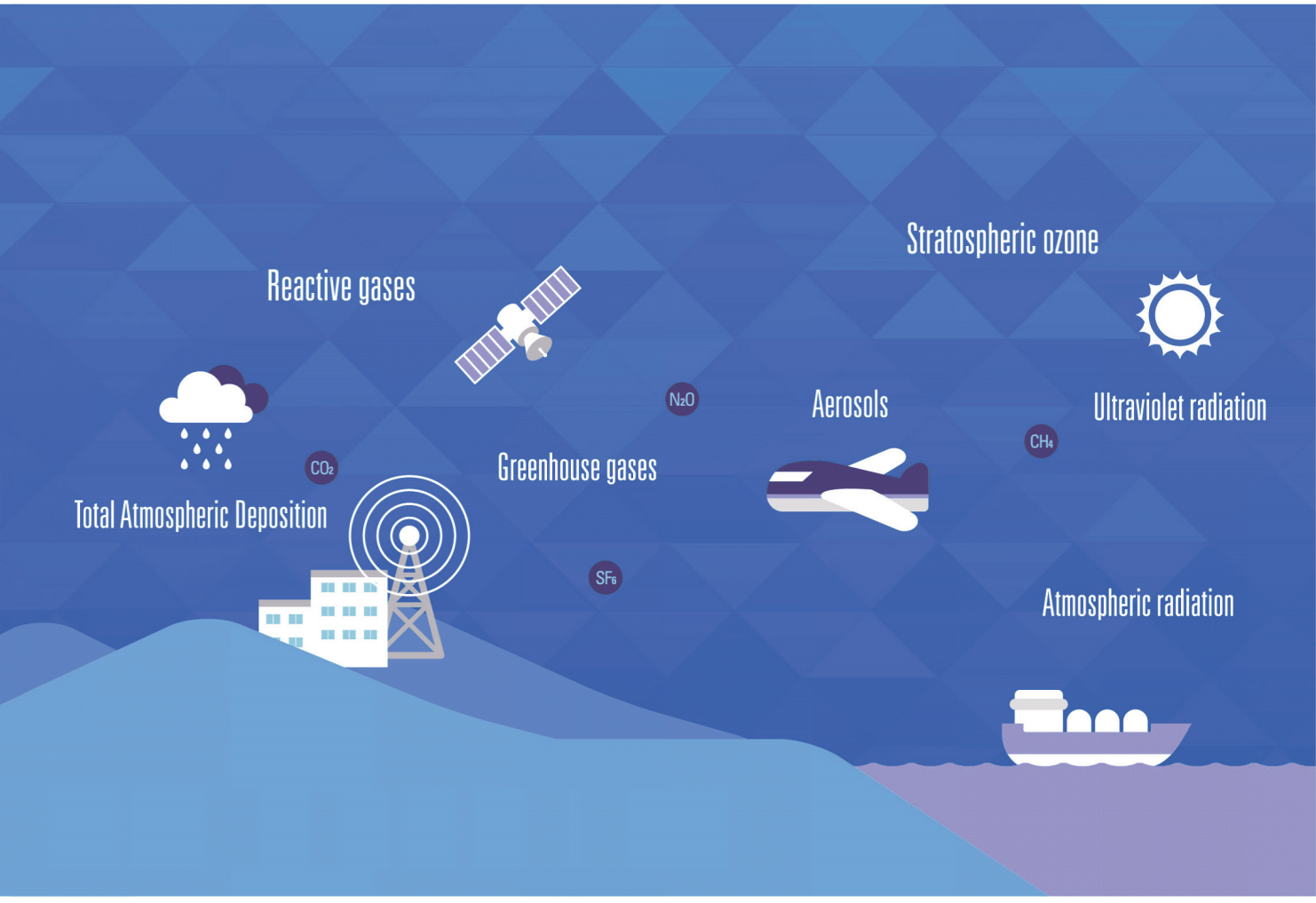
발 간 등 록 번 호
11-1360000-000991-10

2019
지구대기감시 보고서

Report of Global Atmosphere Watch **2019**



책임운영기관
국립기상과학원 책임 | 혁신 | 상생 | 전문

CONTENTS



요 약 vi

제1장 머리말 2

제2장 지구대기감시 현황 6

2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램 6
2.2 한반도 기후변화감시소 현황 8
2.3 세계기상기구 육불화황 세계표준센터 11

제3장 기상특성 16

3.1 2019년 기상특성 16
3.2 기후변화감시소 기상특성 43

제4장 온실가스 및 반응가스 68

4.1 온실가스 68
4.2 반응가스 98
4.3 2019년 온실가스 및 반응가스 특성 분석 108

제5장 에어로졸 122

5.1 에어로졸 감시의 목적 122
5.2 에어로졸 물리특성 124
5.3 에어로졸 광학특성 129
5.4 에어로졸 화학특성 143
5.5 2019년 에어로졸 특성 분석 154

제6장 대기복사 164

6.1 대기복사 감시의 목적 164
6.2 직달일사, 산란일사 165
6.3 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사) 167
6.4 지구상향복사, 지구하향복사 169
6.5 순복사 170
6.6 2019년 대기복사 특성 분석 171

제7장 성층권 오존 178

7.1 성층권오존 감시의 목적 178
7.2 오존전량 179
7.3 오존 연직분포 187
7.4 남극 오존홀 196
7.5 2019년 성층권오존 특성 분석 203

제8장 자외선 208

8.1 자외선 감시의 목적 208
8.2 자외선A 복사량 209
8.3 자외선B 복사량 210
8.4 서울 자외선 복사량 211
8.5 2019년 자외선 특성 분석 215

CONTENTS

제9장 총대기침적 220

9.1 총대기침적 감시의 목적 220
9.2 2019년 강수채취율 222
9.3 pH(산성도) 225
9.4 전기전도도 227
9.5 강수이온성분 229
9.6 총대기침적 239
9.7 2019년 강수성분의 발생원 분석 242

제10장 기타 246

10.1 수증기 농도 연직분포 및 특성 분석 246
10.2 라돈 농도 및 특성 분석 251

부 록

1. 관측자료품질보증체계 264
2. 지구대기감시 관측자료 297
3. 기후변화감시 기술노트 목록 341
4. 지구대기감시 매뉴얼 목록 342
5. 기후변화감시 관측자료 활용논문 목록 343
6. 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황 348
7. 지구대기감시 보고서 작성자 349

참고문헌 351

온실가스

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

이산화탄소 CO_2	온실가스 중 가장 많은 양을 차지하며 온실효과에 첫 번째로 기여 대기 중 체류시간 200~300년
메탄 CH_4	두 번째로 영향력이 큰 온실가스로 100년을 기준으로 CO_2와 같은 농도로 가정할 시 CO_2보다 약 28배 강한 온실효과, 대기 중 체류시간 약 9년
아산화질소 N_2O	온실가스 중 온실효과에 세 번째로 기여하며 100년을 기준으로 CO_2와 같은 농도로 가정할 시 CO_2보다 약 265배 강한 온실효과, 대기 중 체류시간 약 114년
육불화황 SF_6	대기 중 존재하는 양이 1조분의 1로 적으나, 100년을 기준으로 CO_2와 같은 농도로 가정할 시 CO_2보다 약 22,500배 높음, 대기 중 체류시간 약 580-1,400년
염화불화탄소 CFCs	몬트리얼 의정서에 의해 대기 중 농도가 차츰 줄어들고 있으나 100년을 기준으로 CO_2와 같은 농도로 가정할 시 CO_2보다 약 4,660배~13,900배 높은 온실효과 대기 중 체류시간 약 40~100년

반응가스

- 인위적 활동 혹은 자연적으로 대기 중에 배출
- 화학반응으로 대기 중 체류 시간이 짧지만 사람, 생물에 해로운 영향
- 대기화학반응을 통해 CO_2를 생성하고, CH_4의 소멸을 늦추거나(온실효과), 에어로졸 형성에 관여(냉각효과)

지표오존 O_3	광화학 오염물질, 온실가스, OH 라디칼의 주요 생성원 성층권 오존의 유입 혹은 광화학 반응을 통한 생성 대기 중 체류시간 1주일~1개월
일산화탄소 CO	대기화학반응으로 온실가스(CO_2, CH_4)의 대기수명에 영향 줌 탄소화합물(예: 화석연료), 불완전연소, 산불 등으로 생성 대기 중 체류시간 10일~1년
질소산화물 NO_X	질산에어로졸의 전구체, 대기화학반응으로 O_3, CO_2, CH_4 농도 변화에 영향 줌 자동차 배기가스, 생체소각, 산불, 번개, 토양 등에서 발생 대기 중 체류시간 수 시간~1주일
이산화황 SO_2	아황산가스, 황산 에어로졸의 전구체, 화석연료 연소, 산불, 화산 등에서 발생 OH라디칼과 반응 혹은 액상 표면에 침적으로 소멸 대기 중 체류시간 1주일 이내

에어로졸

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

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

* 수용성 이온 성분: 9종(Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, F^-, Na^+, K^+, NH_4^+, Ca^{2+}, Mg^{2+})
원소 성분: 20종(Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti, Mn, Zn, Cu, V, Cr, Co, Ni, Sr, Co, 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 유해자외선으로부터 생태계를 보호
- 태양에너지를 흡수하여 전지구 기후변화에 영향(온실효과)

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

자외선

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

자외선A (320~400 nm)	피부 노화와 같은 장기적인 피부손상을 일으키며 노출 지속시간에 따라 손상이 커지기 때문에 일 누적값으로 분석
자외선B (280~320 nm)	피부암, 백내장 등을 유발하며 높은 자외선 값일수록 발병확률이 높아지기 때문에 일 최댓값으로 분석

총대기침적

- 대기 중 인위적 및 자연적 발생 가스 및 입자들이 대기로부터 제거되는 중요한 과정

건성침적	대기 중 가스상·입자상 물질이 중력에 의해 지면에 도달하는 과정 * 분석성분: pH(산성도), 전기전도도, 수용성 이온 성분: 9종 (Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, F^-, Na^+, K^+, NH_4^+, Ca^{2+}, Mg^{2+})
습성침적	대기 중 가스상·입자상 물질이 강수(비, 눈, 우박 등)에 의해 제거되는 과정 * 건성침적과 동일한 요소를 분석함

온실가스

ㅇ 이산화탄소(CO_2) 배경농도* 지속 증가

- 안면도: 417.9 ppm (2019년 증가율: 2.7 ppm/year, 최근 10년 증가율: 2.4 ppm/year)
  - ※ 전지구: 409.8 ppm (2019년 증가율: 2.4 ppm/year, 최근 10년: 2.3 ppm/year, 1980년대: 1.5 ppm/year)
  - ※ 하와이: 411.4 ppm (2019년 증가율: 2.9 ppm/year, 최근 10년 2.3 ppm/year)
  - • 2019년 전 세계적 고온 현상으로 해양/토양의 유기생물활동으로부터 배출이 강화되어 증가율은 최근 10년보다 가속화

ㅇ 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 육불화황(SF_6) 등 배경농도 증가 지속

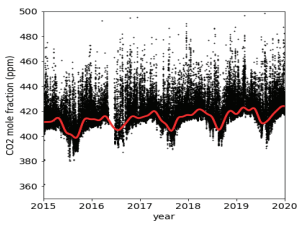
※ 몬트리올 의정서로 제한하고 있는 염화불화탄소류 (CFCs) 배경농도 감소 지속

〈*온실가스 배경농도〉

전체 관측 자료에서 고농도 사례를 제거한 농도(잘 섞여진 공기궤에 있는 농도) [본문 4.1.1]

온실가스는 체류시간이 길어 배출지역에 영향을 미치기보다 전지구적 증가율에 영향을 미치기 때문에 배경농도를 산정함. WMO 기준 산정법 [부록1]

〈오른쪽 그림의 검정: 모든 관측값, 붉은 실선: 배경농도값〉



▌요약표 1.1 2019년 온실가스 배경농도평균, 2019년 증가율과 최근 증가율 비교▐

감시소 / 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2019년 평균	최근 10년 증가율* (2019년 증가율**)	2019년 평균	최근 5년 증가율*** (2019년 증가율)	2019년 평균	2019년 증가율
CO_2 (ppm)	417.9	2.4 (2.7)	416.9	2.5 (2.6)	414.5	2.4
CH_4 (ppb)	1991	8 (17)	1967	5 (20)	1960	17
N_2O (ppb)	333.9	1.0 (1.0)	333.5	1.3 (1.2)	–	–
SF_6 (ppt)	10.3	0.3 (0.5)	10.2	0.2 (0.3)	10.3	0.5
CFC-11 (ppt)	228.8	-0.2 (0.5)	–	–	–	–
CFC-12 (ppt)	497.9	-2.9 (-5.2)	–	–	–	–
CFC-113 (ppt)	69.6	-1 (-0.5)	–	–	–	–

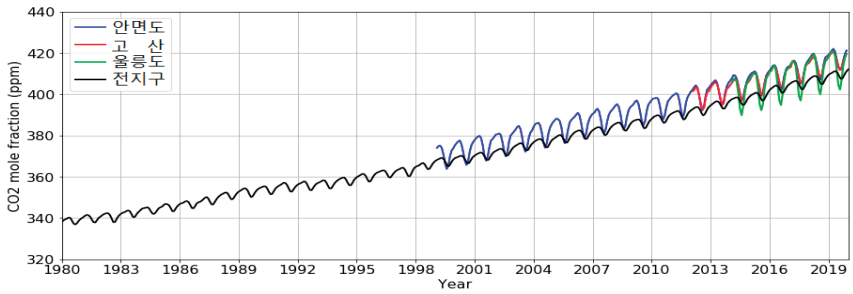
* 최근 10년 증가율: 2009~2018년의 평균 증가율(전년도와의 차이값 평균) (단위/year)

** 2019년 증가율: 2018년과의 차이값 (단위/year)

*** 최근 5년 증가율: 2014~2018년 평균 증가율 (단위/year), CH_4는 4년(2014~2018년), SF_6는 1년(2017~2018년) 증가율

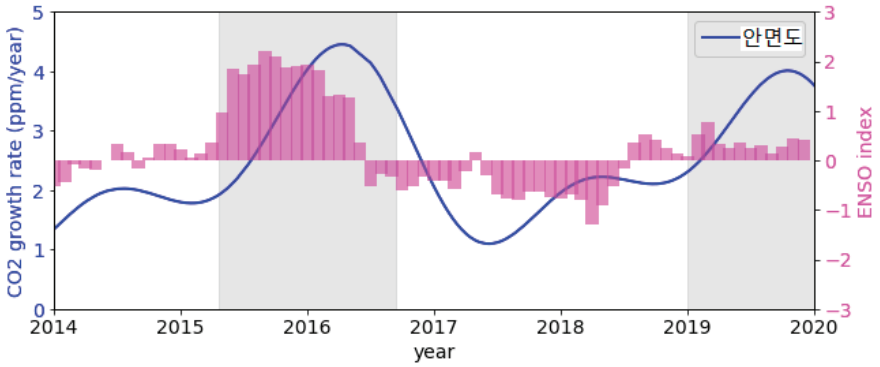
2019년 온실가스 특성

- **이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 육불화황(SF_6)의 배경농도 증가 지속 [요약표 1.1, 요약그림 1.1]**
- CO_2의 배경농도는 인간 활동에 의한 배출이 누적되어 식생활동 시작 전인 봄철(4월)에 최곳값, 지표 식생의 광합성이 가장 활발한 여름철(8월)에 최젓값을 갖는 연변동성을 보임
- CO_2의 배경농도는 안면도(417.9 ppm) 〉 고산(416.9 ppm) 〉 울릉도(414.5 ppm)
  ※ CO_2의 배경농도는 주변 배출원(산업단지 및 인구밀도 높은 곳 등)이 많을수록 높음
- 몬트리올 의정서로 제한하고 있는 염화불화탄소류(CFCs) 감소 지속 [요약표 1.1]



▌요약그림 1.1 안면도, 고산, 울릉도, 전지구의 CO_2 배경농도 장기관측자료 ▐

- 안면도도 ENSO 지수※가 양의 값일 때 증가율이 강화되는 경향을 보임 [요약그림 1.2]
  - 전세계적으로 관측이래(1973년) 두 번째 고온현상 발생 [본문 3.1]
  - 기온이 증가하면 해양과 토양에서의 배출이 강화되어 CO_2 증가율 강화(Keeling et al., 1995)



▌요약그림 1.2 안면도 CO_2 증가율(장기추세곡선이용)과 ENSO 지수의 상관관계 (2014~2019년) ▐

※ ENSO 지수: ENSO는 El Niño- Southern Oscillation (엘니뇨-남방진동)의 약어. 해수면 기압, 해수면 온도 등 6가지 항목으로 ENSO 현상을 나타내는 지수. 전세계 지수편차가 +1 이상은 평년대비 따뜻한 시기, - 1 이하는 추운 시기로 판단

반응가스

ㅇ 지표오존(O_3) : 안면도 42.2 ppb (최근 10년 대비 +1%),
고 산 45.9 ppb (최근 6년 대비 +6.4%)
ㅇ 전구물질인 NOx와 광화학반응에 관여하는 직달일사 증가로 인해 고산의 지표오존 증가율이 큼
* 전구물질 : 최종 화합물을 생성하는 화학반응에 참여하는 화합물

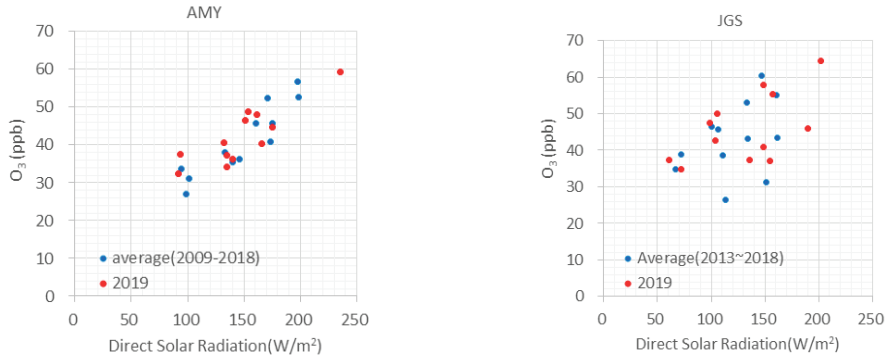
▌요약표 2.1 2019년과 최근 평균 비교▐

감시소 / 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2019년 (변화율)	최근 10년	2019년 (변화율)	최근 6년	2019년 (변화율)	최근 4년
O_3 (ppb)	42.2 (+1%)	41.8	45.9 (+6.4%)	43.2	-	-
CO (ppb)	290.8 (+7.5%)	270.6	198.5 (-4.8%)	208.5	177.7 (-1%)	179.6
NOx (ppb)	6.0 (-14%)	7.0	4.7 (+29%)	3.6	-	-
SO_2 (ppb)	1.0 (-56%)	2.3	1.0 (+81.2%)	0.6	-	-

*최근 평균: 안면도(2009~2018년), 고산(2013~2018년), 울릉도(2015~2018년)

2019년 반응가스 특성

- 직달일사가 높을수록 지표O_3 농도가 높음 [요약그림 2.1]
- 안면도 지표O_3은 최근 10년 평균과 유사함 [그림 4.2.2]
- 고산 지표O_3은 최근 6년 평균보다 6.4% 증가. 전구물질인 NOx와 직달일사 증가(최근 평균 대비 각각 29%, 11.3% 증가)와 관련 깊음 [그림 6.2.1]

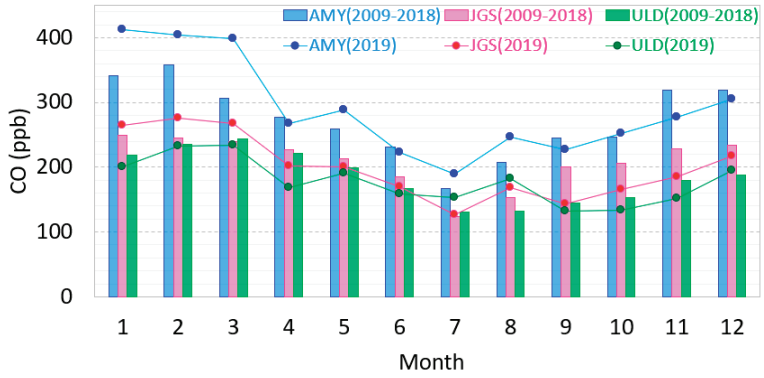


▌요약그림 2.1 안면도(AMY)와 고산(JGS)에서 관측한 직달일사와 지표O_3 월평균의 관계▐

- CO 연평균 농도는 안면도 〉 고산 〉 울릉도의 순서로 높음 [요약표 2.1]

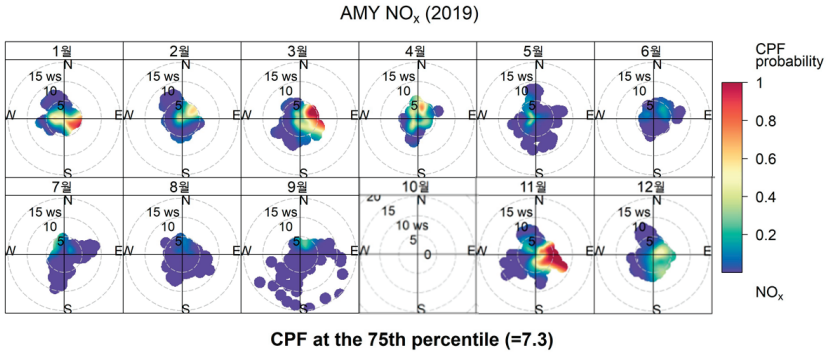
※ CO는 화석연료의 불완전연소(산업공정, 지역난방 등)로 생성되며 반응성 낮고 대기 내 수명 길어(10일 ~ 1년) 장거리 이동 가능함

- 1~3월 안면도와 고산에서 CO 농도가 최근 평균보다 높았음 [요약그림 2.2]
  → 시베리아고기압의 영향이 약하여 풍속 감소, 공기 확산 억제 [그림 3.1.2]
- 9~12월 고산과 울릉도에서 CO 농도가 최근 평균보다 낮았음 [요약그림 2.2]
  → 9~10월 북태평양 고기압과 태풍의 영향, 11~12월 깨끗한 북서기류 영향 [본문 3.1.4]



▌요약그림 2.2 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)에서 관측한 CO 월평균▐

- 안면도 NOx는 풍향, 풍속과 함께 분석한 고농도 확률분포에서 고농도가 동풍 계열 바람일 때 나타나 감시소 주변(화학물질 제조, 자동차 배출 등)의 영향 받은 것으로 추정 [본문 4.3]



▌요약그림 2.3 안면도(AMY) NOx의 2019년 월별 고농도 확률 분포▐

- SO_2는 안면도, 고산에서 연평균 1ppb 이하. 1990년대 이후 황 저감 정책으로 SO_2 농도 낮음 [본문 4.2.5]

에어로졸

ㅇ PM10 : 안면도 39 ㎍/㎥ (최근 10년 대비 +8.3%)
고 산 35 ㎍/㎥ (최근 8년 대비 +16.7%)
ㅇ 연무 현상일수가 북서계절풍 약화, 풍속 감소에 따라 최근 10년 대비 증가

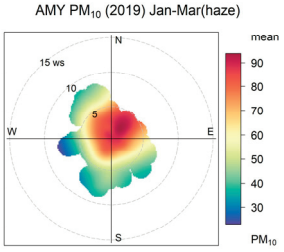
▌요약표 3.1 2019년과 최근 평균 비교▐

감시소 / 측정요소	안면도		고산	
	2019년 (변화율)	최근 10년	2019년 (변화율)	최근 8년
PM10 (㎍/㎥)	39 (+8.3%)	36	35 (+16.7%)	30
총수농도 (#/㎤)	3993 (-1.7%)	3925	4373 (+9.5%)	3993
광산란계수 (Mm^{-1})	80.2(-23.4%)	104.7		
광흡수계수 (Mm^{-1})	8.2(-3.3%)	7.9		
검댕 (㎍/㎥)	1.0 (0.0%)	1.0		
수용성 이온성분(㎍/㎥)	18.2 (-13.9%)	21.1		

*최근 평균: 안면도(2009~2018년), 고산(2011~2018년)

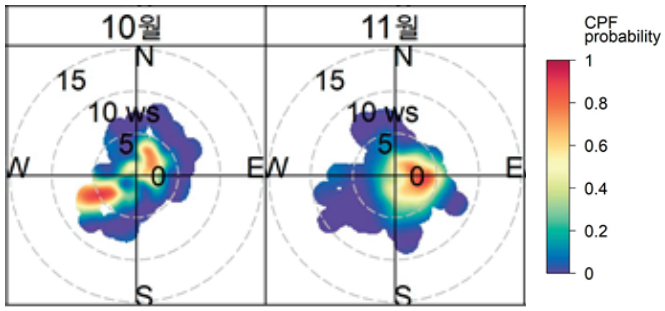
2019년 에어로졸 특성

- PM10 질량농도는 최근 평균 대비 약 +8.3%(안면도), +16.7%(고산) [그림 5.2.2]
  - 특히, 1~3월에 최근 평균보다 농도가 높았음 [그림 5.2.1]
    : 최근 10년 대비 북서계절풍 약화, 풍속 감소 [그림 3.1.2, 그림 3.2.5]
    → 남서풍 편차(중국 대륙의 오염된 공기 유입), 공기 확산 억제
    → 연무 관측일수 증가 [그림 5.5.1]
    ※ 1~3월 연무 일수: 38일(홍성), 36일(제주) (최근 10년 대비 각 +58%, +130%)
    → 안면도 연무 사례일: 낮은 풍속에서 고농도 관측 [요약그림 3.1]
  - 고산은 11월 황사 일수 증가로 인해 고농도 발생 [그림 5.2.1, 5.5.2]
    ※ 11월 황사 일수: 2일(홍성), 3일(제주) (최근 10년 대비 각 +275%, +315%)



▌요약그림 3.1 2019년 1~3월 중 연무 사례일(38일) 풍향/풍속에 따른 PM10 농도▐

- 광산란계수는 최근 평균 대비 23% 감소, 2016년 이후 변화폭 적음 [그림 5.3.3]
- 광흡수계수의 연평균은 최근 평균과 유사하나 10~11월에 최근 평균 대비 증가 [그림 5.3.5, 그림 5.3.6]
  - 최근 10년 평균 대비 동풍~남동풍이 증가하였고, 동풍 계열 바람일 때 고농도 빈도 높아 [요약그림 3.2] 감시소 인근(동쪽)의 연소(난방(화석연료, 바이오연료), 논밭 소각 등)가 주원인으로 추정



▌요약그림 3.2 2019년 안면도 풍향풍속에 따른 광흡수계수의 고농도 확률 분포▐

- 에어로졸 광학깊이는 봄철·여름철에 값이 크고, 상대적으로 큰 입자(황사, 흡습성장)의 영향을 주로 받았으며, 가을철·겨울철에는 작은 입자가 우세하고, 광학깊이도 작았음 [본문 5.3.3]
- 수용성 이온성분 총합은 최근 평균 대비 13.9% 감소 [그림 5.4.3]
- 연무로 인한 고농도 시 질산염(NO_3^-) 조성비 증가, 황사 시에는 칼슘이온(nss-Ca^{2+})의 조성비 증가 [그림 5.4.1, 그림 5.4.2]
- 안면도 에어로졸 발생원 분석 [그림 5.5.6, 그림 5.5.7]
  - 인위적 발생원이 51.4%(PM10), 57.4%(PM2.5)로 자연적 발생원보다 많음
    ※ 인위적 발생원: 이차오염물질(황산염, 질산염), 자동차 및 연소 등
    자연적 발생원: 해염, 토양 등
  - PM10의 자연적 발생원은 약 42.8%로 PM2.5의 31.1%보다 많음

대기복사

ㅇ 태양하향복사(전천일사) : 안면도 173.2 W/㎡ (최근 10년 대비 +4.6%)
고 산 165.4 W/㎡ (최근 10년 대비 +3.9%)
ㅇ 태양하향복사는 평년보다 높은 기온과 길어진 일조시간의 영향으로 증가, 고산은 강수량 증가로 그 증가폭이 작음

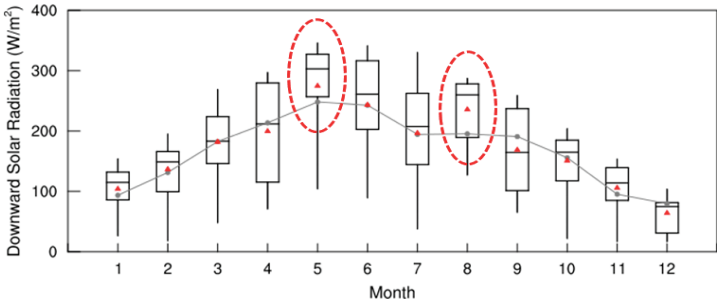
▌요약표 4.1 2019년과 최근 평균 비교▐

감시소 / 측정요소 (W/㎡)	안면도		고산	
	2019년 (변화율)	최근 10년	2019년 (변화율)	최근 10년
직달일사	147.5 (+1.3%)	145.6	131.5 (+11.3%)	118.2
산란일사	82.2 (+8.1%)	76.0	85.7 (+3.0%)	83.2
태양하향복사	173.2 (+4.6%)	165.5	165.4 (+3.9%)	159.3
태양상향복사	34.2 (+1.2%)	33.8	-	-
지구하향복사	313.7 (+4.6%)	299.9	-	-
지구상향복사	377.0 (+1.6%)	371.0	-	-
순복사	76.8 (-1.1%)	77.6	-	-

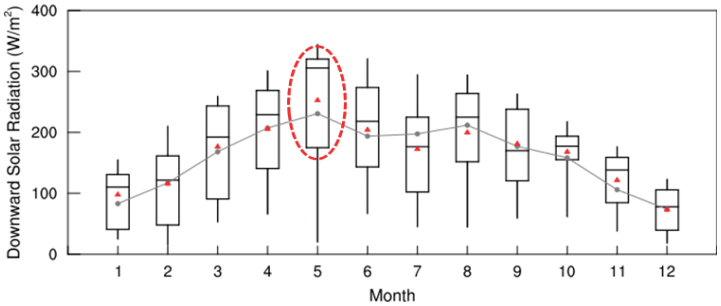
* 최근 평균: 안면도, 고산(2009~2018년)

2019년 대기복사 특성

- 태양복사는 최근 10년 평균에 비해 다소 높은 관측값 [요약표 4.1]
  - 태양복사는 태양일사를 받는 시간(일조시간)의 영향을 받음 [본문 6.6]
  - 최근 10년 평균보다 높은 일조시간 [그림 6.6.3]
- 5월 : 이동성 고기압의 영향으로 전국적으로 고온, 건조해 안면도와 고산의 전천일사 크게 증가 [본문 3.1.2]
- 8월 : (안면도) 강수량이 평년에 비해 26% 가량 적었고, 늦더위와 전국적 폭염의 영향으로 전천일사가 증가 [본문 6.6, 본문 3.1.3, 요약그림 4.1]
  (고 산) 8월 후반 남부지방에 걸친 정체전선의 영향으로 많은 비, 안면도와 달리 전천일사가 평년보다 낮았음 [본문 3.1.3, 요약그림 4.2]

