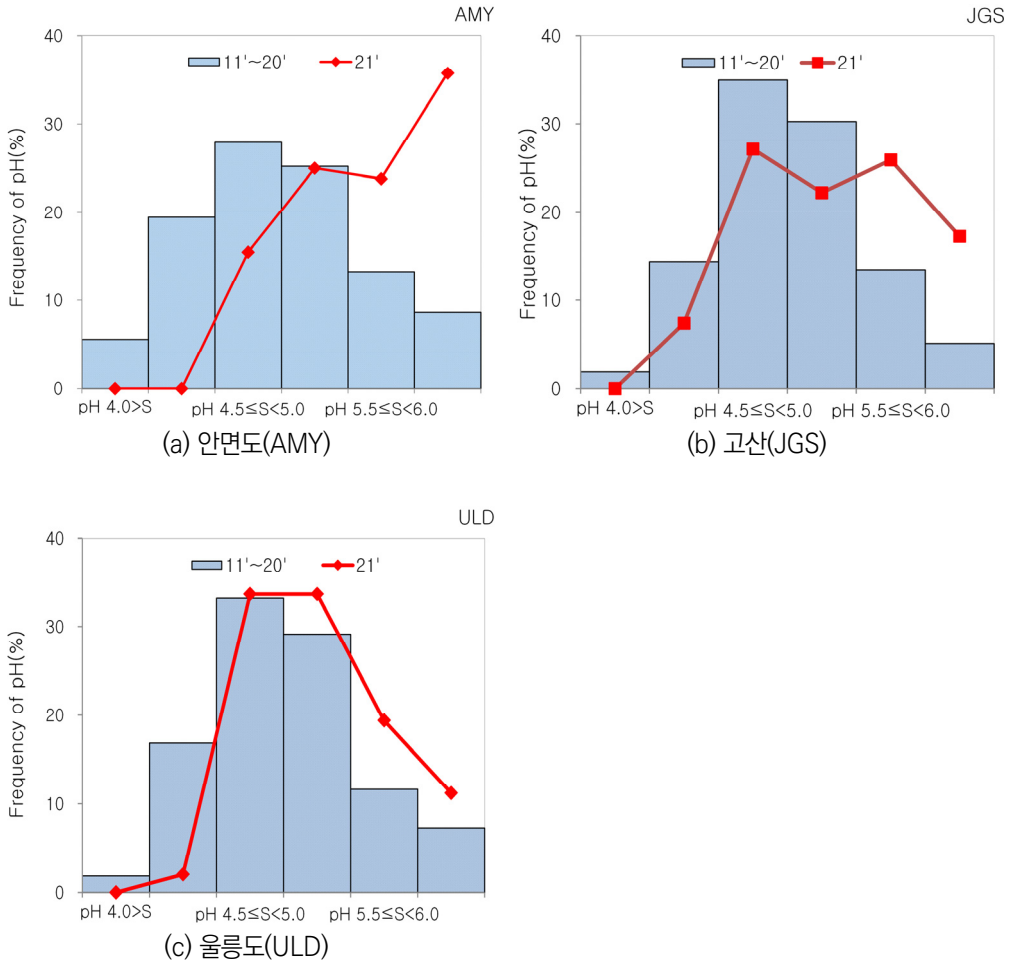


그림 10.3.2 감시소별 강수의 pH(산성도) 발생 빈도 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD).

10.4 전기전도도

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료를 최근 10년(2011~2020년), 2021년의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 전기전도도를 함께 비교하였다.

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 10년(2011~2020년)의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도를 확인해본 결과(표 10.4.1, 그림 10.4.2), 최근 10년간의 전기전도도의 값은 각각 24.4, 21.9, 48.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났다. 그리고 2021년도의 부피가중평균의 전기전도도는 안면도 19.7 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 고산 15.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 울릉도 37.6 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 고산지역이 가장 낮았다.

최근 10년과 2021년의 안면도, 고산, 울릉도 강수의 부피가중평균 전기전도도인 경우, 겨울철에 높고, 여름철에는 낮은 값을 나타냈다. 또한, 2021년도는 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도가 평년과 마찬가지로 겨울에 높고, 여름에 낮았다.

표 10.4.1 2021년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 강수의 부피가중평균 전기전도도($\mu\text{s}/\text{cm}$)

기간	감시소	안면도(AMY)	고산(JGS)	울릉도(ULD)
2021년		19.7	15.9	37.6
최근 10년 (2011~2020년)		24.4	21.9	48.5

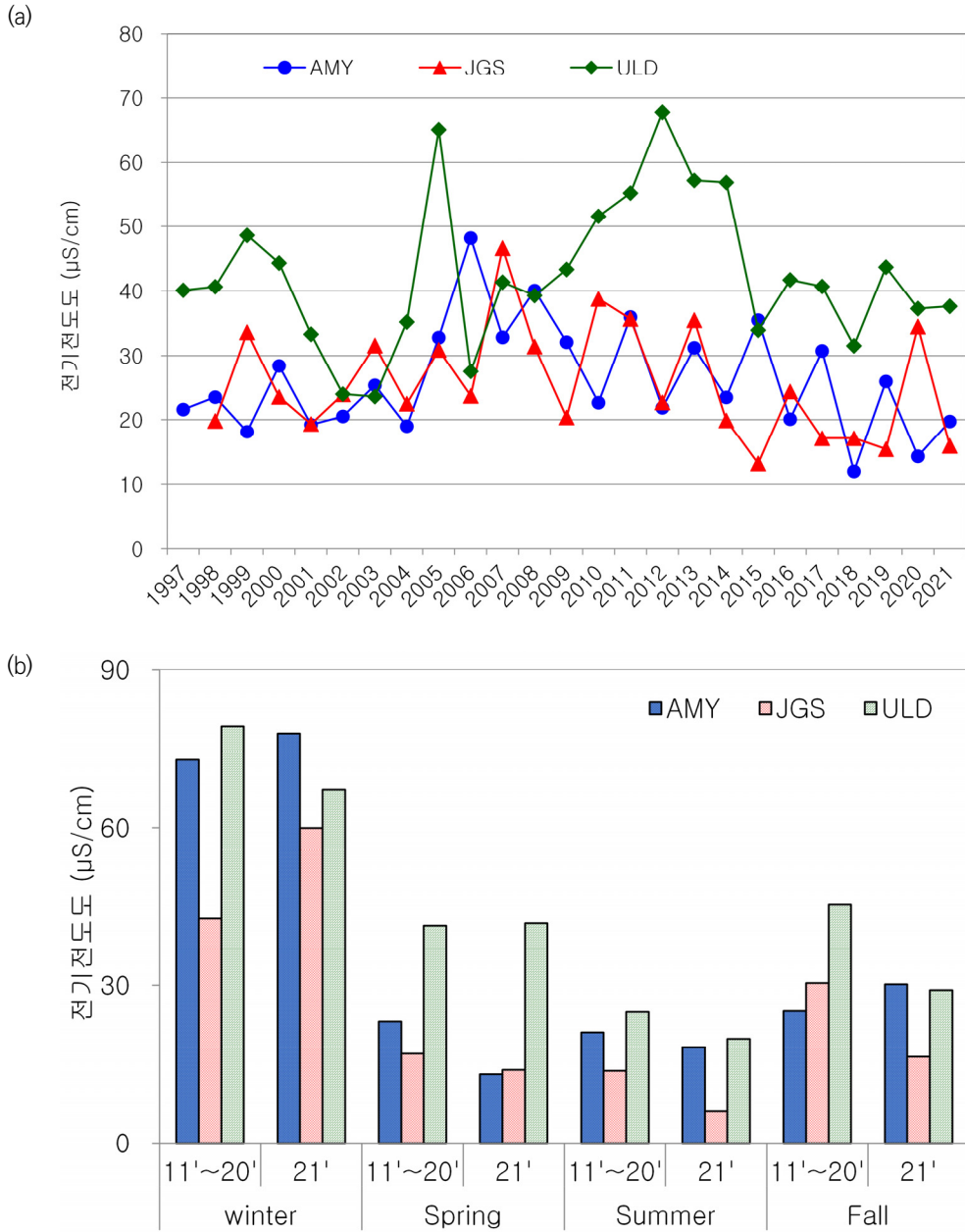


그림 10.4.1 감시소별 전기전도도의 (a) 부피가중평균변화, (b) 연도별 부피가중평균 계절별 부피가중평균 (안면도(AMI), 고산(JGS), 울릉도(ULD)).

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 총대기침적-, 2017”을 따라 강수화학 분석 자료를 검증하였다.

그림 10.5.1~10.5.3은 2021년의 안면도, 고산, 울릉도 세 감시소 강수일과 일별 농도를 그래프로 나타낸 것이다.

세 감시소 모두 대체로 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 구름 응결핵으로 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.

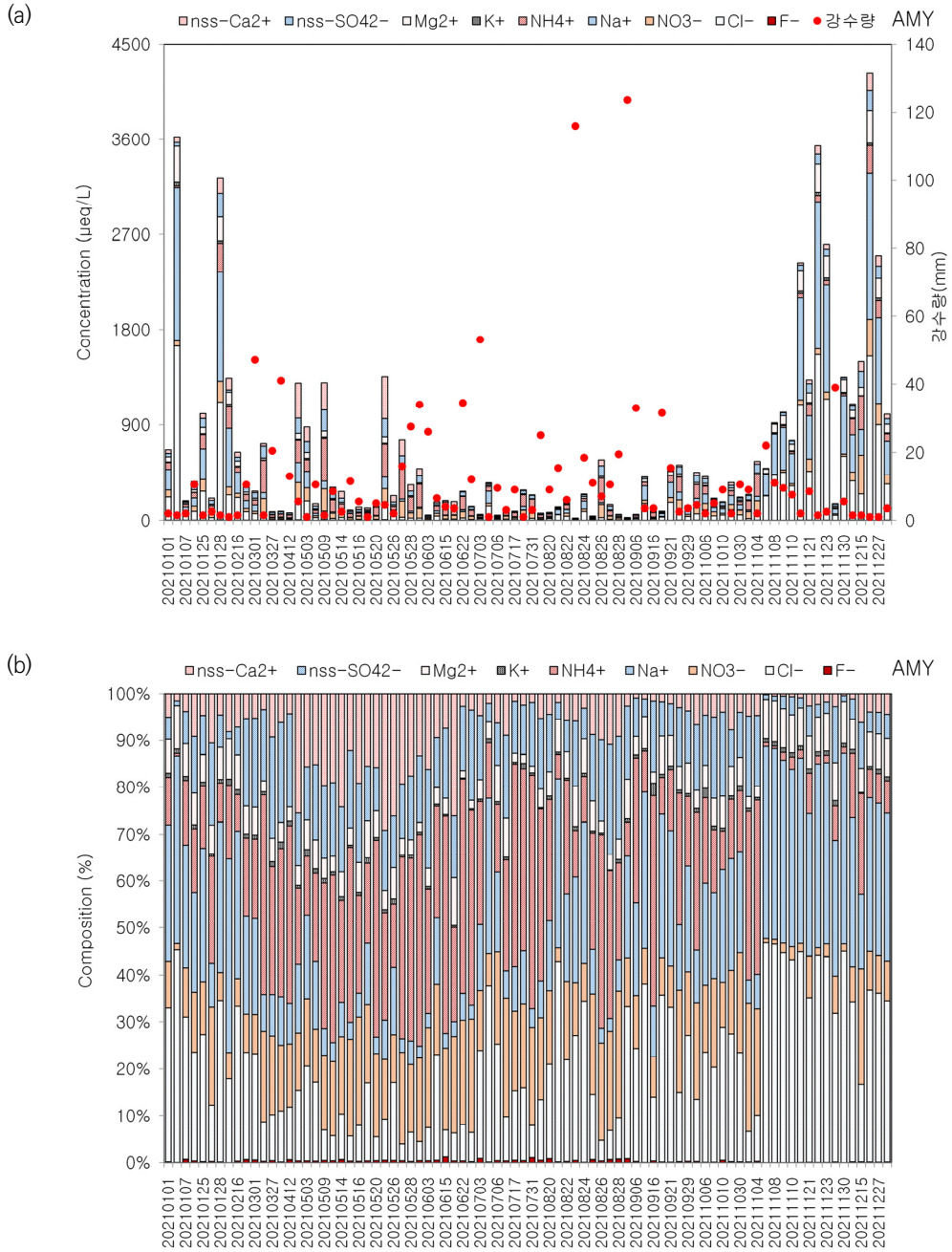


그림 10.5.1 2021년 안면도(AMY)의 강수성분 (a) 농도, (b) 조성비.

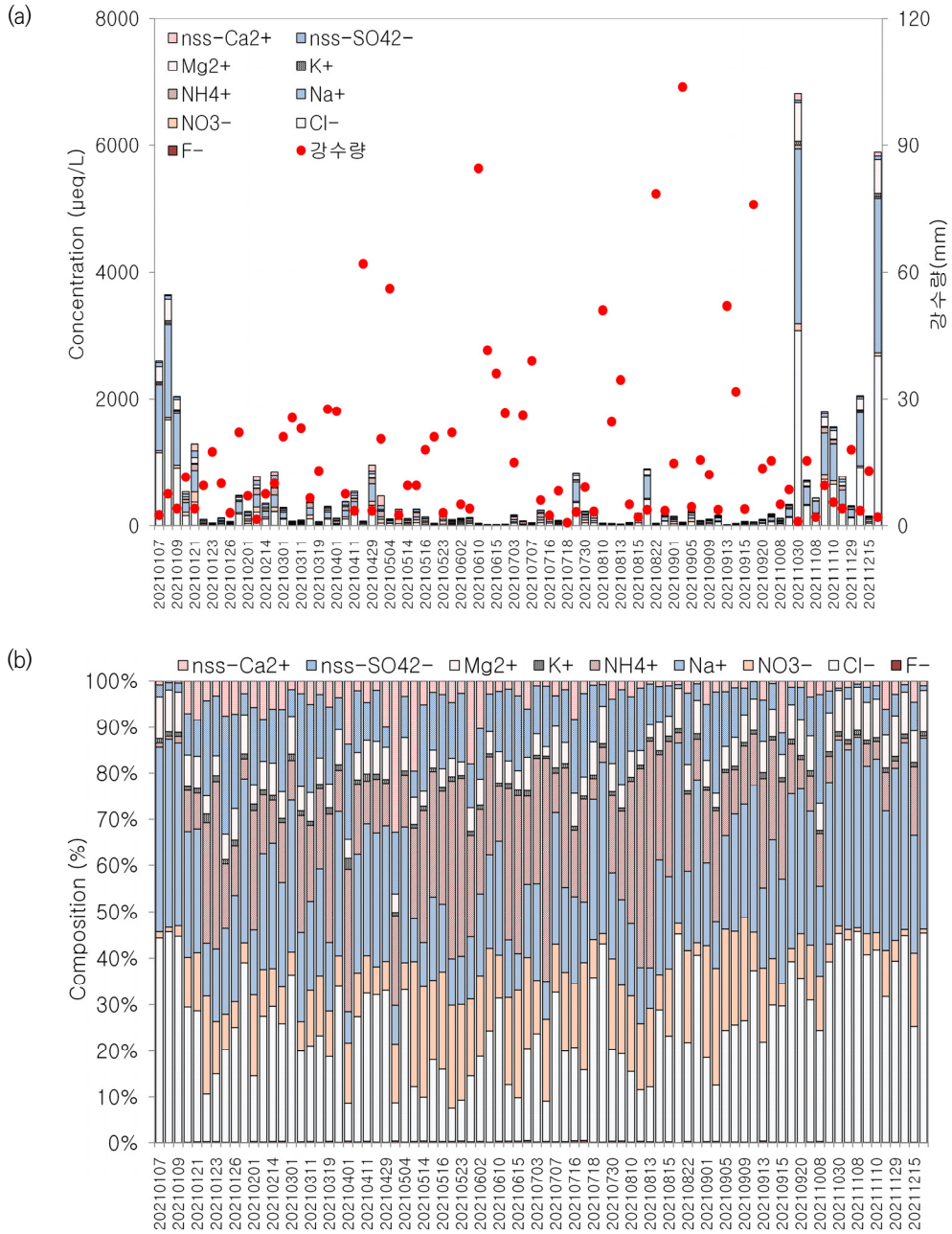


그림 10.5.2 2021년 고산(JGS)의 강수성분 (a) 농도, (b) 조성비.

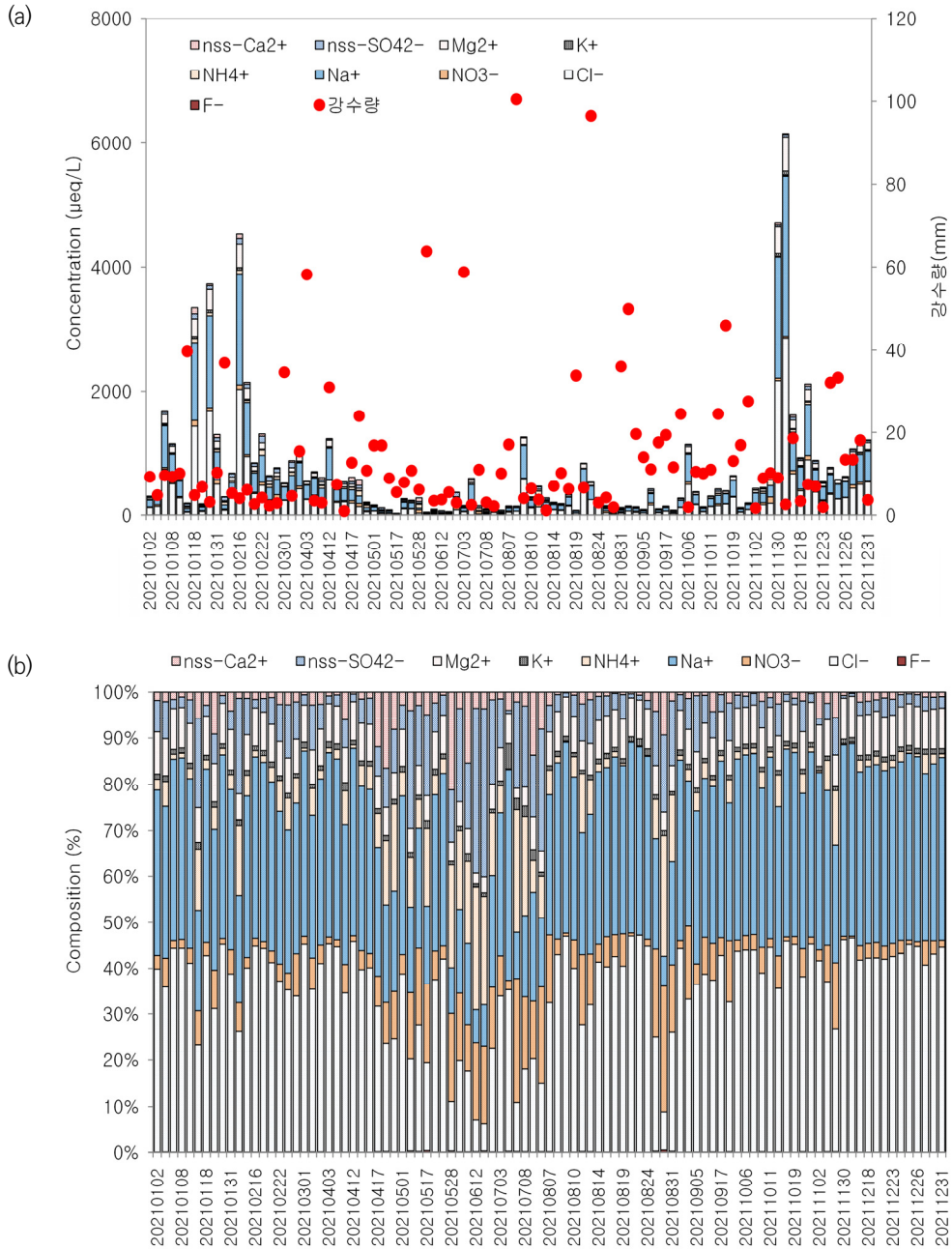


그림 10.5.3 2021년 울릉도(ULD)의 강수성분 (a) 농도, (b) 조성비.

10.5.2 강수성분의 연도별 농도

표 10.5.1과 그림 10.5.4는 최근 10년(2011~2020년)의 평균값과 당해 연도인 2021년의 평균값이며, 이때의 평균은 각각 채취된 강수량이 가중되어 계산되었다. 안면도, 고산, 울릉도의 모든 감시소는 해안가에 위치하여 있으므로, 해염성분인 Na^+ , Cl^- 성분의 농도가 가장 높았다.

2021년도 해염성분인 Na^+ , Cl^- 성분 다음으로 안면도에서는 NH_4^+ , 고산, 울릉도에서는 SO_4^{2-} 성분 농도가 가장 높았다. 안면도, 고산, 울릉도 각 감시소의 강수 성분 중 이차오염물질인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분을 비교해 보았다.

2021년도 안면도, 고산, 울릉도 강수 SO_4^{2-} 성분의 부피가중평균농도는 각각 31.1, 20.8, 41.0 $\mu\text{eq/L}$ 이며, 최근 10년(2011~2020년)은 각각 43.5, 30.3, 63.5 $\mu\text{eq/L}$ 로 나타났다. 안면도, 고산, 울릉도 NH_4^+ 성분의 부피가중평균농도는 2021년 각각 46.1, 18.5, 14.2 $\mu\text{eq/L}$, 최근 10년은 40.9, 17.8, 25.1 $\mu\text{eq/L}$ 의 값을 보였다. 또한, NO_3^- 성분의 2021년은 각각 27.2, 14.4, 16.4 $\mu\text{eq/L}$, 최근 10년은 30.5, 16.9, 27.5 $\mu\text{eq/L}$ 의 값을 보였다(표 10.5.1).

따라서 2021년의 SO_4^{2-} 성분 농도를 최근 10년 평균 농도와 비교한 결과 안면도, 고산, 울릉도 강수 각각 1.4, 1.5, 1.5배, NO_3^- 성분은 각각 1.1, 1.2, 1.7배 감소하였다. 그러나 NH_4^+ 성분은 울릉도를 제외하고 소폭 증가했거나 비슷한 값을 보였다. 토양 성분인 Ca^{2+} 은 안면도에서 최근 10년보다 증가한 값을 보였고, 고산, 울릉도는 약 1.2, 1.8배 낮은 농도를 보였다.

표 10.5.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 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 (AMY)	2021년	0.7	62.7	27.2	55.1	46.1	1.9	14.7
	최근 10년	1.0	60.6	30.5	52.0	40.9	2.3	13.9	43.5 (37.2)	16.3 (14.0)
고산 (JGS)	2021년	0.3	63.1	14.4	56.9	18.5	1.8	13.9	30.3 (21.2)	9.9 (7.4)
	최근 10년	0.5	87.1	16.9	75.0	17.8	2.6	17.6	20.8 (13.9)	11.5 (8.2)
울릉도 (ULD)	2021년	0.2	202.6	16.4	181.4	14.2	5.2	40.4	41.0 (19.1)	16.9 (8.9)
	최근 10년	0.8	232.6	27.5	201.4	25.1	12.2	45.7	63.5 (39.1)	29.9 (21.1)

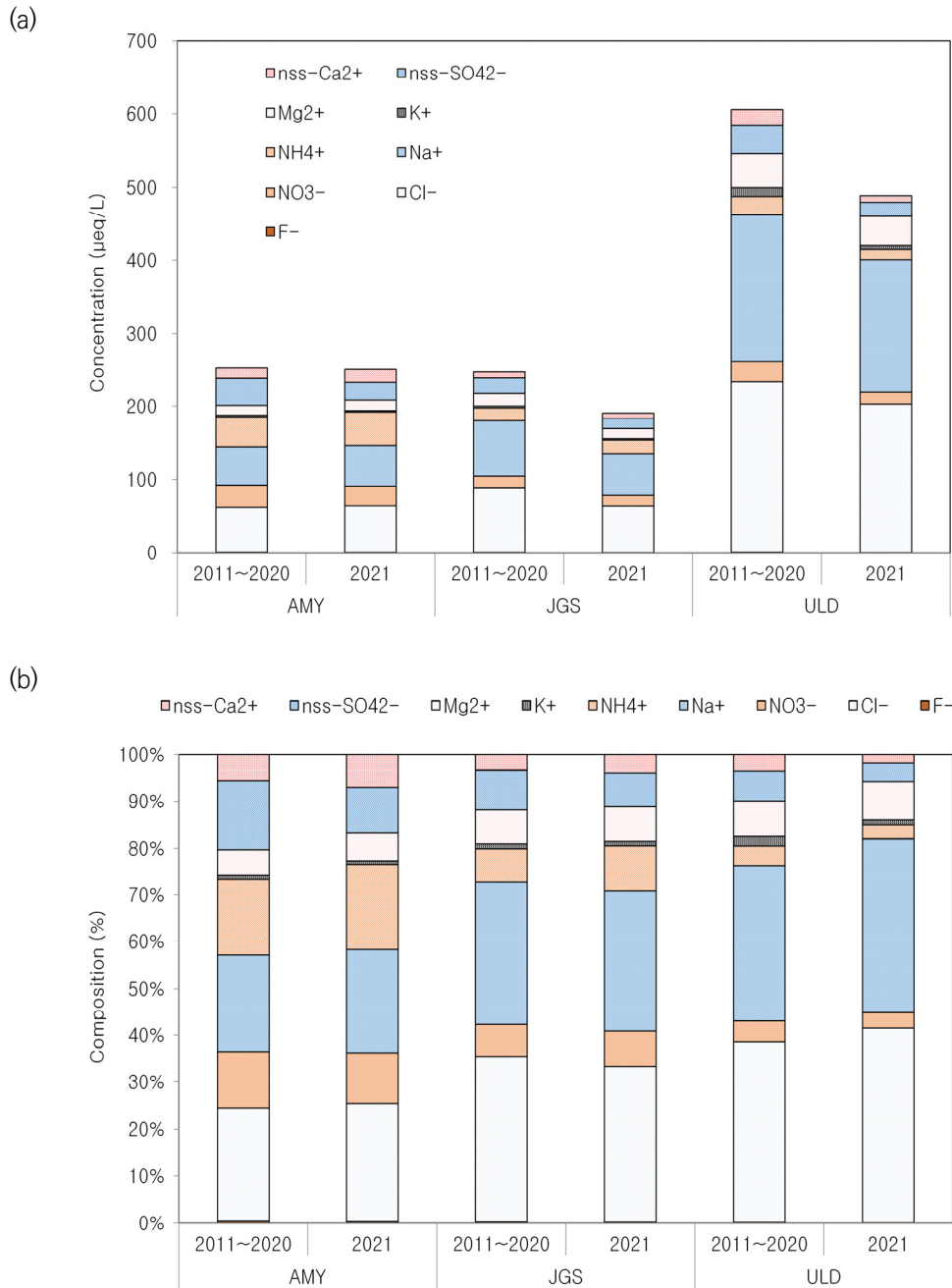


그림 10.5.4 2011~2021년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 강수성분 연도별 부피가중평균 (a) 농도, (b) 조성비.

10.5.3 강수성분의 계절별 농도

안면도, 고산, 울릉도에서 채취한 강수의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 10.5.5~10.5.7과 같다. 여기서 강수이온성분의 계절별 평균 농도는 최근 10년(2011~2020년) 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해 연도 1, 2월의 자료를 평균하고, 당해 연도 12월의 자료는 사용하지 않았다. 또한 해염성분에 대한 자료를 제거하기 위해 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 인 경우 비해염성분을 계산하고 작성하였다. 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).

안면도 강수에서 최근 10년(2011~2020년)간과 2021년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분농도 범위는 각각 11.2~84.0, 13.8~84.1, 23.4~100.4 $\mu\text{eq/L}$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분들의 조성비는 최근 10년간 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 47.0%, 47.1%, 47.4%, 47.9%로, 가을철에 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 다른 계절도 큰 차이를 보이지 않았다. 반대로 2021년은 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 47.5%, 38.1%, 43.3%, 44.8%로 겨울철이 가장 높고, 봄철이 가장 낮은 경향을 보였다. 해염성분 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 인 경우 부피가중평균농도 합이 범위는 28.5~520.2 $\mu\text{eq/L}$ 이며, 이들의 조성비는 26.1~48.2%의 범위를 보였다. 또한, nss-Ca^{2+} 성분은 1.7~15.6%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였고, 최근 10년, 2021년 모두 봄철이 높은 조성비를 보여 황사의 영향으로 판단된다.

고산 강수 중 이차오염물질의 최근 10년(2011~2020년)간과 2021년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분농도 범위는 각각 6.3~41.9, 7.8~35.9, 11.9~34.4 $\mu\text{eq/L}$ 로 분석되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.9%, 48.7%, 46.2%, 43.9%이며, 2021년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.7%, 43.5%, 45.4%, 45.7%로 보였다. 해염 성분 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 인 경우 조성비는 38.7%~51.3%의 범위를 보였다. nss-Ca^{2+} 성분은 1.7%~9.1%의 범위로 최근 10년, 2021년 모두 봄철이 높은 조성비를 보여 황사의 영향으로 판단된다.

마지막으로 울릉도 강수 중 이차오염물질의 최근 10년(2011~2020년)간과 2021년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분농도 범위는 각각 10.5~54.8, 9.6~47.3, 7.1~35.8 $\mu\text{eq/L}$ 로 분석되었다. 강수이온성분의 조



성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.0%, 43.5%, 41.4%, 43.0%이며, 2021년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.5%, 43.6%, 45.4%, 44.6%로 울릉도 강수의 최근 10년은 겨울철이 높고 반면에 2021년도는 봄철이 높은 조성비를 보였다. 해염 성분 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 인 경우 조성비는 49.7~52.6%의 범위를 보였다. 또한, nss-Ca^{2+} 성분은 1.1~7.1%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였고, 특히, 최근 10년에 7.1%로 황사 영향에 의해 높은 조성비를 보이는 것으로 판단된다.

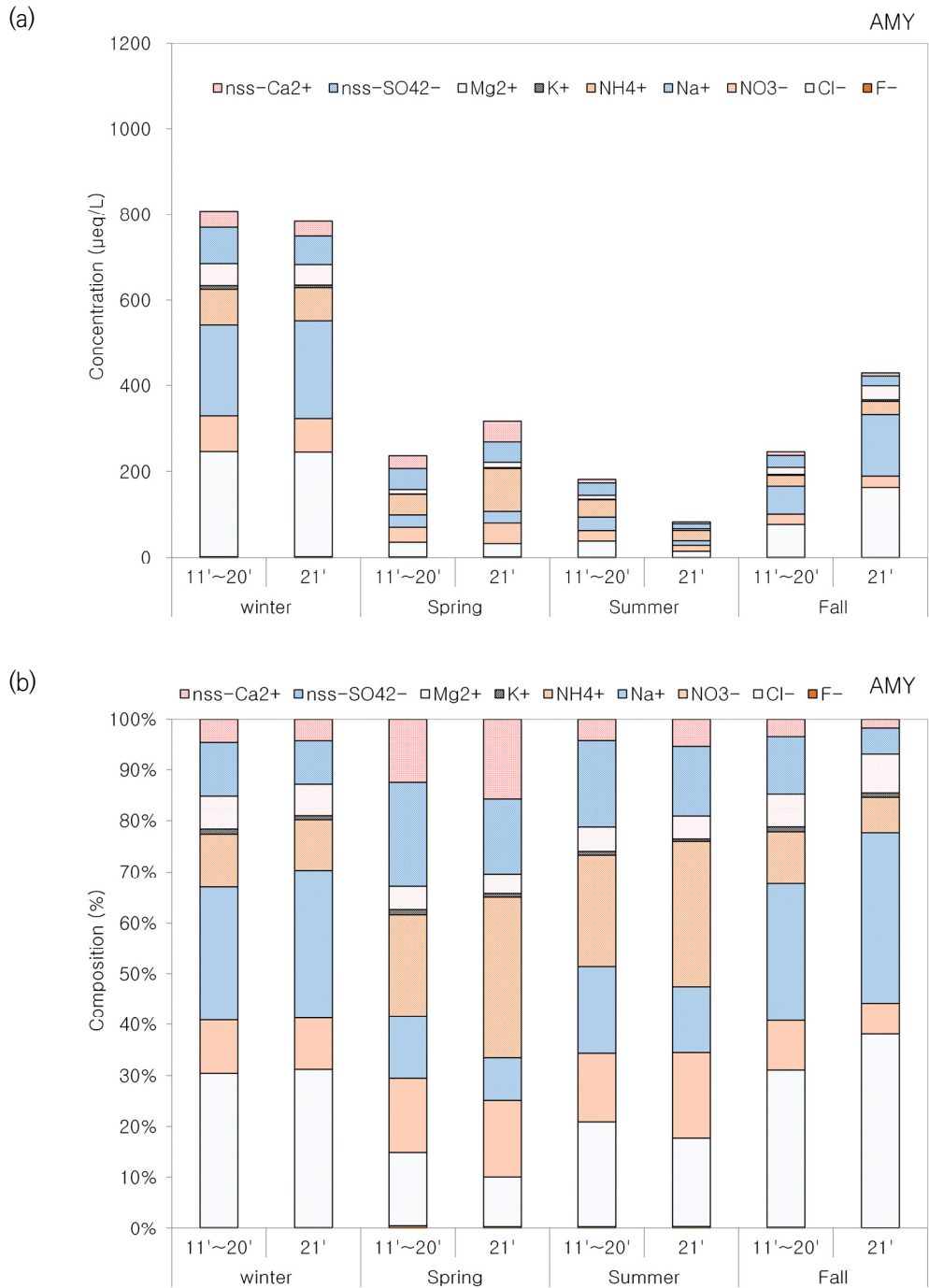


그림 10.5.5 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 안면도(AMY) 강수성분 계절별 부피가중평균 (a) 농도, (b) 조성비.

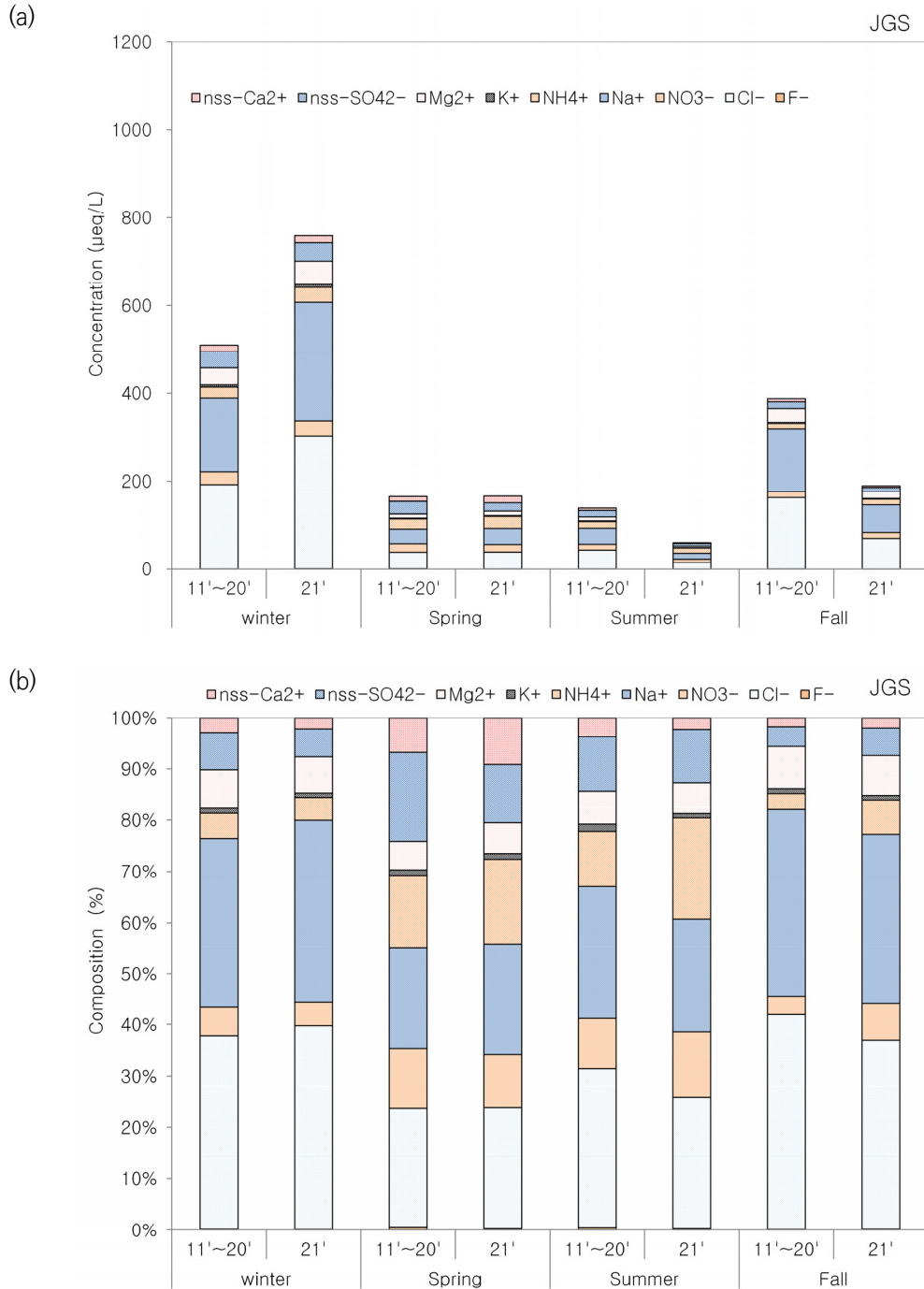


그림 10.5.6 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 고산(JGS) 강수성분 계절별 부피가중평균 (a) 농도, (b) 조성비.

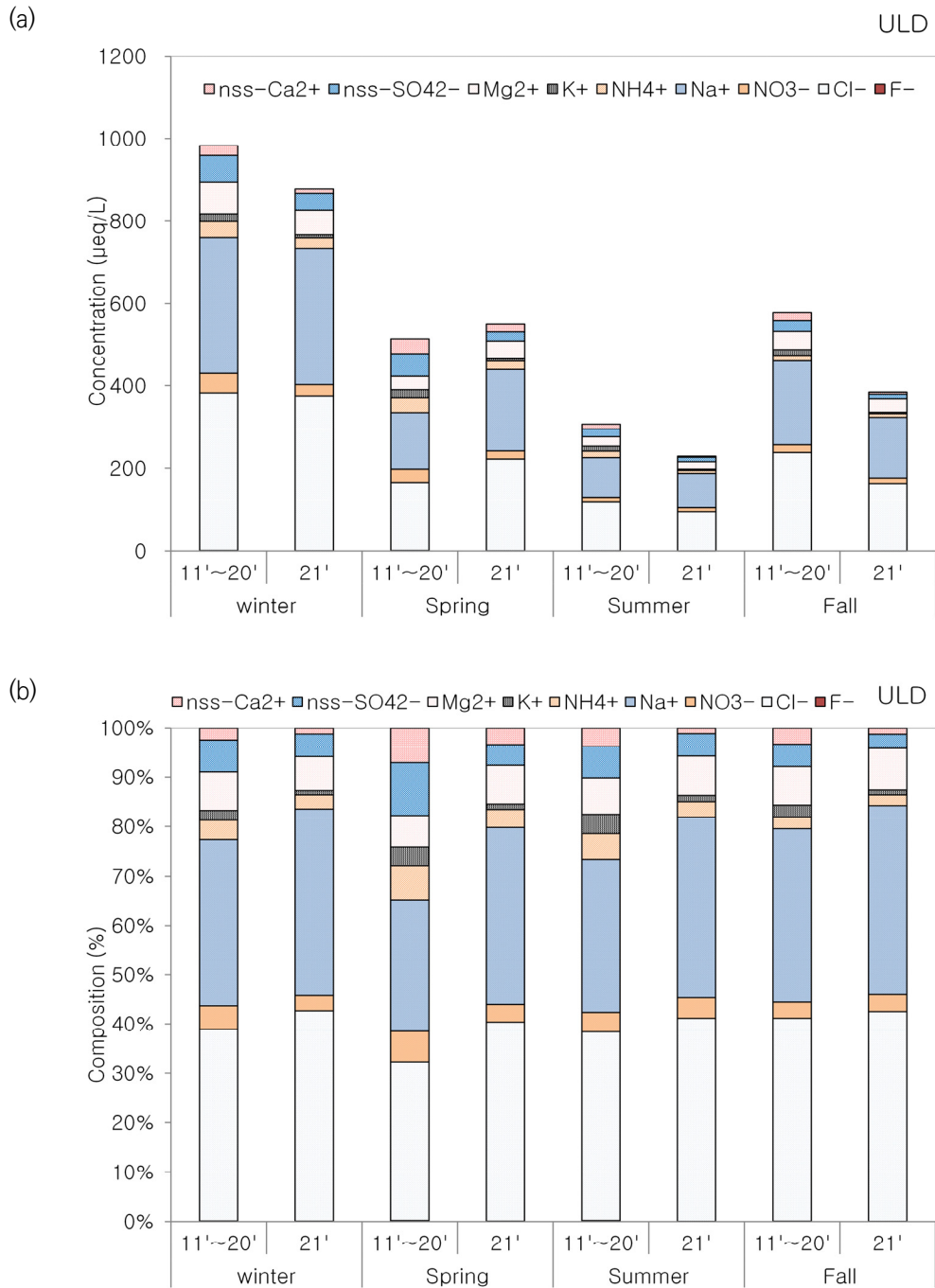


그림 10.5.7 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 울릉도(ULD) 강수성분 계절별 부피가중평균 (a) 농도, (b) 조성비.



10.6 총대기침적량

안면도에서 채취한 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 건성 및 습성침적량을 보면(그림 10.6.1), 2013년 이후 대체로 감소하다 2019년도에 다시 증가하였고, 2020년에는 소폭감소하는 경향을 보였다. 2021년에는 큰폭으로 증가하는 경향을 나타냈다. 2021년도의 전체 침적량은 12829.8 mg/m^2 이며, 최근 10년보다 약 1.2배 정도 많은 침적량을 보였고, 이는 건성침적보다는 습성침적에서의 증가량에 의한 차이 때문으로 판단된다. 또한, 전체 기간 자료인 2011년부터 2021년까지 건성침적량이 차지하는 비율은 약 25.1~45.5%를 차지하였으며, 2011년이 건성침적량이 가장 적은 비율을 보였다. 또한, 습성침적량은 대부분 50% 이상의 비율을 차지하였다. 건성 및 습성의 월별 침적량은 그림 10.6.2와 같다. 여기서 건성 및 습성의 월별 평균 농도는 2003년부터 2021년까지 평균한 값이다. 습성침적은 12월에 가장 높은 농도를 보였으나, 10월에 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 평균농도는 2010년부터 2021년까지 평균한 값이며, 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해 연도 1, 2월의 데이터를 평균하였고, 당해 연도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

최근 10년간 자료와 2021년 침적량 자료는 NO_3^- 와 SO_4^{2-} , NH_4^+ 성분별 농도는 대체로 건성침적량보다 습성침적량이 더 높은 농도를 보였다. 특히 NH_4^+ 인 경우 습성침적량이 최대 전체의 2021년 겨울철을 제외하고는 70~90%까지 비율을 보였다. 특히 토양성분인 경우 Ca^{2+} 성분이 봄철에 습성침적량이 최대를 나타내었고 이는 황사의 영향으로 판단된다.

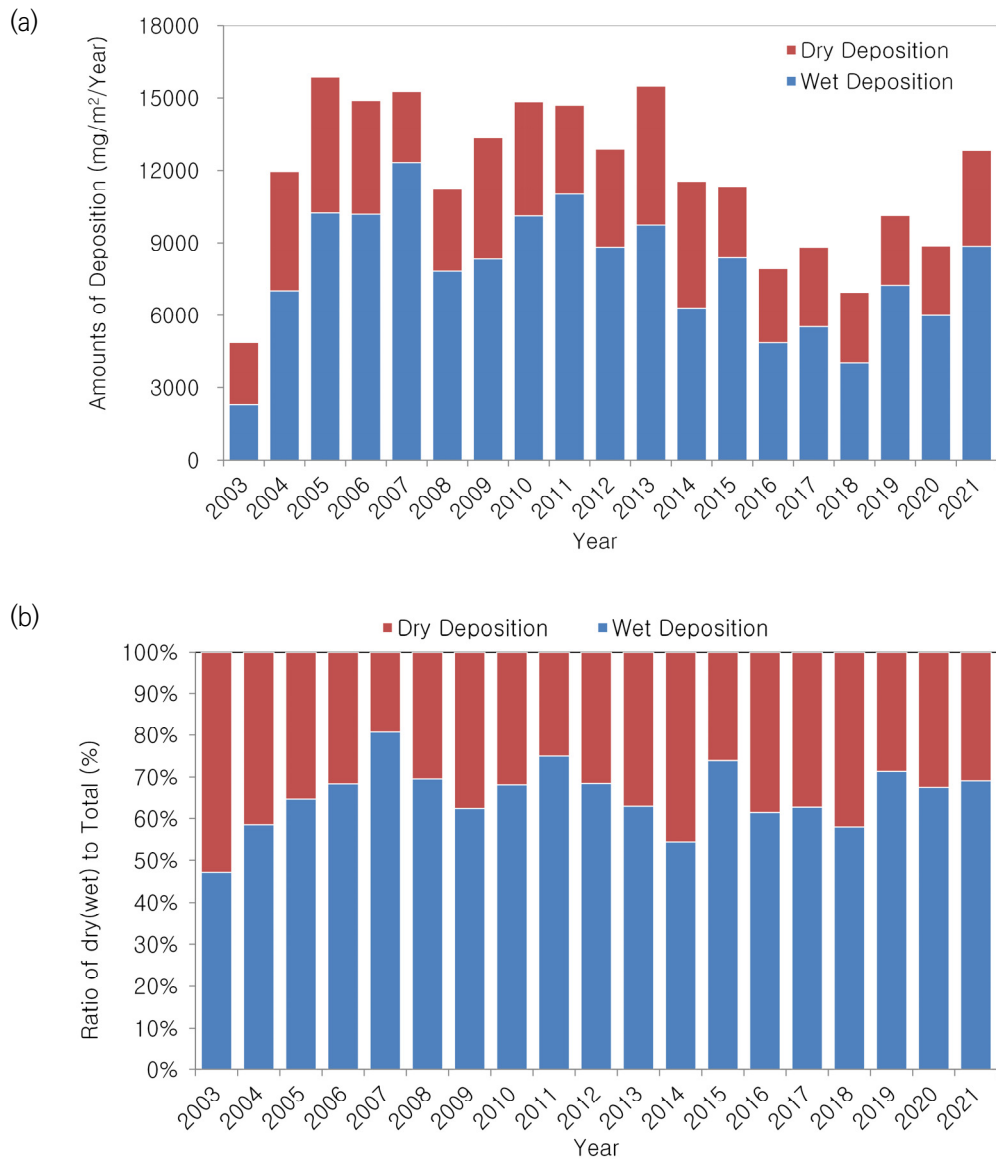


그림 10.6.1 안면도(AMY)의 연도별 건성 및 습성 침적량의 (a) 농도와 (b) 비율.