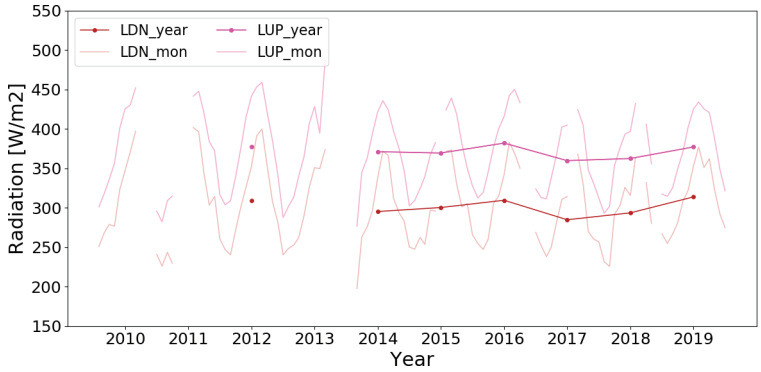


▌요약그림 4.1 안면도 월별 전천일사(2019년 관측값은 박스플롯으로, 최근 10년 평균은 회색선으로 나타냄) ▐



▌요약그림 4.2고산 월별 전천일사(2019년 관측값은 박스플롯으로, 최근 10년 평균은 회색선으로 나타냄) ▐

- 안면도의 지구복사 요소들은 2017년 이후 증가 [요약그림 4.3]
  - 지구복사는 지상의 기온과 관련이 깊음 [그림 3.2.11, 그림 6.4.1]
  - 안면도 기온 관측값은 최근 증가 경향을 보였으며, 2009년 이후 가장 높은 연 평균기온 [표 3.2.4]



▌요약그림 4.3 2010~2019년 안면도 지구상향복사(LUP), 지구하향복사(LDN) 변화 ▐

성층권오존

ㅇ 오존전량 : 안면도 315 DU (최근 6년 대비 -2.9%)
고 산 294 DU (최근 8년 대비 -2.8%)
ㅇ 겨울철 시베리아 고기압의 영향이 약해 고위도 지역에 존재하는 고농도 성층권 오존의 한반도 유입 약화

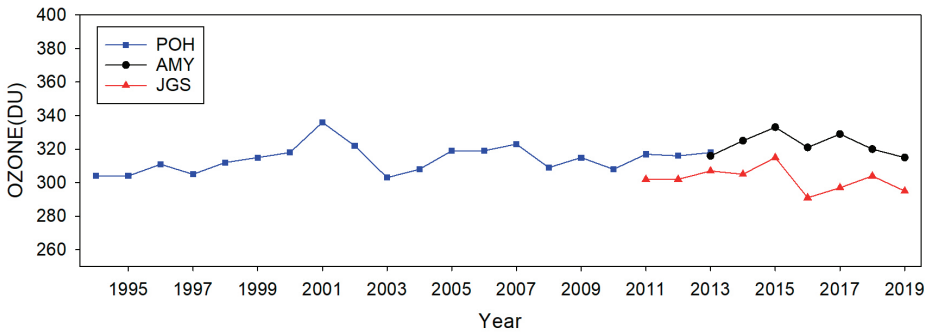
▌요약표 5.1 2019년과 최근 평균 비교▐

감시소 / 측정요소	안면도		고산	
	2019년 (변화율)	최근 6년	2019년 (변화율)	최근 8년
오존 전량 (DU)	315 (-2.9%)	324	294 (-2.8%)	303

* 최근 평균 : 안면도(2013~2018년), 고산(2011~2018년)

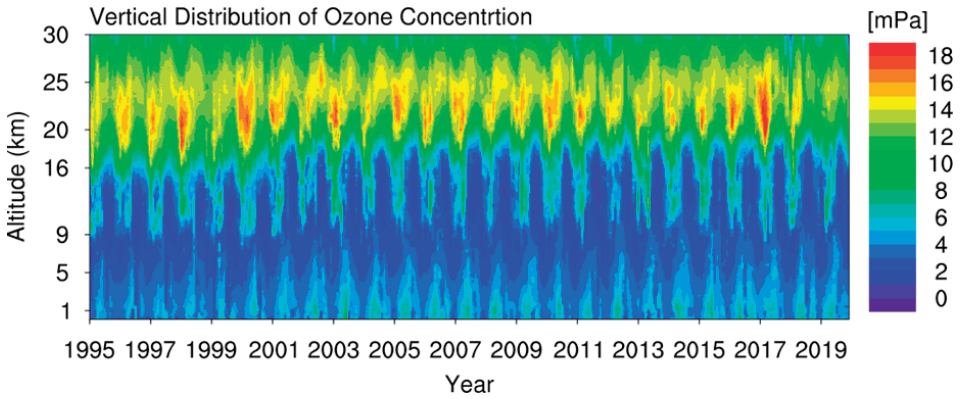
2019년 성층권오존 특성

- 오존 전량은 몬트리올 의정서 발효(1989년 1월) 이후 2015년까지는 장기적으로 증가 추세 [요약그림 5.1]
- 2015년 이후 약한 감소 추세를 보이고 있으나, 감소 추세의 지속 여부에 대한 감시 필요 [요약그림 5.1]



▌요약그림 5.1 안면도(AMY), 포항(POH), 고산(JGS)의 오존전량 변화▐

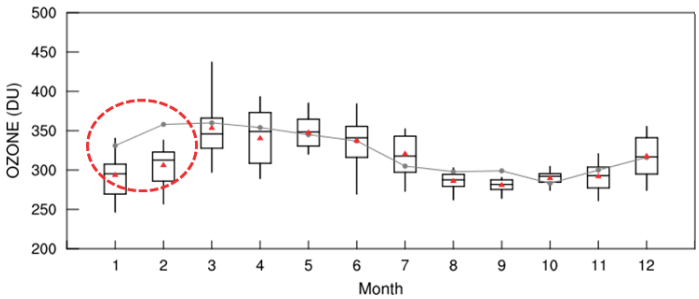
- 오존전량은 안면도와 고산 모두 최근 평균보다 낮았음 [요약표 5.1]
- 안면도와 비슷한 위도대인 포항의 연직오존을 살펴보면, 특히 성층권의 오존량이 낮음 [요약그림 5.2]



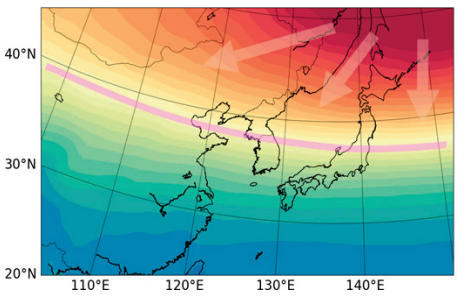
▌요약그림 5.2 1995~2019년 오존 존데로 관측한 포항의 연직오존분포▐

- 오존전량은 1월, 2월에 특히 낮았으며, 당해연도 겨울철 시베리아고기압의 영향 약화가 주원인 [요약그림 5.3, 본문 3.1.1]
  - 고위도 지역의 고농도 오존이 한반도에 미치는 영향과 북반구 중위도 지역의 오존 하강 약화 [요약그림 5.4, 요약그림 5.5]

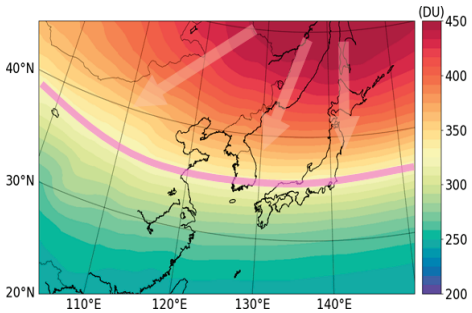
※ 성층권 오존은 여름에 적도지역에서 생성된 오존이 전지구 오존순환에 의해 겨울철-봄철 동안 북반구 중위도에서 하강하여 봄철 한반도 주변지역에 고농도 오존대를 형성



▌요약그림 5.3 최근 6년 평균 대비 2019년 안면도 연평균 오존▐



▌요약그림 5.4 2019년 1~2월 평균 오존전량(OMPS 관측값) 분포▐



▌요약그림 5.5 2009~2018년 1~2월 평균 오존전량(OMPS 관측값) 분포▐

자외선

o 자외선A 일누적 복사량 : 안면도 0.78 MJ/㎡ (최근 10년 대비 +9.2%)
고 산 0.77 MJ/㎡ (최근 7년 대비 +8.3%)
o 자외선B 일최대 복사량 : 안면도 0.126 W/㎡ (최근 10년 대비 +2.9%)
고 산 0.140 W/㎡ (최근 7년 대비 +2.0%)
o 자외선A 일누적 복사량은 최근 10년 평균보다 높은 일조시간, 자외선B 일최대 복사량은 높은 일사량과 낮은 오존전량의 영향

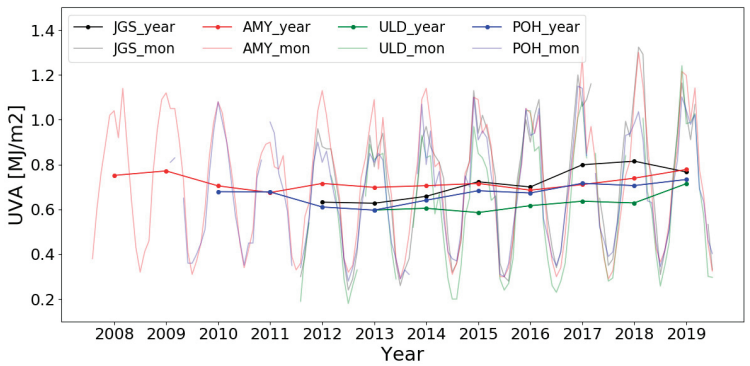
▌요약표 6.1 2019년과 최근 평균 비교 ▐

감시소 / 측정요소	안면도		고산		울릉도		포항	
	2019년 (변화율)	최근 10년	2019년 (변화율)	최근 7년	2019년 (변화율)	최근 7년	2019년 (변화율)	최근 10년
자외선A (MJ/㎡)	0.78 (+9.2%)	0.71	0.77 (+8.3%)	0.71	0.76 (+16.9%)	0.61	0.73 (+10.3%)	0.66
자외선B (W/㎡)	0.126 (+2.9%)	0.122	0.140 (+2.0%)	0.137	0.128 (+10.8%)	0.116	0.140 (+18.1%)	0.118

* 최근 평균 : 안면도, 포항(2009~2018년), 고산, 울릉도(2012~2018년)

2019년 자외선A 특성

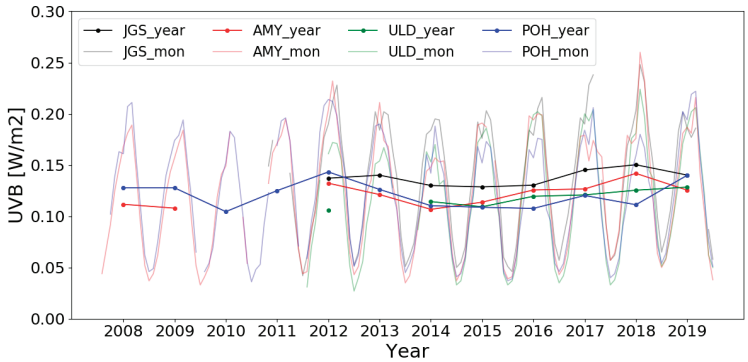
- 자외선A 일누적 복사량은 최근 평균보다 높았음 [요약표 6.1].
  - 일 누적값의 평균으로 분석되기 때문에 일조시간의 영향을 받음 [그림 6.6.3, 그림 8.2.1]
  - 당해의 높은 일조시간과 관련 [그림 6.6.3]
- 일조시간 증가의 영향으로 2012년을 전후해서 약한 증가 추세 [그림 6.6.3, 요약그림 6.1]



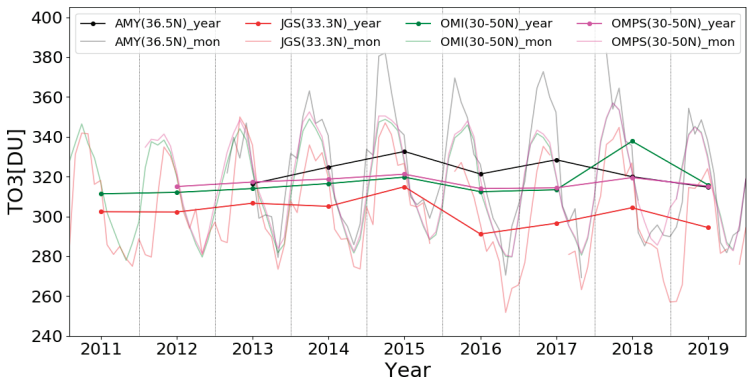
▌요약그림 6.1 지점별 자외선A 월별/연별 관측값의 변화(안면도: AMY, 고산: JGS, 울릉도: ULD, 포항: POH) ▐

2019년 자외선B 특성

- 자외선B 일최대 복사량은 최근 평균보다 높았음 [요약표 6.1]
  - 일 최댓값으로 분석되기 때문에, 전천일사와 오존 농도의 영향을 받음 [본문 8.5]
  - 최근 10년 평균보다 높은 전천일사량과 낮은 오존전량의 영향 [요약표 4.1, 요약표 5.1]
- 자외선B는 2014년 이후 약한 증가 추세, 전천일사량 증가와 최근 오존 전량의 감소가 기여 [요약그림 6.2]
  - 고산의 전천일사는 약하게 증가하여 최근 10년(2009~2018년) 평균 대비 3.9% 증가 [그림 6.6.2, 요약표 4.1]
  - 안면도의 전천일사는 결측으로 인해 추세의 확인은 어렵지만 최근 10년(2009~2018년) 평균 대비 4.6% 증가 [그림 6.6.2, 요약표 4.1]
  - 안면도와 고산 모두 오존전량은 2015년 이후 감소 추세를 보임 [요약그림 6.3]



▌요약그림 6.2 지점별 자외선B 월별/연별 관측값의 변화 (안면도: AMY, 고산: JGS, 울릉도: ULD, 포항: POH) ▐



▌요약그림 6.3 안면도(AMY), 고산(JGS)과 위성(OMI, OMPS)에서 관측된 오존전량의 추세 비교 ▐

총대기침적

ㅇ 습성침적: 안면도 7,235.7 ㎎/㎡/year (최근 10년 대비 -6.2%)
고 산 8,410.9 ㎎/㎡/year (최근 10년 대비 -19.7%)
울릉도 21,897.6 ㎎/㎡/year(최근 10년 대비 -17.3%)
ㅇ 최근 10년보다 적은 강수량(특히 봄철)으로 인해 습성침적량 감소

▌요약표 7.1 2019년과 최근 평균 비교▐

감시소 / 측정요소	안면도		고산		울릉도	
	2019년 (변화율)	최근 10년	2019년 (변화율)	최근 10년	2019년 (변화율)	최근 10년
강수량 (mm)	656.5 (-22.4%)	846.3	1,518.6 (+30.1%)	1,167.3	1,163.7 (-13.4%)	1,343.8
pH	5.14 (+9.1%)	4.71	5.02 (+2.4%)	4.91	5.09 (+6.1%)	4.80
전기전도도	26.0 (+0.4%)	25.9	15.4 (-33.3%)	23.1	43.7 (-13.7%)	49.7
습성침적 (㎎/㎡/year)	7,235.7 (-6.2%)	7,715.1	8,410.9 (-19.7%)	10,469.6	21,897.6 (-17.3%)	26,475.5
건성침적 (㎎/㎡/year)	2,904.1 (-28.7%)	4,073.2	-	-	-	-

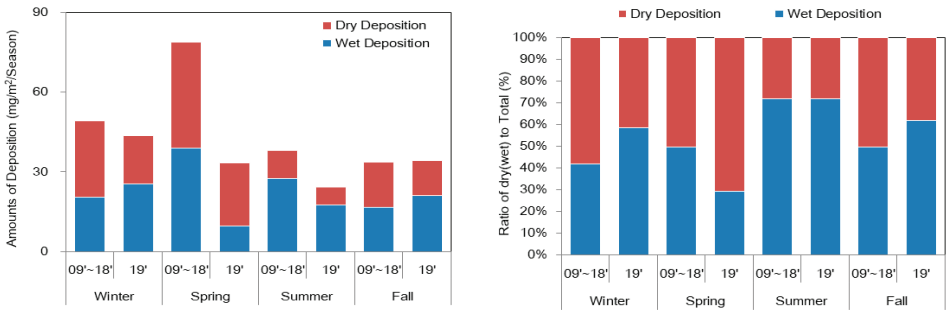
* 최근 평균 : 안면도, 고산, 울릉도(2009~2018년)

2019년 총대기침적 특성

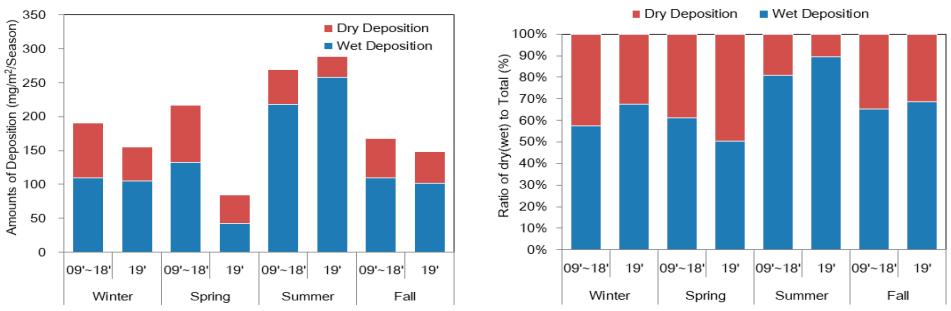
- 고산을 제외한 안면도, 울릉도 지역 강수량이 최근 10년보다 낮았음 [그림 9.2.2]
- 산성도: pH가 5.0 이상이며, 최근 10년 대비 약 2%~9%로 높았음 [요약표 7.1]
- 전기전도도: 고산, 울릉도 지역은 최근 10년 대비 약 14%~33%로 낮았음 [요약표 7.1]
- 습성침적: 최근 10년 대비 약 6%~20% 정도 낮은 침적량을 보임 [요약표 7.1]
  안면도(이차오염물질 중(NO_3^-, NH_4^+)의 영향이 큼)
  고산(이차오염물질 중(SO_4^{2-}, NH_4^+)의 영향이 큼)
  울릉도(해염성분(Na^+, Cl^-)이 타지역보다 영향이 큼) [그림 9.5.1~9.5.3]
  봄철의 적은 강수량에 의해 습성침적량이 크게 줄었음 [그림 9.6.2]

- 건성침적: 최근 10년 대비 약 29%의 낮은 침적량을 보임 [요약표 7.1]
  최근 10년에 비해 잦아진 황사와 이동성고기압의 영향으로 봄철 토양성분(Ca^{2+}), 이차반응물질인(SO_4^{2-}, NO_3^-)의 조성비가 증가함 [그림 5.5.1, 그림 5.5.2, 요약그림 7.1]
- 발생원 분석 [그림 9.7.1]
  - 안면도 : 해염/생체 및 자동차 연소(47%), 황산암모늄, 질산암모늄(38%)로 지배적
  - 고 산 : 황산암모늄, 질산암모늄 및 토양(47%), 해염 및 생체연소(43%)로 유사
  - 울릉도 : 해염과 생체연소의 영향(45%)을 가장 많이 받음

• 토양성분(Ca^{2+})



• 이차반응물(이동형, 자동차) NO_3^-



▌요약그림 7.1 최근 10년과 2019년의 계절별 Ca^{2+}, NO_3^- 성분의 건성 및 습성의 침적량과 비율 ▐

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제1장

머리말



제1장 머리말

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC[1])는 5차 보고서(2013년)에서 지구온난화는 명백하게 진행되고 있으며, 인위적 온실가스의 배출량 증가가 지구온난화의 주 원인이라고 선언했다. 최근 전 세계에서 기후변화로 인한 자연재해 발생이 증가하면서 기후변화 수준을 넘어 '기후 위기'로 인식하고 대처해 가야 한다는 움직임이 활발하다.

세계기상기구(WMO)는 지구온난화를 비롯한 환경문제에 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 화학·물리적 조성에 대한 관측자료와 자연·인위적 대기조성 변화 정보를 제공한다. 이들 자료는 IPCC, 유엔 기후변화 협약(UNFCCC[2]), 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 기관은 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)이 GAW 지역급 관측소로 지정되어 있다.

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

1) IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
2) UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

관측망의 운영현황과 요소별 분석 결과 및 통계자료 등을 포함하고 있다.

2012년에는 교토의정서 규제대상 6대 온실가스 중 하나인 육불화황(SF_6)의 관측기술을 인정받아 WMO로부터 육불화황 세계표준센터(World Calibration Centre, WCC)를 유치하였으며, 2015년에는 강수화학 국제비교실험과 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 국제비교실험(응결핵계수기, 전자기 유도입자계수기, 광흡수계수측정기)에 참여하여 관측자료 신뢰도를 확보하였다.

본 보고서에는 고산(2014년~)과 울릉도(2018년~)에서 측정하고 있는 메탄 자료를 새로 추가하였고, 울릉도 기후변화감시소의 공기역학입자계수기 자료를 추가하여 안면도, 고산, 울릉도의 입자 농도를 크기별로 비교하였다. 또한 NOx 세계표준센터에서 수행하는 국제비교실험에 안면도 NOx 분석기 자료가 기준장비와 일치하는 결과를 얻었으며, WCCAP에서 수행하는 국제비교실험(응결핵계수기)에도 참여하여 관측자료 신뢰도를 확보하였다. 제60차 WMO GAW 강수화학 국제비교실험에서 54개국, 81개의 실험실을 대상으로 강수시료의 화학성분 분석결과를 비교·평가하여, 강수화학성분에 대한 분석능력을 검증하고, 신뢰도를 더욱 강화하였다.

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제2장

지구대기감시 현황

제2장 지구대기감시 현황

2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램

WMO는 세계의 기상관측체계 수립, 기상관측의 표준화, 기상정보의 국제 교환, 다른 분야에 대한 기상학의 응용을 추진하기 위해 1950년에 설립된 국제연합의 특별기구이다. 우리나라는 1956년에 이 기구에 가입하여 활동하고 있다.

세계기상기구 과학기술 프로그램 중의 하나인 GAW 프로그램은 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비 등과 같은 환경 문제에 대처하기 위해 1989년에 전지구오존관측망(GO_3OS)과 배경대기오염감시망(BAPMoN)을 통합하여 시작되었다. 이 프로그램은 첫째, 지구대기의 화학 조성에 대한 과학적이고 신뢰할 수 있는 관측자료를 제공하고, 둘째, 지구대기의 자연적·인위적인 조성 변화 정보를 제공하며, 셋째, 대기·해양·생물 간의 상호작용 과정에 대한 이해를 높이는 것을 목적으로 한다. 지구대기감시 프로그램에는 세계기상기구의 모든 회원국이 참여하고 있다. 현재, 31개소의 지구급 관측소(global station), 400개 이상의 지역급 관측소(regional station), 그리고 100개 이상의 협력 관측소(contributing station)가 운영되고 있다(그림 2.1.1).

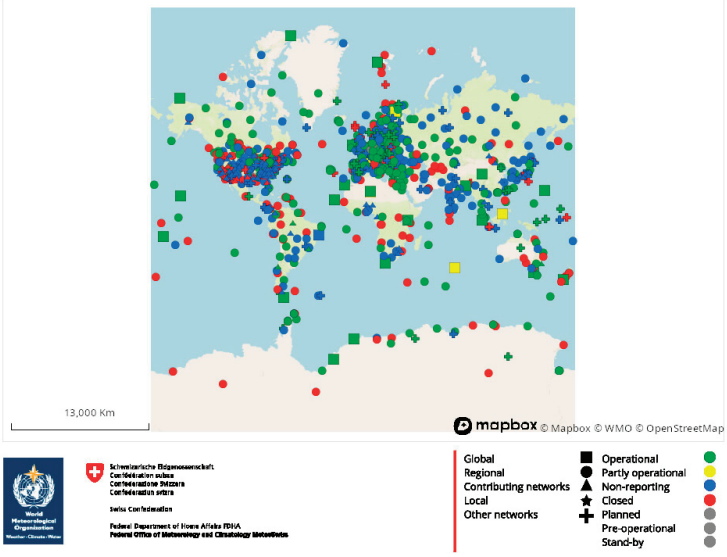


그림 2.1.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 관측소 현황.

지구대기감시 프로그램은 중앙기구를 두어 관측자료의 품질보증기술을 지원하고 있다. 중앙기구는 그림 2.1.2와 같이 품질보증과학활동센터(QA/SAC), 세계표준센터(WCC), 지역교정센터(Regional Calibration Centre, RCC), 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory, CCL), 세계자료센터(World Data Centre, WDC), GAW관측소정보센터(GAWSIS)로 구성되어 있다. 과학자문그룹(SAG)은 프로그램의 과학적 정책 방향을 결정하고 지구대기감시 프로그램 사무국은 중앙기구와 지구대기감시관측소 간의 협력과 운영을 돕는다.

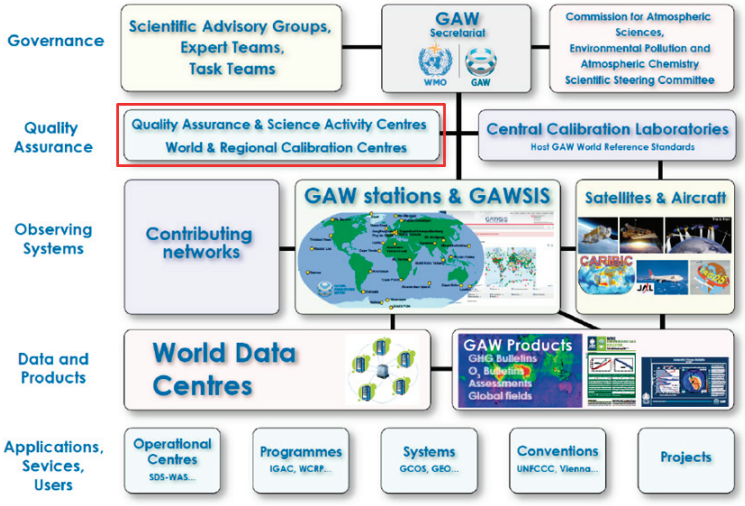


그림 2.1.2 WMO/GAW 프로그램 구성 요소 (WMO/GAW 보고서 No. 228).

표 2.1.1 세계기상기구 지구대기감시 세계자료센터 현황

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

2.2 한반도 기후변화감시소 현황

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

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

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 8월에 지구대기감시관측소로 명칭이 변경되었다. 이때까지 국립기상과학원 소속이었던 지구대기감시관측소는 2008년 3월에 기후변화감시센터로 명칭을, 소속은 기상청으로 변경되었다.

이후 한반도에서 기후변화 유발물질의 유입을 감시하기 위하여 우리나라 중부 서해안의 안면도를 GAW 관측지침에 맞게 관측환경을 구축하는 한편, 2011년 남부 서해안지역인 제주도에 고산기후변화감시소(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(그림 2.2.1). 이 중 고산은 안면도와 마찬가지로 2013년 GAW에 지역급 관측소로 등록되었다. 또한, 대학 및 유관기관에서 운영하는 7개의 위탁관측소도 함께 포함하고 있다(표 2.2.2).

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

표 2.2.1 한반도 기후변화감시 정보

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

표 2.2.2 위탁관측소 운영 현황

위탁기관명	위·경도	관측요소	위탁지정일	비고
연세대학교	37.57°N 126.95°E (서울)	성층권오존, 자외선	2004. 11. 6.	WMO GAW 지역급 관측소
광주과학기술원	35.22°N 126.83°E (광주)	에어로졸 광학깊이, 연직분포	2007. 1. 1.	
서울대학교	37.75°N 127.15°E (광릉수목원)	산림 이산화탄소	2008. 11. 5.	
극지연구소	62.22°S 58.78°W (남극 세종과학기지)	이산화탄소	2010. 10.26.	WMO GAW 지역급 관측소
	74.62°S 164.23°E (남극 장보고과학기지)	이산화탄소, 성층권 오존	2017. 10. 1.	
제주대학교	33.29°N 126.16°E (제주 고산)	라돈	2012. 4. 1.	
숙명여자대학교	37.54°N 126.97°E (서울)	중층대기 수증기, 성층권 오존	2015. 4. 1.	

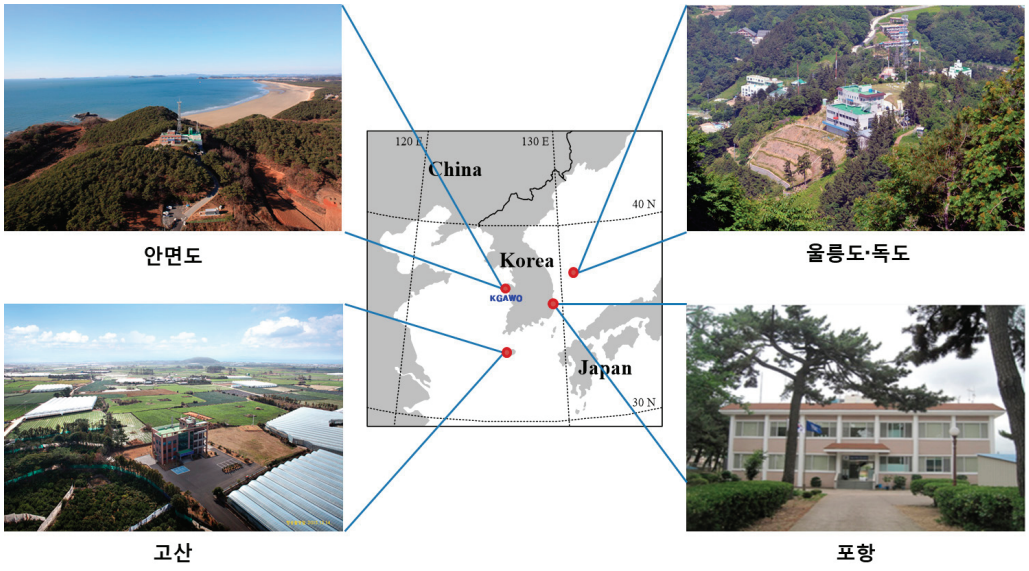


그림 2.2.1 한반도 기후변화감시망의 구성.

2.3 세계기상기구 육불화황 세계표준센터

육불화황(SF_6)은 적외선을 강하게 흡수하면서, 대기 중에 굉장히 오래 체류하는 온실가스이다. 100년 동안 CO_2가 미치는 온실효과와 비교하였을 때, 22,500배 강하다고 알려져 있다. 대류권 SF_6는 매년 0.2-0.3 ppt 씩 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 지속적인 증가는 상대적으로 긴 체류시간 때문이다. SF_6가 대기로 한번 배출되면, 약 850년 (불확도범위 580-1400년)동안 대기 중에 머문다(Ray et al., 2017). 수분에 녹지 않고 대기 중 오랫동안 체류하기 때문에 기단을 구분하기 위한 추적자로도 사용된다. 이러한 SF_6는 대부분 인간활동(전기절연체 등)에서 주로 배출되며, 자연적으로 생산되는 양은 거의 없다. CO_2와 비교해 온실효과가 강력한 반면, 그 농도의 수준이 ppt (1조분의 1수준)으로 낮아 측정이 쉽지 않다.

WMO에 등록된 GAW 관측소는 현재 지구급이 약 31개소, 지역급이 400여개가 넘고, SF_6 관측소는 약 54개소로 대부분이 NOAA(미국해양대기청)의 플라스크 네트워크이다. WMO에서는 GAW 관측소의 수가 많기 때문에, 동일한 품질관리체계를 위하여 세계표준센터와 품질보증과학활동센터 등을 지정하여 GAW 관측소의 품질관리를 담당하게 하고 있다(그림 2.1.2).

기상청은 2012년부터 WMO로부터 SF_6의 세계표준센터(WCC-SF_6)를 지정받아 운영 중에 있으며, 그 역할은 크게 5가지 정도로 요약된다. 1) 표준가스 전파 2) 비교실험 3) 적합성평가 4) 워크숍과 교육훈련과정 5) 기술노트 및 가이드 발간 등이다. 이러한 활동 결과를 2019년 GAW 30주년 심포지움에서 발표하였다. 이 중 비교실험은 가장 기본적이고 중요한 품질관리방법이다. WCC-SF_6의 비교실험은 크게 두 파트로 하나는 WMO/GAW의 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory, NOAA)과의 비교실험, 다른 하나는 전세계 관측소를 대상으로 진행하는 국제순차순환비교실험이다.