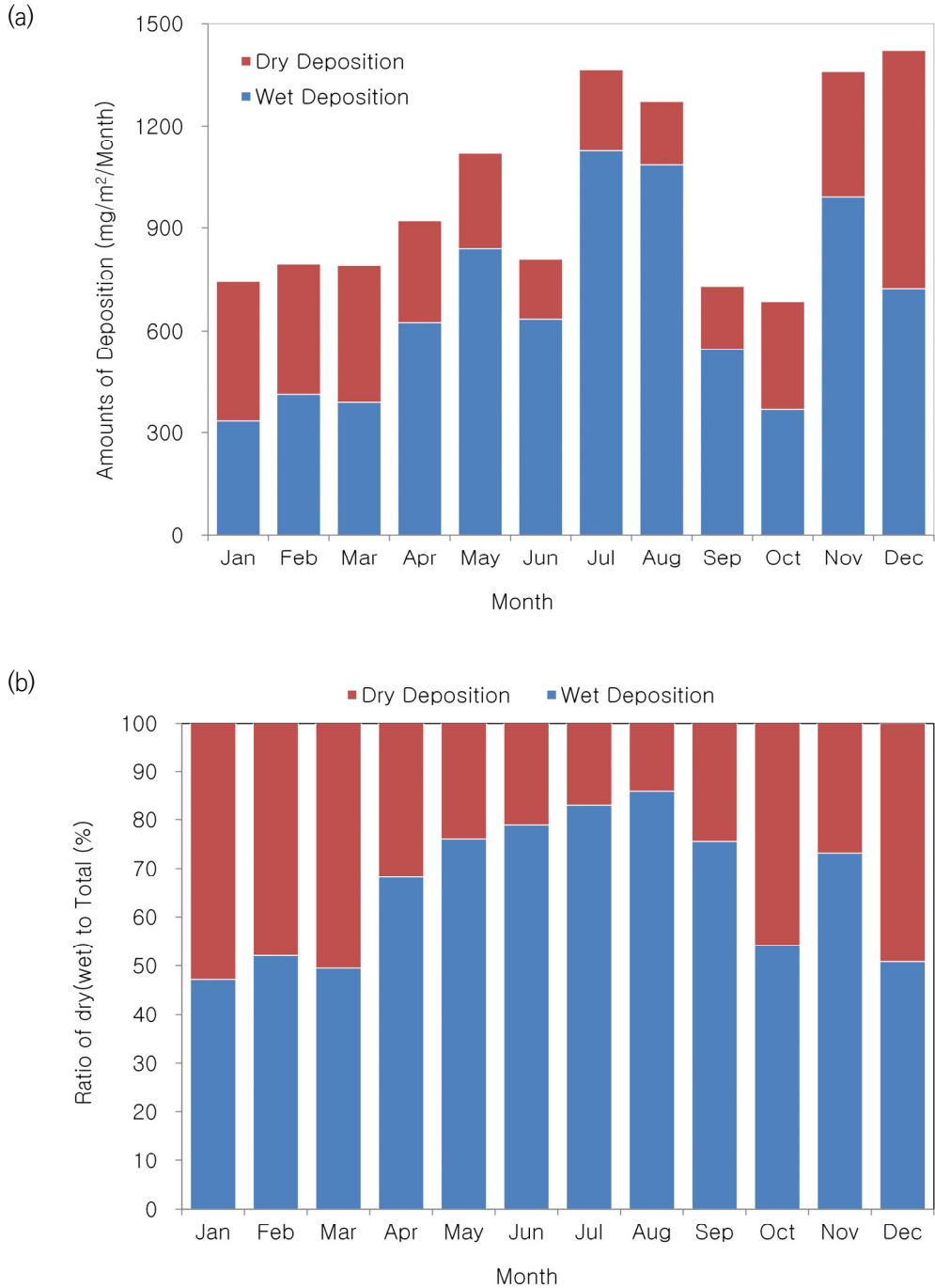


그림 10.6.2 2003~2021년 안면도(AMY)의 월별 건성 및 습성 침적량의 (a) 농도와 (b) 비율.

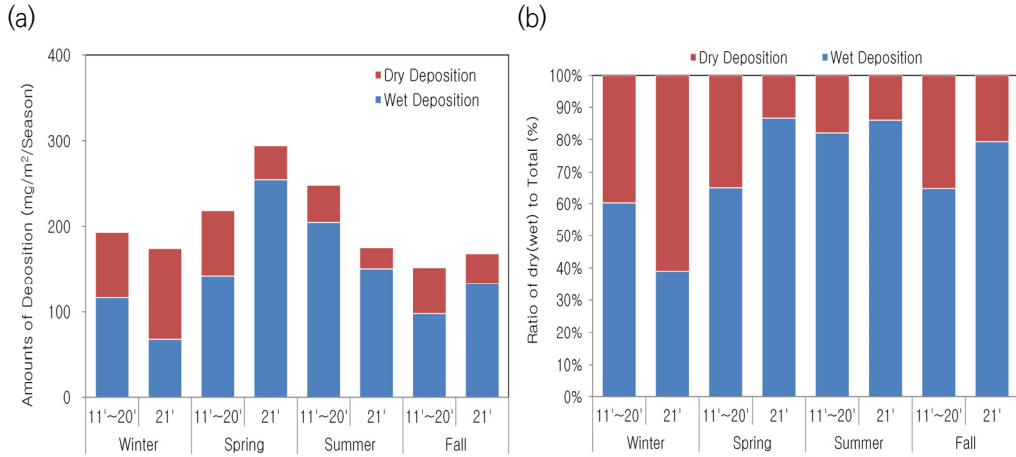


표 10.6.3 계절별 NO_3^- 의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

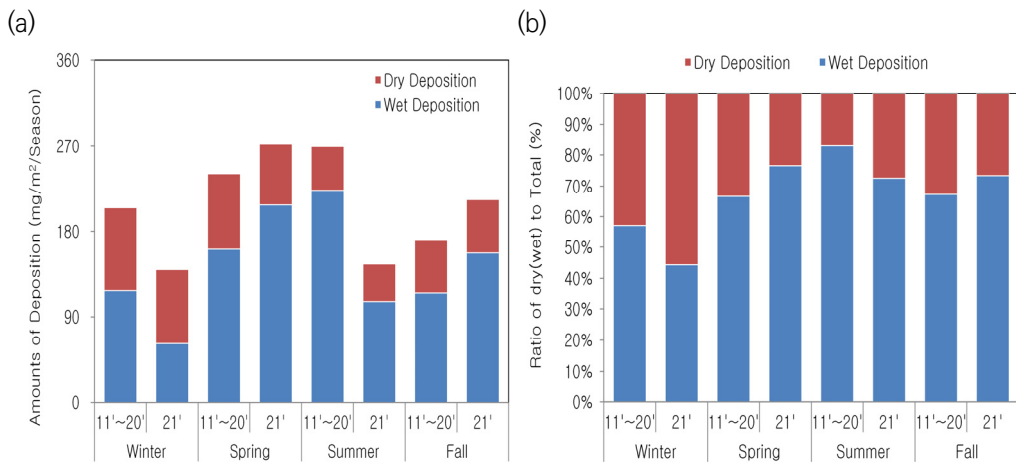


그림 10.6.4 계절별 SO_4^{2-} 의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

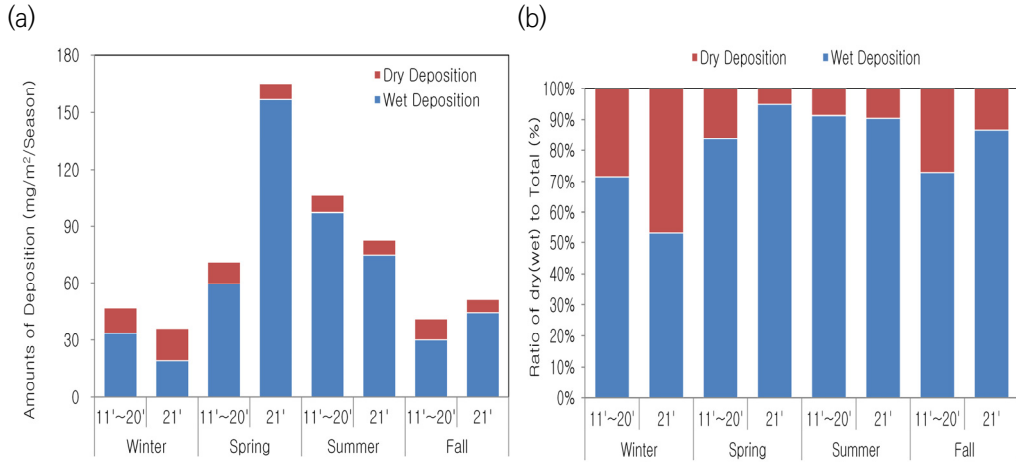


그림 10.6.5 계절별 NH₄⁺의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

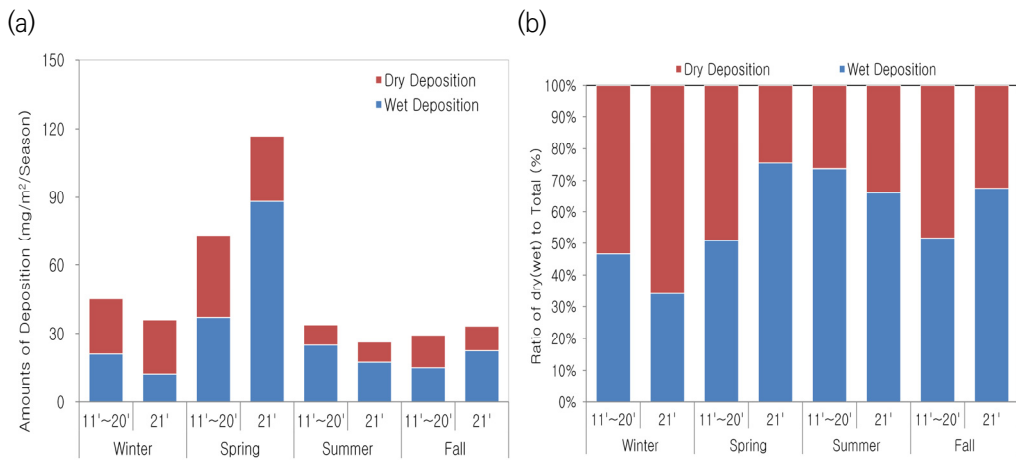


그림 10.6.6 계절별 Ca²⁺의 건성·습성 (a) 침적량과 (b) 침적량비율.

10.7 2021년 강수성분 특성

안면도, 고산, 울릉도 세 감시소 강수 성분의 발생 기원을 살펴보기 위하여 수용성 성분을 이용하여 주성분 분석(Principal Component Analysis; PCA)을 하였다. 안면도, 고산, 울릉도 세 감시소 모두 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 자료를 가지고 지역별 주성분 분석을 하였다(그림 10.7.1). 주성분 분석은 통계프로그램(SPSS 18.0)을 이용하여 최적 인자의 수를 고유값 1 이상으로 정의하였고, 베리맥스(Varimax) 회전법으로 산출하였다.

강수성분의 최근 10년(2011~2020년)과 2021년 자료를 가지고 지역별 주성분 분석을 하였고, 그림 9.7.1에 나타내었다. 안면도, 고산 최근 10년(2011~2021년)의 가장 영향을 많이 받는 발생원으로는 해염 및 생물성 연소가 약 42~43%이며, 그다음으로 황산암모늄과 질산암모늄, 토양 순으로 나타났다. 안면도와 고산의 최근 10년 강수성분의 발생원 특징으로는 안면도가 토양의 영향을 고산보다 더 많이 받으며 반면에 고산은 안면도보다 이차반응물인 황산암모늄과 질산암모늄의 영향이 더 큰 것으로 보인다. 울릉도 최근 10년 강수성분의 발생원은 해염 > 황산암모늄과 질산암모늄 > 토양 > 생물성 연소 순으로 나타났다. 울릉도 최근 10년인 경우 발생원의 혼재되지 않았다.

2021년 안면도, 고산, 울릉도 지역의 강수성분의 발생원 분석 결과, 세 지역 모두 오염원의 혼재된 결과를 보였다. 특히 안면도 지역은 약 44.3% 정도가 자연적인 발생원과 인위적 발생원이 혼재되어 영향을 받은 것으로 분석되었다. 그다음으로는 황산암모늄과 질산암모늄, 토양 순으로 나타났다. 고산과 울릉도 지역도 해염과 생물성 연소가 혼재되는 경향을 보였다. 그러나 고산과 울릉도 지역 발생원 차이는 토양 성분에 대한 영향이 울릉도가 약 17.7%로 고산에 비해 약 2배 정도 높게 나온 것으로 확인되었다.

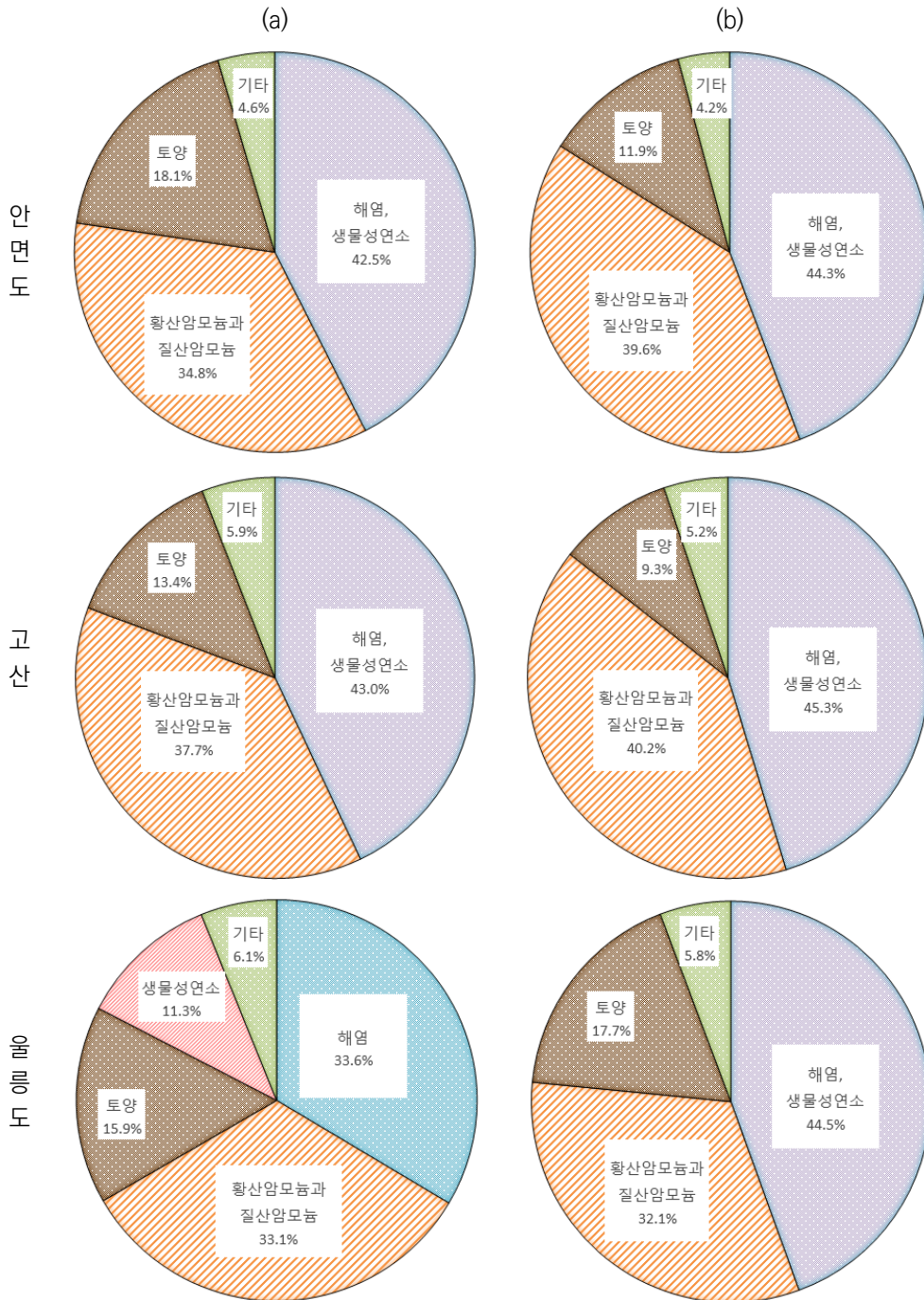


그림 10.7.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)의 (a) 최근10년(2011~2020)기간 (b) 2021년의 강수성분의 발생원 분석 결과.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

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 특성	210
11.2 라돈 농도 및 특성	214



제11장 기타

11.1 수증기 농도 연직분포 및 특성(숙명여자대학교 위탁관측소)

수증기는 분포하는 고도에 따라 다른 역할을 담당하고 있다. 대기에 분포하는 수증기의 대부분은 대류권에 집중되어 있으며, 구름과 비, 눈의 기상 현상에 따라 대기권과 지권, 수권을 순환하여 에너지 순환의 역할도 담당하고 있다. 또한 초단시간 내에 급격한 변동을 보여 성층권에서 중간권 영역에 분포하는 수증기는 대류권에서 유입되는 수증기 및 화학반응, 대기 순환에 의해 농도가 결정되며, 대류권과는 달리 비교적 안정적인 농도를 나타낸다. 그러나 중층대기의 수증기 농도는 기후변화에 의해 결정되기 때문에 농도 증감에 따른 기후 예측 및 회복이 어렵다. 또한 수증기가 참여하는 대기화학반응이 매우 다양하므로 수증기의 농도 증감으로 인해 발생할 수 있는 현상은 매우 다양하다. 중층대기의 수증기 농도를 관측하는 이유도 기후변화의 관점에서 장기 변동 자료를 확보하고, 기후변화 원인 및 예측 연구에 활용하기 위함이다.

중층대기 수증기는 마이크로파 수신기를 이용하여 관측할 수 있다. 수증기 분자가 회전 운동에 의해 자체적으로 발산하는 마이크로파를 수신함으로써 수증기의 연직분포를 관측할 수 있으며, 숙명여대 과학관 옥상에 설치된 22 GHz 마이크로파 수신기를 이용하여 지난 2006년 10월부터 현재까지 관측을 수행하고 있다.

22 GHz 마이크로파 수신기로 관측한 대류권의 광학깊이를 그림 11.1.1에 나타내었다. 광학깊이는 전파가 대기를 통과하면서 흡수되는 크기를 의미하며, 지수함수를 이용하여 전파투과율로 환산하여 표현할 수 있는 크기이다. 광학깊이는 전파의 흡수계수에 의해 표현되며, 주로 기온과 습도 분포에 의해 결정된다. 우리나라의 대류권 광학깊이의 변동을 살펴보면 기온과 습도가 높은 여름철에 0.4 이상의 광학깊이 크기를 보이며, 겨울철에는 0.1 이하의 광학깊이 크기를 보인다. 즉, 겨울철에 지상으로 도달하는 전파투과율은 90% 이상으로 높은 투과율을 보여 관측자료의 신뢰성이 여름철보다 훨씬 높다.

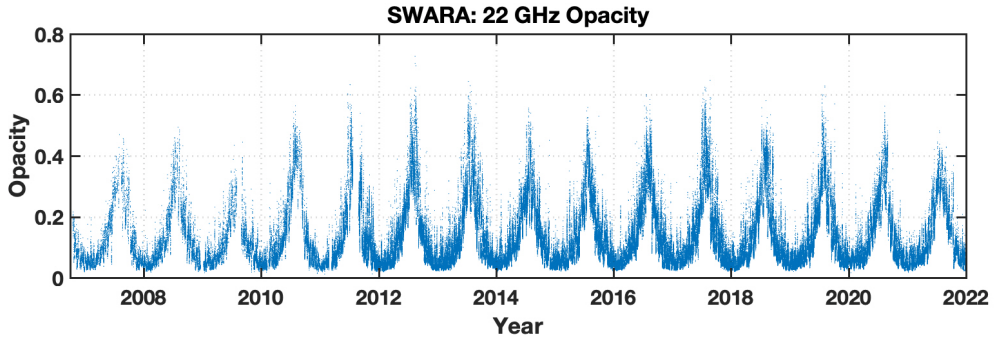


그림 11.1.1 2006년 10월 이후 22 GHz 마이크로파 수신기로 관측한 서울 상공 대류권 광학깊이 변동.

2021년의 중층대기 수증기의 월별 평균 연직분포는 그림 11.1.2에 나타내었다. 중층대기의 수증기는 주로 40~60 km 구간에 최대 부피비를 보이고 있으며, 6.5~8.0 ppmv의 최대농도를 보여준다.