WMO/GAW의 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory, NOAA)과의 비교실험은 2년에 한 번씩 진행되고 있다. 2012년에 지정된 이후로 총 4회 이루어졌다. 방법은 WCC-SF_6에서 표준가스를 제조하여, 이를 인증한 후 CCL에 보내면, CCL에서 분석하여 그 결과를 상호 비교하는 방법이다.

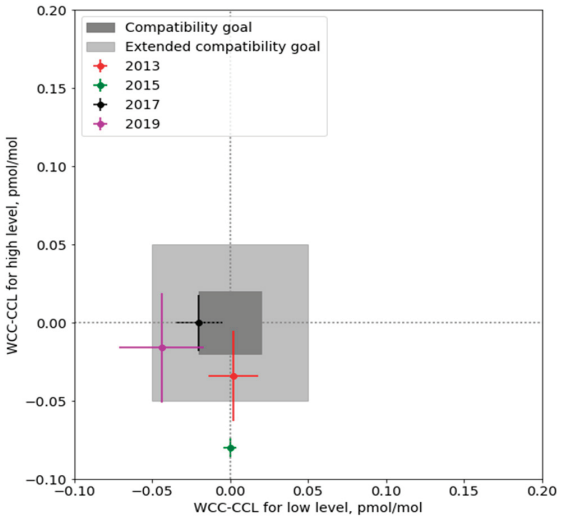


그림 2.3.1 CCL과 WCC-SF_6의 고농도와 저농도 비교실험 결과. 회색영역은 WMO/GAW의 호환성 범위: ±0.02 ppt, 확장호환성범위: ±0.05 ppt.

그림 2.3.1에 제시된 바와 같이 2015년을 제외하고는 대부분 호환성 범위 안에 있다. GC-μECD는 과거 실험을 통해 비선형적 구간의 존재가 증명되었으며, 선형성 실험을 거쳐 2점 이상의 교정(Bracket method)을 요구한다. 2015년의 결과는 이를 무시하고 1점 교정을 진행하였을 때 나타난 결과이다. 따라서 2점 이상 교정이 실시간에도 적용되길 권고하는 계기가 되었다.

이 뿐 아니라 2016년부터 2017년에 걸쳐 제1차 SF_6 국제순차순환비교실험이 기상청 주관으로 진행되었으며 전세계 12개 실험실이 참여하였다. 실험방법은 WCC-SF_6에서 시료 2병(고농도와 저농도)을 제조하여 인증하고, 그 값을 알려주지 않은 채 참여 실험실에 순차적으로 돌린다. 각 실험실에서는 분석한 값을 WCC-SF_6 보고하고 향후 WCC-SF_6의 값과 비교한다.

각 실험실은 다양한 실험설계로 참여하였으나, WCC-SF_6과 차이를 나타낸 가장 큰 이유는 동일한 척도를 사용하지 않았기 때문이었다(그림 2.3.2). 현재 사용되고 있는 WMO-X2014 척도를 사용하지 않는 실험실에서 가장 큰 차이를 보였으며, WMO-X2014척도를 사용했다고 하더라도 준비된 표준가스의 농도범위와 비교실험 시료의 농도범위가 맞지 않을 경우 차이값을 보였다. 따라서 품질관리의 가장 기본적인 방법은 올바른 표준가스의 척도사용과 범위 설정이다. 실험의 보고서는 http://community.wmo.int/ither-gaw-related-publication에 수록되어 있다.

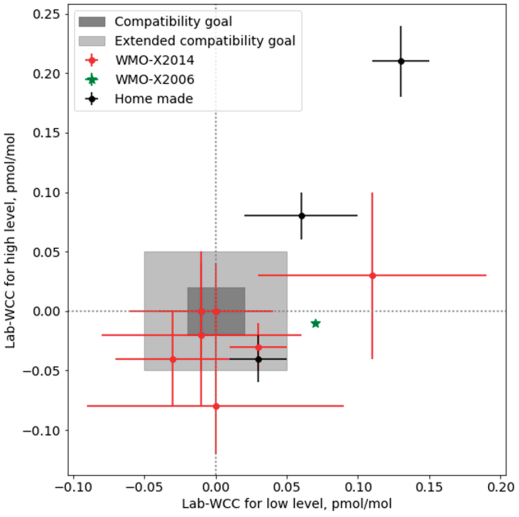


그림 2.3.2. 전세계 관측소와 WCC-SF_6의 고농도와 저농도 비교실험 결과. 회색영역은 WMO/GAW의 호환성 범위: ±0.02 ppt, 확장호환성범위: ±0.05 ppt. 붉은색은 WMO-X2014척도를 사용한 실험실, 초록색은 WMO-X2006척도를 사용한 실험실, 검정색은 자체 표준을 가지고 있는 실험실이다.

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제3장

기상특성



제3장 기상특성

3.1 2019년 기상특성

2019년은 전 세계 평균기온이 2016년에 이어 두 번째로 높았던 해(2016년 대비 -0.06℃, 평년[3] 대비 +0.6℃)였으며, 우리나라도 연 평균기온이 13.5℃(평년 대비 +1.0℃)로 2016년의 13.6℃에 이어서 1973년 이래 두 번째로 높았다. 북쪽 찬 공기의 영향을 자주 받은 4월과 6~7월을 제외한 모든 달의 기온이 평년보다 1.1~1.6℃ 높아, 여름철 폭염은 2018년에 비해 심하지 않았지만, 장마 종료 후 7월 후반부터 8월 중반까지 늦더위가 이어졌다.

전국 연평균 누적 강수량은 1171.8 ㎜로 평년값(1207.6~1446.0 ㎜)보다 적었다. 특히 1월의 경우 누적강수량이 8.1 ㎜로 역대 가장 적게 내린 달 중 하나였고(하위 5위), 10월의 경우 누적강수량이 169.0 ㎜로 역대 가장 많이 내린 달(상위 1위)로 기록되어, 월별 강수량 변화폭이 크게 나타난 해였다.

또한, 영향 태풍 수는 7개로 평년의 3.1개에 비해 2배 이상이었으며, 이는 1950년, 1959년과 함께 가장 많은 수를 기록하였다. 한편 1월과 12월에는 겨울에 우리나라에 영향을 주는 시베리아 고기압이 약해서 적설이 매우 적었던 한해였다. 본 절은 기상청에서 발간한 「2019 연 기후특성 보고서」(기상청, 2020) 및 월별 기상특성 보도자료를 참고하여 작성하였다.

3.1.1 겨울철(1~2월) 기상특성

평년에 비해 북서계절풍의 영향이 약했음
- 시베리아고기압과 알류샨저기압이 평년에 비해 북쪽에 위치
- 기압경도력이 약해 북서풍 풍속이 약했고, 기온 변동성이 컸으나 온화한 겨울

시베리아고기압과 알류샨저기압이 거의 정체성을 띠면서 강력하게 발달하므로 한반도는 북서풍이 탁월하고 강하다. 시베리아기단의 확장 경로가 북쪽일수록 기단의 변질이 적어서 한반도에 추운 날씨를 초래한다. 확장 경로가 중국 화북지방에서 남동 방향일 경우 한반도의 남서 해안지역에서,

3) 평년: 1981~2010년 기간의 평균 기후값을 의미

만주지방으로 확장하는 경우 영동지방에서 강설 현상이 나타난다.

과거부터 겨울은 3일간 춥고, 4일간 따뜻한 날씨가 7일 주기로 반복된다는 의미에서 삼한사온(三寒四溫)을 겨울 일기의 한 특징으로 말하고 있다. 그러나, 겨울의 기온 변화는 매우 불규칙하여 비교적 온화한 해에는 높은 기온이 오래 지속되기도 하나 한랭한 겨울에는 강력한 한파가 자주 출연하기도 한다.

대륙에서 발달한 건조한 저기압은 서해나 동해에 도달하면 따뜻한 해수면으로부터 다량의 습기를 공급받아 기층이 불안정해지면서 폭발적으로 발달하는 경우가 있다. 이를 폭발적 저기압이라 하고, 동해에서 발달하는 경우 동해선풍이라고 한다. 동해선풍은 10월부터 다음해 4월에 걸쳐 자주 나타나며, 돌풍을 동반하여 연안지역에 많은 피해를 초래하기도 한다.

겨울철 안개는 서해안에 가까운 내륙지역과 찬 공기가 쌓이는 분지지역에서 주로 나타나며, 대체로 빈도는 적으나 지속시간이 긴 편이다. 북서계절풍이 약할 때 지면 복사냉각이나 찬 공기의 정체 등으로 지면 역전이 낮게 형성되며, 특히 대도시지역은 연기, 먼지 등 여러 가지 오염물질이 도시 역전층 밑에 쌓여서 옅은 안개가 자주 나타난다.

2018년 겨울철(2018년 12월~2019년 2월) 기상특성을 살펴보면, 12월의 평균기온이 1.1℃로 평년의 1.5℃와 유사하였으나 두 차례의 추위를 포함하여 큰 기온 변동을 보였으며, 1~2월은 온화한 날씨를 나타냈다. 우리나라 부근의 해면기압 편차장을 살펴보면, 바이칼호 부근에 양의 해면기압 편차, 캄차카반도 부근에 음의 해면기압 편차가 위치한 것을 확인할 수 있다. 이는 알류샨 저기압이 평년보다 북서쪽으로 발달하였고, 대륙고기압이 바이칼호 부근에서 평년보다 발달하였음을 의미한다. 그러나 850 hPa 기온 편차 분포도를 보면, 바이칼호 부근에서는 평년보다 낮은 기온이 분포하고, 우리나라 부근의 기온은 평년보다 높았다(그림 3.1.1). 이는 2018/2019년 겨울에 바이칼호 부근에서는 대륙고기압이 평년보다 발달하였으나, 알류샨 저기압이 평년에 비해 북쪽으로 위치함으로 인해 우리나라 부근에서는 기압경도력과 그에 따른 북서기류가 강해지지 못한 것으로 분석된다.

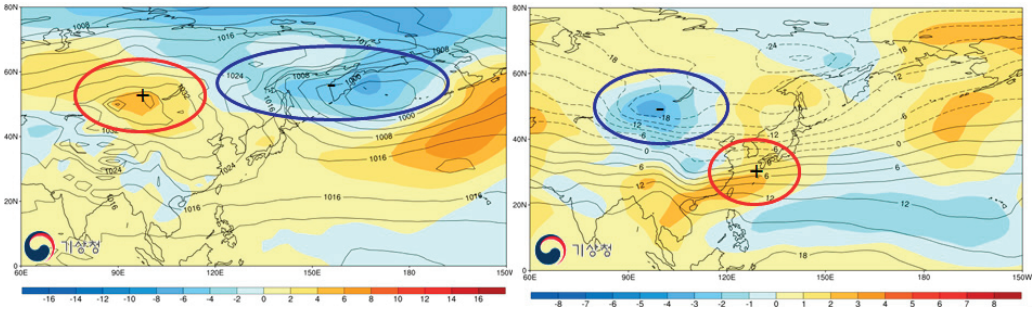


그림 3.1.1 2018/2019년 겨울철 동아시아 해면기압 편차(왼쪽), 850 hPa 기온 편차 분포도(오른쪽) (출처: NCEP 재분석 자료).

이는 유럽중기예보센터(European Center for Medium-range Weather Forecast, ECMWF)의 재분석 자료인 ERA5 자료의 분석에서도 볼 수 있다. 그림 3.1.2a는 ERA5 월별 재분석자료를 이용하여 2009~2018년 10년간의 겨울철(12월, 1월, 2월) 10 m 고도의 평균 풍속과 풍향을 나타낸 그림이다. 전반적으로 내륙에서는 바람이 약하고 해양에서는 바람이 강하며, 북위 30도 이상에서는 북서풍 계열의 바람이 뚜렷하고, 북위 30도 이하에서는 북동풍 계열의 바람이 우세하여 우리나라 주변에서는 전형적인 북서 계절풍 양상이 잘 나타났다. 그림 3.1.2b는 10년 평균 풍속, 풍향(3.1.2a)에 대한 2019년의 편차장이다. 붉은 색 계열은 평년에 비해 풍속이 증가한 것을 의미하며, 파랑색 계열은 감소한 것을 의미한다. 즉, 한반도 주변 지역에서는 북서 계절풍의 약화로 인해 남동풍 편차가 나타나고 있다. 이는 해당 기간에 시베리아 고기압의 약화와 이로 인한 한반도 지역 남서풍 유입, 고온현상과도 일관성 있게 해석된다.

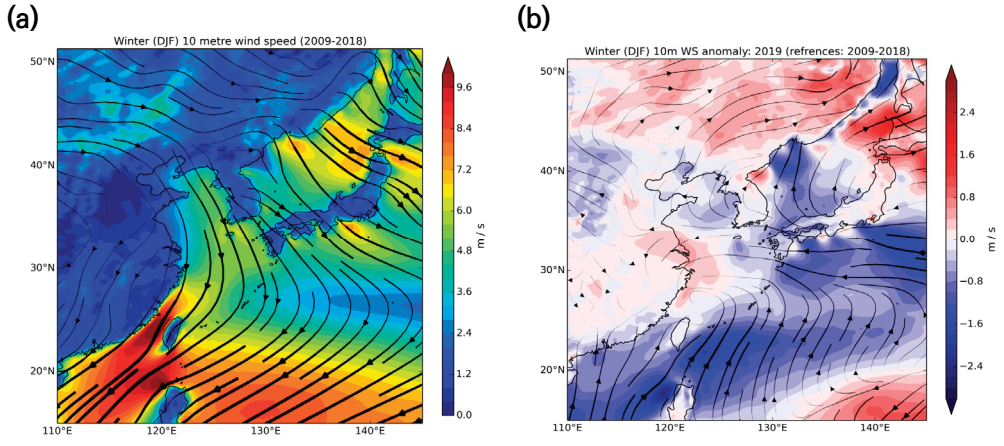


그림 3.1.2 ERA5 재분석자료 10년(2009~2018년) 겨울철(12~2월) 평균 10m 고도 풍속과 풍향 유선(a)과 2019년 겨울철(2018년 12월~ 2019년 2월) 평균 10m 고도 풍속과 풍향 유선편차(b) [단위 m/s].

가. 1월 기상특성

온화하고 건조한 날씨가 지속

- 평년보다 약한 대륙고기압으로 약한 북서기류, 때때로 이동성 고기압 영향

  [기온] 전국 평균기온은 0.3℃로 평년(-1.0℃)보다 높았음

  [강수량] 전국 강수량은 8.1 ㎜로 평년(19.0~28.6 ㎜)보다 적었음

1월의 경우 중순 이후 상층 대기의 동서흐름이 원활한 가운데 대륙성고기압과 이동성 고기압의 영향을 번갈아 받아 기온변화가 다소 컸으며, 찬 공기의 세력이 약해 평년보다 기온이 높은 날이

많았다. 상층 기압골이 시베리아 북부와 캄차카반도 부근에 위치하여 북쪽 찬 공기가 주로 우리나라 북쪽으로 통과하였고, 우리나라 주변에는 약한 상층 기압능이 위치하여 온화한 날씨가 지속되었다(그림 3.1.3a). 특히 11~12일, 18~19일, 22~23일, 30일에는 이동성 고기압과 남쪽 기압골의 영향을 받아 상대적으로 따뜻한 서풍~남서풍의 유입으로 기온이 크게 올랐다(그림 3.1.3b).

또한, 평년보다 약한 대륙고기압과 이동성 고기압의 영향을 주로 받아 건조한 날씨가 이어졌다. 약 10 ㎞ 상공의 제트기류가 시베리아와 북한 부근에 형성되어 북쪽 찬 공기의 남하를 저지하면서 전반적으로 대륙고기압의 세력이 약했다. 이로 인해 서해상에서 해기차(해수면과 대기의 온도차)에 의한 눈구름대의 생성이 약했고, 지상 저기압도 강하게 발달하지 못했다. 또한 열대 중~서태평양의 해수면 온도가 평년보다 높게 유지되는 가운데, 이 지역을 중심으로 상승기류가 활발하였고, 이 상승기류는 우리나라 부근에서 하강기류로 바뀌면서 구름대 생성을 억제함(그림 3.1.4)으로써 누적강수량이 매우 낮게 나타나는 원인이 되었다.

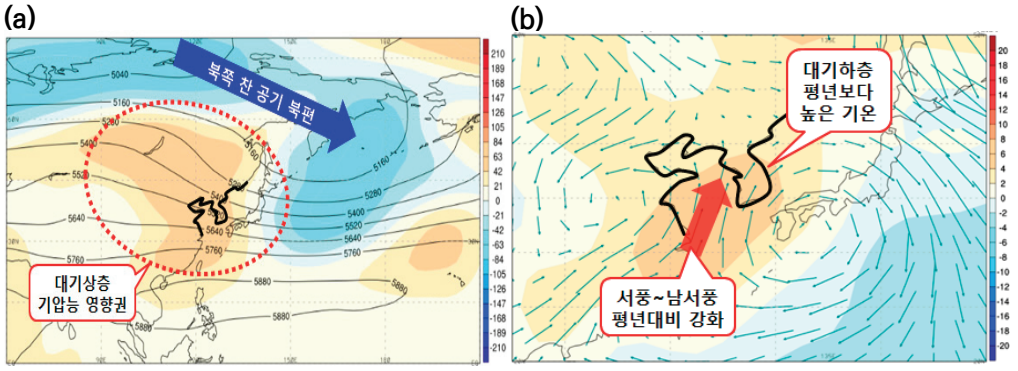


그림 3.1.3 2019년 1월 500 hPa 평균 고도선과 편차(a), 1월 18~19일 850 hPa 기온 편차와 바람편차(b).

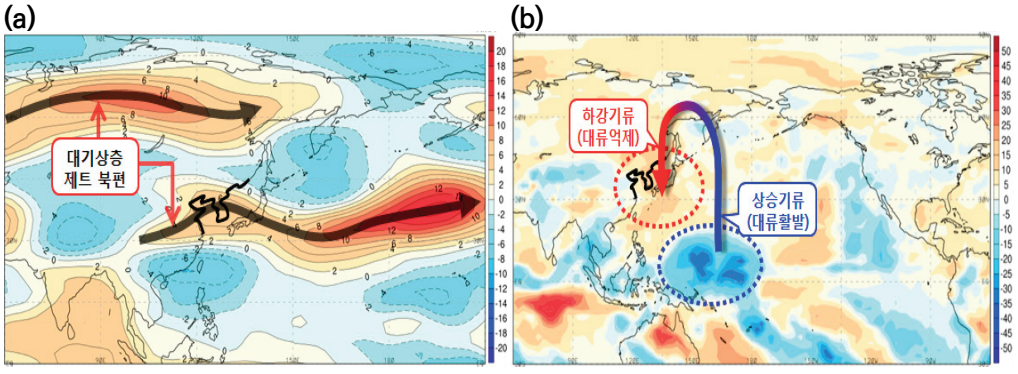


그림 3.1.4 2019년 1월 200 hPa 동서바람 편차(a)와 지구장파복사[4] 편차(b).

나. 2월 기상특성

초·후반 포근한 날씨와 두 차례 많은 비

- 평년보다 약한 대륙고기압, 중반에 대륙고기압 확장으로 낮은 기온
  [기온] 전국 평균기온은 2.4℃로 평년(1.1℃)보다 높았음
  [강수량] 전국 강수량은 30.8 ㎜로 평년(19.2~41.4 ㎜)과 비슷했음

2월에도 초반과 후반에는 이동성 고기압과 저기압의 영향을 주로 받아 기온이 평년에 비해 높았으나, 중반에는 대륙고기압의 확장으로 기온이 평년보다 조금 낮았다. 대기 상층 기압계의 동서흐름이 대체로 원활한 가운데, 초반(1~6일)에는 우리나라 남동쪽에 평년보다 따뜻한 공기가 위치하면서 북쪽의 찬 공기의 남하가 저지되었고, 후반(21~28일)에는 대륙고기압의 세력이 평년보다 약한 가운데 우리나라는 상층 기압능의 영향을 주로 받아 고온현상이 나타났다(그림 3.1.5). 특히, 1~6일에 대기하층은 이동성 고기압의 영향으로 따뜻한 서~남서풍이 유입되면서 기온이 크게 올랐다(그림 3.1.5a).

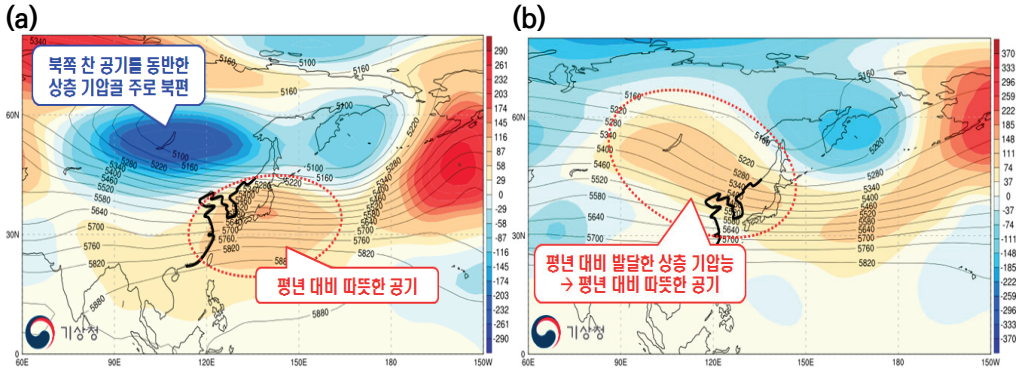


그림 3.1.5 2019년 2월 1~6일(a), 21~28일(b)의 500hPa 평균 고도선과 편차(채색).

강수의 경우 주기적으로 기압골의 영향을 받았으며, 두 차례 전국에 많은 비 또는 눈이 내려 전국 강수량은 평년 수준을 기록하였으나 강원 영동과 제주도는 평년보다 적은 분포를 보였다. 특히, 2~3일과 18~19일에는 우리나라 남쪽 대만 부근 해상에서 평년보다 높은 해수면 온도가 유지되는 가운데, 우리나라 남쪽을 지나는 이동성 고기압과 그 후면의 저기압 사이에 만들어진 강풍대를 따라 따뜻한 수증기가 다량으로 유입됨으로 인해 제주도와 남부지방을 중심으로 많은

4) 지구장파복사(Outgoing Longwave Radiation, OLR): 지구가 반출하는 적외영역 복사에너지로, 대류활동(상승기류)이 강한 영역에서 음의 값(파란색)을, 대류 억제(하강기류)가 강한 영역에서 양의 값(빨강색)을 나타냄. OLR 편차가 음이면 평년보다 대류활동이 활발하여 상승운동이 강해짐을 의미

비가 내렸고, 중부지방에는 다소 많은 눈이 쌓였다(그림 3.1.6). 한편, 7일과 10일, 15~16일에는 기압골의 영향, 14일에는 동풍의 영향으로 비 또는 눈이 내렸으나, 강수량은 대체로 적었다.

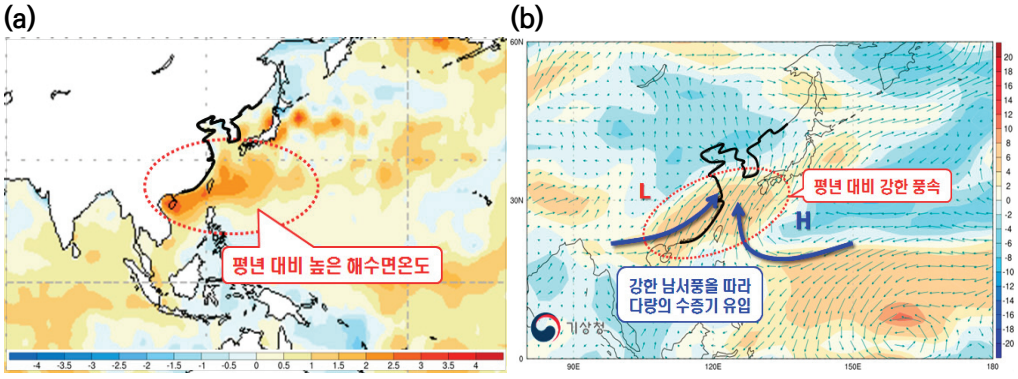


그림 3.1.6 2019년 2월 17~23일 해수면온도 편차(a), 18~19일 850 hPa 바람편차(b).

3.1.2 봄철(3~5월) 기상특성

기온 변동성이 컸으나, 평년에 비해 따뜻
- 이동성 고기압과 기압골의 영향, 동풍이 평년 대비 약간 강했음
- 3월·5월 고온·건조, 4월은 평년과 비슷

우리나라 봄철에는 양쯔강기단의 영향을 주로 받는다. 발달된 양쯔강기단이 동서방향으로 위치하여 이동성 고기압으로 한반도를 통과하면 장기간 맑은 날씨가 지속되며 봄가뭄을 초래하기도 한다. 이동성 고기압의 중심이 한반도 남쪽으로 통과하면 강원도 영동지방에, 북쪽을 통과하면 태백산맥에 의한 푄(Fŏhn)현상으로 경기 및 충청지방으로 고온 건조한 날씨가 나타난다. 가끔 상층기류의 진폭이 남북으로 크게 발달하면 시베리아기단은 한반도에 직접 확장하기도 하여 겨울철 기압배치를 이루면서 갑자기 추운 날씨가 되며, 이를 꽃샘추위라고 한다.

시베리아기단이 약화되면서 중국의 화남 및 동중국 해상에서 발달한 저기압이 한반도에 영향을 주면 약한 강우를 동반한 지속성이 큰 온난전선형 안개가 자주 발생하기도 한다. 중국 북부 및 몽고 지역에서는 겨울철에 덮였던 눈이 녹으면서, 강수를 동반하지 않은 건조한 저기압이 자주 발달하여 이를 동반한 모래먼지, 즉 황사가 동아시아지역으로 3~5 km 고도의 기류를 따라 확산된다. 이에 우리나라에서도 황사현상이 자주 나타나게 된다.

2019년 봄철 북반구 500 hPa 지위고도 편차 분포도를 보면, 북미 동부와 카라해에서 우랄산맥, 베링해 부근에서는 음의 지위고도 편차가 위치하였고, 그린란드해, 알래스카, 바이칼호 서쪽의 중앙아시아까지 양의 지위고도 편차가 위치하여 상대적으로 우리나라와 일본은 상층 기압골의

영향을 주로 받았다. 하층(해면기압)에서는 북시베리아와 베링해 등 고위도를 중심으로 음의 편차가 광범위하게 위치한 반면, 북미 서부와 그린란드해, 북위 30도 이남으로는 양의 편차가 위치하였다. 우리나라는 유라시아 대륙과 중국, 베링해까지 이르는 폭넓은 음의 편차에 위치하여, 대륙고기압의 강도가 평년보다 약해 우리나라를 비롯한 중국, 일본 등 동아시아의 봄철 평균기온이 평년보다 높았던 것으로 분석된다(그림 3.1.7).

ECMWF ERA5 재분석 자료를 이용한 우리나라의 평년 및 2019년 봄철 풍향, 풍속에 대한 분석을 그림 3.1.8에 보였다. 봄철에는 우리나라 지역의 평균 풍속이 1~2 m/s 이내로 매우 약하고, 주된 풍향은 서풍 계열임을 알 수 있다. 2019년의 경우 풍속은 평년에 비해 양의 편차를 보이고 있으나, 풍속 자체는 강하지 않았던 것으로 분석된다.

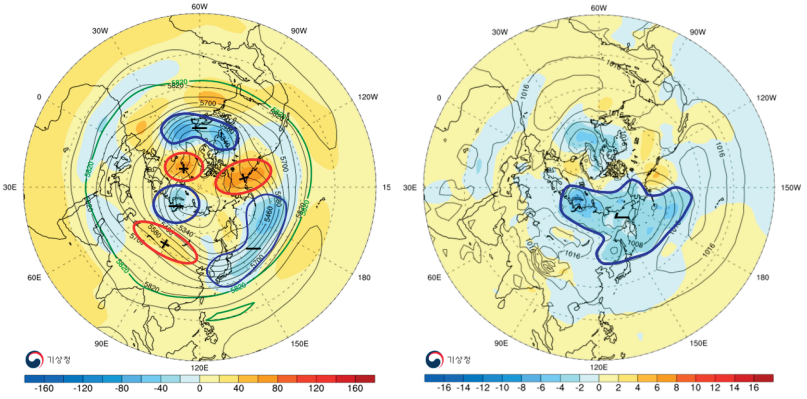


그림 3.1.7 2019년 봄철 북반구 500 hPa 지위고도 편차(왼쪽), 해면기압 편차 분포도(오른쪽) (출처: NCEP 재분석 자료).

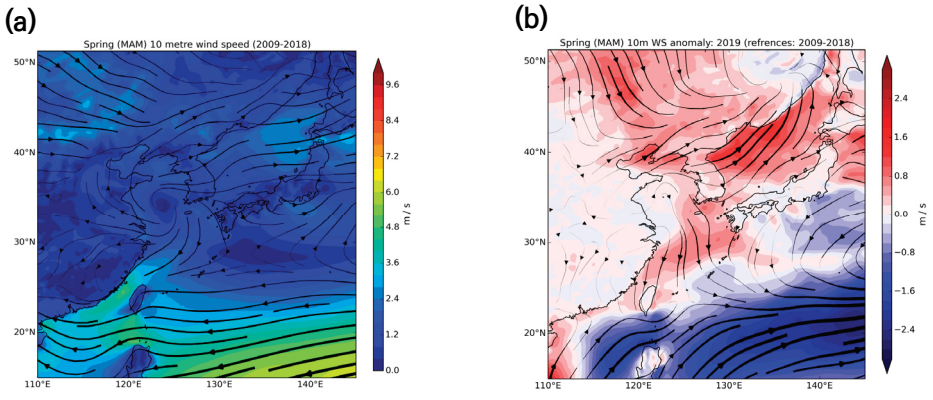


그림 3.1.8 ERA5 재분석자료 최근 10년(2009~2018년) 봄철(3~5월) 평균 10 m 고도 풍속과 풍향 유선 (a)과 2019년 봄철 평균 10 m 고도 풍속과 풍향 유선편차(b) [단위 m/s].

가. 3월 기상특성

기온 높고, 중·후반 일시적 추위로 기온변동성 커

- 이동성 고기압과 기압골의 영향, 중·후반 대륙고기압 일시적 확장
  [기온] 전국 평균기온은 7.5℃로 평년(5.9℃)보다 높았음
  [강수량] 전국 강수량은 38.7 ㎜로 평년(47.3~59.8 ㎜)보다 적었음

3월은 대체로 이동성 고기압과 기압골의 영향으로 기온이 평년보다 매우 높은 가운데, 중·후반에는 대륙고기압이 일시적으로 확장하면서 기온이 크게 떨어져 기온변동이 컸다. 2월 후반부터 중국 북동부에 형성된 상층 기압능의 영향이 3월 10일까지 이어지면서 고온현상이 지속되었고, 특히 3~6일과 19~20일, 26~27일에는 이동성 고기압과 기압골의 영향으로 따뜻한 남서~남동풍이 유입되어 기온이 크게 올랐다(그림 3.1.9a). 하지만 13~14일과 22~24일, 31일은 상층 찬 공기의 유입과 대륙고기압의 확장으로 기온이 크게 떨어져 일시적인 추위를 보였다(그림 3.1.9b).