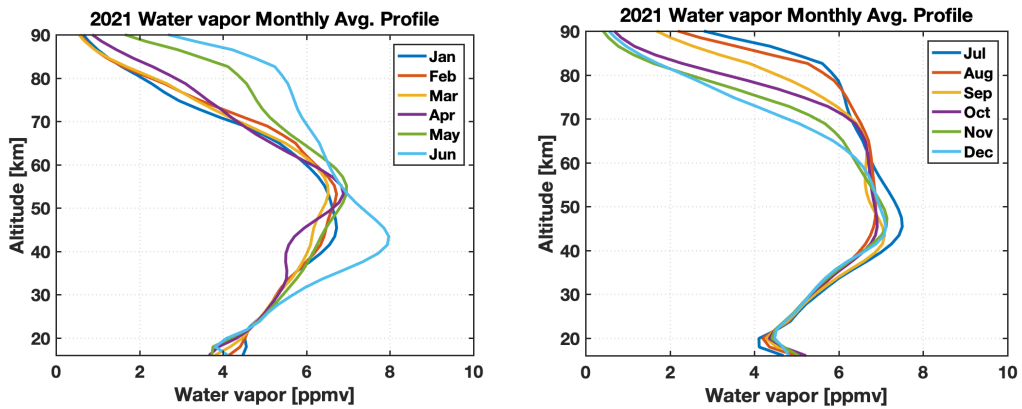


그림 11.1.2. 2021년 월별 평균 수증기 연직분포(ppmv).

표 11.1.1 서울 상공 중층대기 내 수증기 월별 최대 농도

월	1월	2월	3월	4월	5월	6월
최대농도 [ppmv]	6.7	6.7	6.5	6.9	7.0	8.0
월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
최대농도 [ppmv]	7.5	6.9	7.1	6.9	7.1	7.1

2006년 10월부터의 수증기 연직분포 변동을 그림 11.1.3에서 보면 대기 상승에 따라 여름철에는 수증기의 주요 분포 고도 범위가 넓어져 80 km의 고도에서도 5 ppmv 이상의 부피비로 관측되고 있다. 또한 30 km 이하의 분포를 보면 시간에 따라 수증기 분포 고도가 증가하는 보여주고 있으며, 이는 수증기를 이용하여 중층대기의 운동을 추적할 수 있는 추적자의 역할이 가능함을 의미한다.

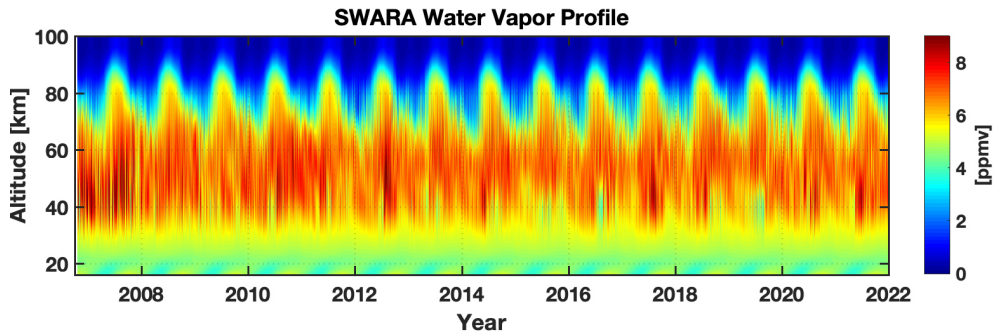


그림 11.1.3 2006년 10월 이후 서울 상공의 중층대기 수증기 연직분포 변동.

수증기의 변동을 16~30 km, 30~50 km, 50~70 km, 70~90 km의 고도별로 나누어 살펴보면 그림 11.1.4와 같다. 성층권 하층에 해당하는 16~30 km 구간에서는 5 ppmv 이하의 부피비를 보이는 가운데, 계절적 변동이 크게 나타나고 있으며 겨울인 12월~1월에 연중 최고치를 보인다. 또한 30~50 km 구간에서는 계절적 특성은 나타나지 않으나 2018년 이후로 증가 추세를 보이고 있다. 또한 50~70 km, 70~90 km 구간에서도 겨울철에 연중 최저 부피비를 보이는 가운데, 2012년 이후로 연중 최저 부피비가 점차 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 수증기의 농도 변동은 대기의 화학적 변화와 대기 순환 이동이 복합적으로 연계되어 있어 농도 변동으로 인한 원인과 결과 예측은 기후변화의 관점에서 접근해야 한다. 중층대기 이상의 대기층에서 연중 최저 농도가 점차 증가하고 있는 현상에 대해 수증기 농도를 화학적으로 증가시키는 주요 원인인 메탄의 농도 변동이나 기온의 변동 등과 연관하여 수증기 농도 변동에 대해 분석할 필요가 있다.

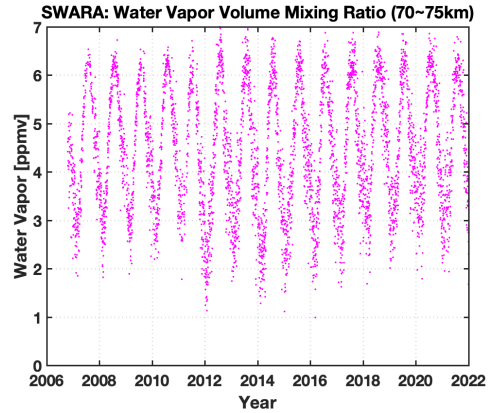
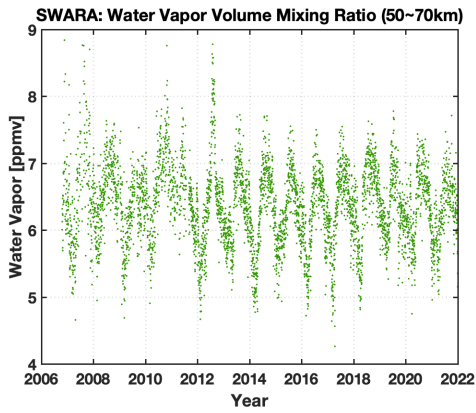
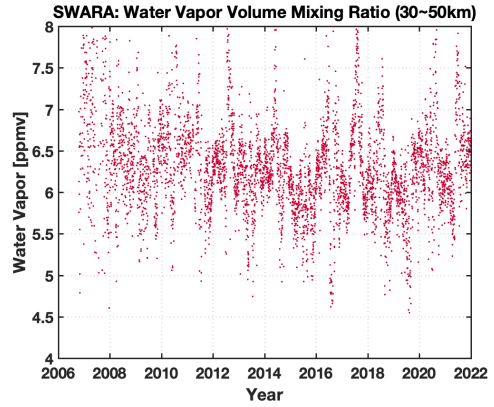
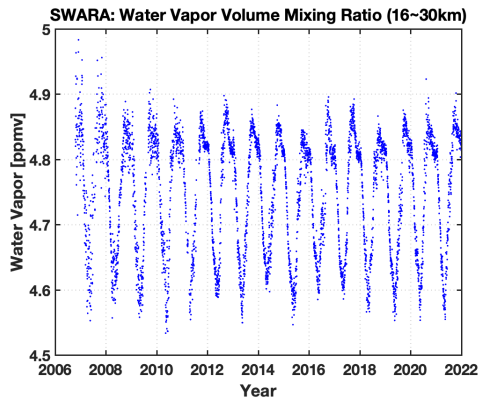


그림 11.1.4 중층대기 16~75 km의 고도별 수증기 농도 변동.

11.2 라돈 농도 및 특성(제주대학교 위탁관측소)

방사선은 크게 인공방사선과 자연방사선으로 구분되며 방사성 물질의 종류는 1,500종 이상이 존재한다. 인공방사선은 핵무기, 원자력시설, 의료시설, 실험실, 일반산업체 등에서 인위적 요인에 의해 발생한다. 반면에 자연방사선은 자연적으로 발생하며 우주 공간, 지구 대기나 지각 등에 지구생성 초기부터 존재해 왔고 지표면 생물체에도 미량으로 존재한다. 세계기상기구(WMO) 지구대기감시(GAW) 프로그램에서는 라돈(^{222}Rn), 크립톤(^{85}Kr), 납(^{210}Pb), 벨릴륨(^7Be)을 주요 방사성 물질(WMO/GAW, 2004; WMO/GAW, 2001)로 지정하여 지속적으로 관측하도록 권장하고 있다.

이 중 라돈(^{222}Rn)은 우라늄(^{238}U)의 붕괴사슬 과정에서 발생하는 대표적인 자연방사성 핵종으로 직접적으로는 라듐(^{226}Ra)의 α -붕괴에 의해 생성된다. 그리고 3.82일의 반감기와 α -붕괴(4회), β -붕괴(4회)를 거쳐 납(^{206}Pb)으로 안정화된다(Whittlestone and Zahorowski, 1998). 주요 동위원소로는 ^{232}Th 의 붕괴과정에서 발생한 ^{220}Rn (thoron)과 ^{235}U 의 붕괴에서 유래된 ^{219}Rn (actinon)이 있다. 그러나 이들 두 동위원소의 반감기는 각각 55초, 4초로 매우 짧아서 대기 중 라돈은 대부분 ^{222}Rn 으로 존재하며 방사성 붕괴를 일으켜 대기에서 제거(Crawford, et al, 2015)된다.

자연계에 널리 분포하는 라돈은 방사성 물질로 관리가 필요한 물질이다(Almeida et al, 2004). 라돈의 모핵종인 우라늄은 주요 지각물질 성분인 우라늄으로부터 발생하기 때문에 인공 방사성 물질과 달리 암석, 토양, 지하수 등의 자연에 널리 분포한다(Choi et al., 2009; Vinson et al., 2008). 그리고 대체적으로 지하나 실내 공간에서 높은 농도를 보이고 대기 중에서는 미량으로 존재한다. 화학적으로 반응성이 낮은 불활성 기체이고 공기보다 무거워서 지표면에서 더 높은 농도를 보인다. 대류에 의해 대기 중에 넓게 확산되는 특성이 있으며 호흡을 통해 인체에 흡입되면 위해성을 나타낸다(Moon et al., 2009).

대체적으로 인체 노출 방사선의 약 85%가 자연방사선이고, 이 중 50% 이상이 라돈에 기인하는 것으로 나타나고 있다(Kim et al., 2019; UNSCEAR, 1988). 라돈 붕괴 과정에서 생성되는 자핵종(^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po)들 역시 방사선을 방출한다. 라돈이 체내에 흡수되면 짧은 반감기를 나타내는 자핵종들이 생성되어 폐 내부에 침착되고, 지속적으로 방사능을 방출하여 폐암을 유발한다. 특히 라돈 붕괴과정에서 생성되는 ^{214}Po 과 ^{218}Po 은 폐에 장시간 잔류하며 α -붕괴에 의해 방사선을 방출한다(Choi et al., 2009). 또 라돈 자핵종은 정전기를 띤 상태로 쉽게 미세 먼지나 담배 연기에 흡착되기 때문에 에어로졸 형태로 폐에 침착되어 방사선 방출에 의해 조직 손상과 암을 유발한다(Miles, 1988). 국제암연구소는 라돈을 인체 발암성이 확인된 1급 발암물질



으로 분류하고 있다. WHO에서는 폐암환자 중 3~14%가 라돈에 기인한 것으로 추정하고 있다. 또 미국 환경청은 라돈을 담배 흡연 다음으로 높은 폐암 원인물질로 지정하고 있고, 미국 과학원(National Academy of Sciences; NAS)은 라돈의 영향으로 연간 15,000~25,000명이 폐암으로 사망하고 있다고 보고(US EPA, 2003; NRC, 2000)하고 있다.

자연방사성 물질을 관리하기 위해서는 실내든 물론 실외에서 라돈 농도를 지속적으로 모니터링 할 필요가 있다. 라돈은 반응성이 낮아서 화학적으로는 안정하지만 방사선을 방출하면서 붕괴되기 때문에 물리적으로는 불안정한 특성을 보인다. 대기 중의 라돈 농도 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. ^{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 지표 물질로 이용되고 있다.

호주핵과학기술기구(Australian Nuclear Science and Technology Organisation; ANSTO)에서는 주요 WMO/GAW 관측소를 중심으로 세계 30여 지점에 라돈검출기를 설치하여 오래전부터 대기 라돈 농도 분포를 지속적으로 모니터링하고 있다. 그리고 측정 결과를 라돈 감시는 물론 주요 온실가스의 플럭스 관측을 위한 추적자(Tracer)로 활용하기 위한 연구를 수행하고 있다. 제주도 고산감시소에서는 ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 고감도 라돈검출기를 설치하여 2001년 초부터 대기 라돈 농도를 실시간 모니터링해오고 있다. 2001년에 실시된 'ACE (Aerosol Characterization Experiment)-Asia' 미션의 일환으로 라돈 관측을 시작하였고, 2021년 12월말 현재 총 21년간의 측정자료를 확보하고 있다.

11.2.1 라돈 모니터링

2021년 1~12월에 제주도 고산(33.17°N, 126.10°E) 현장에 고감도 라돈검출기를 설치하여 대기 라돈 농도를 30분 간격으로 실시간 측정하였다. 라돈검출기는 배경농도 측정을 위해 호주 ANSTO에서 자체 설계, 제작한 High Sensitivity Radon Detector (모델 D1500) 시스템을 이용하였다(그림 11.2.1). 이 검출기는 필터를 거친 후 자연 확산 또는 동력 펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈과 셀 내부에서 생성된 라돈 자손으로부터 방출된 알파입자를 측정하는 방식이다. 알파입자는 ZnS(Ag)와 반응하여 섬광을 발생하며 이를 광전증배관으로 검출, 계수할 수 있도록 설계되어 있다. 대기 중의 극미량 라돈을 모니터링하기 위해 사용한 라돈검출기의 감도는 0.28~0.29 counts·sec⁻¹/Bqm⁻³이며, 검출한계(low limit of detection)는 25 mBq/m³이다.

대기 농도 측정을 위한 외부 공기 유입관은 50 mm HDPE 파이프를 사용하여 지상 10 m 높이로 설치하였다. 공기의 유속은 대략 80~100 L/min이 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.

검출기의 기기 검정은 월 1회 주기로 매회 5시간 동안 실시하였다. 이 때 라돈 관측 데이터를 보정하기 위한 검정용 ²²²Rn 표준물질은 18.5±4% kBq의 ²²⁶Ra source(Pylon Electronic Inc., 모델 RN-2000A, Canada)를 이용하였다. 또한 라돈검출기의 바탕(background) 값은 3개월 주기로 외부 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기의 자체 기저수치를 24시간 동안 측정하여 결정하였다. 검출기의 바탕값은 2차 필터에 포집된 ²¹⁰Pb (반감기 22.3년)의 양에 따라 시간이 지날수록 서서히 상승하는 경향을 보였다. 2021년의 기기 바탕 값은 detector head를 신제품으로 교체한 2019년 12월에 비해 다소 높은 수치를 나타내었다.

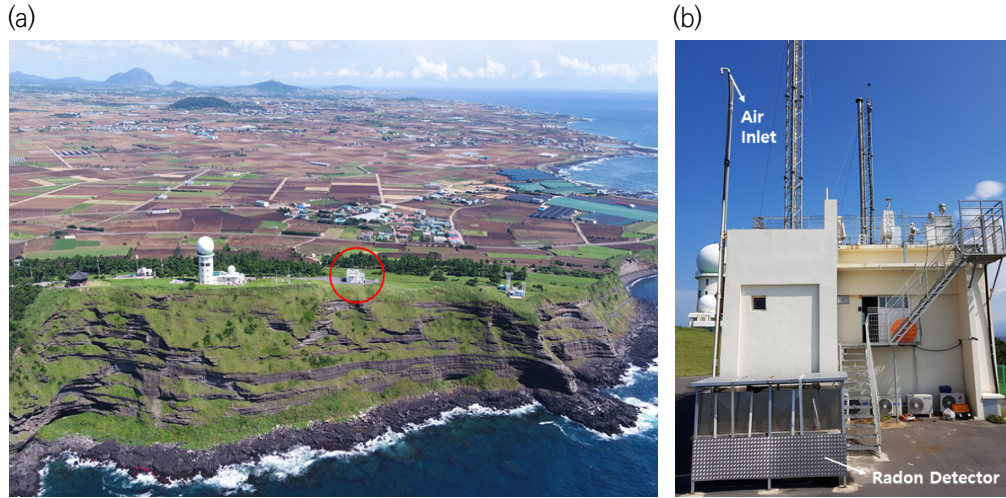


그림 11.2.1 (a) 제주 고산(JGS) (b) 라돈검출기(ANSTO, Model D1500).

11.2.2 라돈 배경농도 모니터링 결과

제주도 고산에 고감도 라돈검출기를 설치하여 라돈을 모니터링한 2021년의 라돈 시계열 변화를 그림 11.2.2에 나타내었다. 그림의 라돈 농도는 시간별 농도를 시계열로 도시한 결과이다. 2021년 고산의 라돈 시간 평균 농도는 2659 ± 1284 mBq/m³이고, 이를 일평균으로 환산한 농도는 2622 ± 1144 mBq/m³이었다. 또한 2001년부터 2021년까지 총 21년간 측정된 고산지역의 라돈 농도는 그림 11.2.3의 결과와 같이 평균 농도 2643 ± 1378 mBq/m³로 2021년의 결과는 이와 비슷한 수준을 나타내고 있다.

2021년의 계절별 라돈 농도는 겨울(3116 mBq/m³) > 가을(3007 mBq/m³) > 봄(2575 mBq/m³) > 여름(1956 mBq/m³) 순으로 높았다. 이처럼 대기 라돈은 북서계열 풍향에 의해 기류가 대륙에서 유입되는 겨울, 가을, 봄에 라돈 농도가 높고, 반대로 기류가 남동풍에 의해 해양으로부터 유입되는 여름철에 농도가 가장 낮은 경향을 보이고 있다. 또 월별로는 11월 > 2월 > 12월 > 3월 > 10월 > 1월 > 9월 > 5월 > 6월 > 4월 > 8월 > 7월 순으로 농도가 가장 높은 11월 (3339 mBq/m³)과 낮은 7월(1744 mBq/m³)에 약 1.9배 정도의 편차를 보이는 것으로 조사되었다.

또한 일간 농도변화를 조사해 본 결과, 대체적으로 하루 중에는 야간이 낮 시간에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그리고 오전 7시 전후에 3098 mBq/m³로 가장 높고, 오후 4시 경에 2185 mBq/m³로 낮은 농도를 보였다.

국내 라돈 측정은 주로 실내와 지하 공간을 중심으로 이루어지고 있어서 비교 가능한 대기 농도 데이터가 많지 않다. 능동형 ERM (Electrostatic Radon Monitor)을 이용하여 1999년 12월~2002년 1월에 서울 시내에서 측정한 라돈 농도는 7620 mBq m^{-3} 로 고산에 비해 3배 정도 더 높은 수준을 나타내고 있다(Kim et al. 2007).

외국 청정지역의 경우 ANSTO 연구팀이 2004~2010년에 하와이 Mauna Loa에서 측정한 농도가 102 mBq/m^3 로 고산보다 대략 26배 더 낮은 수준을 보이고 있다(Chambers et al., 2013). 그러나 Mauna Loa의 경우 측정소 고도가 3397 m로 아주 높고 대륙의 영향이 거의 없는 환경이다. 그리고 태평양 중앙에 위치하여 상시 해양기류의 영향을 받고 있기 때문에 이를 고산과 단순 비교하는 것은 무리가 있다.

반면에 일본의 배경지역인 Sado Island에서 2002~2004년에 측정한 결과(Chambers et al., 2009)는 2555 mBq/m^3 로 고산 지역과 아주 유사한 수준을 보이는 것으로 확인되었다. 또한 이와 동일한 기간에 홍콩의 Hok Tsui에서 측정한 결과(Zahorowski et al., 2005)는 $5,580 \text{ mBq/m}^3$ 로 고산지역에 비해 2배 정도 더 높았고, 이 지역은 중국 대륙에서 이동하는 기류(continental fetch)의 영향을 더 직접적으로 받는 것으로 추정된다.

반면에 도시지역의 대기 라돈 농도는 고산지역의 결과에 비해 훨씬 높은 농도를 나타내고 있다. 홍콩의 King's Park 기상감시소에서 Chan 등(Chan et al., 2010)이 2007년 11월~2008년 10월에 측정한 결과는 9.3 Bq/m^3 이고, 이탈리아의 L'Aquila에서는 9.7 Bq/m^3 로 훨씬 더 높은 농도를 보이고 있다(Pitari et al., 2014). 더욱이 2011년에 루마니아 남부수도인 Bucharest 지역에서 Zoran 등이 측정한(Zoran et al., 2014) 라돈 농도는 40.26 Bq/m^3 까지 상승하여 고산지역에 비해 15배나 더 높은 경향을 보이고 있다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 고산지역의 대기 라돈은 국내에서는 가장 낮은 수준을 나타내는 것으로 추정되며, 비교적 배경 지역의 특성을 잘 유지하고 있는 것으로 평가된다.

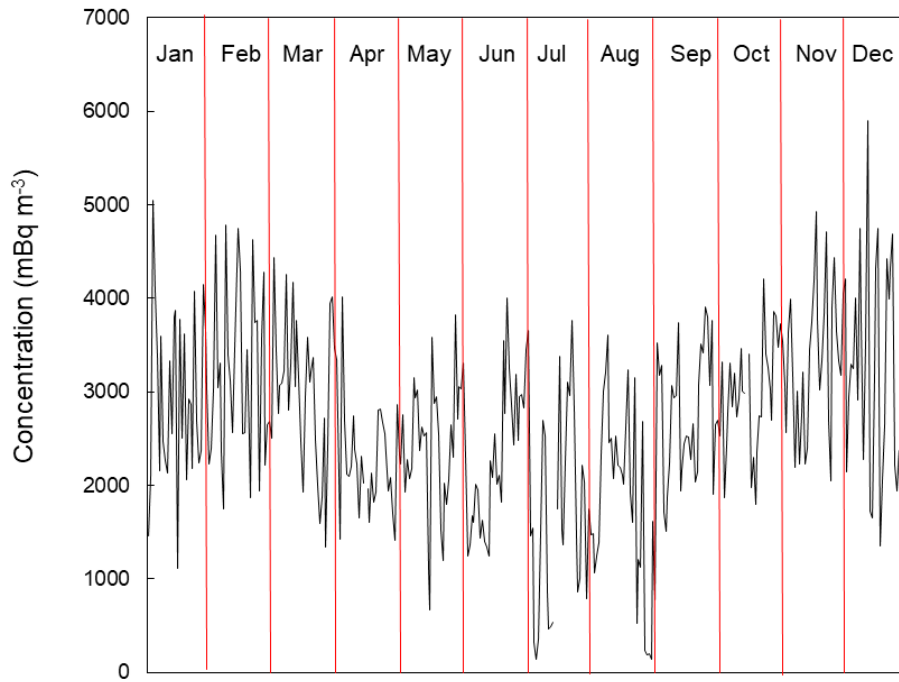


그림 11.2.2 2021년 고산(JGS) 라돈 농도 시계열 변화.

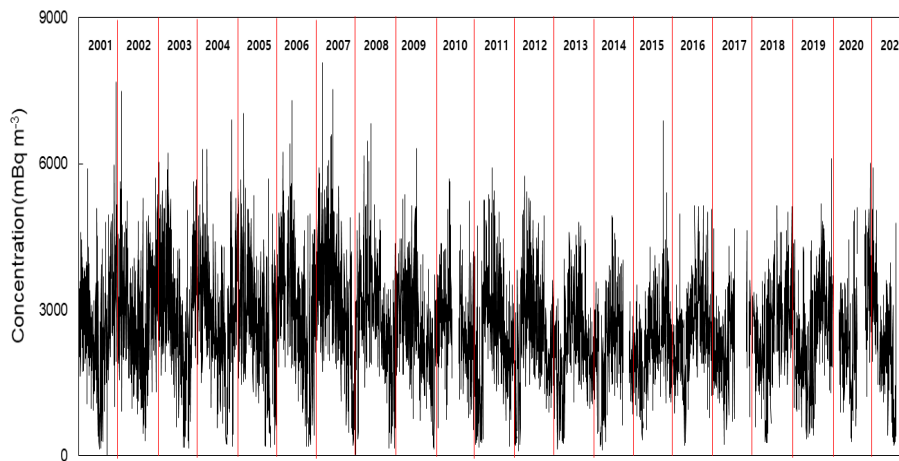


그림 11.2.3 2001~2021년 고산(JGS) 라돈 농도 시계열 변화.

고산의 2021년 라돈 농도를 계절별로 구분하여 그림 11.2.4에 비교하였다. 그림에서 막대그래프는 시간별 라돈농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 중앙값(median)과 90 분위수(90th percentile), 10 분위수(10th percentile) 농도를 나타낸 것이다. 그림의 결과에서 2021년 계절별 평균 농도는 봄에 2575 mBq/m^3 , 여름 1956 mBq/m^3 , 가을 3007 mBq/m^3 , 겨울 3116 mBq/m^3 로 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 평균 농도와 동일한 경향을 보였다.

이러한 계절별 라돈 농도 결과들은 2001년부터 2021년 동안의 라돈 계절별 농도와 비슷한 추세를 나타내는 것으로 확인되었다(그림 10.2.5). 이처럼 계절별 비교에서 겨울, 가을에 라돈 농도가 높은 것은 이 시기에 북서계열 풍향이 주류를 이루고 있고 이 때 대륙으로부터 대기가 유입되었기 때문으로 추정된다. 반면에 여름에 훨씬 낮은 농도를 나타내는 것은 이 시기에 주로 남동 계절풍의 영향을 받아 해양으로부터 공기가 유입되었기 때문으로 추정된다.

또 대기 혼합고(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 보인다. 따라서 대기 라돈 농도는 계절별로 혼합고의 높이에 따라 영향을 받는 것으로 보이며, 혼합고 높이에 반비례하여 겨울과 가을에는 높은 농도를 유지하고, 봄과 여름에는 상대적으로 더 낮은 농도를 유지하는 것으로 추정된다(Kim et al., 2007).

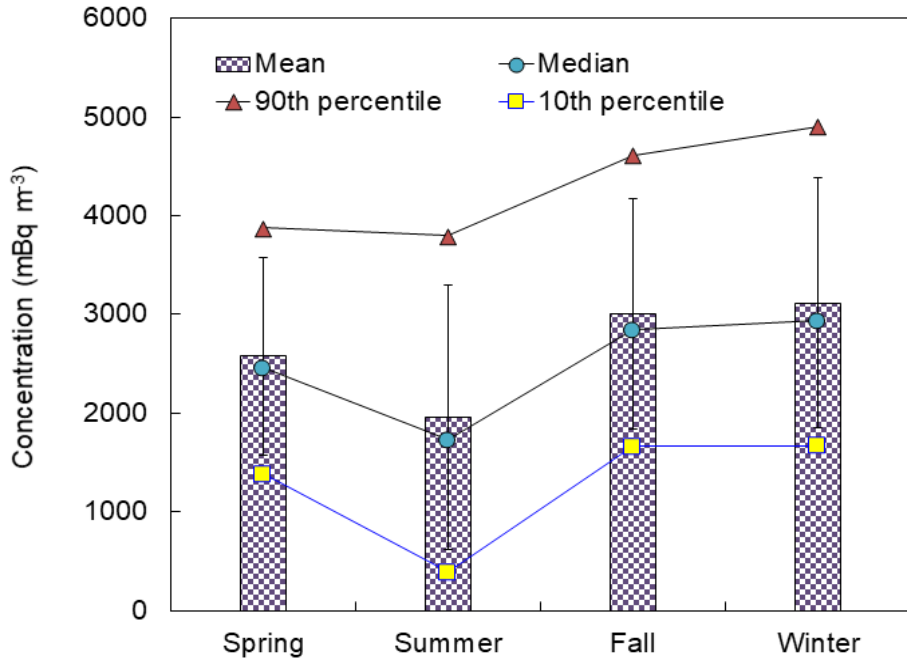


그림 11.2.4 2021년 고산(JGS) 계절별 라돈 농도 비교.

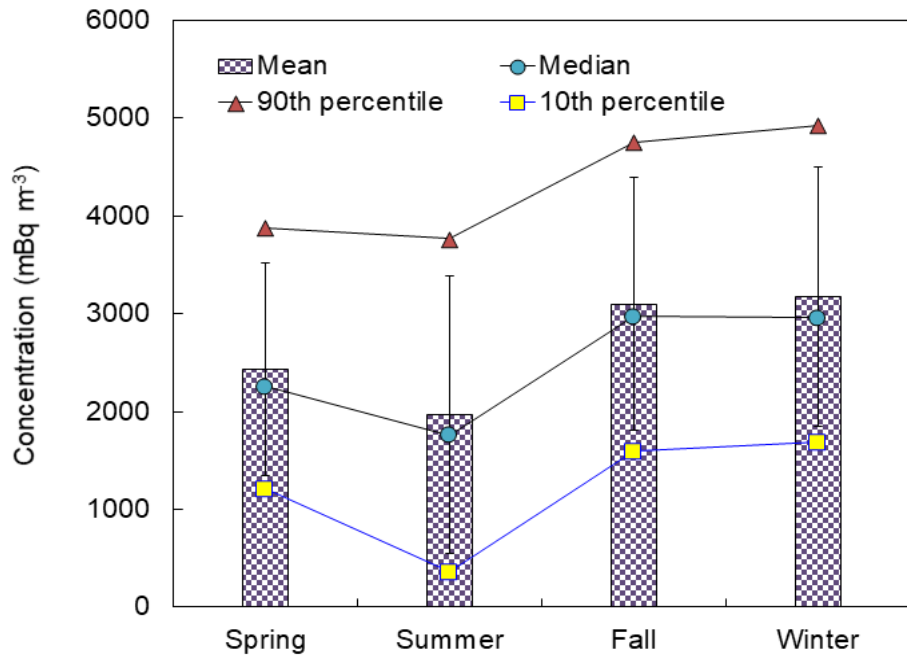


그림 11.2.5 고산(JGS) 계절별 라돈농도 비교(2001~2021년).

2021년의 라돈 농도를 월별로 비교하였고, 그 결과를 그림 11.2.6에 나타내었다. 그림에서 막대그래프로 나타낸 농도는 시간별 농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 각각 중앙값, 90 분위수, 10 분위수 농도를 나타낸 것이다. 이러한 월별 비교에서 라돈 농도는 11월 > 2월 > 12월 > 3월 > 10월 > 1월 > 9월 > 5월 > 6월 > 4월 > 8월 > 7월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 11월에 3339 mBq/m^3 , 가장 낮은 7월에 1744 mBq/m^3 로 월별로는 거의 1.9배 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 변화 추세를 보였다.

반면에 2001~2021년의 장기 측정 결과에서 월별 농도는 11월 > 10월 > 12월 > 1월 > 2월 > 9월 > 3월 > 6월 > 4월 > 5월 > 8월 > 7월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 11월에 3119 mBq/m^3 , 가장 낮은 7월에 1564 mBq/m^3 로 월별로는 거의 2.0배로 차이를 보였고, 월별 농도가 2021년과 유사한 경향을 나타내었다(그림 11.2.7).

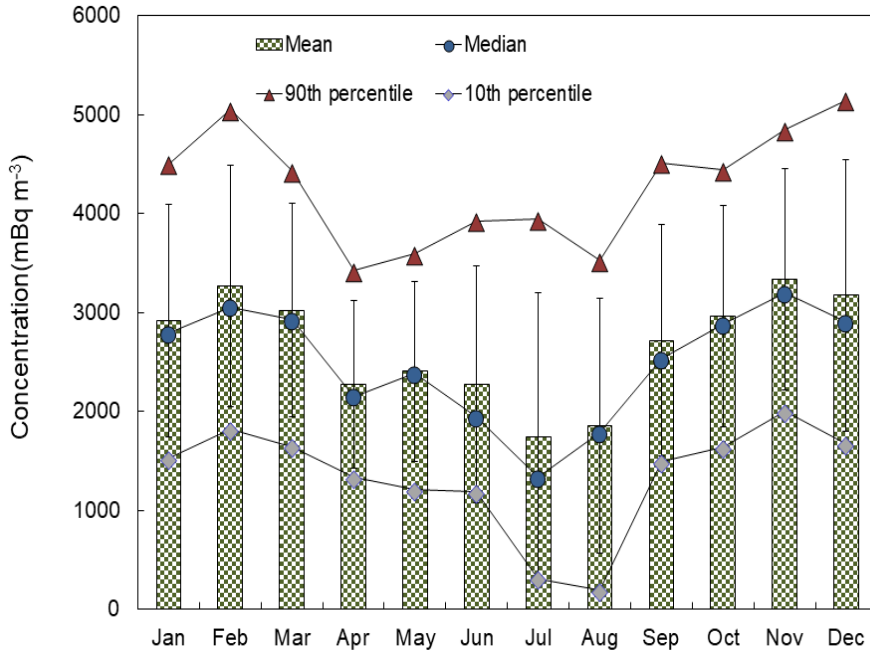


그림 11.2.6 2021년 고산(JGS) 월별 라돈 농도 비교.

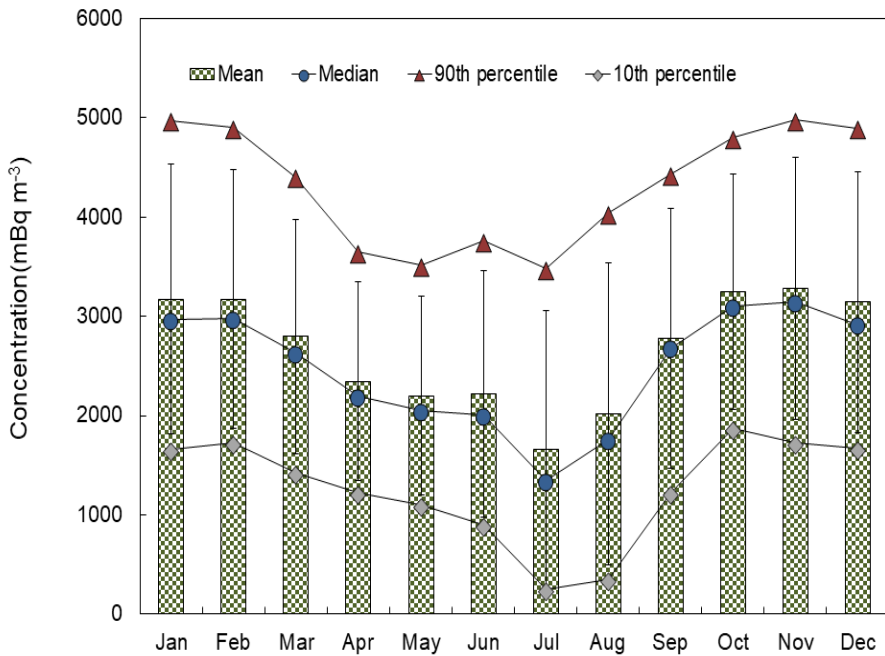


그림 11.2.7. 고산(JGS) 월별 라돈농도 비교(2001~2021년).

2021년 라돈 농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 비교하였다. 그림 11.2.8의 결과와 같이 2021년 1~12월의 일간 변화를 비교한 라돈 농도는 오전 7시에 3098 mBq/m³로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 4시경에 2185 mBq/m³로 가장 낮은 농도를 나타내었다.

또한 그림 11.2.9와 같이 2001~2021년 장기 측정 결과에서 일간 농도는 오전 7시경에 3012 mBq/m³로 가장 높았고, 오후 3시경에 2230 mBq/m³로 농도가 가장 낮은 것으로 보아 비슷한 시간별 패턴을 유지하는 것으로 조사되었다.

이처럼 라돈 농도 일간변화는 대체적으로 야간에 더 높고 주간에 낮은 경향을 보였고, 아침부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하고 다시 저녁 시간에 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 낮은 오전이나 오후의 낮 동안에 최고가 되어 대기 경계의 높이까지 이르게 되고, 이 높이 이내의 대기오염물은 난류에 의해 균일하게 연직분포를 이루게 된다. 그러나 밤이나 이른 아침에는 지표 가까이 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.

2010~2021년의 장기측정 결과로부터 일변화를 계절별로 비교한 결과(그림 11.2.10~그림 11.2.11)에서 겨울철에 라돈의 최대, 최소 농도 차이가 상대적으로 작은 반면에 여름에는 겨울보다 훨씬 큰 농도 차이를 보인다. 그리고 이러한 추세는 2021년 측정 결과에서도 동일한 경향을 보인다. 또 겨울철에는 주야간 온도변화가 큰 차이를 보이지 않고 대기 혼합고의 차이도 상대적으로 작다. 따라서 라돈의 일간 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않게 된다. 그러나 이와 반대로 주야간 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).

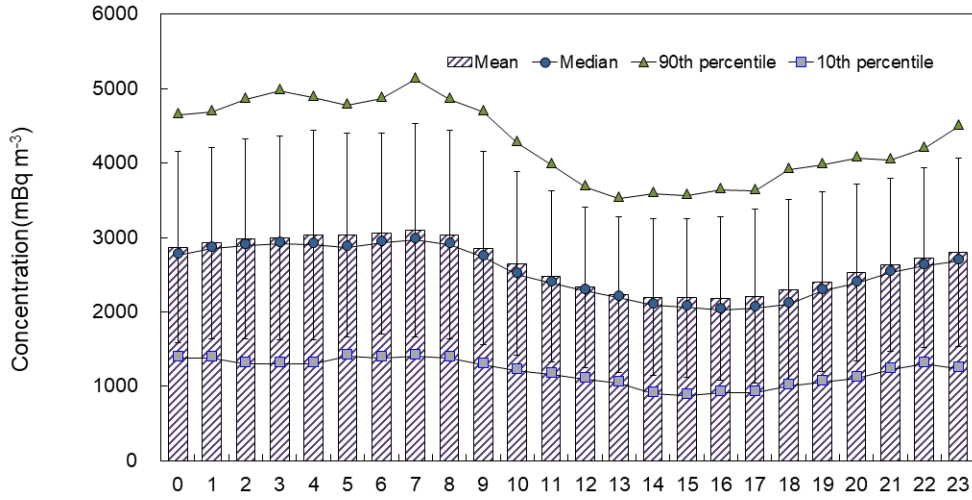


그림 11.2.8 2021년 고산(JGS)의 시간별 라돈 농도 비교.

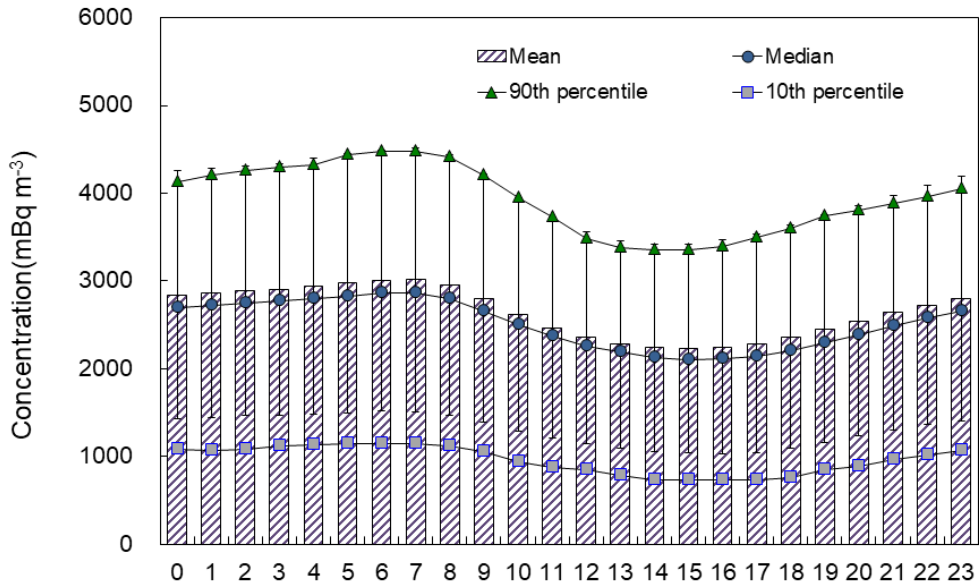


그림 11.2.9 고산(JGS)의 시간별 라돈 농도 비교(2001~2021년).

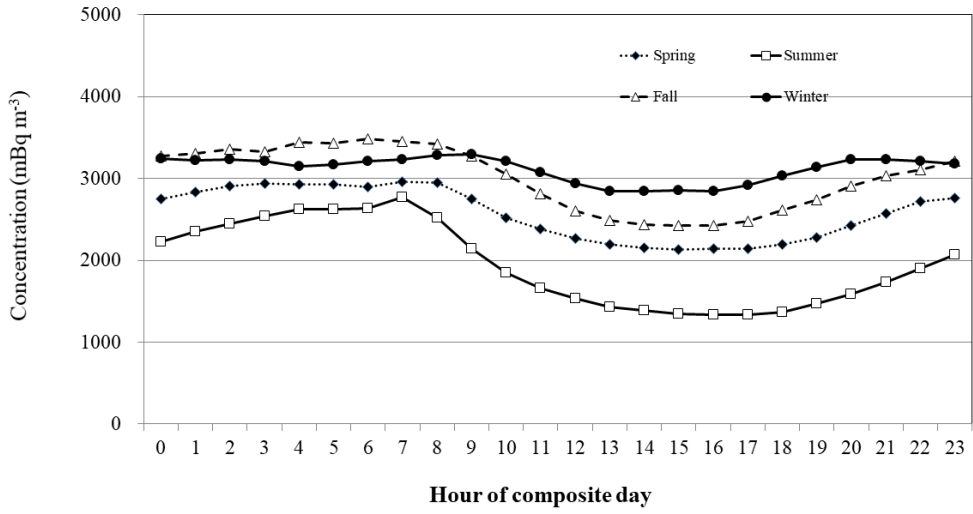


그림 11.2.10 2021년 고산(JGS)의 계절별 시간 라돈 농도 비교.

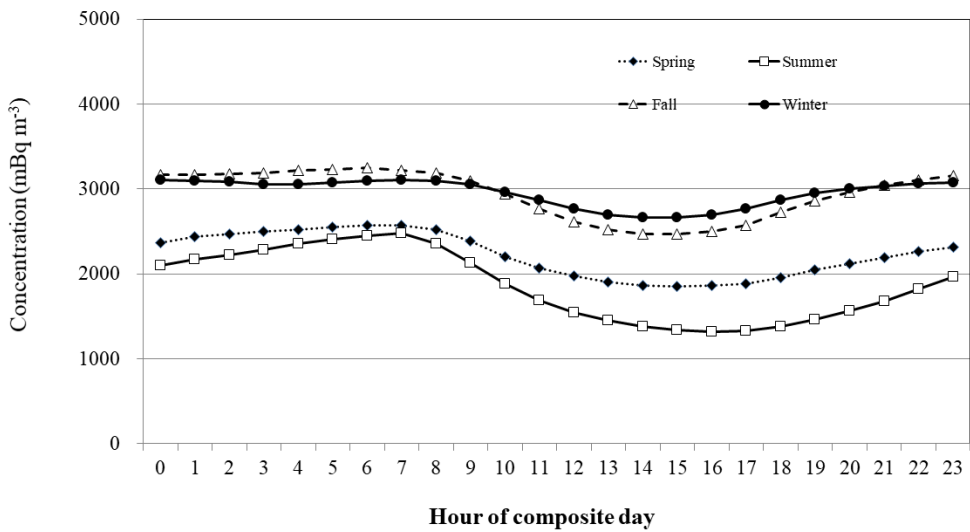


그림 11.2.11 고산(JGS)의 계절별 시간 라돈 농도 비교(2001~2021년).



11.2.3 라돈 장거리 이동 수송경로

기류 유입경로별로 라돈의 농도변화를 비교하였다. 이를 위해 2021년에 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 대기오염물질의 경우 대략 2~5일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사 시간은 120시간으로 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 군집분석 결과를 기초로 4개 군집별 일평균 라돈 농도를 비교한 결과, 기류의 이동은 Cluster 1~Cluster 4에서 각각 29%, 33%, 30%, 8%의 빈도를 나타내어 대부분 북서풍을 타고 중국 대륙으로부터 제주로 이동한 것으로 확인되었다. 그리고 이 때 각 기류 이동 경로별 라돈 농도를 비교한 결과, Cluster 1~Cluster 4에서 각각 2943 mBq/m³, 2978 mBq/m³, 2419 mBq/m³, 1127 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 2.6배 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 확인되었다.

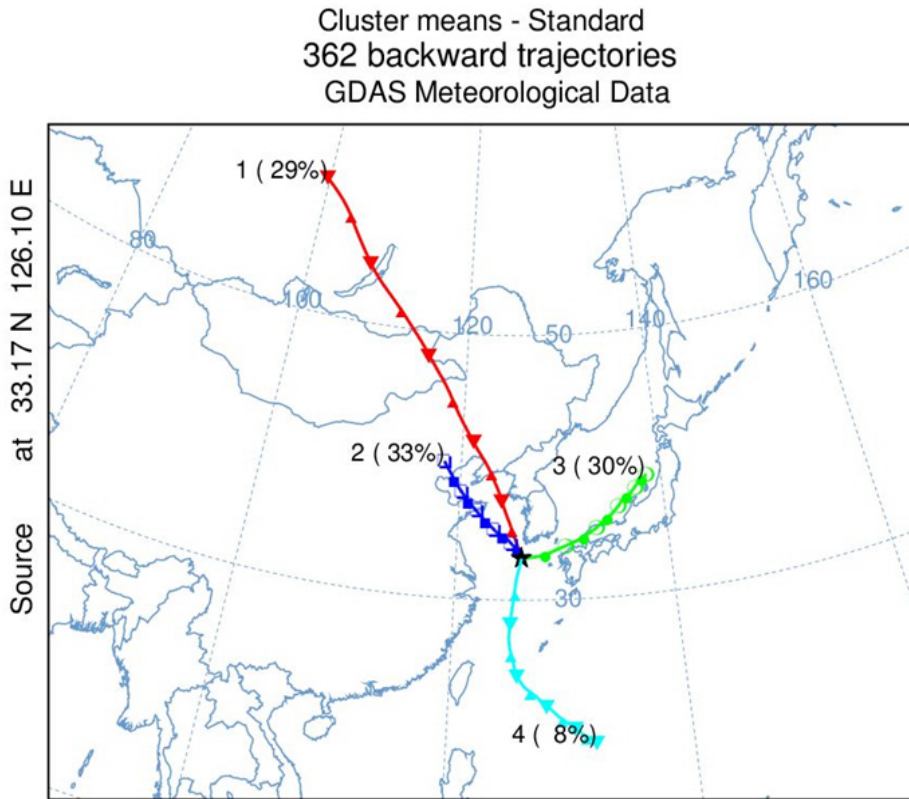


그림 11.2.12 2021년 기류 유입경로 및 라돈 농도.