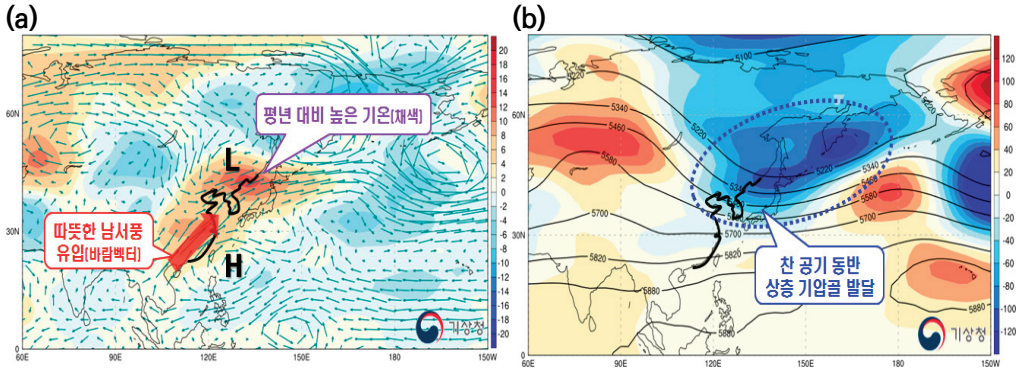


그림 3.1.9 2019년 3월 19~20일 850 hPa 기온편차와 평균바람(a), 3월 21~24일 500 hPa 평균 고도선과 편차(b).

2~6일과 9~10일, 18일은 남쪽 기압골의 영향으로 남해안과 제주도 중심, 7일과 27~28일은 동풍의 영향으로 동해안에 비 또는 눈이 내렸고, 15~16일과 20~21일에는 서쪽에서 다가온 저기압, 11~12일과 23일, 30~31일에는 기압골의 영향으로 전국에 비 또는 눈이 내렸다. 특히 20~21일에는 중국 남부에서 발달한 저기압이 서해상으로 접근하는 가운데 북서쪽으로부터 찬 공기가 남하하면서 강풍대가 형성되었고, 강한 남서풍을 따라 많은 양의 수증기가 유입되면서 남해안과 중부 서해안을 중심으로 다소 많은 비가 내렸다. 하지만, 기압골의 영향을 주기적으로 받아 강수일수는 평년 수준이었으나, 기압골이 주로 제주도 남쪽 먼바다를 통과하면서 3월 전국 강수량은 평년보다 적은 수준에 머물렀다.

나. 4월 기상특성

기온 변화 큰 가운데 잦은 비

- 초·중반 캄차카반도 부근 강한 상층 기압골 발달로 쌀쌀한 날씨
- 중·후반 중국 북부 상층 기압능, 하층 이동성 고기압 영향으로 일시적인 고온

[기온] 전국 평균기온은 12.0℃로 평년(12.2℃)과 비슷했음

[강수량] 전국 강수량은 79.3 ㎜로 평년(56.1~89.8 ㎜)과 비슷했음

4월에는 중반까지 쌀쌀한 날씨가 많았고, 중반 이후에는 기온이 높아졌다. 15일까지 러시아 동부와 베링해 부근에 상층 기압능이 자리 잡은 가운데, 캄차카반도 부근에 강한 상층 기압골이 발달하면서 기압계의 동서 흐름이 느려졌고, 이 상층 기압골의 영향으로 우리나라에 찬 공기가 자주 남하하였다(그림 3.1.10a). 16~24일에는 캄차카반도 부근의 상층 기압골이 약화되고 우리나라는 중국북부에 중심을 둔 상층 기압능의 영향을 받는 가운데, 하층에서는 이동성 고기압의 영향을 주로 받아 기온이 크게 오른 날이 많았다(그림 3.1.10b). 특히, 22~23일에는 낮 동안에 강한 일사와 동풍에 의한 푄(Főhn) 효과가 더해지면서 서쪽 중부지역을 중심으로 고온현상이 나타나기도 하였다.

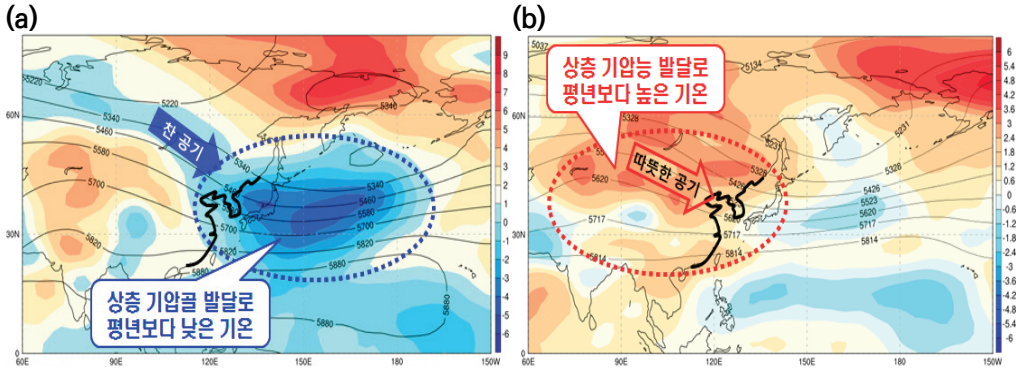


그림 3.1.10 2019년 4월 1~15일(a)과 16~24일(b)의 850 hPa 기온 편차와 500 hPa 평균 고도선.

강수량의 경우 상순과 하순에 기압골의 영향을 주기적으로 받아 4월 전국 강수량은 평년과 비슷하였다. 6일과 14일, 20~21일, 25~26일은 북쪽 기압골의 영향으로 중부 중심, 7일과 16~17일, 28~29일은 남쪽 기압골의 영향으로 전국에 비 또는 눈이 내렸다. 특히 9~10일에는 저기압 동편에 형성된 강한 남풍을 따라 많은 양의 수증기가 유입되어 남부지방과 충청도를 중심으로 다소 많은 비가 내렸고, 기온이 낮았던 강원도와 경상북도의 높은 산지에서는 동풍과 지형적 영향이 더해지면서 강수 구름대가 발달하여 많은 눈이 쌓였다(그림 3.1.11).

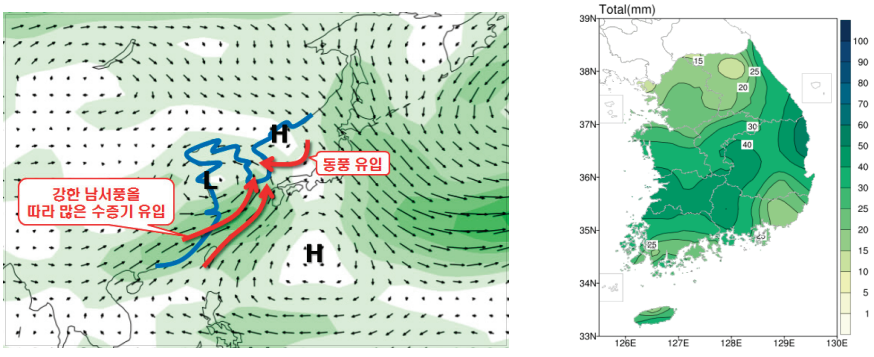


그림 3.1.11 2019년 4월 9일 850 hPa 평균 풍속과 바람(왼쪽), 4월 9~10일 전국 45개와 제주도 2개 지점의 총강수량(㎜) 분포도(오른쪽).

다. 5월 기상특성

기온 높은 가운데 건조하고 강수가 적음

- 이동성 고기압의 영향으로 대체로 고온, 건조
- 초반·후반 캄차카반도와 바이칼호 부근 상층 기압능 발달로 일시적 저온

[기온] 전국 평균기온은 18.6℃로 평년(17.2℃)보다 높았음

[강수량] 전국 강수량은 55.9 ㎜로 평년(77.9~114.4 ㎜)보다 적었음

5월에는 이동성 고기압의 영향으로 기온이 평년보다 높은 날이 많았고, 초반과 후반에는 일시적으로 기온이 낮았다. 기압계의 동서흐름이 대체로 원활하여 이동성 고기압의 영향을 주로 받아 고온현상이 나타났다. 특히 14~17일과 24~26일에는 고기압의 가장자리를 따라 따뜻한 남풍기류가 유입되었고, 강한 일사효과까지 더해져 전국에서 고온현상과 함께 5월 극값이 나타난 곳이 많았다(그림 3.1.12a). 그 결과 2019년 5월은 1973년 이후 5월 전국 평균기온 중 2위, 평균 최고기온 최고 1위를 기록하였다. 한편, 6~8일과 20~21일에는 캄차카반도와 바이칼호 부근에 상층 기압능이 일시적으로 발달하여 기압계의 동서흐름이 느려졌고, 그 사이에 위치한 우리나라는 찬 공기를 동반한 상층 기압골의 영향으로 기온이 일시적으로 평년보다 낮아지기도 하였다(그림 3.1.12b).

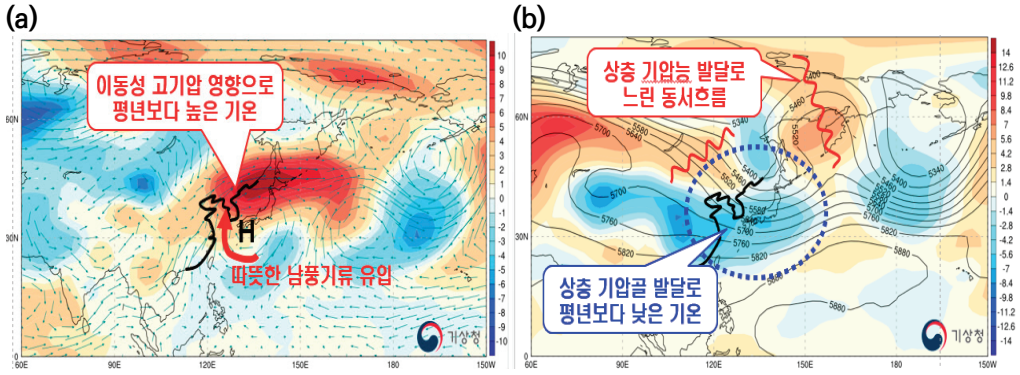


그림 3.1.12 2019년 5월 24~26일 850 hPa 기온 편차와 바람(a), 5월 6~8일 850 hPa 기온 편차와 500 hPa 평균 고도선(b).

2019년 5월은 이동성 고기압의 영향을 주로 받아 전국이 매우 건조하고 전국 강수량이 평년보다 매우 적었다. 건조한 날씨가 이어지는 가운데, 5월 중반까지 강수가 없었다. 후반에는 전국적인 강수와 국지적 소나기가 발생하였지만 주된 강수 구름대는 우리나라 북쪽과 제주도 남쪽으로 통과하면서 건조한 경향이 이어졌다. 2019년 5월의 강수일수와 평년대비 강수일수 편차는 그림 3.1.13과 같다.

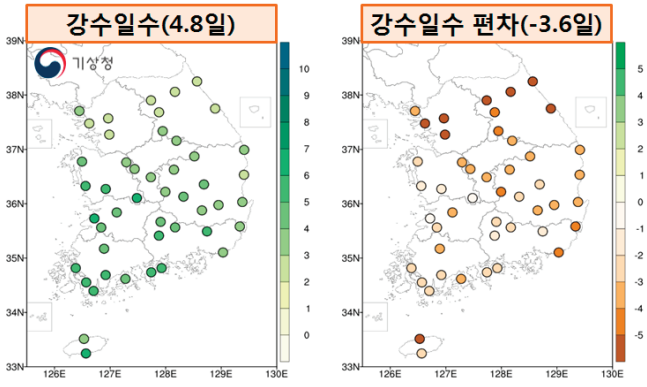


그림 3.1.13 2019년 5월 강수일수와 강수일수 편차 분포도.

3.1.3 여름철(6~8월) 기상특성

장마의 늦은 시작, 장마 후 늦더위 지속, 태풍 3개의 영향에도 적은 강수량
- 6월초 일시적 고온, 장마기간 낮은 기온, 7월 후반부터 늦더위
- 장마의 늦은 시작, 6년 연속 장마기간 적은 강수량 기록
- 강수는 지역적(남부, 제주, 동해안)으로 편중되어 평년보다 적었음

시베리아기단이 크게 약화되고, 북태평양기단이 서서히 북상하게 된다. 이 두 기단의 경계를 나타내는 한대전선대는 대략 5월 초순에 중국 남부, 6월 중순에 한반도 남부, 6월 하순 초반에서 7월 상순에 한반도 중부, 7월 하순이면 만주로 북상하게 된다. 한대전선대가 한반도에 위치할 때가 많은 강수가 연속적으로 내리는 장마이다. 우리나라에서 장마는 대략 6월 하순에 시작하여 약 30일 정도 지속되나 간헐적으로 강수강도가 강화되어 국지적으로 집중호우가 내려 많은 피해를 초래하기도 한다. 한반도의 대부분 지역에서 여름 강수량의 반 이상이 이 장마기에 집중된다.

장마기가 지난 후 북태평양기단이 한반도를 지배하면 습기가 많고, 온도가 높은 무더운 날씨가 시작된다. 또한, 대류불안정으로 인해 소나기와 뇌우 등이 국지적으로 잘 발달한다. 동해안은 남쪽으로부터 따뜻한 난류와 남풍 계열의 바람이 우세하여 북쪽의 더 차가운 한류지역에서 이류안개가 빈번히 형성되며, 동해안과 울릉도는 안개일수가 급증하기도 한다. 북태평양 고압대의 중심 위치의 북상으로 6월과 9월 사이에는 저위도에서 형성된 열대저기압이 태풍으로 발달하여 연 2~3개 정도가 한반도까지 접근한다.

2019년 여름철은 북태평양고기압의 영향으로 장기간 폭염이 지속되었던 2018년과 달리 북쪽 찬 공기의 영향을 받아 북태평양고기압의 확장이 늦었다. 또한, 더위는 일시적으로 일찍 시작하였으나, 북태평양고기압의 강도도 약해서 한여름에는 2018년보다 덜 더운 편이었다. 6월 초에는 평년에 비해 기온이 높았으나, 장마가 7월 중순까지 지속되면서 낮은 기온 분포를 보였으며, 장마 종료 후 7월 후반부터 8월 중반까지 늦더위가 이어졌다. 평년보다 늦은 6월 26일 전국적으로 동시에 장마가 시작되었으며, 장마 전까지 비 또는 소나기가 자주 내려 6월 강수량은 평년 수준을 기록하였다.

7월에도 장마전선이 우리나라 남쪽에 머물면서 주로 남해안과 제주도에 강수가 집중되었고, 8월에도 잦은 소낙성 강수와 3개의 태풍 영향에도 불구하고 강수가 지역적으로 편중되면서 평년보다 적은 강수량을 기록하였다. 북태평양고기압은 평년보다 동서로 길게 발달하였고, 일본 남쪽에 위치하였다. 따라서 우리나라는 여름철 전반에는 상층 기압골에 의한 찬 공기의 유입이 잦았으나, 후반에는 티벳고기압과 북태평양고기압의 영향을 받아 기온이 평년보다 높고, 강수량이

평년보다 적은 경향을 보였다(그림 3.1.14).

ERA5 재분석 자료를 이용하여 분석한 우리나라 여름철 평균 기류는 남풍 계열이 우세하나, 평균 풍속은 세지 않으며, 2019년의 경우 평년에 비해 약했던 것으로 나타났다.

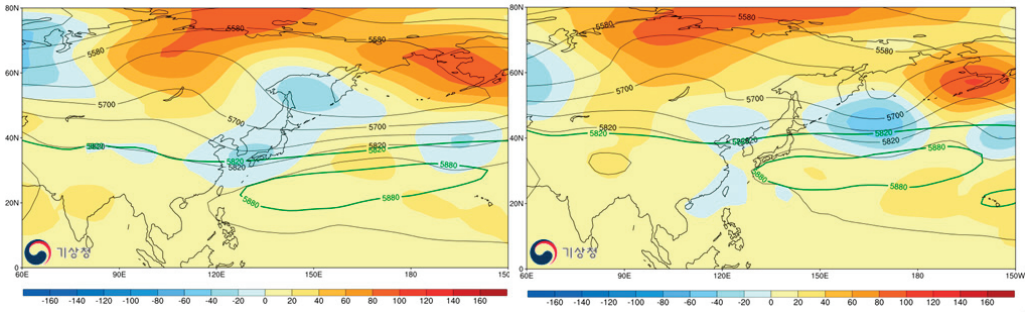


그림 3.1.14 2019년 동아시아 500 hPa 지위고도 편차 분포도 6월 1~7월 20일(왼쪽), 7월 21~8월 31일 (오른쪽) (출처: NCEP 재분석 자료).

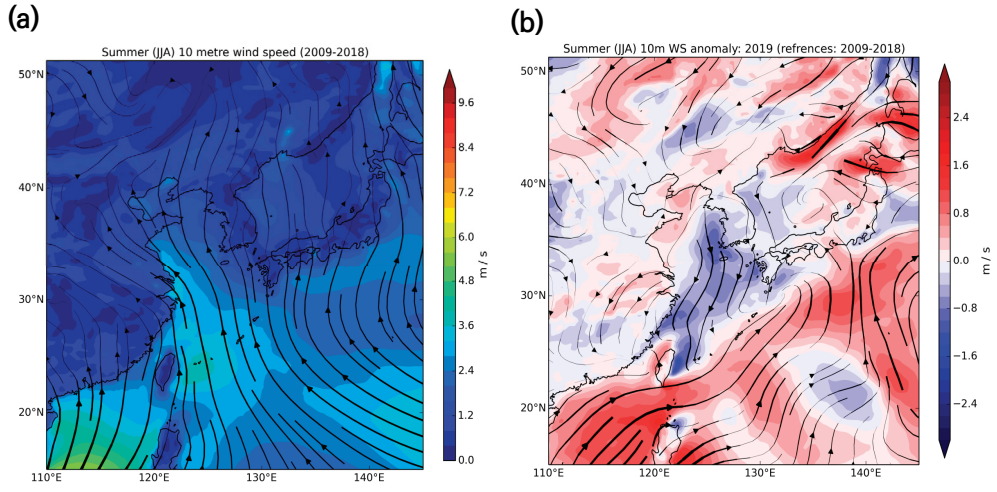


그림 3.1.15 ERA5 재분석자료 10년(2009~2018년) 여름철(6~8월) 평균 10 m 고도 풍속과 풍향 유선 (a)과 2019년 여름철 평균 10 m 고도 풍속과 풍향 유선편차(b) [단위 m/s].

가. 6월 기상특성

기온 변동 크고 중반에는 선선한 날씨, 전국적으로 늦은 장마 시작

- 상·하순 고기압 및 남서풍 유입, 일사효과로 고온, 중반 상층 기압골로 차고 건조
- 상층 기압골의 주기적인 영향, 대기불안정으로 잦은 소나기, 늦은 장마 시작

[기온] 전국 평균기온은 21.3℃로 평년(21.2℃)과 비슷했음

[강수량] 전국 강수량은 143.1 ㎜로 평년(132.9~185.9 ㎜)과 비슷했음

6월에는 상순과 하순에는 고온현상이 나타났고, 중반에는 평년보다 낮은 기온을 나타낸 날들이 이어지면서 기온변동이 다소 컸다. 3~5일에는 고기압의 영향으로 전국이 맑은 가운데, 고기압의 가장자리를 따라 남서풍이 유입되고, 낮동안 강한 일사효과까지 더해져 동쪽지역을 중심으로 고온현상이 나타났다(그림 3.1.16a). 6~18일에는 베링해와 바이칼호 북동쪽 상층에 기압능이 발달하여 기압계의 동서흐름이 느려졌다. 그 사이에 위치한 우리나라와 오호츠크해 부근에는 상층 기압골이 위치하여, 차고 건조한 공기가 우리나라로 자주 유입되었다(3.1.16b).

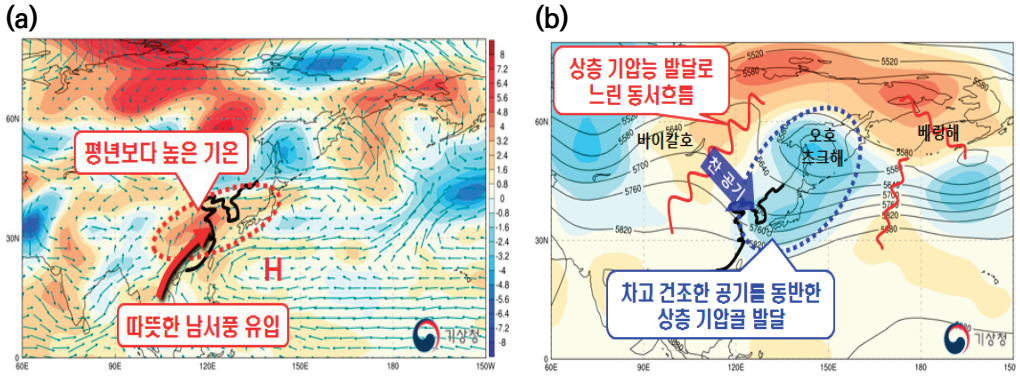


그림 3.1.16 2019년 6월 3~5일 850 hPa 기온 편차와 바람(a), 6월 6~18일 500 hPa 고도 편차와 평균 고도선(b).

차고 건조한 공기를 동반한 상층 기압골의 영향을 주기적으로 받았고, 대기불안정으로 소나기가 내리는 곳이 많았다. 한 차례의 전국적인 비를 제외하고는 지역차가 커 장마 시작 전까지(6월 1~25일) 전국 강수량은 64.1 ㎜로 평년(84.5~139 ㎜)에 비해 적었다. 장마전선의 영향으로 26~27일, 29일 전국에 비가 내렸으며, 장마 시작일은 제주도의 경우 평년에 비해 6~7일 늦게, 남부지방은 3일 늦게, 중부 지방은 1~2일 늦게 시작되었다. 장마 시작이 늦어진 원인은 6월 상순부터 하순 중반까지 베링해와 바이칼호 북동쪽에 상층 기압능이 발달하여, 우리나라 부근으로 찬

공기가 자주 내려오면서 북태평양고기압과 장마전선의 북상이 저지되었고, 특히 베링해 부근에서는 얼음면적이 평년보다 매우 적어 상층 기압능이 발달하기 좋은 조건이 만들어졌기 때문으로 분석되었다(그림 3.1.17).

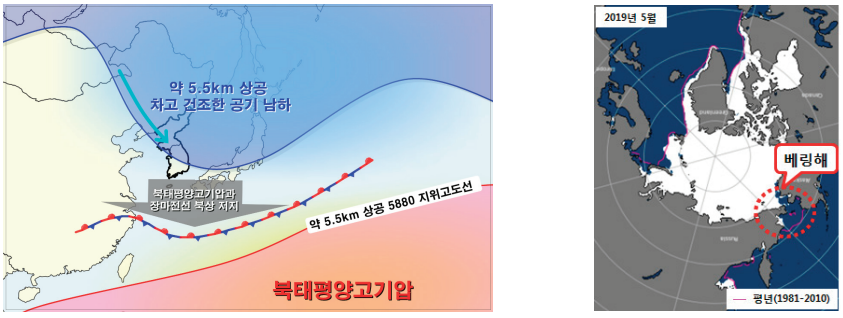


그림 3.1.17 2019년 6월 상~하순 우리나라 주변 기압계 모식도(왼쪽), 2019년 5월 북극해 얼음면적 분포도(오른쪽)(출처: nsidc.org/articseaicenews).

나. 7월 기상특성

기온·강수량 지역차 크고, 평년보다 적은 강수량

- 상층 기압골의 영향, 북태평양고기압이 우리나라 부근으로 확장 못해
- 장마전선과 태풍 다나스 영향 남해안과 제주도 많은 비, 저온

[기온] 전국 평균기온은 24.8℃로 평년(24.5℃)과 비슷했음

[강수량] 전국 강수량은 217.2 ㎜로 평년(240.4~295.9 ㎜)보다 적었음

7월 전국 평균 기온은 24.8℃로 평년의 24.5±0.5℃와 비슷했으나, 2018년 26.8℃에 비해 2℃ 낮게 나타났다. 초·중반에는 기온이 평년보다 높았으나, 중반에는 평년보다 낮은 날들이 많아 평년과 비슷한 기온을 보였다. 중반까지 장마전선이 주로 남해상에 위치하면서 중부와 남부의 지역차가 컸다. 7월 8~18일에는 찬 공기를 동반한 상층 기압골의 영향을 자주 받는 가운데 티벳고기압과 북태평양고기압이 우리나라 부근으로 확장하지 못했으며, 장마전선과 소나기의 영향으로 비가 내리거나 구름 낀 날이 많았다(그림 3.1.18a). 7월 6~9일에는 동풍 효과(Föhn)로 인해 중서부 지역을 중심으로 기온이 높았으며, 17~20일에는 장마전선이 주로 남부지방과 제주도에 영향을 주면서 평년보다 기온이 중부는 높았고, 남부는 낮았다(그림 3.1.14b).

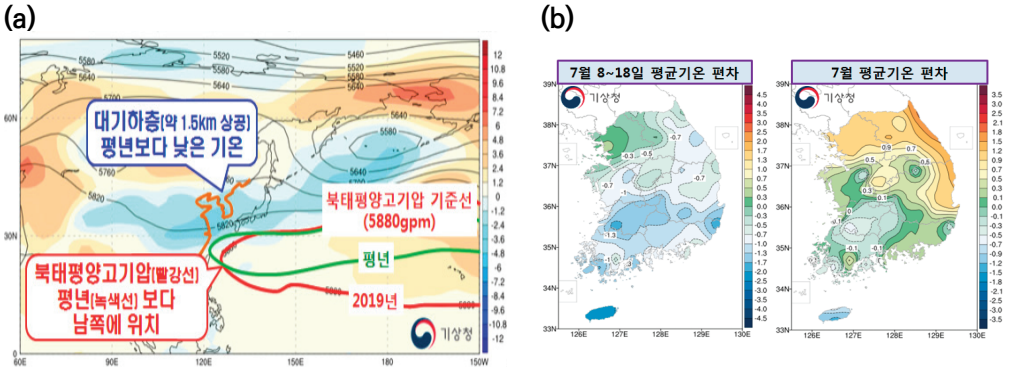


그림 3.1.18 2019년 7월 8~18일 500 hPa 평균고도선과 850 hPa 기온편차, 평균기온 편차 분포도(a), 평균기온 및 편차 분포도(b).

7월의 전국 평균 폭염일수는 3.3일로 동해안과 일부 내륙지역에 발생했다. 2019년 7월의 폭염일수는 평년의 3.9일보다 0.6일 적었고, 2018년의 15.5일 대비 12.2일이나 적었다. 7월의 전국 평균 열대야일수는 4.6일로 평년의 2.3일보다 많았으며, 2018년의 7.8일 대비 3.2일 적었다. 7월 중반까지 상층 기압골의 영향으로 차고 건조한 공기가 자주 유입되어 열대야 발생이 적었지만, 후반에 북태평양고기압의 영향으로 온난다습한 공기가 유입되면서 동해안 지역을 중심으로 열대야가 발생하였다(그림 3.1.19).

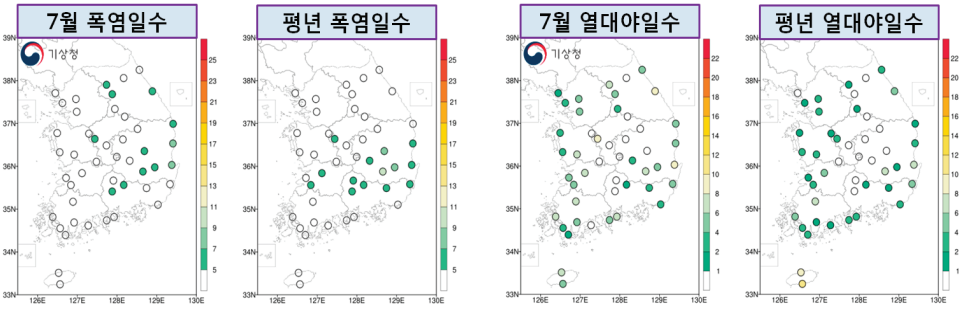


그림 3.1.19 2019년 7월 폭염일수와 평년일수 분포도, 열대야일수와 평년일수 분포도.

강수의 경우 7월의 전국 강수량은 상층 기압골의 영향으로 소나기가 잦은 가운데 장마전선과 제5호 태풍 다나스의 영향을 받아 217.2 ㎜로 2018년의 172.3 ㎜ 대비 많았으나, 평년의 240.4~295.9 ㎜보다는 적었다(그림 3.1.20). 7월 중반까지 장마전선이 우리나라 남쪽에 머물면서 주로 남해안과 제주도에 영향을 주어, 중부지방과 전라북도, 경상북도는 7월 강수량이 평년보다 적었다.

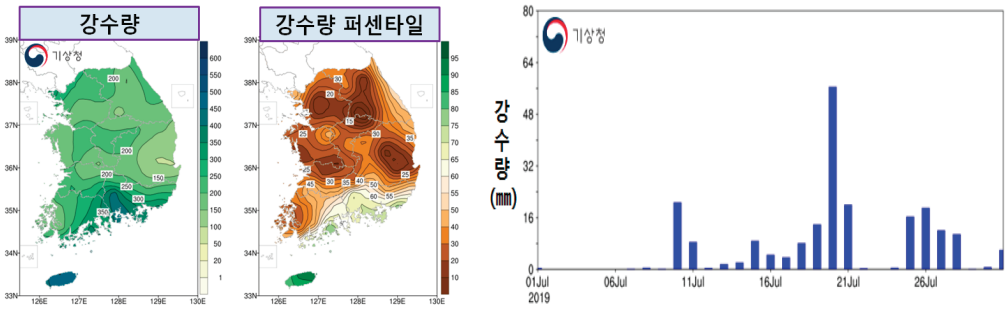


그림 3.1.20 2019년 7월 강수량 및 강수량 퍼센타일 분포도, 강수량 시계열
(※ 분포도는 전국 45개 지점과 제주도 2개 지점)

2019년 7월에는 4개의 태풍(제4호 문, 제5호 다나스, 제6호 나리, 제7호 위파)이 발생했으며, 우리나라에 영향을 준 태풍은 1개로 제5호 태풍 다나스였다. 다나스는 제주도 서쪽해상으로 북상하여 진도 부근에서 열대저압부로 약화되면서, 많은 양의 수증기가 유입되어 7월 19일~21일 남부지방과 제주도를 중심으로 많은 비가 내렸다.

다. 8월 기상특성

폭염·열대야 지속, 강수량 적어 중부지방(동해안 제외) 기상가뭄
- 중반까지 북태평양고기압 영향으로 무더위, 이후 기압골 영향으로 무더위 꺾임
- 2018년보다는 낮았지만, 전국적 폭염과 열대야
- 강수는 지역적으로 편중되어 중부지방(강원·영동 제외) 기상가뭄
  [기온] 전국 평균기온은 26.2℃로 평년(25.1℃)보다 높았음
  [강수량] 전국 강수량은 140.7 ㎜로 평년(220.1~322.5 ㎜)보다 적었음

6월 초에는 평년대비 기온이 높았으나 장마가 7월 중순까지 지속되면서 상대적으로 낮은 기온을 보였다. 장마 종료 후 7월 후반부터 8월 중반까지 티벳고기압과 북태평양고기압이 우리나라 부근까지 발달하여 무더운 가운데, 낮 동안 강한 일사효과가 더해지면서 폭염이 지속되었다. 이 기간 동안 필리핀 해 부근에서는 높은 해수면 온도로 인해 대류활동이 활발함에 따라, 대기 순환으로 우리나라 부근에서 하강기류가 강하게 발달하면서 북태평양고기압이 우리나라까지 확장하는데 기여한 것으로 분석되었다(그림 3.1.21).