제1장 머리말

제2장 한반도 지구대기감시업무 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스

제5장 반응가스

제6장 에어로졸

제7장 대기복사

제8장 성층권오존

제9장 자외선

제10장 총대기침적

제11장 기타



2021 지구대기감시 보고서



부



록

1. 관측자료품질보증체계	232
2. 지구대기감시 관측자료	260
3. 기후변화감시 기술노트 목록	301
4. 지구대기감시 매뉴얼 목록	302
5. 기후변화감시 관측자료 활용 학술논문	303
6. 기후변화감시기술 특허 보유 현황	315
7. 지구대기감시 보고서 작성자	317

[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	플라스크	-	주 1회	1990~2003년
	비분산적외선분석기 (NDIR)	Siemense	1시간	2009~2013년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2014년~현재
CH ₄	플라스크	-	주 1회	1990~2003년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2015년~현재
N ₂ O SF ₆	가스크로마토그래피- 전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	2010년~현재 2016년~현재

※ 2012년 고산 한경면에서 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 3점 교정, 2012~현재 CRDS 2주 이내마다 4점 교정 * 고 산 : 2009~2013 NDIR, 3시간마다 3점 교정, 2014~현재 CRDS 2주 이내마다 4점 교정 * 울릉도 : 2012~2019.11. CRDS 2주마다 4점 교정, 2019~현재, CRDS 5일마다 4점 교정 ② 장비 유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거, 표준가스 교정 기간 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 $HA - HA의\ 30일\ 이동중앙값 \leq 1.3 \times HA의\ 30일\ 이동표준편차$ <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 검·교정하여 농도 재산정 <ul style="list-style-type: none"> * 안면도: 1999~2015 GC-FID, 6시간마다 1점 교정, 2016~현재 CRDS 2주마다 4점 교정 * 고 산: 2014~현재 CRDS 2주마다 4점 교정 * 울릉도: 2018~2019.11. CRDS 2주마다 4점 교정, 2019.12.~현재, CRDS 5일마다 4점 교정 ② 장비 유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시 자료에서 제거, 표준가스 교정 기간 제거 <p><시간평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균 산정 ④ CH₄ 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 $HA - HA의\ 30일\ 이동중앙값 \leq 1.8 \times HA의\ 30일\ 이동표준편차$ <p><일평균, 월평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ⑧ Thoning et al.(1989)의 방법을 적용하여 산정 (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 장비 유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시 자료에서 제거 <p><시간자료 선택></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 시간자료의 연속된 앞·뒷값의 차이가 A 이상 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 시간 평균자료가 6개 이상일 때 1차 일평균 산정 <p><월평균></p> <ul style="list-style-type: none"> ⑥의 선정된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅 ⑦관측값 - 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)
염화불화탄소 류(CFCs)	<p><입력자료 선정></p> <ul style="list-style-type: none"> ① 염화불화탄소류의 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입) ② 장비 유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시 자료에서 제거 <p><시간자료 선택></p> <ul style="list-style-type: none"> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 관측소 간의 비교, 기상자료 등을 판단하여 유효 값 선정 <p><일평균, 월평균> ※ O'Doherty et al., 2001</p> <ul style="list-style-type: none"> ④ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간 값을 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 장비 유지보수 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 감시소 간의 비교, 기상자료 등을 판단하여 유효 값 선정 <p><일평균, 월평균> ※ O'Doherty et al., 2001</p> <ul style="list-style-type: none"> ④ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간 값을 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

1.2 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 〈 시간통계 〉 ○ 자료 기간 : 생산자료를 이용하여 해당 시간의 00분 이후부터 59분까지의 1시간에 대하여 통계 ○ 자료 종류 : 시간 평균자료 ○ 산출방법 <ul style="list-style-type: none"> - 제거 후 생산자료가 시간당 66% 이상일 때 산출(1분 자료 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 표류 오차값을 보정함. 예) 04시 zero = 5 ppb, 06시 zero = 10 ppb라면 2시간 동안 5ppb가 선형적으로 증가하였다 고 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 〉 ○ 자료 기간 : 시간 평균자료가 하루 75% 이상일 때 산출(시간자료 18개 이상) ○ 자료 종류 : 일평균 ○ 산출방법 : 시간 통계와 같음 〈 월통계 〉 ○ 자료 기간 : 일자료가 50% 이상일 때 산출 ○ 자료 종류 : 월평균 ○ 산출방법 : 시간 통계와 같음 〈 연통계 〉 ○ 자료 기간 : 해당 연의 1월부터 12월까지의 1년간에 대하여 통계 ○ 자료 종류 : 연평균 ○ 산출방법 : 시간 통계와 같음

1.3 에어로졸

1.3.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	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 라이더	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>〈자료품질보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 국가기준측정시스템(NRM)과 비교평가를 통과한 기준채취기(Class I)를 이용하여 현장에서 등가성 평가 수행 (부록 1.3.2 참조) <p>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기기 상태 검사: 6자리 상태 코드가 '000000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심'으로 분류 ○ 계측한계 검사: 1~5,000 μg/m³를 벗어나면 '의심'으로 분류 ○ 시간 연속성 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 원시 자료(5분)가 1시간에 75% 이상일 때 시간 평균값 산출 ○ 유효 시간 평균자료가 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
응결핵 수농도 (0.01~3 μm, 총수농도)	<p>〈자료품질보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 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>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기기 상태 검사: 기기 예러가 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>〈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 원시 자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간 평균값 산출 ○ 유효 시간 평균자료가 일, 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 산출
크기별 수농도 (0.5~20 μm)	<p>〈자료품질보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 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>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기기 상태 검사 <ul style="list-style-type: none"> 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°C : '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>〈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
	<p><통계방법></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 위 자료 품질관리를 통과한 원시 자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간 평균값 산출 ○ 유효 시간 평균자료가 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><자료품질보증></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 연 1회 이상 표준입자(203nm)를 이용한 자체 점검 ○ APS와 중복 입경 구간(0.532~1.0 μm) 수농도 비교평가 ○ 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"> ○ 기기 상태 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 원시 자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간 평균값 산출 ○ 유효 시간 평균자료가 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><자료품질보증></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 매 2개월마다 스펠가스 확인(span check) <ul style="list-style-type: none"> - 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 ○ 기기 상태 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>〈자료품질보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 연 1회 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"> ○ 광흡수계수가 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% 불확실 도를 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



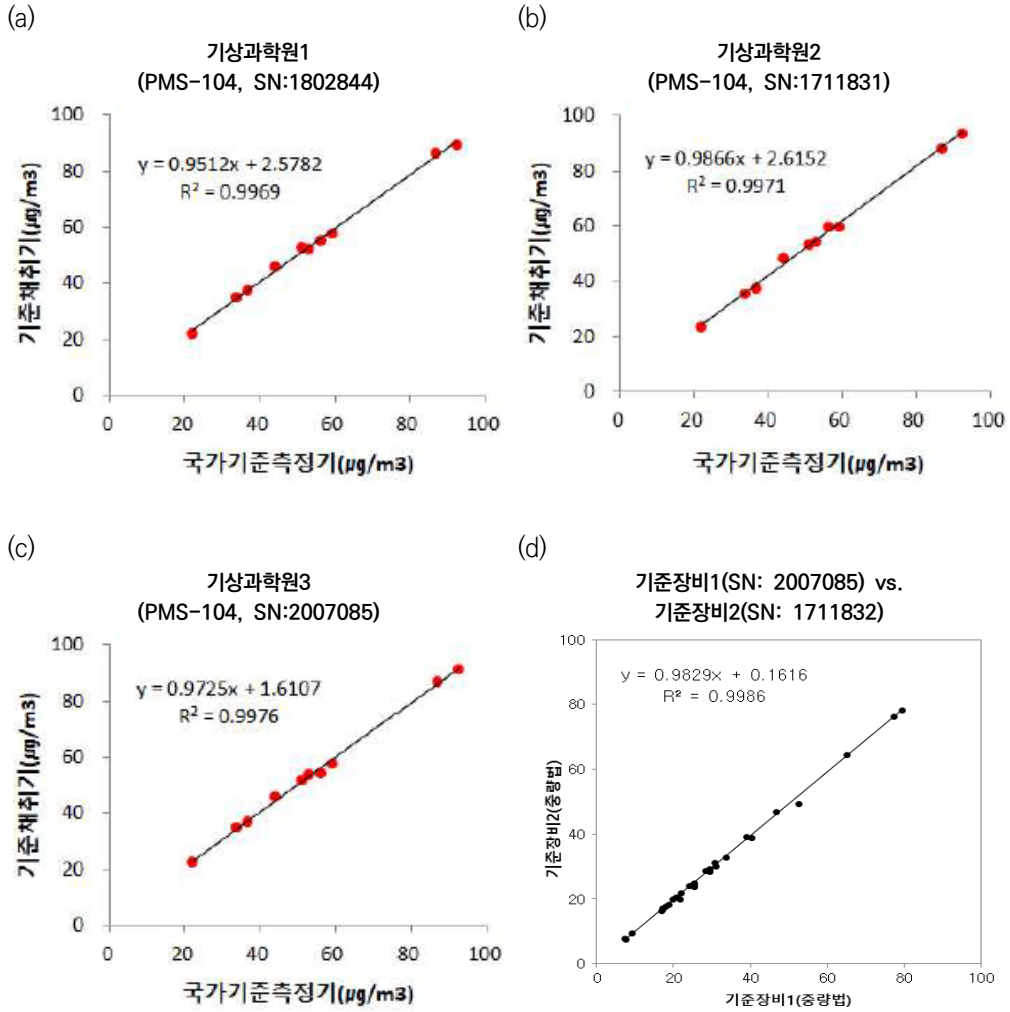
관측요소	자료통계 방법
광학깊이 (정밀필터복사계 (PFR))	<p>〈자료품질보증〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 3년마다 세계광학깊이연구-보정센터(WORCC PMOD/ WRC)-제작사 교정 수행 <p>〈자료품질관리(자동)〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기기 상태 검사 <ul style="list-style-type: none"> ① 내부 센서 온도 $19.5 \pm 1^\circ\text{C}$: 센서 온도 ② 태양 추적 장치 위치 이상 유무 ③ 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 관측 채널 중 하나라도 Overflow ⑤ 야간(태양고도가 20도 미만) ○ 계측한계 검사: AOD이 및 오스트롬 산출 결과 2 이상일 때 '의심' <p>〈통계방법〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 위 자료 품질관리를 통과한 자료가 일별 관측 유효데이터가 10개 이상일 때 일평균값으로 산출 ○ 유효 시간평균 자료를 이용하여 월평균, 연평균 산출
PM10 질량농도	<ul style="list-style-type: none"> - 채취시간이 24시간 이상 된 자료 제거 또는 채취시간이 10시간 미만인 자료 제거
PM2.5 질량농도	<ul style="list-style-type: none"> - 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 이온 성분	<ul style="list-style-type: none"> - 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 이온 성분	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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

안면도, 고산, 울릉도 기후변화감시소에서 운영 중인 부유분진측정기는 「환경측정기기 형식 승인·정도검사 등에 관한 고시⁴⁾」에 따라 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 14개 이상인 때 등가성이 인정되어 정도검사를 받을 수 있다. 기후변화감시소는 2018년 3월 GAW 에어로졸 세계표준센터로부터 받은 적합성 평가 시 권고에 따라 부유분진측정기에 대해 기준채취기와 의 등가성을 연중 확인하고 있다. 부유분진측정기 등가성평가를 위한 기준채취기는 국립환경과학원의 국가기준측정시스템과 비교 측정하여 성능을 검증받은 중량농도법 측정기이다. 2021년에 국가기준측정시스템(NRM)과 기후변화감시소의 기준채취기(Class I) 3대의 성능검증 결과를 부록그림 2에 보였다. 국가기준측정시스템과 기준채취기(Class I)의 선형회귀식 기울기는 0.95~0.99, 절편은 1.6~2.6으로 중량법 기준채취기 등가성평가 기준을 만족하였다. 성능이 검증된 이 기준채취기(Class I)들은 안면도와 고산 기후변화감시소로 이동하여 현지에서 부유분진측정기의 등가성평가를 위해 운영되었다. 국가기준측정시스템과 인증된 기준채취기 중 1대는 국립기상과학원이 보유한 다른 기준채취기를 인증하였고(부록그림 2d), 이후 울릉도 현지로 이동하여 등가성평가를 수행하게 하였다. 기준채취기와 부유분진측정기의 선형회귀식의 기울기와 절편은 안면도, 고산, 울릉도에서 각각 0.91/1.1, 0.94/4.2, 1.0/1.2로 부유분진측정기 등가성평가 기준⁵⁾(기울기 0.90~1.1, 절편 -5.0~5.0)을 모두 만족하였다(부록그림 3).

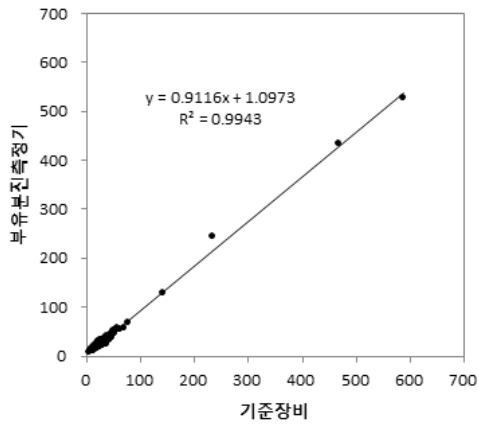
4) 국립환경과학원 고시 2017-6 (2017.4.) 부칙 제1조(시행일) 등가성 평가시험은 2018년 1월 1일부터 시행한다.

5) 대기오염공정시험기준(시행 2022.2.7.) 환경대기 중 미세먼지(PM-10) 자동측정법-베타선법

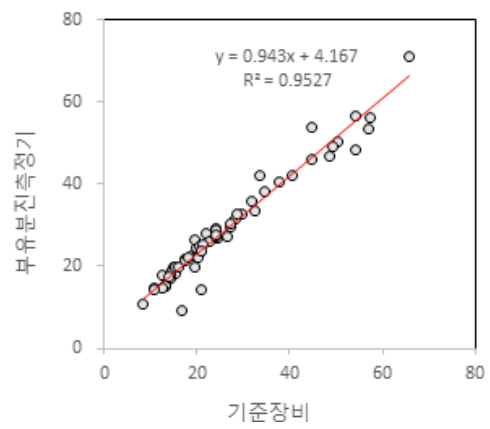


부록그림 2. 국가기준측정시스템과 국립기상과학원 기준채취기(Class I)의 비교평가(a) 고산, (b) 안면도, (c)~(d) 울릉도 등가성평가용).

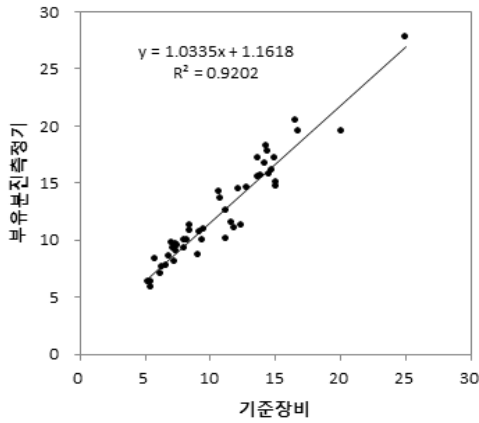
(a) 안면도



(b) 고산



(c) 평안도



부록그림 3. 2021년 감시소별 부유분진측정기 등가성평가 결과.



1.4 대기복사

1.4.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	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 [월평균]
순복사	- 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	<p>< 오존분광도계 ></p> <ul style="list-style-type: none"> - 태양광 중 6개 파장에 대한 광도를 참조 값과 비교하여 오존전량 산출 - 일평균 <ul style="list-style-type: none"> • 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	<p>< ECC 오존존데 ></p> <ul style="list-style-type: none"> - 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(할로겐램프) 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 활용하고 있다. 일반적으로 검교정 직후에는 보정 유무에 따른 오존농도 차이가 크지 않으나 시간이 지날수록 그 차이는 벌어질 수 있으며, 검교정 직후에는 보정 상수값의 불확실성이 존재할 수 있다. 따라서, 위성 오존전량과의 상호 비교를 통해 보정값의 안정성이 확인된 이후 O3Brewer 자료처리 소프트웨어를 통한 보정을 적용하였다.

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 향)
					2012년~현재 (고 산)
자외선B (홍반자외선)	UV-Biometer	Solarlight	#501	10분	2012년~현재 (울릉도)
					1999년~현재 (안면도)
					1999년~현재 (포 향)
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 때 오류처리 • 기기상태 오류 <ul style="list-style-type: none"> - 관측 센서 온도가 24℃~26℃를 벗어날 때 오류처리 • Tropospheric Ultraviolet-Visible (TUV) radiation model (V. 5.3) 값보다 큰 경우 오류 값 처리(75° 이하)
자외선B (홍반자외선)	- 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

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 때 오류처리 • 기기상태 오류 <ul style="list-style-type: none"> - 관측센서온도가 24°C~26°C를 벗어날 때 오류처리 • Tropospheric Ultraviolet-Visible (TUV) radiation model (V. 5.3) 값보다 큰 경우 오류 값 처리(75° 이하)
자외선B (홍반자외선)	- 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)
전기전도도	전기전도도 측정기	Thermo	Orion 3-Star	2009~2016년 (울 진)
				2009년~현재 (안면도)
				2009년~현재 (고 산)
				2009년~현재 (울릉도)
				2009~2016년 (울 진)
				2009년~현재 (안면도)
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 허용범위(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"> <thead> <tr> <th>CE+AE (μeq/L)</th> <th>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 (μeq/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 (μeq/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(EC_{mea})와 이론적으로 계산한 전기전도도(EC_{cal}) 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"> <thead> <tr> <th>EC_{mea} (μS/cm)</th> <th>Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EC_{mea} ≤ 5</td> <td>ACD ≤ ±50</td> </tr> <tr> <td>5 < EC_{mea} ≤ 30</td> <td>ACD ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>30 < EC_{mea}</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 $70 < IonRatio(\%) = \frac{CE}{AE} \times 100 < 130$	EC _{mea} (μS/cm)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)	EC _{mea} ≤ 5	ACD ≤ ±50	5 < EC _{mea} ≤ 30	ACD ≤ ±30	30 < EC _{mea}	ACD ≤ ±20		
EC _{mea} (μS/cm)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)										
EC _{mea} ≤ 5	ACD ≤ ±50										
5 < EC _{mea} ≤ 30	ACD ≤ ±30										
30 < EC _{mea}	ACD ≤ ±20										



1.7.3 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 감시소의 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. 2021년 5월에 시행된 제 63차 강수화학 국제비교실험은 45개국, 69개 실험실에서 실시하였고, 부록그림 5는 미지시료 분석한 결과를 나타내었다. 강수분석 결과는 국제비교실험 값의 중앙값 근처에 분포하여 신뢰성 있는 결과를 보여주었다.