8월 전국 평균기온은 26.2℃로 평년의 25.1±0.5℃보다 높았으나, 2018년의 27.3℃ 대비 1.1℃ 낮았다. 8월 1~20일까지 우리나라는 북태평양고기압의 영향으로 무더위가 이어지다가, 21일 이후 기압골의 영향으로 찬 공기가 남하하면서 흐린 날이 많아져 무더위가 꺾였다. 특히,

5~6일에는 제8호 태풍 프란시스코가 일본 가고시마를 통과하여 북상하면서, 동풍기류가 유입되어 강한 일사에 동풍(Főhn) 효과까지 더해져 서쪽지방을 중심으로 폭염과 열대야가 더욱 강화되었다. 8월의 전국 평균 폭염일수는 9.2일로 경상도지역에서 주로 발생했다. 평년의 5.3일보다 3.9일 많았으나, 2018년의 14.3일 대비 5.1일 적었다.

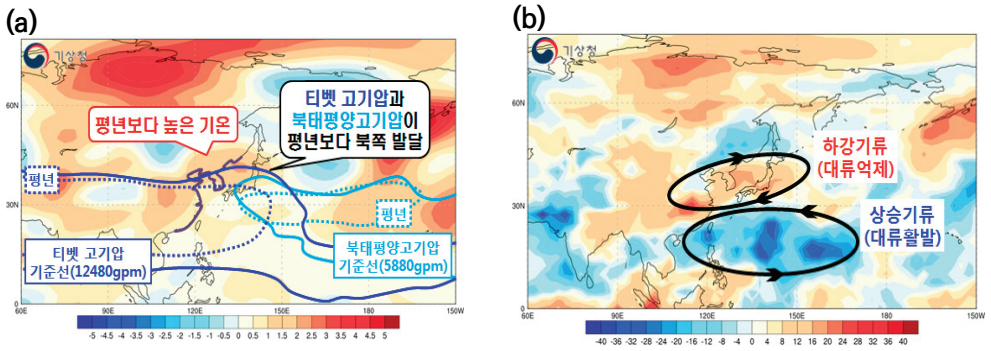


그림 3.1.21 2019년 7월 21일~8월 20일 기간의 200 hPa과 500 hPa 지위고도(2019년: 실선, 평년: 점선), 850 hPa 기온 편차(채색)(a), 지구장파복사 편차(b).

장마가 이례적으로 일찍 종료되었던 2018년보다 강수일수가 33.6일로 늘었다(2018년 27.1일). 8월에는 대기불안정으로 소낙성 강수가 자주 내렸고, 3개의 태풍(제8호 프란시스코, 제9호 레끼마, 제10호 크로사)이 연달아 북상하여 우리나라에 영향을 주었으나, 강수가 지역적으로 편중되면서 누적강수량은 매우 적었다(그림 3.1.22). 8월의 강수량은 140.7 ㎜로 2018년 8월 282.1 ㎜의 절반 수준이었고 평년(220.1~322.5 ㎜)보다도 적었다(그림 3.1.23). 8월 후반에는 한 차례의 기압골과 북태평양고기압이 약화되면서 형성된 정체전선의 영향으로 남부지방과 제주도를 중심으로 많은 비가 내렸다. 하지만 강수량이 적었던 중부지방(강원영동 제외)에서는 기상가뭄이 지속되었다.

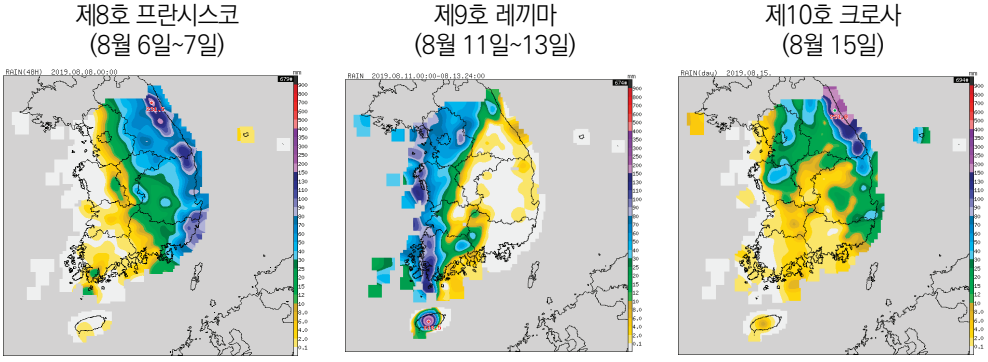


그림 3.1.22 2019년 8월 제8~10호 태풍 영향에 의한 누적 강수량(㎜) 분포도

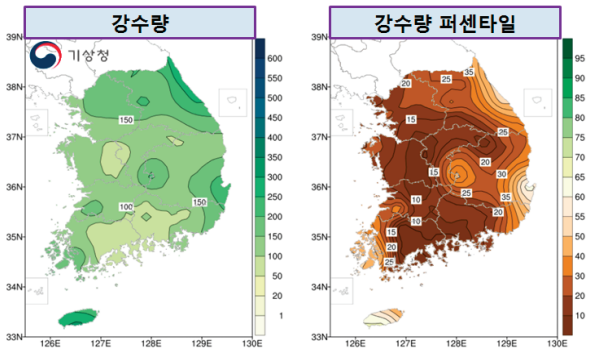


그림 3.1.23 2019년 8월 강수량(㎜)과 강수량 퍼센타일 분포도.

3.1.4 가을철(9~11월) 기상특성

기온이 높고 잦은 비, 역대 가장 많은 태풍 영향

- 북태평양고기압이 10월초까지 세력 유지, 이동성고기압 영향으로 높은 기온
- 정체전선, 3개 태풍의 영향으로 전국에 많은 비

시베리아기단이 발달하고 북태평양기단이 남쪽으로 물러나기 시작하는 8월 하순에서 9월 하순 사이에는 중국 만주지방에 위치하던 한대전선대가 한반도로 남하해서 가을비가 빈번하게 내리는데 시베리아기단은 빠르게 발달하므로 단기간에 끝나는 경향이 있어서 뚜렷이 드러나지 않는 해가 많다.

시베리아기단이 발달되나 아직 상층기류는 약해 기압계의 이동이 전반적으로 완만하여 시베리아기단에서 분리된 고기압이 한반도 부근을 통과할 무렵이면 온도가 크게 상승한다. 시베리아기단이 중국 화남지방으로 확장하고, 화남에서 변질된 이 기단이 상층 기압골에 뒤따르는 기압능에 연관되어 한반도로 이동할 때는 동서 고압대를 이루면서 지속적인 맑은 날씨를 가져와 천고마비(天高馬肥)의 계절이라고 한다. 가을공기는 고위도지방으로부터 이동해 오면서 가열되므로 대체로 건조하고, 대기중에 부유하는 먼지가 적어 깨끗하다.

가을에는 안개가 동해안을 제외한 한반도 전역에서 빈번하게 나타난다. 내륙지역은 지면의 복사냉각이 활발하므로 큰 일교차가 나타나서 복사안개가 많고, 해안지역에서는 해수면 온도가 높아 수면으로부터 증발이 잘 일어나고 습윤한 공기는 육지로 이동하여 야간에 냉각되면서 이류안개가 빈번하게 형성된다.

2019년 가을철은 북태평양고기압과 이동성 고기압의 영향이 잦아 기온이 높은 날이 많았다.

9월에는 북태평양고기압으로부터 따뜻하고 습한 공기의 유입과 낮 동안 강한 일사로 인해 기온이 높았고, 10월에는 대륙고기압이 때때로 확장하여 찬 공기가 유입되기도 했지만, 10월 초에는 북태평양고기압의 영향, 중순에는 이동성 고기압의 영향이 잦아 기온이 높은 날이 많았다. 11월에도 대기 상층에서 기압계의 동서 흐름이 대체로 원활한 가운데, 대륙고기압과 이동성 고기압의 영향을 주기적으로 받아 기온변화가 컸으나, 평년보다 기온이 높은 날이 많았다.

2019년 가을철에는 고온 다습한 북태평양고기압이 이례적으로 10월 초까지 세력을 유지하면서, 근대 기상업무를 시작한 1904년 이래 가장 많은 가을 태풍의 영향(3개)으로 전국에 많은 비를 내렸다. 특히 10월 초에는 북태평양고기압 가장자리를 따라 따뜻하고 습한 남풍 기류가 유입되는 가운데, 제18호 태풍 미탁이 북상하면서 남풍 기류가 더욱 강화되어 전국적으로 많은 비를 내렸다.

일반적으로 가을은 여름 기압계에서 겨울 기압계로 전환되는 시기로, 대체로 이동성 고기압의 영향을 받지만, 가을 초반에는 여름 기압계의 특성이 나타나기도 하며, 가을 후반에는 겨울 기압계의 특성이 나타나기도 한다. 9월까지 북태평양고기압이 발달해 있어 여름 기압계의 특징이 나타나며, 북태평양고기압이 일본 동쪽까지 확장된 상태가 유지된다. 10월에 북시베리아 지역에서는 영하의 기온이 나타나기 시작하고 북태평양고기압은 점차 약화되어 수축된다. 이 시기에는 우리나라 기후를 지배하는 뚜렷한 기압계가 없어 이동성 고기압의 영향을 주로 받는다. 11월에 점차 대륙이 냉각되어 대륙고기압이 발달하기 시작하면 겨울과 유사한 형태의 기압계 패턴을 보이며, 대륙고기압 및 알류샨 저기압의 발달로 북풍 계열 바람이 강해진다.

2019년 가을의 500 hPa 지위고도 분포도를 보면, 동서 기압계가 대체로 원활한 흐름 속에 베링해와 그린란드, 우랄산맥, 우리나라 부근은 평년보다 지위고도가 높았다. 또한 북태평양고기압(5880 gpm 지위고도)은 평년보다 북상하여 동서로 길게 발달하였고, 이로 인해 우리나라는 북태평양고기압 가장자리를 따라 북상한 가을 태풍의 영향을 이례적으로 많이 받았다. 하층(해면기압)은 상층(500 hPa 지위고도)과 유사한 지위고도 편차 분포를 보여 우리나라는 이동성 고기압의 영향을 주로 받아 평년보다 기온이 높았던 것으로 분석된다(그림 3.1.24).

ERA5 재분석 자료를 이용한 풍향, 풍속은 평년의 경우 겨울철 기압패턴의 영향을 받기 시작하여 북풍 계열이 바람이 우세하다. 풍속은 봄과 여름에 비해 증가하였으며, 특히 해상에서는 풍속이 아주 강하였고, 이는 평년에 비해 많은 태풍의 영향으로 분석된다.

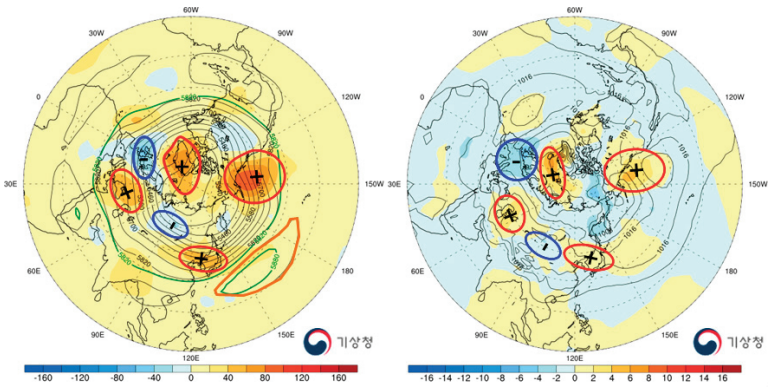


그림 3.1.24 2019년 가을철 북반구 500 hPa 지위고도 편차(왼쪽), 해면기압 편차 분포도(오른쪽) (출처: NCEP 재분석 자료).

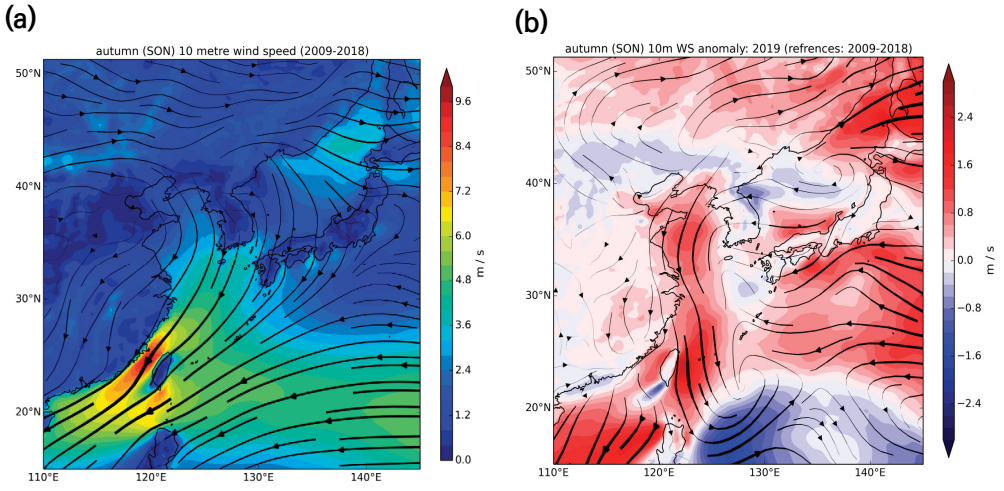


그림 3.1.25 ERA5 재분석자료 10년(2009~2018년) 가을철(9~11월) 평균 10 m 고도 풍속과 풍향 유선 (a)과 2019년 가을철 평균 10 m 고도 풍속과 풍향 유선편차(b) [단위 m/s].

가. 9월 기상특성

잦은 비, 역대 가장 많은 태풍 영향

- 덥고 습한 공기와 차고 건조한 공기로 인한 긴 정체전선과 3개의 태풍 영향
  [기온] 전국 평균기온은 21.8℃로 평년(20.5℃)보다 높았음
  [강수량] 전국 강수량은 221.2 ㎜로 평년(74.0~220.7 ㎜)보다 많았음

9월에는 따뜻하고 습한 북태평양고기압이 이례적으로 우리나라 부근까지 확장되면서 9월 전반에는 북쪽의 차고 건조한 공기와 만나 정체전선을 형성하여 비가 잦았다. 9월 1~11일에는 정체전선이 남해와 중부지방을 오르내리며 비가 길게 이어졌고, 특히 8~11일에는 남북으로 좁고 동서로 긴 띠 형태의 강수대가 형성되어 중부지방에 많은 비가 내렸다(그림 3.1.26).

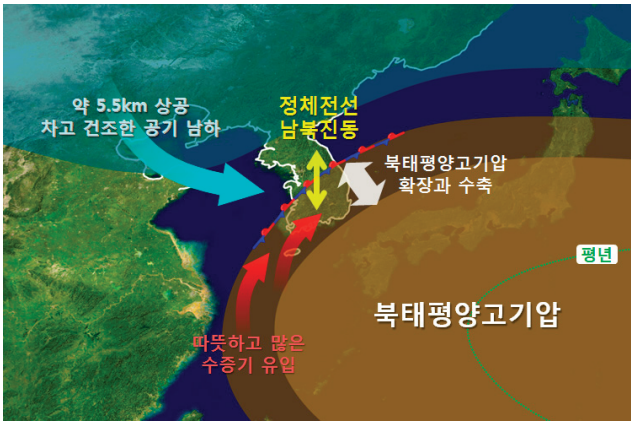


그림 3.1.26 2019년 9월 1~11일 우리나라 주변 기압계 모식도.

제13호 링링, 제17호 타파, 제18호 미탁 등 총 3개의 태풍이 우리나라에 영향을 주어 최근 4년 연속으로 9월에 태풍의 영향을 받았다. 특히 근대 기상업무를 시작한 1904년 이후 가장 많은 9월 영향 태풍 수를 기록하였다. 필리핀 동쪽 해상의 높은 해수면 온도(29℃)로 인해 상승기류가 강해지면서, 북태평양고기압 가장자리인 일본 부근에서 하강기류를 만들었으며 이로 인해 북태평양고기압이 평년에 비해 북서쪽으로 확장하여 우리나라는 태풍의 길목에 위치하게 되었다(그림 3.1.27).

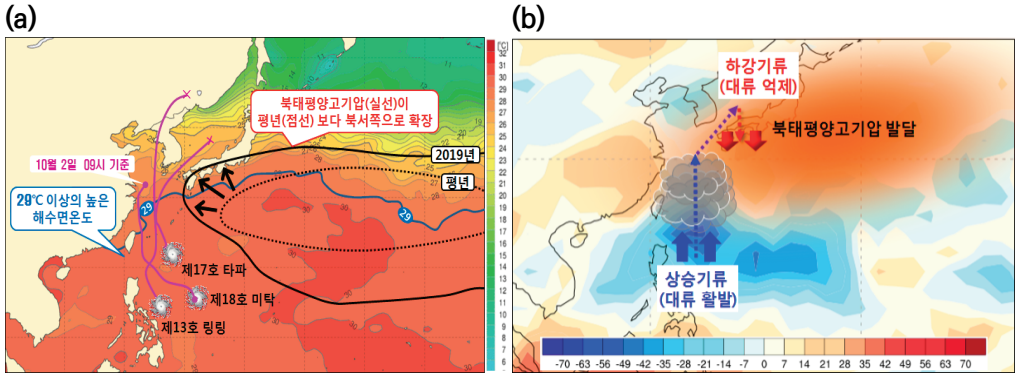


그림 3.1.27 2019년 9월 1일 해수면온도와 500 hPa 기압계(검정), 영향 태풍 경로(보라)(a), 9월 지구 장파복사 편차(채색)와 대기순환 모식도(b).

9월 대부분은 북태평양고기압으로부터 따뜻하고 습한 공기의 유입과 낮 동한 강한 일사로 인해 기온이 높았다. 그러나 9월 1~3일과 19~25일은 상층 찬 공기의 유입으로 기온이 낮기도 하였으나, 5~7일 서해상으로 북상한 제13호 태풍 링링과 8~11일 저기압, 26~30일 동해상에 위치한 고기압의 영향으로 남풍 기류가 강화되었고, 15~16일은 강한 일사와 동풍으로 인한 푄(Föhn) 현상으로 동해안을 제외한 전국 대부분의 기온이 크게 올랐다(그림 3.1.28).

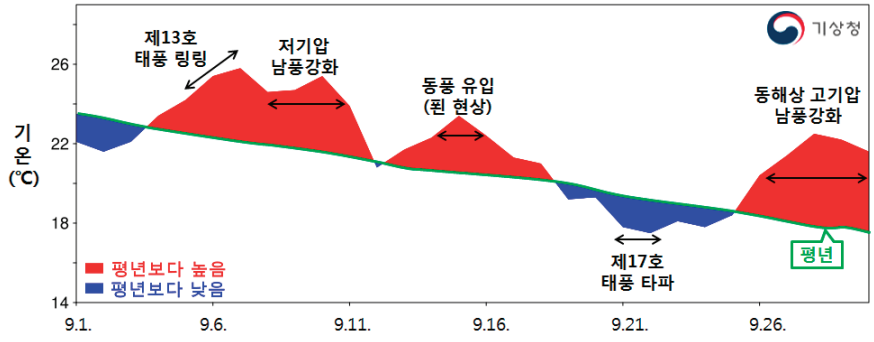


그림 3.1.28 2019년 9월 평균기온 일변화 시계열.

나. 10월 기상특성

태풍 미탁으로 전국에 많은 비, 10월 강수량 역대 1위

- 10월초 태풍 미탁에 의한 강수가 10월 총 강수량의 86% 차지
- 평균기온 역대 4위, 남풍 기류의 영향으로 기온이 높은 날이 잦았음

  [기온] 전국 평균기온은 15.8℃로 평년(14.3℃)보다 높았음

  [강수량] 전국 강수량은 169.0 ㎜로 평년(33.1~50.8 ㎜)보다 많았음

북태평양고기압이 10월 초까지 세력을 유지하면서, 10월 1일~3일은 9월 말에 발생한 제18호 태풍 미탁의 영향으로 전남 해안과 동해안 지역을 중심으로 많은 비가 내려 일강수량이 최다 1위를 기록한 곳이 많았다(그림 3.1.29). 10월에는 4개의 태풍이 발생하였으나, 북태평양고기압이 크게 수축하면서 3개의 태풍은 일본으로 진행하고, 1개는 베트남으로 이동하여 우리나라에는 영향이 없었다. 태풍 미탁의 통과 후 4일부터 찬 공기가 때때로 유입되면서 강수가 잦았으나 강수량은 적었다. 하지만 태풍 미탁의 영향으로 10월 전국 강수량 169.0 ㎜로 평년의 33.1~50.8 ㎜보다 매우 높았다(그림 3.1.30).

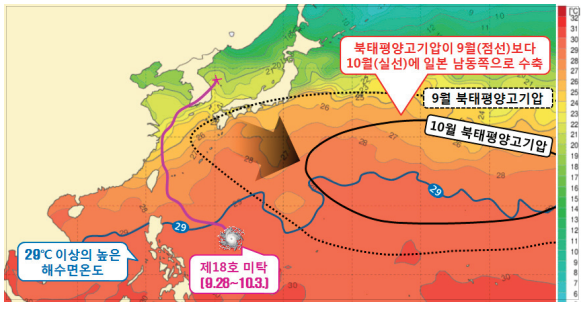


그림 3.1.29 2019년 10월 18일 해수면온도와 500 hPa 기압계(검정색), 태풍 '미탁' 경로(보라색).

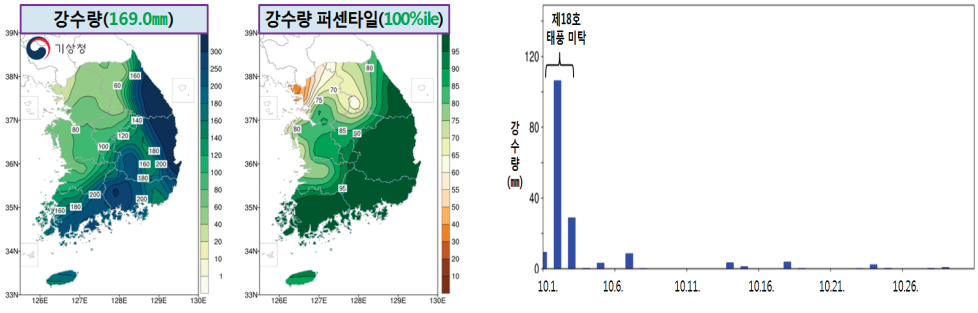


그림 3.1.30 2019년 10월 강수량 및 강수량 퍼센타일 분포도, 강수량 시계열
(※ 분포도는 전국 45개 지점과 제주도 2개 지점).

기온의 경우 대륙고기압이 때때로 확장하여 찬 공기가 유입되기도 했지만, 1~4일에는 북태평양 고기압 가장자리를 따라 따뜻하고 습한 남풍 기류가 유입되는 가운데, 태풍 미탁이 북상하면서 남풍 기류가 더욱 강화되어 전국적으로 기온이 매우 높았다. 중순 이후에도 이동성 고기압의 영향이 잦아 기온이 높은 날이 많았다(그림 3.1.31). 2019년 10월의 전국 평균기온은 15.8℃로 평년의 14.3±0.4℃보다 높았다. 첫서리는 10월 27일 서울, 수원, 북춘천, 28일 안동에서 관측되었으며, 서울의 경우 작년보다 15일 늦었고, 평년보다 1일 늦었고, 첫얼음은 10월 30일 북춘천에서 관측되어 작년과 동일하였다.

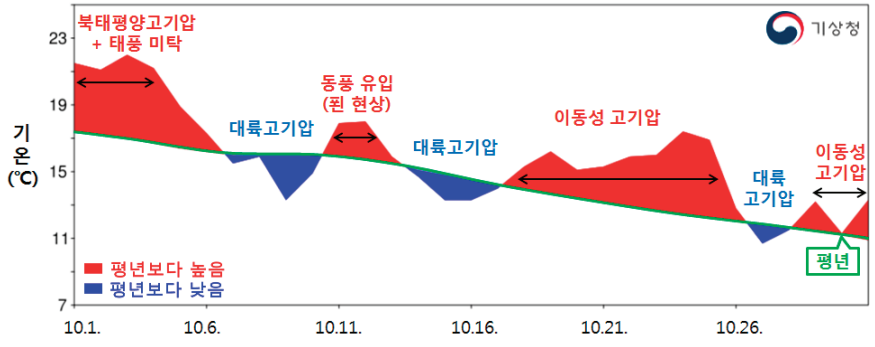


그림 3.1.31 2019년 10월 평균기온 일변화 시계열.

다. 11월 기상특성

대륙고기압과 이동성 고기압의 주기적 영향, 큰 기온 변화

- 평년에 비해 온화하였으나, 중순 이후 북쪽 찬공기 영향으로 잦은 비와 첫눈
  [기온] 전국 평균기온은 8.8℃로 평년(7.6℃)보다 높았음
  [강수량] 전국 강수량은 58.2 ㎜로 평년(22.8~55.8 ㎜)보다 많았음

11월은 대기 상층에서 동서 기압계의 흐름이 대체로 원활한 가운데, 대륙고기압과 이동성 고기압의 영향을 주기적으로 받아 기온변화가 컸다. 상순에는 이동성 고기압의 영향을 받으면서 평년에 비해 높은 기온으로 시작되었다. 7일 이후 중순에 3차례에 걸쳐 찬 공기를 동반한 대륙고기압의 확장으로 큰 기온 변화를 보였다. 15~17일에는 우리나라에 저기압이 통과하면서 남풍의 영향으로 기온이 올랐고, 하순에 다시 이동성 고기압의 영향을 받으면서 평년보다 기온이 높은 날이 우세하였다(그림 3.1.32).

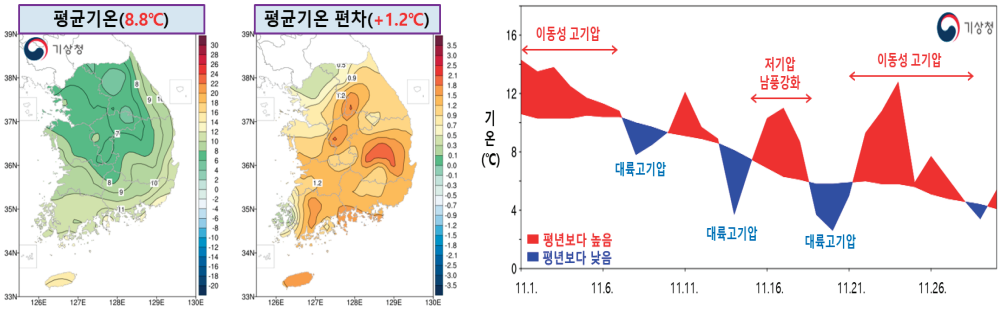


그림 3.1.32 2019년 11월 평균기온과 편차 분포도 및 일변화 시계열.

강수의 경우 상순과 하순에는 동풍의 유입으로 동해안 지역에 비가 내렸고, 중순과 하순에는 북쪽 찬 공기의 영향을 주기적으로 받아 중부지방을 중심으로 비가 자주 내렸다(그림 3.1.33). 특히, 15일 새벽과 18일 밤~19일 새벽에는 기온이 빠르게 떨어져 중부 일부 지역에 눈이 기록되었다. 첫눈 기록은 11월 15일 서울과 북춘천을 시작으로 18~19일 백령도, 인천, 수원, 청주 등 중부지방에서 관측되었으며, 서울의 경우 2018년보다 9일, 평년보다 6일 빨리 내린 것으로 분석되었다.

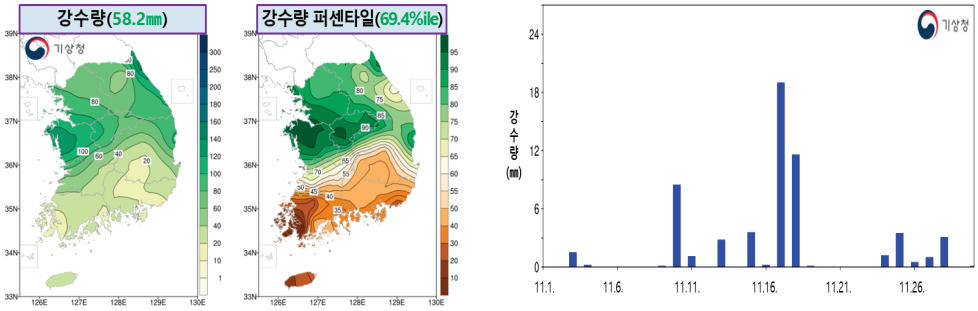


그림 3.1.33 2019년 11월 강수량(㎜)과 강수량 퍼센타일 분포도.

3.1.5 12월 기상특성

온화했지만 기온변화 컸고, 잦은 비·눈에도 적설 최소 1위

- 시베리아 고기압 평년보다 약했고, 한반도 남동쪽에 고기압 지속
  [기온] 전국 평균기온은 2.8℃로 평년(1.5℃)보다 높았음
  [강수량] 전국 강수량은 26.3 ㎜로 평년(16.6~28.5 ㎜)과 비슷

12월 전반과 말에 세 차례 한파 특보가 발표되는 추위가 있었으나, 전반적으로 따뜻한 남서기류가 자주 유입되면서 평년보다 기온이 높은 날이 많았다. 12월 전국 평균기온은 2.8℃로 평년의 1.5±0.5℃보다 1.3℃ 높았다. 이는 시베리아 부근의 기온이 평년보다 높아 북쪽의 찬 공기를 몰고 오는 시베리아 고기압의 강도가 평년에 비해 약했기 때문이다(그림 3.1.34a). 또한, 열대 서태평양의 해수면 온도가 평년보다 1℃ 내외로 높아 우리나라 남동쪽에 따뜻하고 습한 고기압이 강도를 유지하면서 북쪽 찬 공기가 한반도로 깊숙이 내려오는 것을 막는 역할을 한 것도 하나의 요인이다(그림 3.1.34b).

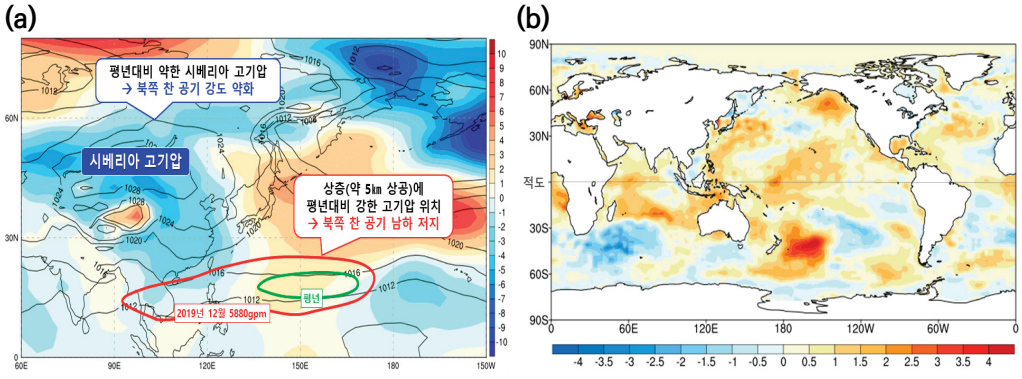


그림 3.1.34 2019년 12월 10~30일 해면기압 편차(채색)와 500 hPa 5880 gpm 고도선(빨강: 2019년 12월, 녹색: 평년)(a), 12월 15~21일 해수면 온도 편차(b).

12월에는 기압골의 영향이 잦아 강수 현상이 자주 나타났으나, 우리나라 주변의 기온이 평년보다 높았고, 약한 시베리아 고기압으로 인해 서해상에서 해기차(해수면과 대기의 온도차)에 의한 눈구름대의 생성이 약해 눈보다는 주로 비가 내려, 12월 적설이 최소 1위를 기록한 지점이 많았다.