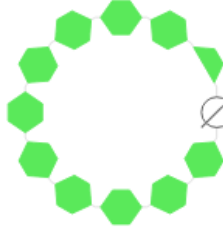


Table 1. Precipitation Chemistry - Data Quality Objectives

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="281 635 519 725">pH Marginal , 전기도도도 Satisfactory 그 외 분석요소 Good</p>	 <p data-bbox="630 645 853 715">NH_4^+, F - Satisfactory 그 외 분석요소 Good</p>	 <p data-bbox="972 645 1194 715">NH_4^+, 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
2021	425.6	426.5	426.8	427.1	424.8	421.8	419.0	415.6	416.3	421.9	425.7	426.7	423.1



○ 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
2021	423.0	424.3	425.5	425.9	424.0	419.8	416.9	414.6	414.8	420.0	424.2	425.0	421.5

○ 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
2021	422.9	424.4	423.7	424.8	423.9	417.4	414.1	414.6	416.3	420.3	423.2	424.2	420.8

○ 독도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2014	-	-	-	410.3	-	403.1	398.7	392.7	393.1	400.1	404.3	405.5	401.0
2015	406.6	407.6	409.5	411.1	409.3	400.8	396.	-	-	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
2021	422.7	423.7	423.9	424.7	423.5	418.3	413.5	411.1	411.7	416.6	421.7	423.7	419.6

※ “-”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	-	-	-	1901	1900	1888	1840	1843	1891	1902	1884	1847	1877
2000	1827	1852	1871	1856	1858	1826	-	1763	1849	1854	-	-	1840
2001	-	-	-	-	1799	1823	1816	1851	1895	1867	1853	1874	1847
2002	1888	1901	1906	1873	1857	1852	1811	1829	1872	1857	1856	1874	1865
2003	1879	-	-	-	-	1876	1846	1796	-	-	1921	1889	1868
2004	1865	1863	1859	1839	1837	1823	1772	1774	1851	1878	1855	1861	1840
2005	1866	1861	1867	1863	1849	1848	1838	1838	1909	-	-	-	1860
2006	1852	1842	1845	1832	1852	1864	1808	1837	1905	1887	1882	1905	1859
2007	1898	1889	1889	1882	-	-	-	1824	1900	-	1882	1889	1882
2008	1893	1902	1908	1893	1889	1876	1836	1822	1844	1882	1900	1904	1879
2009	1902	1906	1911	1899	1886	1891	1894	1894	1899	1890	1899	1914	1899
2010	1906	1911	1919	1894	1881	1890	1839	1806	1872	1908	1903	1908	1886
2011	1908	1907	1905	1894	1892	1876	1839	1874	1911	1904	1909	1918	1895
2012	1926	1929	1926	1911	1905	1909	1863	1846	1908	1923	1918	1934	1908
2013	1942	1947	1949	1927	1930	1911	1831	1860	1928	1917	1907	1921	1914
2014	1935	1943	1940	1930	1940	1923	1875	1910	1957	1945	1945	1958	1933
2015	1959	1956	1947	1933	1934	1938	1897	1912	1961	1953	1953	1957	1942
2016	1952	1955	1957	1951	1959	1938	1881	1889	1944	1954	1952	1969	1942
2017	1970	1964	1965	1956	1954	1925	1892	1946	1980	1959	1961	1974	1954
2018	1970	1974	1975	1960	1965	1944	1882	1898	1960	1968	1963	1975	1953
2019	1986	1985	1979	1962	1969	1987	1939	1941	1995	1990	1980	1996	1976
2020	2000	1992	1986	1972	1973	2008	1967	1912	1980	2009	1993	2005	1983
2021	2015	2021	2015	1997	1997	1996	1963	1978	2013	2013	2021	2034	2005

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2014	1920	1925	1927	1919	1923	1921	1884	1906	1946	1925	1915	1930	1920
2015	1931	1934	1940	1930	1926	1925	1876	1881	1938	1937	1938	1951	1925
2016	1947	1946	1945	1941	1940	1888	1843	1905	1954	1940	1937	1949	1928
2017	1951	1951	1954	1945	1946	1910	1856	1908	1966	1952	1952	1960	1938
2018	1953	1960	1961	1946	1946	1918	1863	1875	1932	1960	1963	1965	1937
2019	1966	1972	1975	1960	1961	1977	1920	1890	1952	1971	1962	1977	1957
2020	1984	1982	1980	1968	1966	1970	1912	1896	1984	2001	1983	1993	1968
2021	1996	2002	2001	1986	1985	1971	1917	1919	1975	2000	2010	2017	1982

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2018	1952	1956	1961	1953	1944	1922	1887	1902	1946	1954	1955	1960	1941
2019	1962	1971	1973	1958	1956	1960	1932	1935	1962	1959	1964	1976	1959
2020	1976	1979	1977	1966	1965	1975	1948	1935	1980	1994	1985	1990	1972
2021	1998	2004	2000	1987	1990	1980	1930	1952	1999	1998	2007	2017	1988



□ 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
2021	334.9	335.5	335.8	335.5	335.5	336.6	336.9	336.1	335.9	336.3	337.2	337.3	336.1

※ “-”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
2021	334.7	335.0	335.4	335.5	335.6	336.1	336.1	336.4	336.9	336.8	336.6	336.4	336.0

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 올롱도

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
2021	334.7	334.7	335.0	335.3	335.4	335.6	335.4	335.2	335.2	335.4	335.8	335.8	335.3

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 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
2021	-	-	-	-	11.0	11.0	11.4	11.4	11.2	-	-	11.2	11.2

※ “-”은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄



○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2017	9.7	9.7	9.4	-	9.5	9.6	9.6	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8	9.7
2018	9.7	9.9	9.9	9.9	10.0	9.9	9.8	9.8	9.9	10.0	10.0	10.1	9.9
2019	10.1	10.1	10.1	10.2	10.4	10.5	10.1	10.1	10.2	10.3	10.3	10.3	10.2
2020	10.4	10.3	10.4	10.4	10.5	10.6	10.5	10.4	10.6	10.7	10.7	10.7	10.5
2021	10.7	10.7	10.8	10.9	11.1	11.1	10.8	10.9	11.1	11.2	11.2	11.2	11.0

※ “-”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
2021	10.8	10.8	10.9	11.0	11.2	11.4	11.2	11.1	11.0	11.1	11.2	11.1	11.1

※ “-”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	-	-	-	78.4	76.5	77.3	-	77.8	-	-	-	-	77.5
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2011	-	-	-	-	-	-	-	-	75.1	76.3	75.7	75.3	75.6
2012	74.9	76.1	-	-	-	-	74.4	-	-	74.3	74.1	74.2	74.7
2013	74.7	74.2	73.1	73.3	73.6	73.7	74.0	74.2	-	-	-	73.6	73.8
2014	73.7	-	72.4	73.4	73.6	72.1	72.0	72.2	-	71.5	-	-	72.6
2015	-	74.1	-	-	72.3	72.8	71.1	70.8	71.0	-	71.2	71.3	71.8
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
2021	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.1	69.0	68.9	68.9	69.0	69.0	69.0

□ 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
2021	222.5	222.2	222.3	222.2	222.2	222.3	222.1	221.4	221.0	220.5	220.1	219.8	221.6



□ 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
2021	495.2	495.2	495.0	494.3	493.5	493.2	493.6	492.5	491.6	491.5	491.8	491.8	493.3

※ “-”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(2014.1.~2017.3.)는 관측환경에 따른 품질처리로 무효 처리됨

□ 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
2021	35.6	43.8	47.8	45.8	47.1	49.0	40.1	40.6	39.2	39.5	38.7	31.7	41.6



○ 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
2021	40.4	45.9	50.1	56.2	55.5	48.8	27.5	35.6	42.4	45.0	48.8	42.5	44.9

□ 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
2021	294.0	307.3	318.3	302.7	212.5	210.3	159.5	196.0	206.5	199.1	281.0	301.8	249.1

○ 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
2021	200.5	237.6	236.5	190.5	204.5	166.2	102.1	128.8	179.6	177.8	220.4	218.6	188.6

○ 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
2021	183.2	215.8	185.9	169.2	181.7	176.0	123.0	164.9	177.3	166.0	195.0	195.9	177.8



□ 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
2021	6.7	7.4	9.0	5.6	3.2	-	3.9	3.3	3.5	4.1	5.5	7.1	5.4

※ 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
2021	3.9	5.6	6.4	4.0	3.4	3.0	2.3	2.4	3.0	3.9	4.4	3.6	3.8

□ 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
2021	1.3	1.3	1.0	1.0	0.7	0.5	0.8	0.8	0.6	0.8	0.9	1.1	0.9

○ 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
2021	0.8	0.9	0.7	0.7	0.5	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7



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
2021	36	41	59	34	55	25	23	20	16	24	33	29	33

○ 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
2021	34	34	86	37	51	24	23	20	20	26	41	30	36

※ 2017년 9월 21일까지 환경분석센터(구 고산기후변화감시소)
2017년 10월부터 수월봉(통합관측실)에서 관측

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2019	23	28	33	27	-	-	20	21	15	19	20	15	22
2020	13	17	22	23	20	17	9	18	15	18	20	16	17
2021	21	27	44	30	32	16	11	14	11	13	20	16	21



□ 미세먼지 크기별 수농도 [총수농도, 단위: 개/cm³]

○ 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	-	-	-	-	-	-	2921	3572	4260	4221	4060	4216	3873
2018	4319	4442	3723	3696	-	-	5120	4032	-	-	-	-	4170
2019	-	-	4134	4490	4314	3363	3235	-	-	-	5456	3765	3993
2020	3681	3876	4741	4179	4537	4030	4209	2738	5773	6110	5054	4294	4433
2021	4987	4902	4763	4901	4347	3801	4571	4652	4819	5157	3851	4337	4590

※ 2005~2016(0.01~0.5 μm), 2017~ (0.008~1.2 μm)

□ 응결핵 수농도(0.01 ~ 3 μm, 총수농도) [단위: 개/cm³]

○ 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
2021	3624	4447	4358	6953	4205	3861	3857	3086	2944	3002	-	1922	3864

※ 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
2021	74.0	117.4	111.8	60.8	71.5	83.5	68.7	69.8	34.4	51.6	78.5	79.9	74.8

[에어로졸 광학특성-참고]

안면도 본동 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~)

※ 표준상태(0°C, 1기압)



□ 지상 에어로졸 산란 용스트림 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
2021	1.25	1.20	1.26	1.53	1.44	1.70	1.82	1.47	1.58	1.50	1.34	1.40	1.46

□ 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
2021	8.4	11.6	9.6	7.5	6.8	3.7	3.6	4.0	3.2	4.5	5.9	5.9	6.2

□ 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
2021	60	0.02	1.4	6.9	3.6	1.1	2.8	0.2	0.2	0.5
연평균	623	0.05	1.4	7.2	5.6	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	2011~2020	111	0.07	2.1	8.1	6.2	1.6	3.7	0.4	0.2	0.6
	2021	17	0.03	2.9	12.4	5.1	1.7	4.8	0.3	0.3	0.8
봄	2011~2020	145	0.04	1.4	8.5	7.1	1.3	3.83	0.3	0.2	0.7
	2021	16	0.02	1.2	8.2	3.1	1.1	2.84	0.2	0.2	0.7
여름	2011~2020	99	0.02	0.5	5.4	5.3	0.8	3.0	0.2	0.1	0.3
	2021	16	0.00	0.2	2.6	3.9	0.4	2.0	0.1	0.1	0.1
가을	2011~2020	113	0.03	1.2	5.3	4.2	1.1	2.1	0.2	0.2	0.5
	2021	13	0.01	1.0	5.4	2.4	0.8	2.0	0.1	0.1	0.4

※ “지구대기감시 업무매뉴얼(II)-에어로졸 및 총대기침적-, 2017, 국립기상과학원”의 QA/QC방법으로 자료 처리함.

※ 겨울: 전년도 12월과 당해 연도 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
2021	59	260.6	234.4	97.2	220.8	121.6	396.9	213.0
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
2021	59	9.8	0.8	0.7	2.1	4.7	1.5	22.7
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	-
2021	59	2.3	0.8	0.4	2.1	1.8	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
2021	103.7	148.8	141.9	180.1	144.4	133.6	178.8	121.7	149.0	165.1	114.8	115.6	141.5

※ 1999~2016년 월 평균값은 계산된 직달일사 값임[(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
2021	83.3	129.6	137.4	178.9	170.1	145.7	108.2	118.7	109.5	164.5	132.3	89.8	130.7



□ 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	-
2021	50.9	62.5	87.5	97.4	103.1	129.1	110.9	98.3	73.5	60.8	54.4	45.4	81.2

○ 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
2021	55.3	67.3	88.5	96.4	105.9	126.3	103.3	105.5	96.2	69.1	55.2	49.2	84.8

□ 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
2021	32.3	35.8	39.2	44.6	40.5	43.7	45.1	32.7	34.4	30.5	23.8	19.7	32.2



□ 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
2021	95.8	140.5	177.7	222.4	215.7	232.1	243.5	181.8	163.0	132.0	104.8	-	173.6

○ 고산

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	-
2021	92.2	135.7	175.6	223.6	231.1	236.4	183.4	185.4	162.9	160.9	115.8	85.1	165.7

□ 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
2021	310.4	329.2	354.4	381.3	394.2	397.5	403.2	-	-	-	-	-	-



□ 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
2021	256.4	260.6	287.4	304.4	332.2	357.7	382.0	-	-	-	288.9	276.5	-

□ 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	-
2021	9.6	35.7	73.5	101.3	115.5	133.2	145.1	91.9	-	-	21.7	4.3	73.2



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
2021	-	-	-	-	-	-	-	317	297	281	-	327	-

○ 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
2021	290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

○ 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	31.1
1988	330	331	347	360	320	322	285	285	287	271	301	319	313	27.5
1989	316	325	350	344	354	321	301	286	288	285	292	320	315	25.1
1990	347	337	348	351	337	319	293	279	282	298	298	334	319	27.0
1991	335	337	333	343	325	309	299	298	295	295	300	312	315	18.4
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	17.0
1994	357	350	380	339	356	337	294	290	307	292	296	299	325	31.8
1995	332	349	361	344	361	338	297	283	286	283	305	323	322	29.9
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	29.6
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	31.8
2001	364	330	381	353	354	338	299	297	284	284	301	312	325	33.1
2002	324	331	349	333	334	339	304	299	301	297	316	328	321	17.5
2003	366	366	372	348	344	342	310	297	283	291	282	297	325	34.8
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	34.2
2006	330	336	379	373	342	352	319	292	301	292	318	325	330	28.5
2007	342	349	382	381	351	333	313	294	286	281	299	324	328	34.5
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	28.7
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	1.6
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	28.9
2015	342	389	382	358	350	348	320	316	306	300	313	323	337	29.1
2016	356	372	355	358	332	339	308	304	292	275	293	305	324	31.8
2017	315	355	376	368	367	352	328	305	306	281	310	339	333	30.5
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	34.2
2020	339	350	368	381	434	323	324	301	298	282	290	320	327	43.8
2021	326	344	345	341	364	351	314	322	298	298	325	329	330	20.3
평균	337	350	362	339	332	319	292	281	278	291	303	321	317	
표준 편차	15.3	18.0	17.5	15.3	19.5	13.5	13.0	11.2	10.7	12.2	12.4	12.9	6.6	

※ 괄호()안의 값은 결측으로 인하여 OMI-TOMS 자료를 Dobson 관측 값으로 환산한 자료임.

2.6 자외선

□ 자외선A 일누적값 [단위: MJ/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.37	0.56	0.75	0.97	1.03	1.19	1.26	0.97	0.89	0.69	0.46	0.35	0.79

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.37	0.55	0.72	0.97	1.04	1.12	0.93	0.93	0.79	0.70	0.47	0.35	0.74



○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.46	0.57	0.67	0.92	0.95	1.01	1.05	0.77	0.71	0.59	0.43	0.37	0.71

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.32	-	0.69	0.97	1.00	0.98	1.08	0.81	0.75	0.53	0.41	0.29	0.71

□ 자외선A 일 최댓값 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	20.79	28.17	34.52	45.27	46.32	51.68	52.65	46.17	42.46	35.57	26.36	20.60	37.55

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	23.09	29.67	35.37	42.91	45.94	49.40	44.25	44.49	42.05	35.95	26.39	20.78	36.69



○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	23.75	28.06	32.62	40.69	43.25	46.27	47.34	40.38	39.10	29.56	22.47	19.88	34.45

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	20.77	NaN	33.39	44.96	45.38	45.57	49.14	42.00	36.33	29.65	23.31	18.33	35.35

□ 자외선B(홍반자외선) 일누적값 [단위: kJ/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.82	1.58	2.44	3.51	3.77	-	4.75	3.19	2.88	1.92	0.93	0.62	2.40

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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	-
2021	0.93	1.65	2.39	3.44	3.73	4.18	3.57	3.55	2.89	2.33	1.21	0.83	2.26



[부록 2] 지구대기감시 관측자료

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.74	1.18	1.68	2.63	2.90	3.22	3.69	2.61	2.19	1.55	0.87	0.63	1.99

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.73	-	1.91	3.15	3.44	3.51	4.30	3.23	2.72	1.65	0.90	0.55	2.37

□ 자외선B(홍반자외선) 일 최댓값 [단위: W/m²]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.055	0.095	0.136	0.197	0.204	-	0.240	0.186	0.167	0.119	0.063	0.043	0.137

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.065	0.106	0.141	0.181	0.198	0.225	0.204	0.206	0.182	0.142	0.081	0.060	0.149



○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.047	0.072	0.100	0.144	0.163	0.181	0.202	0.162	0.145	0.094	0.055	0.041	0.117

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
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
2021	0.052	-	0.114	0.176	0.188	0.194	0.232	0.197	0.158	0.111	0.061	0.040	0.139

2.7 총대기침적

□ 습성침적 관측자료(부피가중평균)

○ 안면도

연	개수	강수량	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(mm)		(μS/cm)									
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	43	1187.5	5.04	18.1	0.8	58.9	16.0	29.6	58.1	16.9	2.7	12.7	15.9
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	17	267.0	4.65	20.5	0.7	22.9	29.7	45.5	30.8	39.5	2.2	5.8	15.0
2003	30	306.5	4.45	25.4	4.3	27.6	30.8	54.6	27.3	37.6	2.0	8.8	18.6
2004	55	999.5	4.73	19.0	1.0	37.3	25.0	46.0	35.3	26.1	2.2	9.5	15.8
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	55	637.5	4.90	20.1	0.9	48.0	28.7	38.4	39.8	40.8	2.5	11.5	15.6
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	25.96	1.1	82.1	40.0	44.0	74.1	58.8	2.5	19.0	17.6
2020	69	1099.0	5.24	14.29	0.3	51.4	15.2	19.1	44.1	22.7	1.4	10.0	6.3
2021	84	1076.0	5.32	19.72	0.7	62.7	27.2	31.1	55.1	46.1	1.9	14.7	19.9
평균	-	784.9	4.72	25.9	1.5	60.3	30.2	49.0	53.8	36.5	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⁺
				(μS/cm)									
겨울	2011~2020	116	4.44	69.49	2.0	243.9	84.1	109.7	211.7	83.3	8.2	52.7	47.1
	2021	13	4.68	61.98	1.9	242.8	78.7	93.4	228.2	77.3	6.0	49.2	44.4
봄	2011~2020	137	4.94	22.13	1.4	34.0	34.3	51.8	28.6	47.3	2.4	10.6	30.6
	2021	20	5.44	24.6	1.4	30.6	47.6	50.1	26.8	100.4	2.2	12.3	50.9
여름	2011~2020	222	4.82	18.82	0.8	37.2	24.4	34.4	31.0	39.8	1.3	8.6	9.2
	2021	24	5.58	7.44	0.4	14.2	13.8	12.5	10.6	23.5	0.4	3.7	4.9
가을	2011~2020	154	4.74	24.11	0.8	75.6	23.7	35.7	66.2	24.9	2.3	16.0	11.3
	2021	25	5.00	33.22	0.4	163.0	26.1	39.9	143.7	30.1	3.7	32.2	13.7

※ "지구대기감시 업무매뉴얼(II)[에어로졸 및 총대기침적], 2017, 국립기상과학원"의 QA/QC방법으로 자료 처리함

※ 겨울: 전년도 12월과 당해 연도 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)											
1998	6	266.3	5.47	19.8	0.41	77.31	17.05	39.64	65.77	18.98	3.36	18.19	17.71
1999	38	1079.9	5.34	33.7	0.67	164.17	17.82	40.34	178.34	12.69	6.38	33.89	24.57
2000	17	178.7	4.65	23.6	0.45	61.84	21.43	45.21	61.96	19.36	3.80	21.54	19.33
2001	21	418.7	4.84	19.3	0.27	77.36	11.37	38.27	69.57	18.39	2.93	14.49	8.26
2002	30	503.9	4.78	24.0	0.04	79.31	21.52	42.71	93.57	16.72	3.17	21.84	15.86
2003	36	524.4	4.60	31.6	2.77	104.50	25.95	61.92	101.19	32.51	4.04	27.32	18.42
2004	41	1092.3	4.81	22.5	0.57	94.90	15.16	34.52	84.20	10.68	4.01	20.57	11.92
2005	42	664.6	4.68	30.9	1.10	93.86	32.46	44.98	82.84	15.22	4.76	24.71	20.36
2006	46	1010.4	4.98	23.7	1.31	75.30	20.43	44.97	64.24	11.09	3.21	19.24	31.24
2007	50	936.7	4.75	46.7	1.36	261.10	17.07	55.99	236.44	15.19	6.74	41.16	19.19
2008	52	745.8	4.57	31.4	0.84	85.78	23.11	45.61	75.53	17.92	3.97	17.81	13.93
2009	49	1045.2	4.81	20.4	0.98	54.14	18.08	33.92	47.24	13.58	2.78	12.06	12.01
2010	57	1140.7	5.05	38.8	0.90	188.11	29.79	49.25	171.61	15.55	8.86	41.97	29.75
2011	42	700.6	4.63	35.7	0.53	134.66	28.74	42.33	116.47	17.77	7.87	28.85	21.09
2012	79	1583.0	4.91	22.7	0.41	93.83	13.19	28.80	80.76	12.12	2.43	19.40	12.59
2013	73	807.0	4.66	35.5	0.97	130.04	29.37	53.38	112.60	27.88	3.74	27.34	20.10
2014	99	1434.0	4.90	19.9	1.09	68.37	18.68	32.97	58.83	18.51	2.34	15.06	15.80
2015	93	1747.5	5.07	13.2	0.53	38.50	14.73	23.81	32.83	16.63	1.41	7.69	7.90
2016	99	1375.0	5.12	24.4	0.28	119.62	14.25	31.73	103.15	16.24	2.92	23.80	13.04
2017	51	893.4	4.88	17.1	0.47	38.98	22.16	31.15	34.00	24.35	1.54	8.55	7.56
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	34.52	0.3	188.9	16.2	37.1	162.8	21.6	4.2	34.6	12.3
2021	82	1446.8	5.19	15.90	0.27	63.09	14.37	20.82	56.86	18.45	1.82	13.87	9.88
평균	-	997.5	4.91	25.6	0.7	100.2	19.5	38.2	90.9	17.7	3.7	21.5	15.5

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				(μS/cm)									
겨울	2011~2020	163	4.71	42.8	0.6	191.7	29.1	57.4	167.6	25.1	4.9	38.4	22.0
	2021	21	4.72	60.0	0.7	301.0	35.9	74.6	269.6	34.4	6.5	53.3	28.0
봄	2011~2020	179	4.89	16.9	0.7	38.4	19.3	32.6	32.6	23.5	1.8	9.2	12.6
	2021	20	5.32	13.9	0.4	39.2	17.3	23.3	36.1	27.4	1.8	10.0	16.7
여름	2011~2020	223	5.01	13.7	0.5	43.2	13.5	19.1	36.0	14.9	1.9	9.0	6.8
	2021	24	5.45	6.1	0.1	15.5	7.8	8.0	13.5	11.9	0.5	3.7	2.0
가을	2011~2020	180	5.03	30.4	0.3	162.7	13.6	32.4	141.3	12.3	3.7	31.6	12.9
	2021	21	5.11	16.4	0.2	69.8	13.8	17.9	62.5	12.8	1.7	14.7	6.5

※ 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 당해 연도 1월, 2월 자료를 사용함

○ 올릉도

연	개수	강수량	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(mm)											
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	75	1130.8	4.99	37.3	0.3	205.3	13.8	42.6	180.2	10.3	3.6	29.1	10.2
2021	97	1476.0	5.09	37.6	0.2	202.6	16.4	41.0	181.4	14.2	5.2	40.4	16.9
평균	-	2411.8	4.86	45.2	0.8	213.0	26.5	60.6	180.6	22.6	18.1	41.0	31.7

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				(μS/cm)									
겨울	2011~2020	318	4.54	79.4	1.1	381.1	47.3	103.9	330.7	38.9	19.3	76.3	38.7
	2021	24	4.82	67.3	0.6	374.2	27.3	80.7	331.7	25.6	7.4	60.2	25.3
봄	2011~2020	164	4.92	41.4	1.1	164.6	32.0	71.4	136.9	35.8	19.3	32.9	42.4
	2021	19	5.20	41.9	0.4	221.5	19.9	46.8	197.1	20.1	6.0	43.2	27.4
여름	2011~2020	156	5.10	24.9	0.5	117.1	12.4	31.1	95.1	16.0	12.0	22.4	15.9
	2021	27	5.14	19.8	0.1	94.0	9.6	20.7	83.7	7.1	3.0	18.2	6.2
가을	2011~2020	233	4.91	45.4	0.5	237.0	19.2	50.7	202.7	13.9	14.0	44.8	28.2
	2021	21	5.24	29.0	0.2	163.0	13.4	28.8	146.8	8.5	3.7	32.5	11.3

※ "지구대기감시 업무매뉴얼(II)[에어로졸 및 총대기침적], 2017, 국립기상과학원"의 QA/QC방법으로 자료 처리함

※ 겨울: 전년도 12월과 당해 연도 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 학술논문

▶ 출판연도순으로, 같은 출판연도일 때 한글판 순서(가나다순)와 영문판(알파벳순)대로 수록

- 1999 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.
- 2000 김지영, 윤용훈, 송기범, 김기현 2000: 포항지역 오존의 수직분포 특성. 한국지구과학회, 21(3), 287-301.
- 2001 김만구, 강미희, 홍영민, 박기준, 이보경, 이동수, 김산 2001: 필터팩을 이용한 서울과 춘천, 안면도의 건성 강하량 측정. 한국대기환경학회지, 17, 19-29.
김재환, 이상희, 김유근, 이화운, 송상근, 2001: 포항오존존데에 나타난 한반도 대류권 오존의 특성에 관한 연구. 대기, 11(1), 98-102.
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.
- 2002 박기준, 최재천, 박상순, 오성남 2002: 안면도에서 측정한 온실가스(CH₄, N₂O, CFCs)의 변동 특성 연구. 대기, 12, 502-505.
- 2003 조경숙, 방소영, 최재천, 최병철, 차주완, 박기준, 최성철, 노영민, 김영준 2003: 에어졸라이더를 이용한 안면도에서의 에어로졸 수직분포 측정. 대기, 13, 484-487.
- 2005 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.