3.2 기후변화감시소 기상특성

안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시소는 자동기상관측 장비(Automatic Weather System, AWS)로 기상요소를 관측하고 있다. 각 감시소의 2019년 풍향, 풍속, 기온과 습도를 최근 10년(2009~2018년)간 관측된 자료와 함께 비교하여 분석하였다.

3.2.1 풍향

최근 10년(2009~2018년)과 유사한 경향
[안면도] 북서풍의 빈도 증가(봄·겨울), 겨울철 북동풍 빈도 감소
[고 산] 과거와 달리 모든 계절에 북동풍이 강세
[울릉도] 북동풍과 남서풍이 주풍, 여름·가을철 북동풍의 빈도 증가

각 감시소의 2019년 월별 풍향과 풍속, 그리고 최근 10년(2009~2018년)의 월별 평균 풍향, 풍속을 바람장미로 그림 3.2.1~3.2.3에 나타내었다. 바람장미는 방위별 풍향의 출현빈도와 풍향별 풍속계급 빈도를 나타낸다.

가. 안면도 기후변화감시소

2009~2018년까지 안면도에서 최근 10년간 관측된 풍향은 1~3월은 북동풍-북풍-북서풍 계열의 빈도가 높다가 4월부터 8월까지 북서풍의 빈도가 점차 감소하고 남서풍-남풍 계열로 풍계가 바뀐 후 9월 이후 다시 북동풍-북풍 계열의 빈도가 증가하는 모습을 보였다. 2019년 안면도의 풍계는 최근 10년과 달리 1~3월은 북서풍 계열의 빈도가 높았으나, 3.1절의 겨울과 봄철 기상특성의 ERA5 재분석 자료 결과에서 보인 바와 같이 풍속은 최근 10년보다 감소한 경향을 보였다. 4월은 북동풍-북서풍-서풍-남서풍 기류의 빈도가 골고루 나타나 뚜렷한 주풍이 없었으며, 1~3월에 이어서 풍속도 여전히 약하였다. 5~6월은 남서풍-북서풍 계열의 빈도가 높았고, 풍속은 최근 10년보다 상대적으로 약했다. 이는 북태평양고기압 발달이 늦었던 2019년 특성이 반영된 결과로 판단된다. 7월의 경우 북태평양고기압의 영향권에 들면서 늦더위가 시작되었고, 이로 인해 남풍-남서풍 영향의 빈도가 증가하였다. 또한 제5호 태풍 다나스의 영향으로 다른 계절에 비해 풍속이 증가하였으나 10 m/s 이상의 풍속 빈도는 최근 10년 대비 줄어든 경향을 보였다. 9월과 10월은 제17호 태풍 타파가 대한해협을 통과하고, 제18호 태풍이 남서해안에 상륙하면서 안면도에는 동풍-북동풍의 빈도가 증가하였고, 11월과 12월에는 점차 겨울철 기압패턴인 시베리아고기압이 영향권에 들면서 북풍-북서풍 계열 바람의 빈도가 증가하였다.

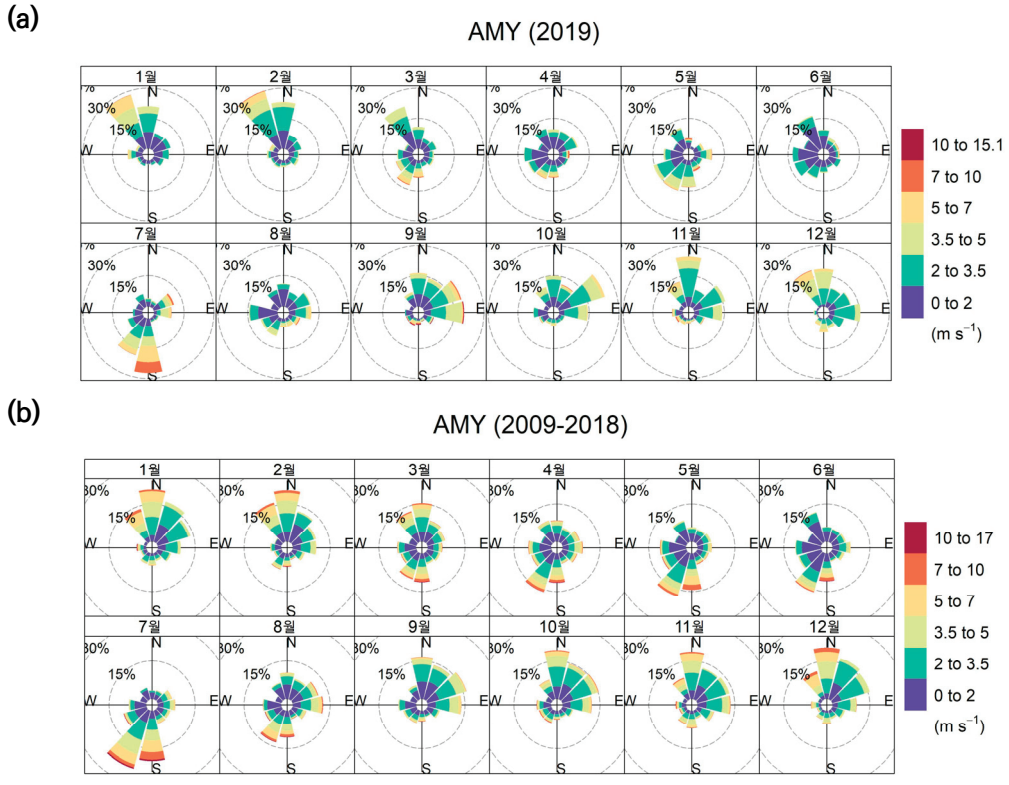
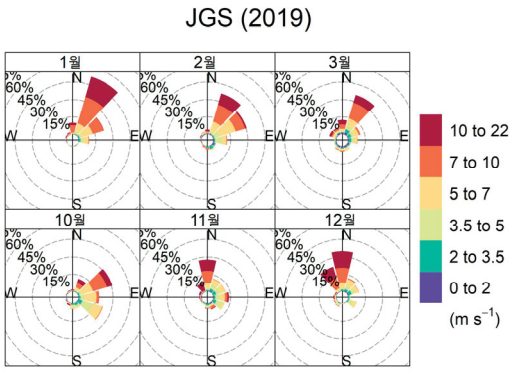


그림 3.2.1 2019년 안면도(AMY)에서 관측된 풍향·풍속(a)과 최근 10년(2009~2018년)간 평균 풍향·풍속(b).

나. 고산 기후변화감시소

2009~2018년까지 최근 10년간 고산에서 관측된 풍향의 경우 1~3월에는 북서-북풍 계열의 빈도가 높다가 4월부터 8월까지 북서-북풍의 빈도가 점차 감소하고 남동풍 계열로 풍계가 바뀐 후 9월과 10월은 북서-북풍-북동풍의 빈도가 증가하며, 11월과 12월은 강한 북서풍으로 바뀌는 모습을 보였다. 2019년은 4월부터 9월까지 고산에 설치된 풍향·풍속계의 품질저하 및 장애가 발생하여, 이 기간의 자료는 분석에서 제외하였다. 2019년 고산은 최근 10년과 매우 다른 풍계가 형성되었다. 1~3월 북동풍의 빈도가 높았다. 하지만 풍속은 최근 10년에 비하여 약하게 불었는데, 이는 시베리아 고기압 세력의 약한 영향권, 잦은 이동성 고기압의 영향으로 판단되며, 3.1절 그림 3.1.2b에서 보인 바와 같이 남부지방과 제주지역에 풍향은 동풍 편차, 풍속은 음의 편차가 있었던 ERA5 재분석 자료 10 m 바람장 결과와도 일치하는 결과이다. 10월에는 북동-동풍-남동풍 계열의 기류가 많았고, 11월과 12월은 겨울철 기압패턴의 영향으로 북풍-북서풍 계열의 기류 빈도가 증가하였다.

(a)



(b)

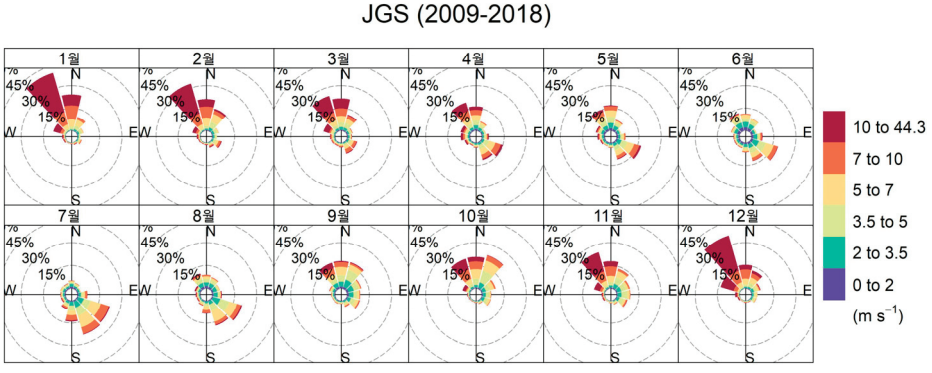
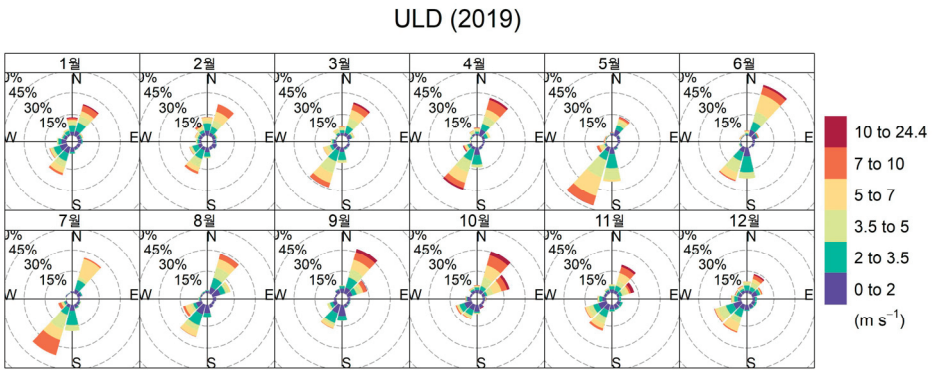


그림 3.2.2 2019년 고산(JGS)에서 관측된 풍향·풍속(a)과 최근 10년(2009~2018년)간 평균 풍향·풍속(b).

다. 울릉도독도 기후변화감시소

2009~2018년까지 최근 10년간 울릉도에서 관측된 풍향은 북서풍과 남동풍 계열의 풍계의 빈도는 매우 작고, 북동풍과 남서풍이 주풍을 형성했다. 그 중 4~7월과 11~12월은 남서풍의 빈도가 좀 더 많았고, 8월은 북동풍과 남서풍의 빈도가 유사하였으며, 1~3월과 9~10월은 북동풍의 빈도가 상대적으로 좀 더 많았다. 2019년에도 울릉도에서 관측된 풍계는 북동풍과 남서풍이 주풍을 이루어 최근 10년간 관측된 경향과 유사하였으나, 6월, 8월과 11월의 경우 북동풍 계열의 빈도가 증가했고, 1~3월은 북동풍과 남서풍의 빈도가 유사하였다. 8~11월은 과거보다 북동풍의 빈도가 증가하였다. 특히 9월과 10월은 태풍의 영향으로 북동풍 계열의 빈도가 많이 증가하였으며, 풍속 또한 강하였다.

(a)



(b)

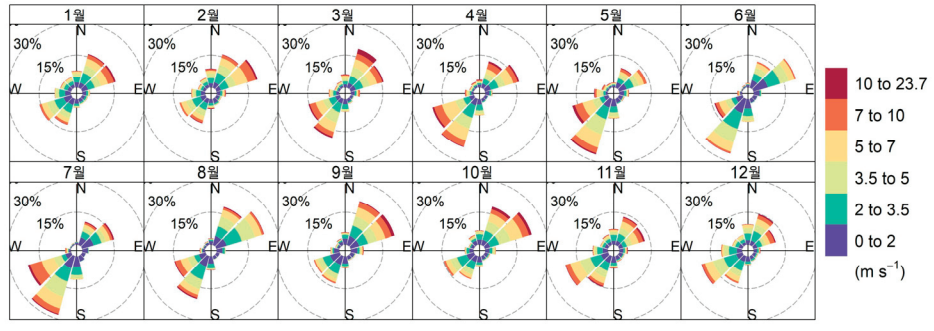


그림 3.2.3 2019년 울릉도(ULD)에서 관측된 풍향·풍속(a)과 최근 10년(2009~2018년)간 평균 풍향·풍속(b).

3.2.2 풍속

안면도, 울릉도 평년에 비해 풍속 약화

[안면도] 봄, 여름, 겨울철은 풍속 감소, 가을 풍속 증가

[고 산] 겨울철(2월) 평년에 비해 풍속 감소 8.4 m/s → 6.7 m/s

[울릉도] 1~3월 평년에 비해 풍속 감소, 7월, 10월 태풍의 영향으로 풍속 증가

가. 안면도 기후변화감시소

그림 3.2.4는 2009~2019년 기간 동안 안면도 감시소에서 관측된 풍속의 연변화이며, 표 3.2.1과 그림 3.2.5는 월평균 값이다. 2010년의 경우 평균 풍속이 2.0 m/s로 다른 해에 비해 풍속이 약했으나, 2012년 풍속이 3.2 m/s로 증가한 이후 2019년까지 평균 풍속은 유사한 수준으로 나타났다. 2019년 안면도의 연평균 풍속은 2.7 m/s로 최근 10년간 평균인 2.8 m/s보다

0.1 m/s 약하게 관측됐다.

안면도에서 관측된 풍속을 월별로 살펴보면 2019년의 1~4월은 3.1절의 ERA5 재분석 자료 결과와 동일하게 풍속이 약했던 것으로 분석되며, 7월은 앞 절에서 보인 바와 같이 제5호 태풍 다나스의 영향을 받아 강한 남풍이 불었으며, 9월은 우리나라에 영향을 주었던 제13호 태풍 링링, 제17호 태풍 타파, 제18호 태풍 미탁의 영향으로 남풍계열의 바람 빈도는 감소하였으나, 8 m/s 이상 바람의 빈도가 증가하여 최근 10년 평균보다 풍속이 강했던 것으로 분석되었다. 그 외의 기간은 최근 10년과 유사하였다.

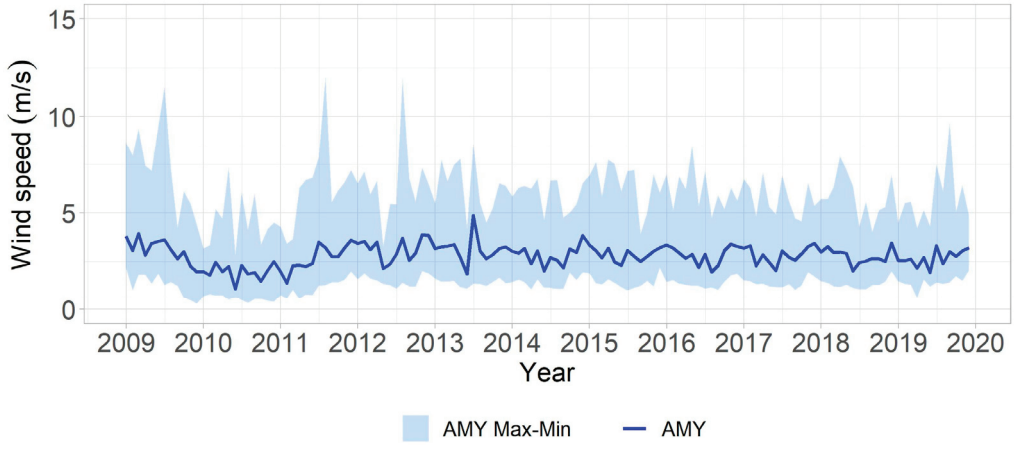


그림 3.2.4 2009~2019년까지 안면도(AMY)에서 관측한 풍속의 연변화.

표 3.2.1 안면도의 월평균 풍속(2009~2019년)

[단위: m/s]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	3.8	3.1	3.9	2.8	3.4	3.5	3.6	3.1	2.6	3.0	2.3	2.0	3.1
2010	2.0	1.8	2.5	2.0	2.2	1.1	2.3	1.9	1.9	1.5	2.0	2.5	2.0
2011	2.0	1.4	2.3	2.3	2.2	2.4	3.5	3.2	2.8	2.7	3.2	3.6	2.6
2012	3.4	3.5	3.1	3.5	2.1	2.4	2.9	3.7	2.6	2.9	3.9	3.8	3.2
2013	3.2	3.3	3.3	3.4	2.7	1.9	4.9	3.1	2.6	2.9	3.2	3.3	3.1
2014	3.0	2.9	3.2	2.4	3.1	2.0	2.7	2.6	2.2	3.2	3.0	3.8	2.8
2015	3.4	3.0	2.7	3.2	2.5	2.3	3.1	2.8	2.5	2.8	3.0	3.2	2.9
2016	3.4	3.2	2.9	2.7	2.9	2.2	2.9	2.0	2.3	3.0	3.4	3.3	2.8
2017	3.2	3.3	2.3	2.9	2.5	2.0	3.0	2.7	2.6	2.9	3.3	3.4	2.8
2018	3.0	3.3	3.0	3.0	2.9	2.0	2.4	2.5	2.7	2.6	2.5	3.5	2.8
2019	2.6	2.5	2.6	2.2	2.7	1.9	3.3	2.4	3.0	2.8	3.0	3.2	2.7

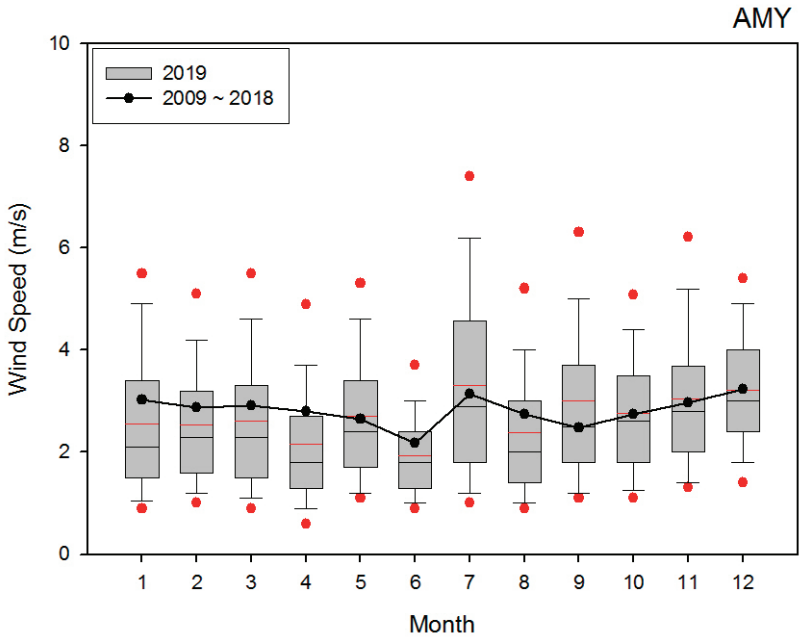


그림 3.2.5 2019년 안면도(AMY)의 풍속 월변화(m/s). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

나. 고산 기후변화감시소

그림 3.2.6은 2009~2019년 동안 고산 감시소에서 관측된 풍속의 연변화이며, 표 3.2.2와 그림 3.2.7은 월평균 값이다. 2010년은 평균 풍속이 7.1 m/s로 다른 해에 비해 풍속이 높아 최댓값을 나타냈으나, 2012년부터 풍속이 약해져 2018년은 6.3 m/s까지 낮아졌다. 고산의 2019년 연평균 풍속 7.0 m/s는 3.2.1절에서 언급했듯이 풍향·풍속계의 장애로 인하여 풍속이 약한 4~9월까지 여름철 자료가 제외되었기에 풍속이 다소 높게 나타났다.

고산에서 관측된 풍속을 월별로 살펴보면 2019년의 1~3월은 풍속이 ERA5 재분석 자료 결과와 유사하게 최근 10년간 평균보다 약했던 것으로 분석되었다. 10~12월에도 최근 10년과 유사하긴 하나 조금 약했던 것으로 분석된다.

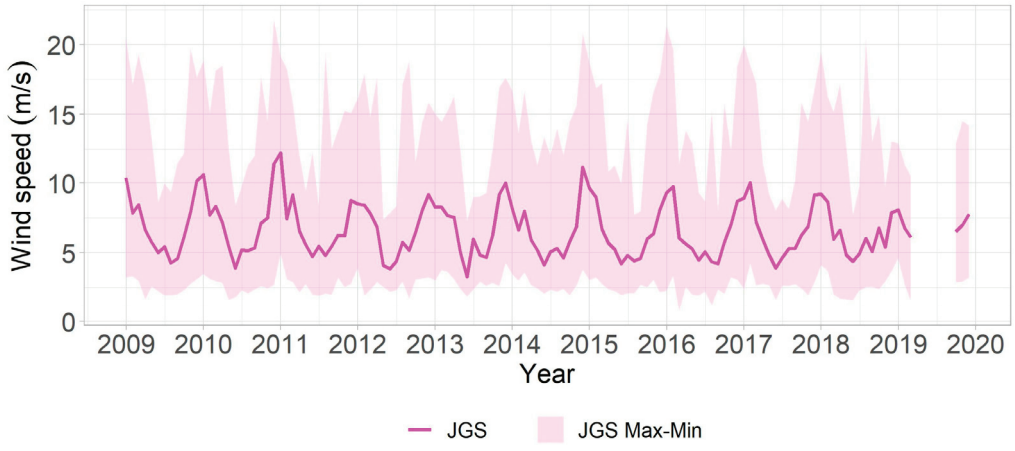


그림 3.2.6 2009~2019년까지 고산(JGS)에서 관측한 풍속의 연변화.

표 3.2.2 고산의 월평균 풍속(2009~2019년)

[단위: m/s]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	10.4	7.8	8.5	6.6	5.8	5.0	5.4	4.3	4.6	6.1	7.9	10.1	6.9
2010	10.6	7.7	8.3	7.1	5.5	3.9	5.2	5.2	5.3	7.1	7.5	11.4	7.1
2011	12.2	7.4	9.1	6.6	5.6	4.7	5.5	4.8	5.5	6.2	6.2	8.8	6.9
2012	8.5	8.4	7.8	6.9	4.1	3.8	4.4	5.7	5.2	6.4	8.1	9.2	6.5
2013	8.3	8.3	7.7	7.5	5.0	3.3	6.0	4.8	4.7	6.2	9.2	10.0	6.7
2014	8.2	6.6	8.0	5.9	5.2	4.1	5.1	5.3	4.6	5.8	6.9	11.1	6.4
2015	9.6	9.0	6.7	5.7	5.3	4.2	4.8	4.4	4.6	6.0	6.4	8.1	6.2
2016	9.3	9.7	6.1	5.6	5.3	4.5	5.0	4.4	4.2	5.7	7.0	8.7	6.3
2017	8.9	10.0	7.2	5.9	4.8	3.9	4.6	5.3	5.3	6.2	6.9	9.2	6.5
2018	9.2	8.6	6.0	6.6	4.9	4.4	4.9	6.0	5.1	6.7	5.4	7.9	6.3
2019	8.1	6.7	6.1	–	–	–	–	–	–	6.5	7.0	7.8	7.0

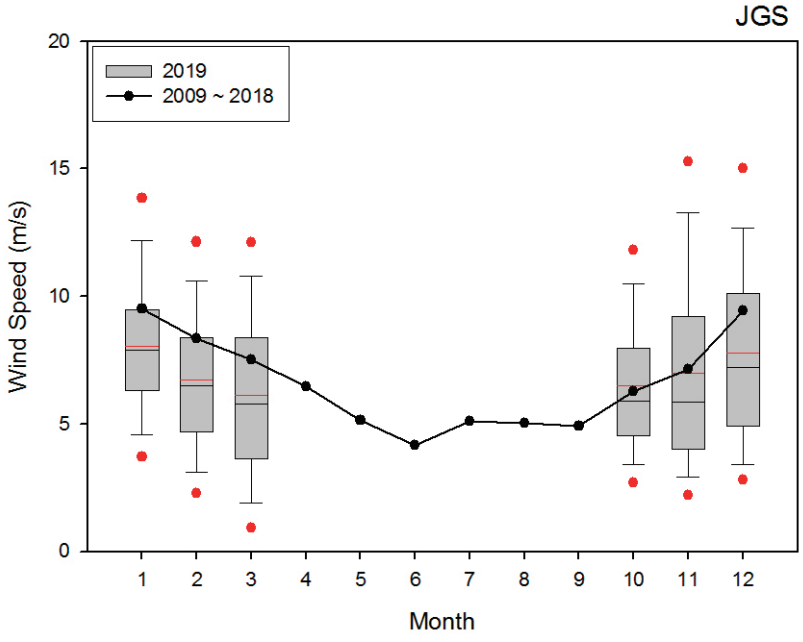


그림 3.2.7 2019년 고산(JGS)의 풍속 월변화(m/s). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

다. 울릉도독도 기후변화감시소

그림 3.2.8은 2009~2019년 동안 울릉도독도 감시소에서 관측된 풍속의 연변화이며, 표 3.2.3과 그림 3.2.9는 월평균 값이다. 2019년 평균 풍속은 3.9 m/s로 평균 풍속이 3.6 m/s로 낮았던 2009년을 제외한 2010~2018년까지의 연평균 풍속 4.0 m/s와 유사한 수준으로 관측되었다.

울릉도에서 관측된 풍속을 월별로 살펴보면 안면도와 유사하게 1~3월은 풍속이 약했고, 7월은 제5호 태풍 다나스의 영향을 받아 풍속이 강했다. 10월 풍속이 강하였는데 이는 3.1절 10월 기상특성에서 설명하였듯이 4개 태풍의 영향을 받았고, 북태평양고기압이 크게 수축하면서 3개의 태풍이 일본으로 진행하는데, 그 간접적인 영향으로 볼 수 있다. 그 외의 기간은 최근 10년과 유사하였다.

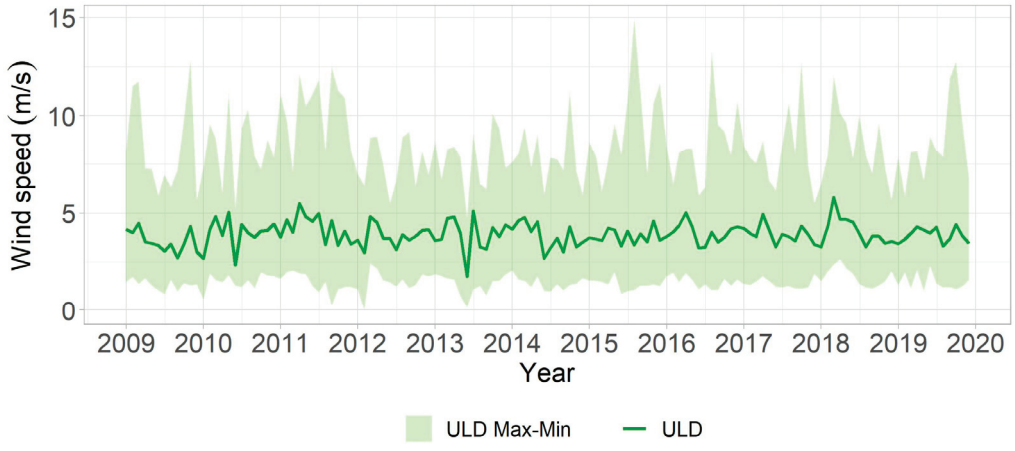


그림 3.2.8 2009~2019년까지 울릉도(ULD)에서 관측한 풍속의 연변화.

표 3.2.3 울릉도의 월평균 풍속(2009~2019년)

[단위: m/s]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	4.2	4.0	4.5	3.5	3.5	3.4	3.0	3.4	2.7	3.4	4.3	3.0	3.6
2010	2.7	4.2	4.8	3.8	5.0	2.3	4.4	4.0	3.7	4.1	4.1	4.4	4.0
2011	3.8	4.7	4.0	5.5	4.8	4.6	5.0	3.4	4.6	3.4	4.1	3.4	4.3
2012	3.6	3.0	4.8	4.5	3.7	3.7	3.1	3.9	3.6	3.8	4.1	4.2	3.8
2013	3.6	3.6	4.7	4.8	4.0	1.8	5.1	3.3	3.1	4.3	3.8	4.4	3.9
2014	4.2	4.6	4.8	4.1	4.6	2.7	3.2	3.7	3.0	4.3	3.3	3.5	3.8
2015	3.7	3.7	3.6	4.2	4.1	3.3	4.1	3.4	3.9	3.5	4.6	3.6	3.8
2016	3.8	4.0	4.4	5.0	4.3	3.2	3.3	4.0	3.5	3.7	4.2	4.3	4.0
2017	4.2	3.9	3.8	4.9	4.1	3.3	3.9	3.8	3.6	4.3	3.9	3.4	3.9
2018	3.3	4.3	5.8	4.7	4.7	4.5	3.9	3.3	3.8	3.8	3.4	3.5	4.1
2019	3.4	3.7	4.0	4.3	4.1	4.0	4.3	3.3	3.7	4.4	3.8	3.4	3.9

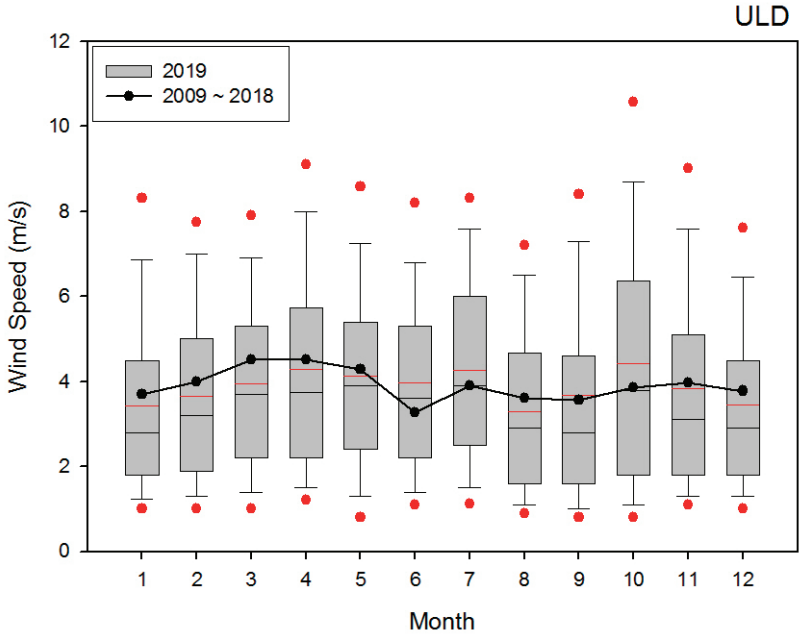


그림 3.2.9 2019년 울릉도(ULD)의 풍속 월변화(m/s). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

3.2.3 기온

안면도, 고산, 울릉도독도 감시소 모두 겨울철 평균 기온 증가

[안면도] 겨울철 평균 기온이 2.5℃를 기록하여 평년보다 1.8℃ 증가

[고 산] 겨울철 평균 기온이 7.8℃를 기록하여 평년보다 1.1℃ 증가

[울릉도] 겨울철 평균 기온이 4.4℃를 기록하여 평년보다 2.2℃ 증가

가. 안면도 기후변화감시소

그림 3.2.10은 2009~2019년 동안 안면도 감시소의 기온 연변화이며, 표 3.2.4와 그림 3.2.11은 월평균 값이다. 2019년 안면도 감시소의 연평균 기온은 13.2℃로 관측되어 2009년부터 2019년까지 중에서 기온이 가장 높았다. 특히 겨울철인 1월, 2월과 12월에 월평균 기온이 각각 최근 10년 평균대비 2.0℃, 0.8℃, 2.7℃ 높아 연평균 기온 상승에 크게 기여하였다.

안면도에서 관측된 기온을 월별로 살펴보면 2019년 8월은 3.1절의 8월 기상특성에 언급된 바와 같이 티벳고기압과 북태평양고기압이 우리나라 부근까지 발달하여 무더운 가운데, 낮동안 강한 일사효과가 더해지면서 폭염이 지속되어 최근 10년 평균이 25.2℃보다 1.0℃ 높은 26.2℃의 평균 기온을 나타냈다. 하지만 여름철(6~8월)의 평균 기온은 22.9℃로 최근 10년 평균인 22.9℃와 동일하여 2019년은 1~3월과 늦더위가 이어진 8월부터 가을, 겨울철 기온이 높아 연평균 기온이 1℃ 상승한 것으로 분석되었다.

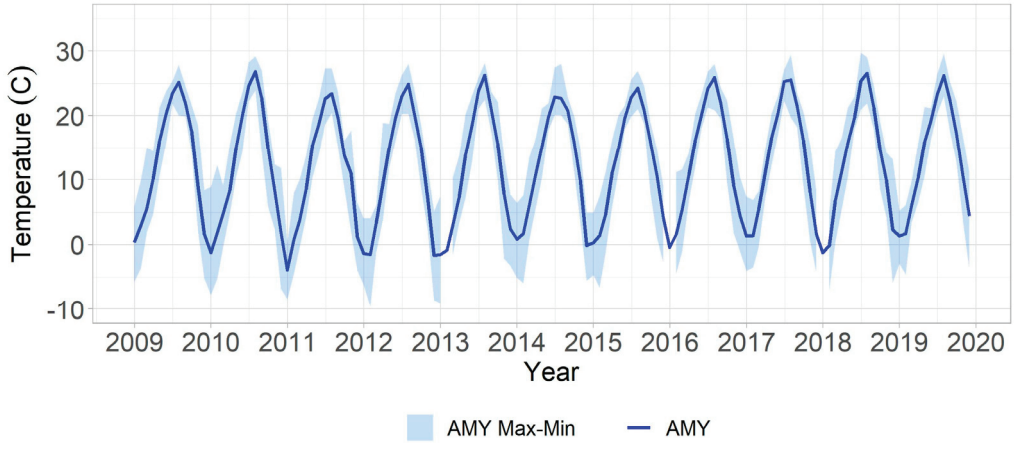


그림 3.2.10 2009~2019년까지 안면도(AMY)에서 관측한 기온의 연변화.

표 3.2.4 안면도의 월평균 기온(2009~2019년)

[단위:℃]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	0.4	3.0	5.6	10.1	16.0	20.3	23.5	25.2	22.0	17.5	9.0	1.7	12.8
2010	-1.2	1.8	4.8	8.4	15.0	20.0	24.6	26.8	22.7	14.9	8.3	1.9	12.3
2011	-3.9	0.9	3.6	8.5	15.4	18.6	22.6	23.4	19.6	13.7	11.0	1.2	11.2
2012	-1.4	-1.5	3.3	9.3	15.0	19.6	23.0	24.9	20.0	15.0	7.1	-1.6	11.1
2013	-1.5	-0.9	3.1	7.3	13.8	18.6	23.9	26.3	20.8	15.6	7.8	2.4	11.4
2014	0.8	1.7	6.0	10.7	15.1	19.8	22.9	22.7	20.8	15.9	9.9	-0.2	12.2
2015	0.3	1.4	4.6	11.1	14.9	19.6	22.8	24.3	20.9	15.9	10.5	4.1	12.5
2016	-0.4	1.6	5.5	10.8	16.1	20.1	24.2	25.9	21.9	16.4	9.0	4.4	13.0
2017	1.3	1.4	5.3	11.1	16.5	20.2	25.3	25.6	21.5	16.1	8.1	1.6	12.8
2018	-1.2	-0.2	6.8	11.2	15.7	19.7	25.4	26.6	21.2	14.7	9.9	2.3	12.7
2019	1.4	1.7	6.0	10.4	15.8	19.2	23.2	26.2	22.2	17.2	10.4	4.5	13.2

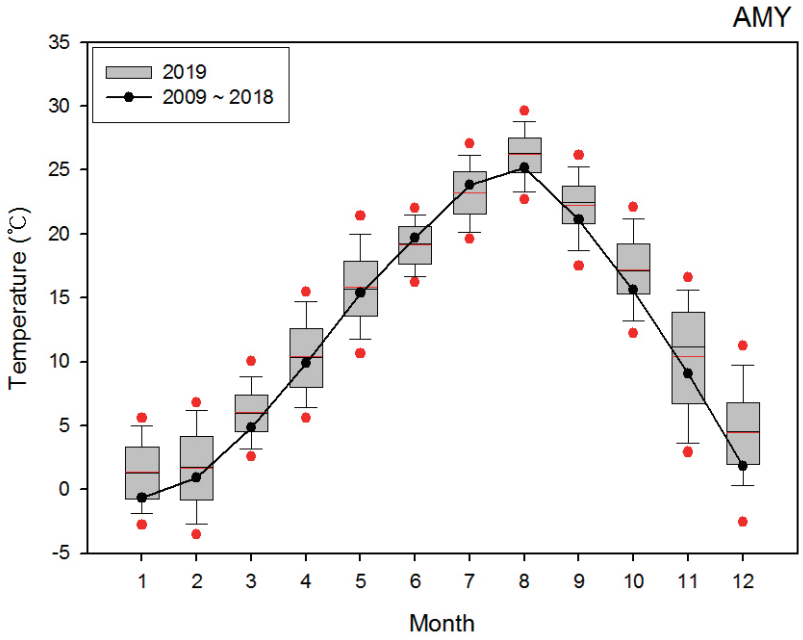


그림 3.2.11 2019년 안면도(AMY)의 기온 월변화(℃). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

나. 고산 기후변화감시소

그림 3.2.12는 2009~2019년 동안 고산 감시소의 기온 연변화이며, 표 3.2.5와 그림 3.2.13은 월평균 값이다. 2019년 고산 감시소의 연평균 기온은 16.2℃로 최근 10년간의 평균기온인 15.7℃보다 0.5℃ 높았다. 고산에서 관측된 기온을 월별로 살펴보면 대부분이 최근 10년 평균 대비 높거나 유사한 기온을 보였다. 특히, 시베리아고기압의 영향이 약했던 겨울철에 높은 기온 특성을 보였고, 1월, 2월, 11월, 12월은 최근 10년 평균보다 각각 0.8℃, 0.5℃, 1.0℃, 1.8℃ 높았다. 다만, 상층 기압능이 발달하여 우리나라 부근에 찬 공기가 유입되었던 6월에 평균기온이 0.3℃ 낮았고, 상층 기압골의 영향으로 북태평양고기압의 확장이 늦어졌던 7월의 경우에는 최근 10년 대비 1.6℃ 낮은 기온을 보였다.

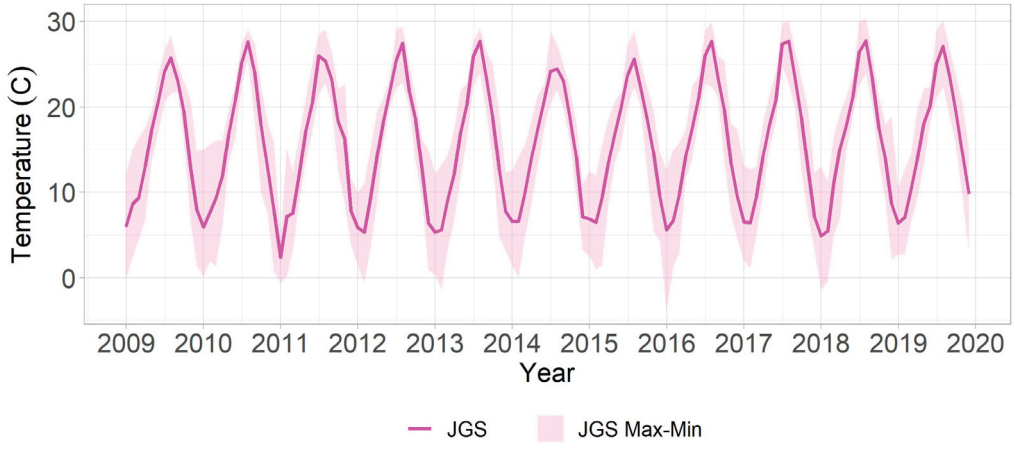


그림 3.2.12 2009~2019년까지 고산(JGS)에서 관측한 기온의 연변화.

표 3.2.5 고산의 월평균 기온(2009~2019년)

[단위:℃]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	6.0	8.6	9.3	13.0	17.3	20.7	24.2	25.8	23.1	19.5	12.9	7.9	15.7
2010	5.9	7.6	9.2	11.9	16.8	20.9	25.2	27.7	24.1	18.0	12.8	7.9	15.7
2011	2.4	7.1	7.5	12.2	17.2	20.6	26.0	25.4	23.2	18.4	16.3	7.8	15.4
2012	5.9	5.3	9.1	14.1	18.2	21.9	25.5	27.4	21.9	18.6	12.5	6.4	15.6
2013	5.3	5.6	8.9	12.1	16.9	20.4	25.9	27.7	23.4	18.8	12.6	7.8	15.4
2014	6.6	6.6	9.6	13.8	17.3	20.8	24.2	24.4	23.1	18.9	14.0	7.1	15.5
2015	6.9	6.5	9.3	13.3	16.8	20.0	23.7	25.6	22.3	18.6	14.6	9.5	15.6
2016	5.6	6.6	9.6	14.2	17.5	21.1	26.0	27.7	23.4	19.7	13.4	9.5	16.2
2017	6.5	6.4	9.4	14.1	17.8	20.8	27.4	27.7	23.3	18.7	12.7	7.2	16.0
2018	4.9	5.5	11.0	15.1	17.8	21.3	26.4	27.7	23.4	17.6	14.0	8.7	16.1
2019	6.4	7.1	10.2	13.8	18.0	20.5	23.8	26.8	23.6	19.4	14.6	9.8	16.2

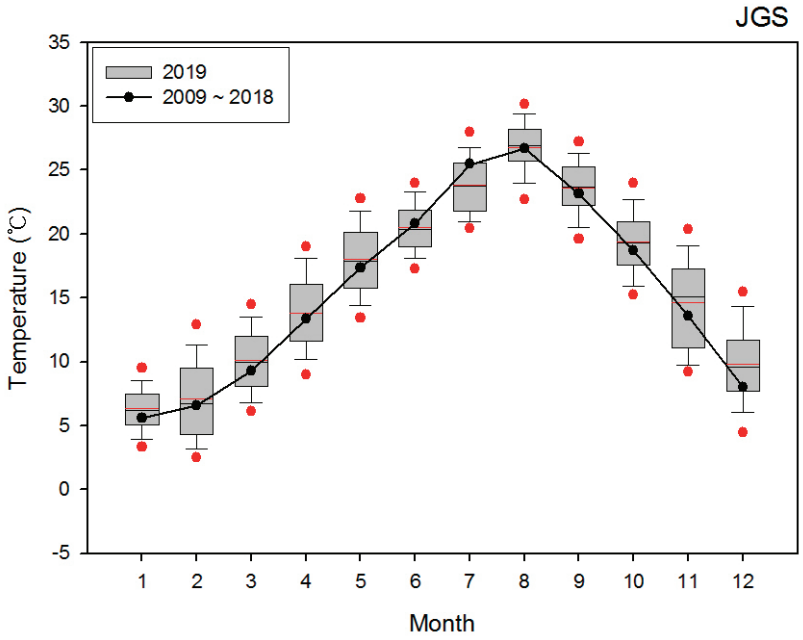


그림 3.2.13 2019년 고산(JGS)의 기온 월변화(℃). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

다. 울릉도독도 기후변화감시소

그림 3.2.14는 2009~2019년 동안 울릉도독도 감시소의 기온 연변화이며, 표 3.2.6와 그림 3.2.15는 월평균 값이다. 2019년 연평균 기온은 13.7℃로 2009년부터 2019년까지 중에서 가장 높은 기온을 기록하였다.

울릉도에서 관측된 기온을 월별로 살펴보면 2019년 1월, 2월, 3월, 12월에는 앞서 여러 번 언급한 바와 같이 우리나라 부근에 시베리아고기압의 영향이 약하여 최근 10년 평균보다 높은 기온을 보였다. 5월의 경우 3.1절의 5월 기상특성에서 기술 했듯이 이동성 고기압의 영향을 받아 따뜻한 남풍기류가 유입되었고, 강한 일사효과까지 더해져 고온을 기록한 것으로 분석되었다. 따라서 2019년은 여름보다는 겨울철인 1월, 2월, 12월과 이동성 고기압의 영향을 받은 3월과 5월의 영향을 받아 최근 10년 평균기온인 12.7℃보다 1.0℃ 상승하였다.

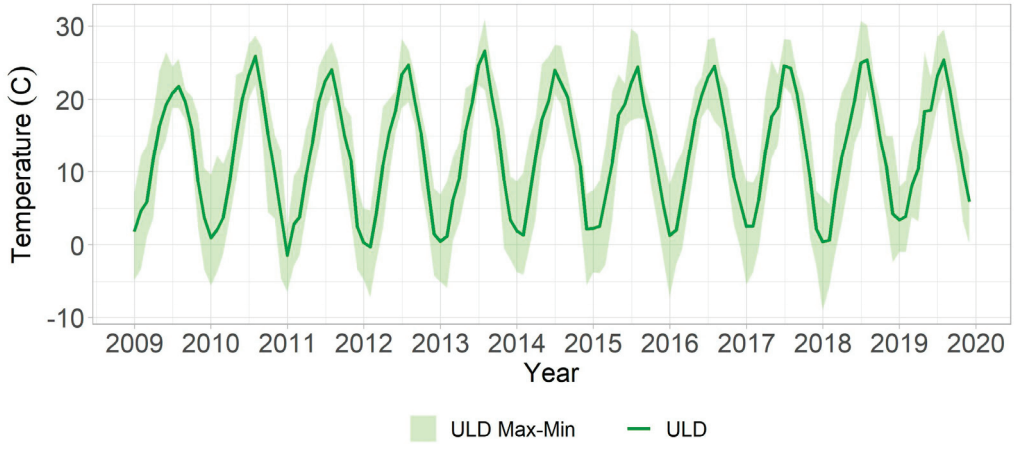


그림 3.2.14 2009~2019년까지 울릉도(ULD)에서 관측한 기온의 연변화.

표 3.2.6 울릉도의 월평균 기온(2009~2019년)

[단위:℃]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	1.9	4.7	5.9	11.7	16.4	19.3	20.8	21.8	19.6	16.0	8.7	3.7	12.5
2010	1.0	2.2	3.7	8.9	15.2	20.2	23.4	25.9	21.2	15.2	9.8	4.2	12.6
2011	-1.4	2.9	3.8	9.6	14.1	19.7	22.5	24.0	19.9	15.2	11.5	2.5	12.0
2012	0.3	-0.3	4.3	10.9	15.5	18.4	23.4	24.7	19.8	15.4	8.2	1.5	11.8
2013	0.5	1.2	6.2	9.1	15.7	19.6	24.6	26.6	20.7	16.1	8.9	3.4	12.7
2014	1.9	1.4	6.5	12.0	17.2	19.7	24.0	22.2	20.3	15.2	10.8	2.2	12.8
2015	2.3	2.5	6.5	11.2	17.9	19.4	22.2	24.4	19.3	15.4	10.4	5.4	13.1
2016	1.3	2.1	6.7	12.3	17.3	20.5	23.0	24.5	20.3	15.5	9.3	5.9	13.2
2017	2.6	2.6	6.1	12.6	17.6	18.9	24.6	24.3	20.7	15.2	9.1	2.2	13.1
2018	0.5	0.7	6.9	11.9	15.6	19.8	25.0	25.4	20.2	14.8	10.7	4.3	13.0
2019	3.4	3.9	8.0	10.4	18.4	18.5	23.1	25.4	21.0	15.9	10.3	5.9	13.7

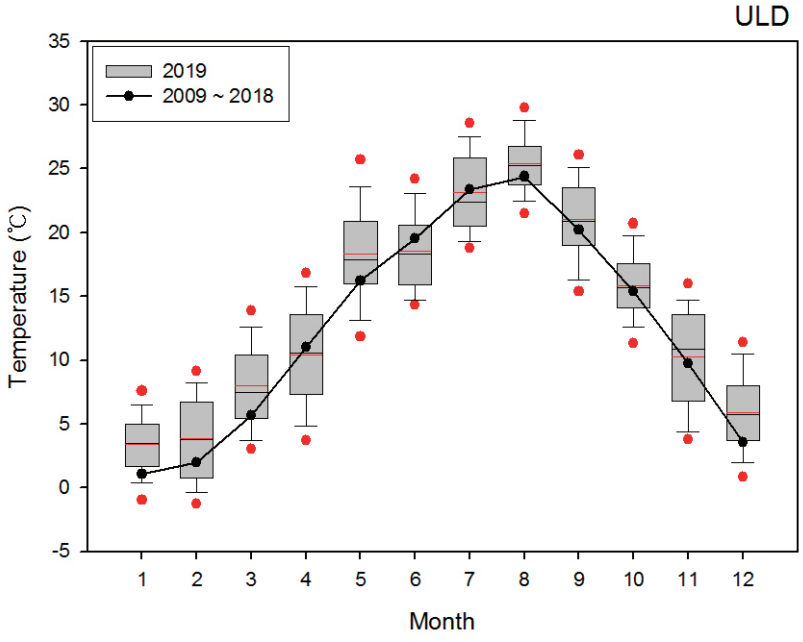


그림 3.2.15 2019년 울릉도(ULD)의 기온 월변화(℃). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

3.2.4 습도

안면도, 고산, 울릉도독도 감시소 모두 전년대비 낮은 습도 기록

[안면도] 여름 폭염과 중부지방 가뭄으로 2009년 이후 최고로 낮은 72.8% 기록

[고 산] 세 감시소 중 평년보다 유일하게 높게 습도 관측 74.7% → 78.0%

[울릉도] 가을 태풍의 영향으로 평년보다 높게 습도 관측 69.2% → 71.5%

가. 안면도 기후변화감시소

그림 3.2.16은 2009~2019년 동안 안면도 감시소의 습도 연변화이며, 표 3.2.7과 그림 3.2.17은 월평균 값이다. 2019년은 2009년부터 2019년 중 습도가 가장 낮은 72.8%를 기록하였다.

안면도에서 관측된 습도를 월별로 살펴보면 2019년은 8월의 경우 3.1절의 8월 기상특성에서 언급된 것처럼 티벳고기압과 북태평양고기압이 우리나라 부근까지 발달하여 폭염이 지속되었고, 중부지방은 기상가뭄이 지속되어 10년간 8월의 평균습도인 85.4%보다 낮은 67.0%로 관측되었다. 그 외의 기간은 최근 10년과 유사하였다.

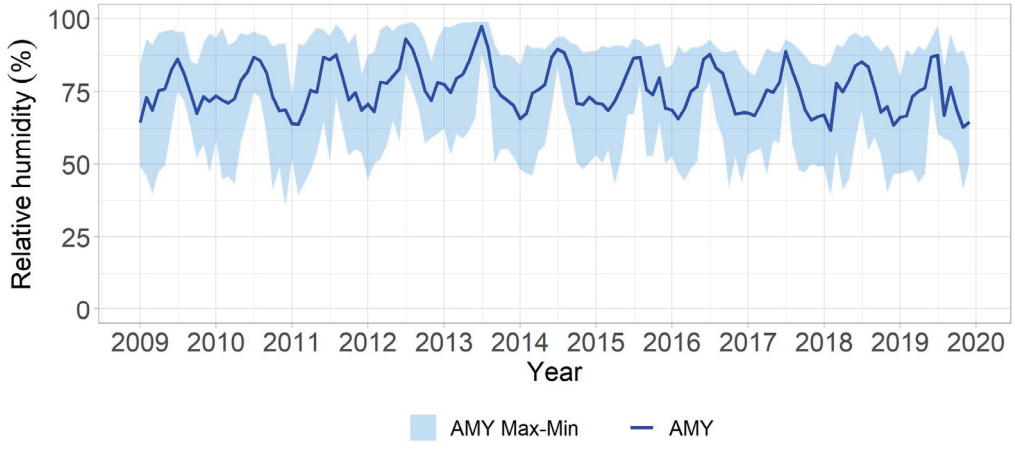


그림 3.2.16 2009~2019년까지 안면도(AMY)에서 관측한 습도의 연변화.

표 3.2.7 안면도의 월평균 습도(2009~2019년)

[단위: %]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	64.7	73.1	68.8	75.4	76.1	82.7	86.2	81.1	74.7	67.7	73.4	71.8	74.6
2010	73.6	72.2	71.3	72.8	79.0	82.0	87.0	85.8	81.7	73.3	68.5	69.0	76.3
2011	64.2	64.0	68.6	75.6	74.9	86.9	86.0	83.3	80.4	72.3	74.8	68.8	75.0
2012	70.9	68.3	78.5	78.0	80.5	83.0	93.1	89.8	83.5	75.5	72.0	78.3	79.3
2013	77.6	74.8	79.7	81.0	85.4	91.6	97.5	89.8	76.9	73.9	72.2	70.4	80.9
2014	65.8	67.7	74.6	75.9	77.6	86.9	89.6	88.4	82.9	71.2	70.8	73.3	77.1
2015	71.2	70.8	68.7	71.9	76.3	81.8	86.5	86.8	75.8	74.1	79.9	69.5	76.1
2016	68.8	65.8	69.3	75.2	77.0	86.1	87.9	83.1	81.4	74.3	67.5	67.9	75.4
2017	67.8	66.9	70.8	75.7	74.9	78.2	88.9	82.1	76.4	68.9	65.5	66.5	73.6
2018	67.1	61.9	78.1	75.1	79.0	84.0	85.4	83.6	76.4	68.2	70.1	63.7	74.4
2019	66.4	66.8	73.5	75.3	76.4	86.9	87.6	67.0	76.7	68.8	63.1	64.8	72.8

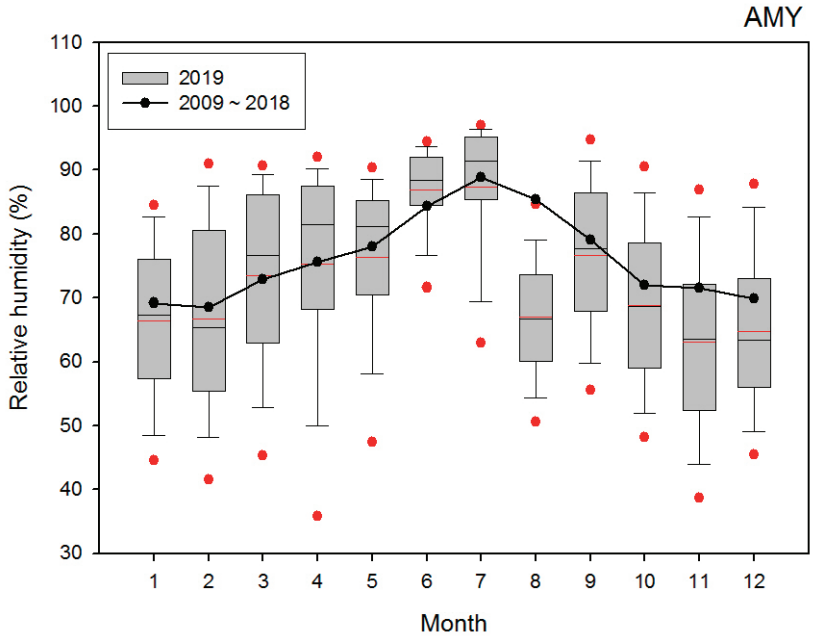


그림 3.2.17 2019년 안면도(AMY)의 습도 월변화(%). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

나. 고산 기후변화감시소

그림 3.2.18은 2009~2019년 동안 고산 감시소의 습도 연변화이며, 표 3.2.8과 그림 3.2.19는 월평균 값이다. 2019년의 습도는 최근 10년 평균보다는 3.4% 증가 하였으나, 2018년에 비하여 1.2% 감소한 78.0%로 관측되었다.

고산에서 관측된 습도를 월별로 살펴보면 2019년 1월의 경우 3.1절의 1월 기상특성에서 언급된 바와 같이 평년보다 약한 대륙성 고기압과 이동성 고기압의 영향을 주로 받아 건조한 날씨가 이어져 습도가 낮게 유지되었다. 6월, 7월은 3.1절 여름철 기상특성에서 분석한 것과 같이 장마의 영향으로 습도가 상승하였으며, 9월은 태풍의 영향을 받은 것으로 분석되었다. 그 외의 기간은 최근 10년과 유사하였다.

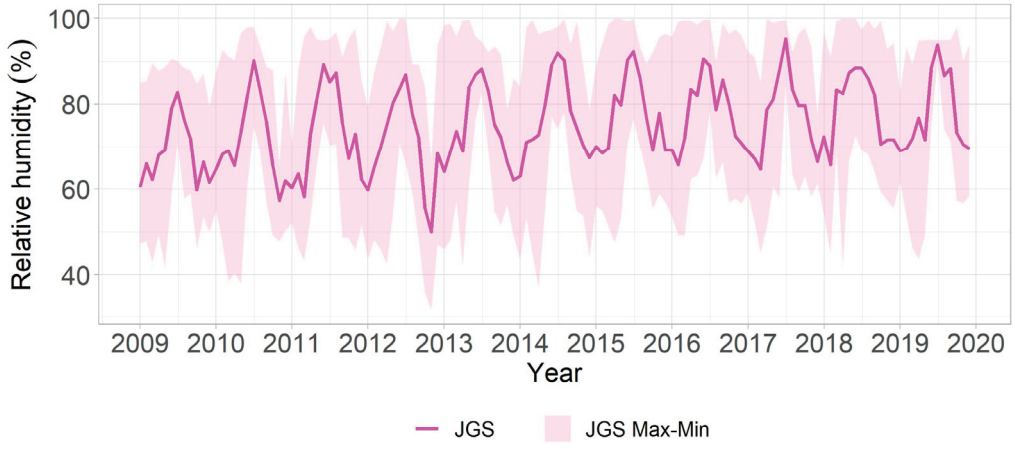


그림 3.2.18 2009~2019년까지 고산(JGS)에서 관측한 습도의 연변화.

표 3.2.8 고산의 월평균 습도(2009~2019년)

[단위: %]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	60.5	65.9	62.2	68.0	69.2	79.1	82.7	76.3	71.9	59.7	66.4	61.5	68.6
2010	64.7	68.2	69.0	65.5	73.4	82.2	90.1	83.2	75.8	65.6	57.3	61.9	71.4
2011	60.3	63.6	58.2	73.1	81.1	89.2	85.2	87.2	75.6	67.2	73.0	62.2	73.0
2012	59.8	65.2	69.8	75.1	80.4	83.5	86.8	77.6	72.2	55.5	50.0	68.3	70.3
2013	64.1	68.9	73.6	68.9	84.0	86.9	88.2	83.0	75.1	72.3	66.3	62.0	74.4
2014	63.0	71.0	71.7	72.8	79.7	89.1	91.9	90.3	78.4	74.4	70.4	67.3	76.7
2015	70.0	68.5	69.6	82.0	79.8	90.3	92.3	85.8	76.8	69.2	77.9	69.1	77.6
2016	69.2	65.7	72.0	83.4	82.0	90.5	89.0	78.7	85.6	80.0	72.5	70.7	78.3
2017	68.9	67.1	64.7	78.7	81.1	87.9	95.2	83.4	79.6	79.7	71.8	66.5	77.0
2018	72.3	65.6	83.4	82.5	87.3	88.5	88.4	85.9	82.1	70.6	71.6	71.7	79.2
2019	69.0	69.6	71.8	76.9	76.2	90.3	94.9	86.5	87.8	73.2	70.6	69.5	78.0

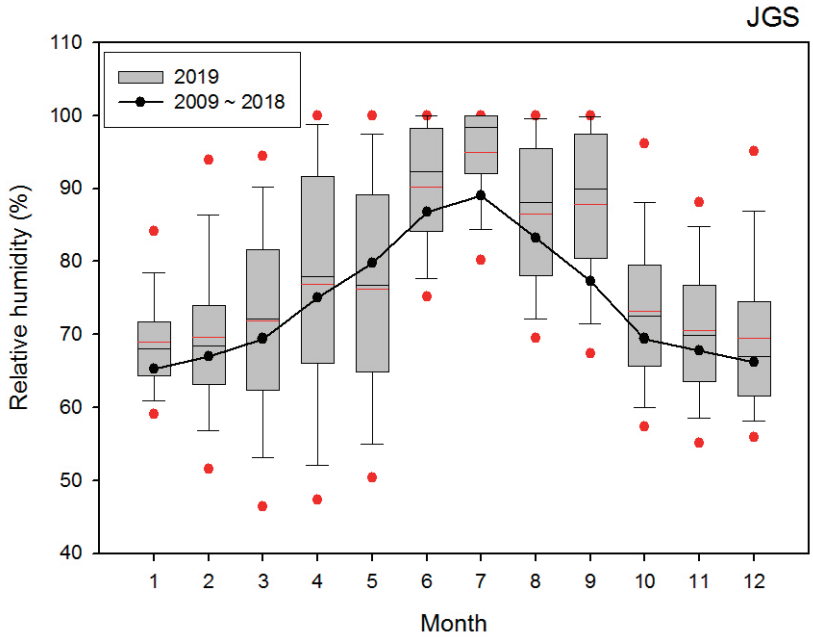


그림 3.2.19 2019년 고산(JGS)의 습도 월변화(%). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

다. 울릉도 기후변화감시소

그림 3.2.20은 2009~2019년 동안 울릉도독도 감시소의 습도 연변화이며, 표 3.2.9와 그림 3.2.21은 월평균 값이다. 2019년의 습도는 최근 10년 평균인 69.4%보다 1.4% 감소한 68.0%로 관측되었다.

울릉도에서 관측된 습도를 월별로 살펴보면 2019년 1월과 5월의 경우 이동성 고기압의 영향을 받아 건조한 날씨가 이어져 습도가 낮게 유지되었다. 6월과 7월은 장마, 10월은 일본으로 향하는 태풍의 간접적인 영향에 의해 습도가 상승한 것으로 분석되었다. 그 외의 기간은 최근 10년과 유사하였다.

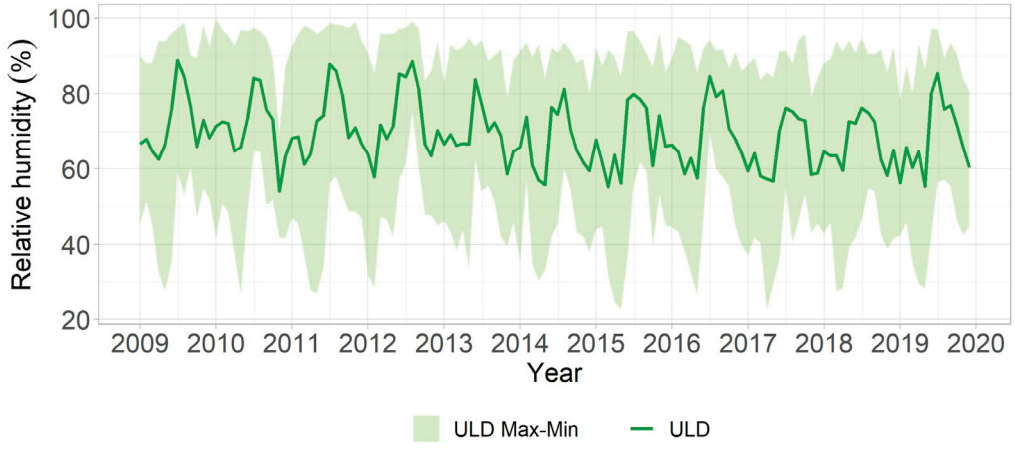


그림 3.2.20 2009~2019년까지 울릉도(ULD)에서 관측한 습도의 연변화.