- 2006 노영민, 김영민, 김영준, 최병철 2006: GIST/ADEMRC 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이다 비 연구. 한국대기환경학회지, 22, 1-14.
- 2008 구태영, 홍기만, 김상백, 공종웅, 김명수 2008: 2006년 4월 안면도에서 발생한 황사, 안개, 청명, 구름 사례에 대한 에어로졸 특성 분석. 대기, 18, 99-111.
- 2010 노영민, 이한림, Detlef Muller 2010: 다파장 라만 라이다를 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.
- 2012 강창희, 김원형, 허철구, 강동훈 2012: 제주도 고산지역의 라돈 배경농도 실시간 모니터링, 분석과학, 한국분석과학회, 25(1), 7-13.
- 2013 고희정, 신승희, 허철구, 김원형, 강창희, 강동훈, Scott Chambers 2013: 제주도 고산 측정소의 대기 라돈농도 시계열 변화, 한국대기환경학회지, 29(1), 86~96.
- 2016 김관철, 최성철, 노영민 2016: 선포토미터 데이터를 이용한 편광소멸도 산출과 라이다 편광소멸도와의 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 이온 조성 및 오염특성, 한국분석학회지, 1-10.
- 신동호, 노영민 2016: 황사 발원지에서 선포토미터를 활용한 에어로졸의 광학적 특성 산출과 미세먼지 속 황사 구분, 대한원격탐사학회지, 32, 245- 251.
- 2017 송정민, 부준오, 김원형, 강창희, 고희정, S. Chambers 2017: 제주도 고산지역의 대기 라돈 배경농도 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.
- 2018 송정민, 김기주, 부준오, 김원형, 강창희 S. Chambers 2018: 대기 라돈 및 기체상 오염물질의 기류 이동경로별 농도변화:2010~2015년 측정, 한국대기환경학회지, 34(2), 321-330.



- 2019 고희정, 정지영, 김은실, 이상삼, 류상범 2019: 안면도와 고산 기후변화감시소에서 채취한 강수성분의 조성 및 중화특성(2008~2017년), 대기, 403-416.
- 박진경, 김서연, 손석우 2019: 대류권 오존 재분석 자료의 품질 검증: 포항 오존존데와 비교 검증, 대기, 29(1), 53-59.
- 2021 이해영, 이정순, Brad Hall, Ed Dlugokencky, 김연희, 2021: 기상청 WMO/GAW 세계표준 센터(WCC-SF₆) 비교실험 활동을 통한 육불화황 관측 정확도 향상 연구, 대기환경학회지, 37(3), 512-522
- 서원익, 이해영, 김연희, 2021: 지난 22년간 한반도 이산화탄소 배경농도 재산정 연구 - WMO/GAW 척도 변경과 NIMS 온실가스 배경농도 산출기법을 중심으로-, 대기, 31(5), 593-606
- 이수정, 이해영, 김수민, 김연희, 2021: 기상청 온실가스 국내 순차순환비교실험을 통한 온실가스 관측 정확도 향상 연구, 대기환경학회지, 37(5), 790-802
- 김재민, 이해영, 김수민, 정주용, 김연희, 이그림, 최경배, 이윤곤, 2021: 안면도 지역 온실기체 기원에 따른 CO/CO₂ 비율 변동성 분석 연구, 대기, 31(5), 625-635

- 2006 Kim, J. H., H. J. Lee, and S. H. Lee 2006: The characteristics of tropospheric ozone seasonality observed from ozone soundings at Pohang, Korea. *Environ Monit Assess.*, 118, 1-12.
- 2012 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.
- 2013 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.
- Matsui, 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 and 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.
- 2014 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 Is land, Korea in 2011, *Bull. Korean. Chem. Soc.*, 35(4), 1149-1153.
- 2015 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 erythemal 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.
- 2016 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.
- 2017 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.
- 2018 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.
- 2019 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.

2020 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
- 2021 Kenea, S. T., Lee, H., Joo, S., Li, S., Labzovskii, L. D., Chung, C.-Y., Kim Y.-H., 2021: Interannual Variability of Atmospheric CH_4 and Its Driver Over South Korea Captured by Integrated Data in 2019, *Remote Sens.* <http://doi.org/10.3390/rs13122266>
- 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 (GA W) near-surface observatories, *Atmos. Chem. Phys., Discuss.* <https://doi.org/10.5194/acp-2020-1311>, in review.

Shin, D., Y.-S. Oh, W. Seo, C.-Y. Chung and J.-H. Koo 2021: Total Ozone Trends in East Asia from Long-Term Satellite and Ground Observations, *Atmosphere*, 12(8), 982.

2022 Jongjin Seo, Haklim Choi, and Young-Suk Oh, 2022: Potential of AOD Retrieval Using Atmospheric Emitted Radiance Interferometer(AERI), *Remote Sensing.*, 14, 407.

Patra, P. K., Dlugokencky, E. J., Elkins, J. W., Dutton, G. S., Tohjima Y., Sasakawa, M., Ito, A., Weiss, R., Manizza, M., Krummel, P.B., Prinn, R. G., O'doherty, S., Bianchi, D., Nevison, C., Solazzo, E., Lee, H., Joo, S., Kort, E. A., Maity, S., Takigawa, M., 2022: Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide Using MIROC4-Atmospheric Chemistry-Transport Model Forward and Inverse Modelling of Atmospheric Nitrous Oxide, *J. Meteorol Soc.* <https://doi.org/10.2151/jmsj.2022-018>

Sim, S., Lee, H., Oh, E., Kim, S., Ciais, P., Piao, S., Lin, J.C., Mallia, D., Lee, S., Kim, Y.-H., Park, H., Yun, J., Jeong, S., 2022: Short-term reduction of regional enhancement of atmospheric CO₂ in China during the first COVID-19 pandemic period, *Environ. Res. Lett.* 17, 024036, <http://doi.org/10.1088/1748-9326/ac507d>

Thomas E. Taylor, Christopher W. O'Dell, David Crisp, Akhiko Kuze, Hannakaisa Lindqvist, Paul O. Wennberg, Abhishek Chatterjee, Michael Gunson, Annmarie Eldering, Brendan Fisher, Matthias Kiehl, Robert R. Nelson, Arome Merrelli, Greg Osterman, Frederic Chevallier, Paul I. Palmer, Liang Feng, Nicholas M. Deutscher, Manvendra K. Dubey, Dietrich G. Feist, Omaira E. Garcia, David W. T. Griffith, Frank Hase, Laura T. Iraci, Rigel Kivi, Cheng Liu, Martine De Maziere, Isamu Morino, Justus Notholt, Young-Suk Oh, Hirofumi Ohyama, David F. Pollard,



Markus Rettinger, Matthias Schneider, Coleen M. Roehl, Mahesh Kumar Sha, Kei Shiomi, Kimberly Strong, Ralf Sussmann, Yao Te, Voltai re A. Velazco, Mihalis Vrekoussis, Thorsten Warneke, and Debra Wun ch, 2022: An 11-year record of XCO₂ eastimates derived from GOSA T measurements using the NASA ACOS version 9 retrieval algorithm, Earth Syst. Sci. Data, 14, 325-360, 2022.

Jongjin Seo, Haklim Choi, and Young-Suk Oh, 2022: Potential of AOD Retrieval Using Atmospheric Emitted Radiance Interferometer(AERI), Remote Sensing., 14, 407.

[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 측정 방법
(출원일 : 2016.12.15. / 등록일 : 2017.09.12.)
- 제10-2358744호 이동형 가스실린더 수납 케이스
(출원일 : 2021.08.12. / 등록일 : 2022.01.28.)
- 제10-2325241호 저출력 레이저 미세먼지 감지 시스템 및 방법
(출원일 : 2021.09.08. / 등록일 : 2021.11.05.)

[부록 기] 지구대기감시 보고서 작성자

제 1 장	머 리 말	국립기상과학원	기 상 연 구 관	정 주 용
제 2 장	지구대기감시 현황	국립기상과학원	기 상 연 구 사 기 상 연 구 사	김 수 민 이 해 영
제 3 장	기 상 특 성	국립기상과학원	기 상 연 구 사	김 수 민
제 4 장	온 실 가 스	국립기상과학원 " " 서울대학교 극지연구소	기 상 연 구 사 기 상 연 구 사 교 수 책 임 연 구 원	이 해 영 영 석 오 김 준 최 태 진
제 5 장	반 응 가 스	국립기상과학원	기 상 연 구 사	김 수 민
제 6 장	에 어 로 줄	국립기상과학원 " " " " 광주과학기술원	기 상 연 구 관 기 상 연 구 사 기 상 연 구 사 연 구 원 교 수	김 정 은 유 희 고 희 정 원 기 흥
제 7 장	대 기 복 사	국립기상과학원	연 구 원	신 대 근
제 8 장	성 층 권 오 존	국립기상과학원 연세대학교 숙명여자대학교 극지연구소	연 구 원 교 수 교 수 책 임 연 구 원	신 대 근 대 자 호 정 진 태
제 9 장	자 외 선	국립기상과학원 연세대학교	연 구 원 교 수	신 대 근 대 자 호
제10장	총 대 기 침 적	국립기상과학원	기 상 연 구 사	고 희 정
제11장	기 타	숙명여자대학교 제주대학교	교 수 교 수	오 정 강 창 진 희
작성지원	국립기상과학원 기후연구부	이선란, 서원익, 이수정, Samuel Takele Kenea, 김은실, 문세영, 고미영, 정지영, 김정현, 한종현, 최남원, 강희운, 최홍우, 이충훈, 오상민, 정민재, 한종현		
	대구지방기상청 포항기후변화감시소	김영환, 홍승학, 김정희, 이영일, 김일권, 박요한, 오상엽		
자 문	경북대학교 박선영 교수, 고려대학교 이미혜 교수, 국립환경과학원 임재현 과장, 서울대학교 김상우 교수, 연세대학교 염성수 교수			



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, 2021; 대기환경연보 2020.
- 극지연구소, 2021; 남극 과학기지 운영에 따른 주변 환경 및 생태계 오염 요인 모니터링.
- 기상청, 2011; 2010 지구대기감시 보고서.
- 기상청, 2017; 2016 지구대기감시 보고서.
- 김정은, 정원석, 서원익, 이선란, 오상민, 신대근, 고희정, 유희정, 정주용, 김연희, 2022; 2021년 3월 YES-AQ 기간 중 관측된 서해상 황사 특성, 한국대기환경학회지, 38(4).
- 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.
- Almeida, R.M., Lauria, D.C., Ferreira, A.C., Sracek, O., 2004; Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil, Journal of Environmental Radioactivity, 73(3), 323-334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2003.10.006>
- Andreae, T. W., Andreae, M. O., Ichoku, C., Maenhaut, W., Cafmeyer, J., Karnieli, A., Orlovsky, L., 2002; Light scattering by dust and anthropogenic aerosol at a remote site in the Negev desert, Israel, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 107(1?2) <https://doi.org/10.1029/2001jd900252>.



- 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.
- 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.
- Bu, J.O., Song, J.M., Kim, W.H., Kang, C.H., Song S.K., Williams, A.G., Chambers, S.D., 2017; Temporal Variation of Atmospheric Radon-222 and Gaseous Pollutants in Background Area of Korea during 2013-2014, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 11(2), 114-121.
- Butchart, N., 2014: The Brewer-Dobson circulation. *Rev. Geophys.*, 52(2), 157-184.
- Carmichael, G.R., M.S.Hong, H.Ueda, L.L. Chen., K.Murano, J.K.Park, H.Lee, Y.Kim, C.Kang, and S.Shim, 1997: Aerosol composition at cheju Island Korea, *Journal of Geophysical Research*, 102, 6047-6061
- 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.D., Zahorowski, W., Williams, A.G., Crawford, J., Griffiths, A.D., 2013; Identifying tropospheric baseline air masses at Mauna Loa Observatory between 2004 and 2010 using Radon-222 and back trajectories, *Journal of Geophysical Research*, 118, 1-13, <https://doi.org/10.1029/2012JD018212>
- Chambers, S.D., Zahorowski, W., Matsumoto, K., Uematsu, M., 2009; Seasonal variability of radon-derived fetch regions for Sado Island, Japan, based on 3 years of observations: 2002-2004, *Atmospheric Environment*, 43(2), 271-279.
- Chambers, S.D., Kang, C.H., Williams, A.G., Crawford, J., Griffiths, A.D., Kim, K.H., Kim, W.H., 2016: Improving the representation of cross-boundary transport of anthropogenic pollution in Southeast Asia using Radon-222, *Aerosol and Air Quality Research*, 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.
- Chambers, S., Zahorowski, W., Williams, A.G., Crawford, J., Griffiths, A.D. (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
- Chan, S.W., Lee, C.W., Tsui, K.C. 2010; Atmospheric radon in Hong Kong, *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(6), 494-503. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.02.007>
- Choi, I.C., Shin, S.H., Jo, W.K. 2009; Evaluation of Radon Levels in Various Public-access Buildings or Underground Facilities, and Their Temporal Variation in Underground Facilities, *Journal of Environmental Toxicology*, 24(3), 203-211, (in Korean with English abstract).
- 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.
- Cordero R R, Feron S, Damiani A, Redondas A, Carrasco J, Sepúlveda E, Jorquera J, Fernandoy F, Llanillo P, Rowe P M and Seckmeyer G 2022 Persistent extreme ultraviolet irradiance in Antarctica despite the ozone recovery onset. *Sci Rep-uk* 12 1266
- 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>.
- Crawford, J., Chambers, S., Kang, C.H. Griffiths, A., Kim, W.H., 2015; Analysis of a decade of Asian outflow of PM10 and TSP to Gosan, Korea; also incorporating Radon-222, *Atmospheric Pollution Research*, 6(3), 529-539. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.059>
- David M. G, A. Sinyuk, M. G. Sorokin, J. S. Schafer, A. Smirnov, I. Slutsker, T. F. Eck, B. N. Holben, J. R. Lewis, J. R. Campbell, E. J. Welton, S. V. Korkin, and A. I. Lyapustin, 2019:Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET)



- Version 3 database - automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements, 12, 169-209
- Debra Wunch, Geoffrey C. Toon, Vanessa Sherlock, Nicholas M. Deutscher, Cate Liu, Dietrich G. Feist, Paul O. Wennberg, 2015: The Total Carbon Column Observing Network's GGG2014 Data Version, *Atmospheric Measurement Techniques.*, 14, 1501-1510, 2015.
- Etheridge, D. M., L. P. Steele, R. J. Francey, and R. L. Langenfelds, 1998: Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability, *J. Geophys. Res.*, 103, 15979-15993.
- Fuentes-León F, Oliveira A P de, Quintero-Ruiz N, Munford V, Kajitani G S, Brum A C, Schuch A P, Colepicolo P, Sánchez-Lamar A and Menck C F M 2020 DNA Damage Induced by Late Spring Sunlight in Antarctica Photochem Photobiol 96 1215-20
- 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.
- 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.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The physical science basis. Working Group I Contribution to the IPCC sixth Assessment Report
- Ito A., S. Inoue and M. Inatomi, 2022: Model-based evaluation of methane emissions from paddy fields in East Asia, *J.Agric. Meteorol.*, 78(2), 56-65
- Jackson, R. B., M. Saunois, P. Bousquet, J. G. Canadell, B. Poulter, A. R. Stavert, P. Bergamaschi, Y. Niwa, A. Segers and A. Tsuruta, 2020: Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources, *Environ. Res. Lett.* 15, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>
- 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, M.J., An, S.S., Cho, M.C., Park, S.I., Kim, J.M., Bae, S.J., Cho, Y.G., Seo, G.Y, 2019: Distribution characteristics on indoor radon concentration of multiple-use facilities in Gwangju area, *J. Odor Indoor Environ.*, 18(2), 177-184 (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15250/joie.2019.18.2.177>
- 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.
- Kim, Y.S., Lee, C.M., Kim, K.Y., Jeon, H.J., Kim, J.C., Iida Takao (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>.
- 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.
- 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>.
- Lan, X., S. Basu, S. Schwietzke, L. M. P. Bruhwiler, E. J. Dlugokencky, S. E. Michel, O. A. Sherwood, P. P. Tans, K. Thoning, G. Etiope, Q. Zhuang, L. Liu, Y. Oh, J. B. Miller, G. Pétron, B. H. Vaughn, and M. Crippa, 2021: Improved Constraints on Global Methane Emissions and Sinks Using $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, *Global Biogeochemical Cycles*, 35, e2021GB007000. <https://doi.org/10.1029/2021GB007000>

- 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.
- Jackson, R. B., M. Saunio, P. Bousquet, J. G. Canadell, B. Poulter, A. R. Stavert, P. Bergamaschi, Y. Niwa, A. Segers and A. Tsuruta, 2020: Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources, *Environ. Res. Lett.* 15, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>
- Li, S., T. Wang, M. Xie, Y. Han, B. Zhuang, 2015; Observed aerosol optical depth and angstrom exponent in urban area of Nanjing, China, *Atmospheric Environment*, 123, 350-356
- Miles, J., 1988; Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses, *Journal of Hazardous Materials*, 61, 53-58. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(98\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(98)00107-1)
- 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., 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. P. Montzka, 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>
- 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>.
- Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., Manning, M. R., Lowry, D., Fisher, R. E., France, J. L., et al., 2016: Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*, 30, 1356–1370. <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>
- NRC, National Research Council, 2000: Health risk of radon and other internally deposited alpha emitters, report of the Committee on UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report.
- 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. Lusia, 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.
- 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.
- Shin, D., Y.-S. Oh, W. Seo, C.-Y. Chung and J.-H. Koo 2021: Total Ozone Trends in East Asia from Long-Term Satellite and Ground Observations, *Atmosphere*, 12(8), 982.
- 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>.
- Song, J.M., Yang, H.S., Kim, W.H., Kang, C.H., Chambers, S., 2021: Concentration



- Variability of Atmospheric Radon and Particulate Matter at Gosan Site in Jeju Island during 2016-2020), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6). 907-918 (in Korean with English abstract).
- Song, J.M., Bu, J.O., Kim, W.H., Kang, C.H., Ko, H.J., Chambers, S., 2017; Background Level and Time Series Variation of Atmospheric Radon Concentrations at Gosan Site in Jeju Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 174-183 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Thoning, K. W., Tans, P. P., & Komhyr, W. D., 1989: Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974-1985. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D6), 8549-8565.
- UNSCEAR (United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1988: Scientific committee on the effects of atomic radiation, source effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Annexes. United Nations, New York.
- US EPA (Environmental Protection Agency), 2003: EPA Assessment of Risks from Radon in Homes, EPA 402-R-03-003.
- Valenzuela, A., Olmo, F. J., Lyamani, H., Antón, M., Titos, G., Cazorla, A., Alados-Arboledas, L., 2015; Aerosol scattering and absorption Ångström exponents as indicators of dust and dust-free days over Granada (Spain). *Atmospheric Research*, 154, 1713, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.015>
- Vinson, D., Campbell, T.R., Vengosh, A., 2008: Radon transfer from groundwater used in showers to indoor air, *Applied Geochemistry*, 23(9), 2676-2685. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.05.021>
- Wang F., S. Maksyutov, R. Janardanan, A. Tsuruta, A. Ito, I. Morino, Y. Yoshida, Y. Tohjima, J. W. Kaiser, G. Janssens-Maenhout, X. Lan, I. Mammarella, J. V. Lavric and T. Matsunaga, 2021: Interannual variability on methane emissions in monsoon Asia derived from GOSAT and surface observations, *Environ. Res. Lett.* 16, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd352>

- WCC-Empa, 2017(a):WCC-Empa System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the regional GAW station Anmyeon-Do Republic of Korea June, 17/1, 48.
- WCC-Empa, 2017(b):WCC-Empa 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 June, 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>.
- Weber, M., Coldewey-Egbers, M., Fioletov, V. E., Frith, S. M., Wild, J. D., Burrows, J. P., Long, C. S., and Loyola, D., 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. Zahorowski, 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, 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, 2017: WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan : 2016-2023, GAW Report No. 228.
- WMO, 2018; Calibration Methods of GC- μ ECD for Atmospheric SF₆ Measurements, GAW Report No. 239.
- WMO, 2018: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 58.
- WMO, 2019; Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, GAW Report No. 58.
- 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
- WMO, 2021: WMO Greenhouse gas bulletin, October 2021, No.17
- 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.
- Yang, H., M. Kang, J. Kim, D. Ryu, S.-J. Kim J.-H. Chun, J.-H. Lim, C. W. Park, and S. J. Yun, 2021. The Dynamics of CO₂ Budget in Gwangneung Deciduous Old-growth Forest: Lessons from the 15 years of Monitoring. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 23(4), 198-221.
- Yang S. H., J. I. Jeong, R. J. Park, M. J. Kim, 2020; Impact of Meteorological Changes on Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Seoul during the Months of June over Recent Decades, *Atmosphere*, 11, 1282
- 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., Dida, M.R., Savastru, R., Savastru, D., Dida, A., Ionescu, O., 2014: Ground level ozone (O₃) associated with radon (²²²Rn) and particulate matter (PM) concentrations in Bucharest metropolitan area and adverse health effects, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 300, 729-746. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3041-1>

2021 지구대기감시 보고서

발 행 일 : 2022년 3월

수 정 일 : 2022년 6월

발 행 처 : 국립기상과학원 기후연구부

63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원

홈페이지 : 기상청 기후정보포털(www.climate.go.kr)