표 3.2.9 울릉도의 월평균 습도(2009~2019년)

[단위: %]

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	66.7	67.9	64.7	62.6	66.3	76.0	88.9	84.5	76.7	66.0	73.0	68.3	71.8
2010	71.4	72.5	72.2	64.7	65.9	73.5	84.1	83.5	75.8	73.2	54.1	63.3	71.2
2011	68.2	68.6	61.2	63.7	72.8	74.2	87.8	86.1	79.7	68.4	70.9	66.7	72.4
2012	63.9	57.8	71.8	68.1	71.4	85.3	84.5	88.5	81.3	66.6	63.5	70.3	72.8
2013	66.6	69.2	66.2	66.8	66.6	83.8	77.4	70.0	72.4	68.9	58.6	64.7	69.3
2014	65.8	73.8	61.0	57.0	55.7	76.5	74.6	81.3	70.4	64.9	61.9	59.5	66.9
2015	67.8	61.5	55.2	63.7	56.2	78.4	79.9	78.5	76.2	60.9	74.3	66.1	68.2
2016	66.4	64.5	58.7	62.8	57.5	76.2	84.6	79.3	80.8	70.8	67.9	64.2	69.5
2017	59.6	64.1	58.1	57.3	56.7	70.2	76.2	75.3	73.4	72.9	58.5	58.9	65.1
2018	64.7	63.5	63.5	59.6	72.7	72.1	76.2	75.0	72.6	62.5	58.2	65.1	67.1
2019	56.3	65.8	60.3	64.6	55.3	80.0	82.6	75.9	77.0	71.8	65.7	60.4	68.0

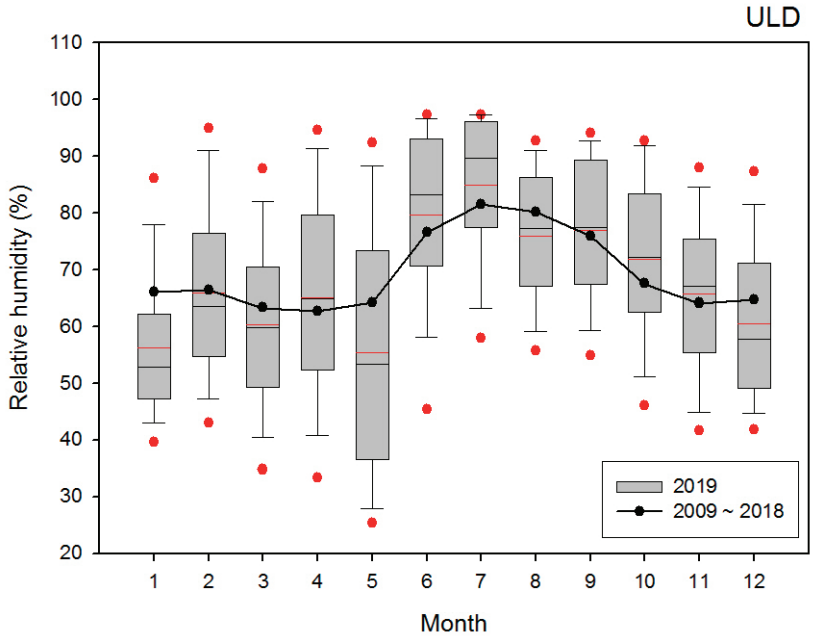


그림 3.2.21 2019년 울릉도(ULD)의 습도 월변화(%). 2019년 월별분포(상자의 끝 붉은 점 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 검은 실선은 중간값, 붉은 실선은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제4장

온실가스 및 반응가스



제4장 온실가스 및 반응가스

4.1 온실가스

ㅇ 이산화탄소(CO_2) 배경농도* 지속 증가

– 안면도: 417.9 ppm (2019년 증가율: 2.7 ppm/year, 최근 10년 증가율: 2.4 ppm/year)

※ 전지구: 409.8 ppm (2019년 증가율: 2.4 ppm/year, 최근 10년: 2.3 ppm/year, 1980년대: 1.5 ppm/year)

※ 하와이: 411.4 ppm (2019년 증가율: 2.9 ppm/year, 최근 10년 2.3 ppm/year)

• 2019년 전 세계적 고온 현상으로 해양/토양의 유기생물활동으로부터 배출이 강화되어 증가율은 최근 10년보다 가속화

ㅇ 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 육불화황(SF_6) 등 배경농도 증가 지속

※ 몬트리올 의정서로 제한하고 있는 염화불화탄소류 (CFCs) 배경농도 감소 지속

안면도(1999~), 고산(2012~), 울릉도독도(2014~) 기후변화감시소에서 CO_2, CH_4, N_2O, SF_6, CFC-11, CFC-12, CFC-113 등 7종을 관측하고 있으며, 위탁관측소로 지정된 남극 세종기지에서 대기 중 CO_2 농도를, 광릉수목원에서 산림 CO_2 플럭스를 측정하고 있다. 안면도 기후변화감시소의 관측을 기준으로 1999년부터 현재까지 총 21년간의 온실가스 배경대기농도 관측자료를 확보하고 있다. 또한, 2019년에는 고산과 울릉도독도 관측소에서 관측했던 CH_4 자료를 최초로 게재하였다.

현재 사용하고 있는 온실가스의 기준은 CO_2는 WMO-X2007, CH_4 WMO-X2004, N_2O WMO-X2006A, SF_6는 WMO-X2014이다. 이 기준은 1957년 킬링 박사가 하와이 마우나로아에서 최초로 관측을 시작했을 때의 기준값과 이어져 있다. 이 최초 기준값(Primary scale)은 현재 미국해양대기청(NOAA/ESRL)으로 이관되어 유지되고 있으며, 전세계로 보급하고 있다. 2019년 온실가스 전문가회의(GGMT-2019)에서 CO_2의 척도변화(WMO-X2019)가 있을 것을 발표한 바 있으며, 2021년부터 적용될 가능성이 크다.

염화불화탄소류의 경우 한국표준과학연구원의 기준을 사용하였으나, 2019년에 중반부터 WMO 기준을 사용하였다. 따라서 염화불화탄소류의 경우 표준가스의 서로 다른 기준값으로 인해 타 관측소와 비교 시 값의 차이가 있을 수 있다. 본 보고서에서 그래프에 제시된 전지구 값의 경우

모두 NOAA에서 만들어진 척도를 사용하고 있다. 비교실험 보고서에 의하면, 염화불화탄소류는 NOAA와 한국표준과학연구원의 척도가 CFC-11은 1.91 ppt, CFC-12는 1.06 ppt, CFC-113은 0.3 ppt의 차이를 보인다(Rhoderick et al., 2013).

본 보고서의 온실가스 관측방법은 Lee et al. (2019)를 통해 자세히 소개되었으며, 자료처리에 관한 정보는 부록 1에 제시하였다. 이를 통해 배경농도를 산출한다. 배경농도란 그 지역의 일시적이고 비주기적인 인위적 활동에 의한 농도를 제거하고, 지역규모의 농도수준과 자연변동을 반영한 농도를 의미한다.

현재 사용하는 온실가스의 단위(ppm: part per million, ppb: part per billion, ppt: part per trillion)는 몰농도(mole fraction)를 기준한 것으로 흔히 언급하는 혼합비(mixing ratio, volume/volume 혹은 mass/mass)를 의미하지 않는다. 혼합비의 경우 수분을 포함한 이상기체를 가정하여 산정하는 값으로 온실가스와 같은 온도, 압력, 부피가 지속적으로 변하는 자연대기 상태에서 수분을 제거하여 측정하기 때문에 몰농도를 기준으로 한다(Schwartz and Warneck, 1995). 따라서 본 보고서의 단위를 SI 단위로 표현할 경우 ppm은 μmol/mol, ppb는 nmol/mol, ppt는 pmol/mol로 대신하여 사용하는 것이 정확하다.

2019년 WMO 온실가스 연보

2019년 10월 WMO는 2018년의 전지구 평균 온실가스 농도를 발표하였으며, 이 때 CO_2 407.8±0.1 ppm, CH_4 1869±2 ppb, N_2O 331.1±0.1 ppb로 나타났다. 이들 온실가스는 산업화 이전(1970년대 이전)보다 각각 147%, 259% 그리고 123% 증가했다. 이렇게 증가하고 있는 온실가스의 배출원을 찾기 위해서는 동위원소의 관측이 널리 사용된다. 예를 들어 CO_2의 C는 동위원소 ^{12}C, ^{13}C, ^{14}C로 구분되는데 이 중 ^{14}C는 화석연료에서 배출된 CO_2에서는 검출되지 않는다. 이러한 특성을 기반으로 ^{14}C의 값을 알 때 화석연료에서 배출된 CO_2의 양을 역산할 수 있다(WMO, 2019). 기상청에서도 2014년부터 2016년까지의 ^{14}C 자료를 이용하여 중국과 한국에서의 화석연료 배출량 변화를 분석한 바 있다(Lee et al., 2020). 향후 온실가스 배출원을 추적하여 정책에 반영하기 위해서는 관측의 확대와 다양성이 필요하다.

4.1.1 온실가스 감시의 목적

온실가스는 지표면이 반사하는 태양복사의 장파복사를 흡수 또는 반사하여 지구표면의 온도를 상승시키는 역할을 하는 가스종을 말한다. 이들은 긴 체류시간으로 한 번 배출되면 대기에 지속적으로 누적되어 지구온난화를 가속한다. 유엔 기후변화협약(UNFCCC)의 제3차 당사국총회(일본 교토, 1997)에서는 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 염화불화탄소(CFCs), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF_6)을 규제대상 온실가스로 규정하였고, 제17차 당사국총회(남아프리카공화국 더반, 2011)에서 삼불화질소(NF_3)를 추가하였다.

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

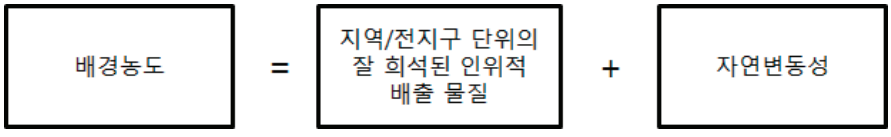


그림 4.1.1에서 보이는 붉은선이 배경농도이다. 온실가스에서 고농도를 포함하지 않고, 배경농도만을 논하는 이유는 전세계 1) 증가율과 연계되어 있으며, 그 지역의 2) 자연변동성을 통해 지역의 배출/흡수 정보를 알 수 있기 때문이다. 온실가스의 경우 실제 고농도 사례가 발생하더라도 대기 중 체류시간이 길기 때문에 반응가스나 에어로졸과 같이 지역규모로 영향을 주지 않는다.

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

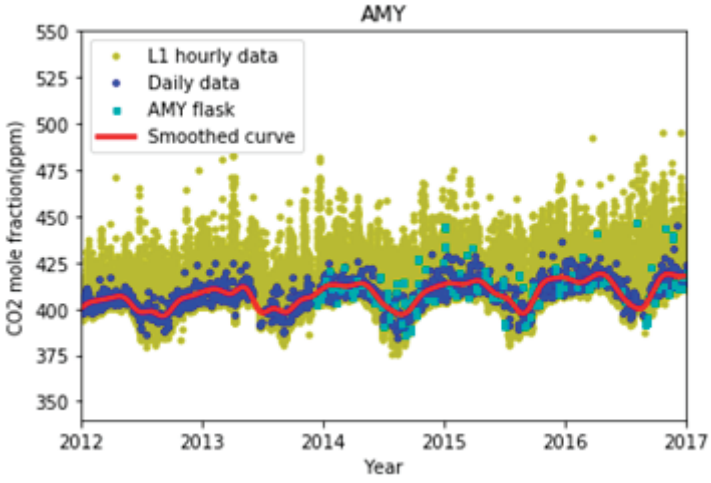


그림 4.1.1 안면도 CO_2 시간 평균농도(L1, 노란색), 고농도를 제거하여 선별한 일 평균농도(파란색), 잘 희석된 공기를 채취한 플라스크자료(하늘색), 선별된 자료를 바탕으로 계산한 배경농도(붉은색, 계산법 부록 1).(그림출처: Lee et al., 2019)

2) 자연변동성: 그림 4.1.1에서 보듯이 CO_2는 여름철에 낮고 봄철에 높다. 여름철 식생의 광합성 활동으로 CO_2의 흡수가 증가해 그 농도가 낮아지다가 여름철이 지나면 점차 광합성 활동이 줄어들고 겨울철 난방 등이 증가하기 시작하면서 배출된 CO_2는 점차 대기에 누적된다. 이 값은 광합성 활동이 다시 시작되는 봄철까지 최대치를 이룬다. 따라서 이 최곳값과 최젓값의 차이(진폭)로 그 지역의 흡수원과 배출원을 이해할 수 있다. 예를 들어 남반구는 북반구에 비해 CO_2의 계절변동의 폭이 작다. 이는 인구가 북반구에 비해 적어 인위적 배출원이 적으며, 식생의 분포도 적어 흡수하는 양도 적기 때문이다. 따라서 계절변동 폭은 북반구가 크고, 남반구가 작다.

반면 자연변동성이 나타나지 않고 증가를 한다는 것은, 지표에 배출원은 있으나 흡수원이 없다는 의미를 갖는다. 이러한 가스종은 대부분 대류권에서 오랫동안 체류하게 된다. 따라서 자연변동성이 없다면, 지표에 흡수원이 없어 대기 중 체류시간이 상대적으로 길다. 이러한 가스들은 한번 배출되면 대기 중에 지속적으로 누적되기 때문에 그 증가율 또한 가파르고, 배출량을 줄인다고 하더라도 단번에 감소효과를 볼 수 없다. 대표적으로 SF_6, CFCs 등이 이에 속한다.

4.1.2 이산화탄소(CO_2) 배경농도

가. 한반도 기후변화감시소

이산화탄소는 지구온난화를 유발하는 주요 원인물질로 인간의 화석연료 소비증가로 배출되는 대표적인 온실가스이다. 이산화탄소의 전지구 평균 농도는 꾸준히 증가하고 있다. 일반적으로 인위적 (화석연료 등) 및 자연적 (해양, 토양의 유기활동, 생체 활동, 생체 소각 등)으로 이산화탄소가 배출되면 생태와 해양에서 약 50%가 흡수되고, 그 나머지가 대기 중에 잔존하는 것으로 알려져 있다. 모든 온실가스의 전지구 복사강제력은 산업화 이전 시기(1750년 이전)와 비교하여 2011년 3.0 [2.22~3.78] W/m^2에 이르며 이 중 이산화탄소가 차지하는 전지구 복사강제력은 1.68 [1.33~2.03] W/m^2 (56%)에 이르는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2013).

2019년 안면도에서 관측된 이산화탄소 연평균 배경대기 농도는 417.9 ppm이다(표 4.1.1). 안면도에서 처음 이산화탄소 농도를 관측한 1999년 연평균 농도 371.2 ppm과 비교하여 20년간 46.7 ppm 증가하였으며 1999년 농도 대비 1.13배로 증가하였다. 산업화 이전인 1750년 이산화탄소 전지구 평균농도 278.0 ppm와 비교하면 1.5배로 증가한 값이다. 안면도 이산화탄소는 전년도에 비해 2.7 ppm 증가하였으며, 최근 10년 (2009~2018년) 안면도에서 관측된 이산화탄소 연간 증가값의 평균인 2.4 ppm 보다 약간 높다. 고산은 416.9 ppm으로 전년도 보다 2.6 ppm 증가하였고, 울릉도는 414.5 ppm으로 전년도보다 1.8 ppm 증가하였다. 독도의 2019년 평균농도는 414.6 ppm 이었다.

미국해양대기청(NOAA)에서 발표한 2019년 전지구 이산화탄소 농도는 409.8 ppm으로 전년도에 비해 2.4 ppm 증가했으며, 최근 10년간(2009~2018년)의 연간 증가값의 평균인 2.3 ppm/year 보다 약간 높다. 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 2019년 연평균 농도는 전지구 평균보다 약 8.1 ppm, 7.1 ppm, 4.7 ppm, 4.8 ppm 높다.

우리나라 관측소 4소와 NOAA에서 관측한 전지구 평균 이산화탄소 농도의 시계열을 그림 4.1.2에 제시하였다. 북반구에 위치한 우리나라 관측소 모두 봄철에 가장 높은 값, 여름철에 가장 낮은 값을 보이며, 전지구 평균값보다 높다. 이는 북반구가 남반구에 비해 많은 인구가 분포하고 육상생태계가 발달하여 농도가 높고 계절변동이 크기 때문으로 밝혀진바 있다(Nevison et al., 2008). 전지구 값을 포함하여 우리나라 관측소 모두 관측 이래 지금까지 꾸준히 이산화탄소 농도가 증가하고 있으며, 그 증가 기울기가 유사하다.

표 4.1.1 2019년 안면도, 고산, 울릉도, 전지구의 CO_2 배경농도 (ppm)

	안면도	고산	울릉도	독도	전지구[1]
2019년 평균값	417.9	416..9	414.5	414.6	409.8
2019년 증가값[2]	2.7	2.6	1.8	-	2.4
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2009~2018년)	2.4 ppm/year	-	-	-	2.3 ppm/year

[1] 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.
[2] 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

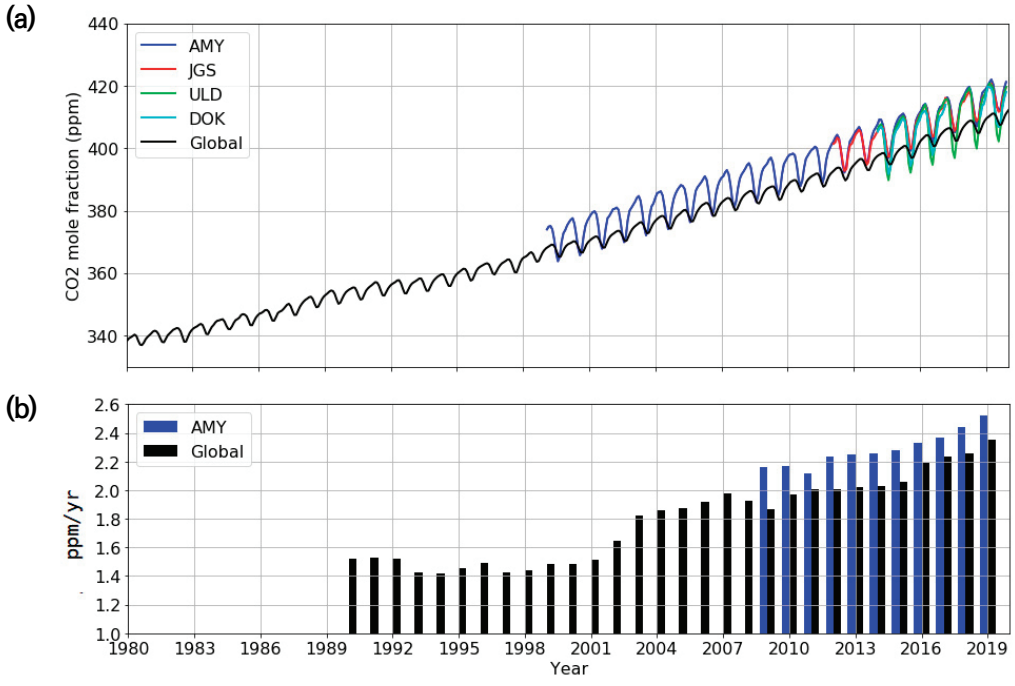


그림 4.1.2 (a) 안면도(AMY, 파란색), 고산(JGS, 붉은색), 울릉도(ULD, 초록색), 독도(DOK, 하늘색)와 전지구(Global, 검정색)의 이산화탄소 배경농도. (b) 매 10년간 절대 증가값($\triangle CO_2$)의 평균.

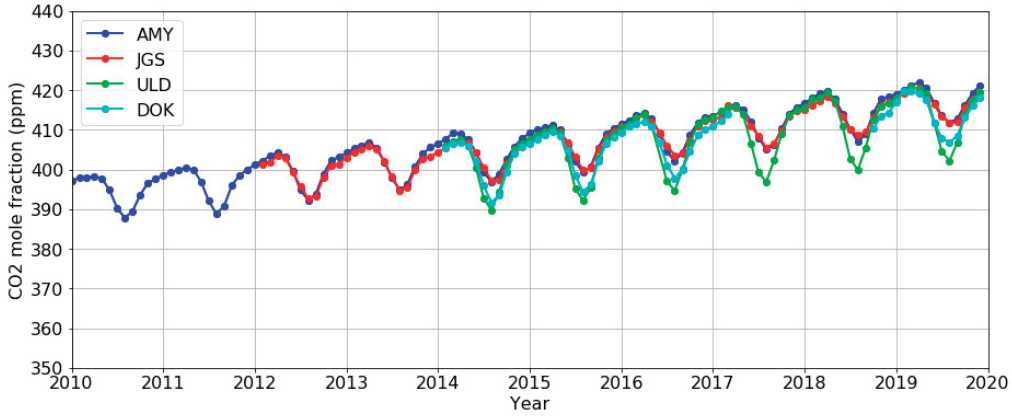


그림 4.1.3 최근 10년(2009~2018년) 안면도(AMY, 파란색), 고산(JGS, 빨간색), 울릉도(ULD, 초록색), 독도(DOK, 하늘색)의 이산화탄소 배경농도.

1980년대 전지구 CO_2 증가율을 보면, 10년간 약 1.5 ppm/year의 평균 증가율을 보였으나, 2000년대 들어 2 ppm/year까지 증가하였으며, 최근 10년 2.4 ppm/year를 보였다. 한반도도 이와 동일하게 2000년 초반에 약 2.2 ppm/year를 보였으나 최근 10년 2.5 ppm/year 수준을 보이면서 지속적으로 CO_2가 증가하고 있음을 보인다.

그림 4.1.3은 2010년부터 2019년까지 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 이산화탄소 배경대기 농도 시계열이다. 안면도의 CO_2 농도는 1999년부터 꾸준히 증가하여 2012년에 처음으로 연평균 농도가 400 ppm (399.9 ppm)을 넘었다. 2015년까지 여름철에는 300 ppm 후반으로 관측되었으나, 2016년부터는 월평균 전체가 400 ppm을 넘었고, 이는 제주도의 고산에서도 동일한 결과로 나타났다. 울릉도는 2018년까지 여름철에 399 ppm 대의 농도를 보여 한반도 서쪽에 비해 농도가 낮았으나, 2019년은 울릉도 또한 모든 계절에 400 ppm을 넘어섰다. 이 세 관측지점의 증가율은 1~4 ppm/year로 비슷하게 나타나 한반도의 이산화탄소 농도가 지속적으로 증가함을 보인다. 특히 2015/2016년 ENSO의 영향으로 증가율이 높았으며, 2019년에도 모든 관측소에서 그 증가율이 높았다. 이는 4.3.1에 일부 설명하였다.

안면도, 고산, 울릉도, 독도의 이산화탄소의 최댓값은 보통 4월에 관측되었으나, 2019년은 겨울철인 2월과 12월에 주로 관측되었으며, 최솟값은 서쪽 관측소에서는 7월에 동쪽 관측소에서는 8월에 관측되었다. 이러한 계절변동은 이산화탄소의 발생원과 흡수원, 주풍에 따른 이동에 의한 영향을 알 수 있는 지표가 된다.

연간 최댓값과 최솟값의 차이가 울릉도(18.7 ppm), 독도(13.3 ppm), 안면도(10.2 ppm), 고산(9 ppm) 순으로 관측되었다. 이들 값은 전지구의 최댓값과 최솟값의 차이 값인 약 4.1

ppm에 비해 2~4배 크다. 최댓값과 최솟값의 차이는 이산화탄소의 발생원과 흡수원(식생 등)이 분포하고 있는 내륙에 가까울수록 큰 것으로 알려져 있다. 최댓값은 안면도 〉 고산 = 울릉도 〉 독도 순으로 관측되었으며, 최솟값은 울릉도 〈 독도〈 고산=안면도 순으로 낮았다. 또한, 최댓값들을 비교하였을 때 이들 관측소간(안면도와 독도)의 차이가 2.6 ppm 수준이나 관측소간 (안면도와 울릉도) 최솟값은 9.6 ppm 까지 차이를 보여 계절 변동 폭이 흡수원에 의해 크게 변할 수 있음을 나타냈다.

나. 남극 세종과학기지 위탁관측소

남극세종과학기지(62.22°S, 58.78°W, 이하 세종기지)에서는 2010년 1월부터 파장스캔 공동감쇠분광기(Wavelength-scanned cavity ring down spectroscopy, WS-CRDS)를 이용한 CO_2 농도 관측이 시작되었다(기상청, 2010). 그리고 2010년 10월 26일에 이산화탄소 농도를 포함하여 성층권 오존 농도 등의 관측요소에 대해 세계기상기구(WMO) 산하 지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램의 지역급 감시소로 등재되었다.

세종기지에서의 이산화탄소 농도 관측은 WS-CRDS 방식의 CO_2/H_2O 분석기(G1200, Picarro, Inc., USA, 이하 간단히 CRDS)와 제습 장치, 그리고 유량 조절 및 교정 장치로 구성되어 있다. WS-CRDS 방식의 기본 원리는 정밀하게 세부 조정(tuning)된 파장을 공동(cavity)에 보내어 흡수소멸(ring down)되는 시간을 흡수 강도(absorption intensity)로 변환하여 정량화하는 것이다. CO_2 농도 관측 시스템은 세종기지 본관동에서 남서쪽 약 180 m 떨어져 있는 관측동에서 운영된다. 관측동 옥상 약 2.7 m 높이(지표면으로부터 약 6 m)의 흡입구(inlet)에서 포집되는 샘플 공기는 펌프에 의해 제습장치에 도달한다(그림 4.1.4). 두 개의 냉동챔버로 구성된 제습장치에서 수증기가 제거되고, 기체유량제어시스템인 MFC(mass flow controller)에 의해 일정하게 조절된 유량(400 mL/min) 중 약 230 mL/min의 양만 최종적으로 분석기에 도달하여 1~2초 단위로 농도가 측정되고 이 값은 CRDS에 저장된다. 보다 자세한 사항은 기상청(2010)을 참조하면 된다.

2017년 1월 CRDS의 내부 문제로 제조사로 반출하여 장기간 결측이 발생하였다. 2018년 1월 30일, 수리된 CRDS가 기지에 재반입되어 운영을 재개하였다. 기존에 사용하던 화학적 제습장치를 냉동제습장치로 교체하여 운영을 시작하였으나, 냉동제습장치 문제가 발생하여 2019년까지 제습을 실시하지 못했다. 2020년 1월 17일 수리된 냉동제습장치를 설치하여 현재는 정상 작동 중이다. 이 때문에 2019년의 관측자료 분석은 분석기에서 제공하는 건조공기 대비 CO_2 분석값을 사용하였다. 15~20일 간격으로 표준가스를 주입하여 농도를 측정하였으며 이로써 CO_2 농도의 후처리가 이루어졌다. 2019년도에는 총 19회의 표준가스 주입이 있었다. Korkiakoski (2014)에

의하면 이슬점 온도 약 18℃에 상응하는 수증기 농도 2.0%까지는 CRDS에 내장된 수증기 교정 함수를 사용할 수 있으며 이는 매우 낮은 농도의 수증기량이 관측되는 남극 및 북극 관측소에서 충분히 적용된다는 연구결과가 있다(Vinther et al., 2006; Bromwich et al., 2013). 2019년도에 세종기지에서 관측된 수증기 농도는 1%를 넘지 않았으므로 Picarro 내장함수를 이용한 수증기 교정된 CO_2 농도를 분석에 이용하였다.

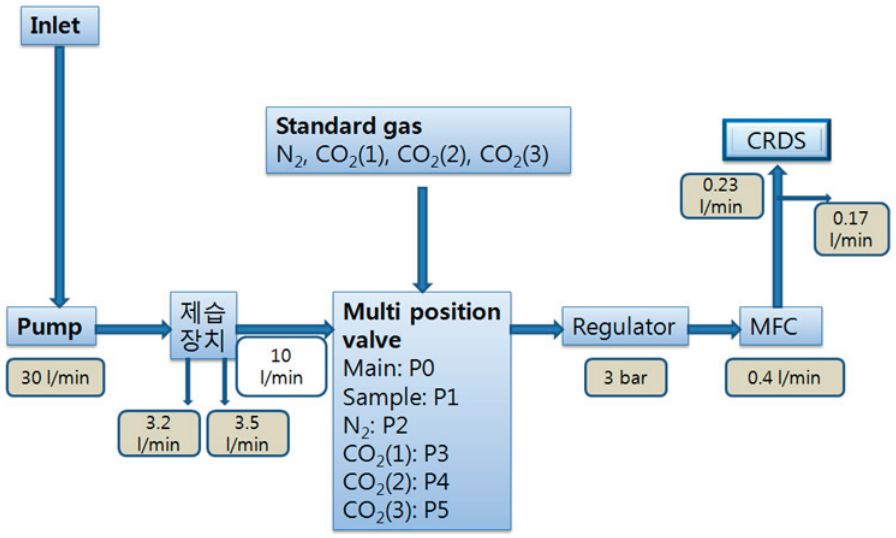


그림 4.1.4 남극세종과학기지 Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS) 관측 모식도.

그림 4.1.5는 2019년 세종기지에서 측정된 월평균 풍속과 기온의 변동이다. 풍속은 평균적으로 하계기간보다 동계기간이 강하게 나타났으며 5월부터 9월 기간에 평균 풍속 및 최대 풍속의 변동이 크게 나타났다. 12월의 평균 풍속이 5.1 m/s로 가장 약하였고, 3월부터 평균 풍속이 증가하여 10월에 8.5 m/s로 가장 강하였다. 순간 최대풍속은 8월에 기록된 38.0 m/s이었다. 풍향은 북서풍(303.75°~326.25°)과 동풍(78.75°~101.25°)이 차지한 비율이 각각 약 11%로 가장 우세하였고, 이산화탄소 농도 측정에 영향을 주는 발전동 방향(355°~ 45°)의 바람은 약 13%를 차지하였다(그림 4.1.6). 연평균 풍속은 6.9 m/s로 예년의 7.8 m/s보다 다소 약했다. 기온은 뚜렷한 계절변동을 보였으며 3월이 1.1℃로 가장 높았고, 8월에 -4.3℃로 가장 낮았다. 연평균 기온은 -1.7℃로 예년과 비슷하였다. 연평균 기압은 988 hPa로 예년 991.1 hPa보다 2.3 hpa 높았다.

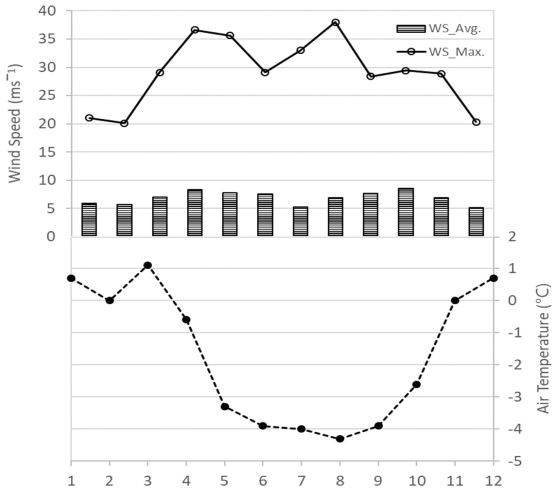


그림 4.1.5 2019년 남극세종과학기지에서의 월평균 풍속, 최대 풍속 및 기온의 변동.

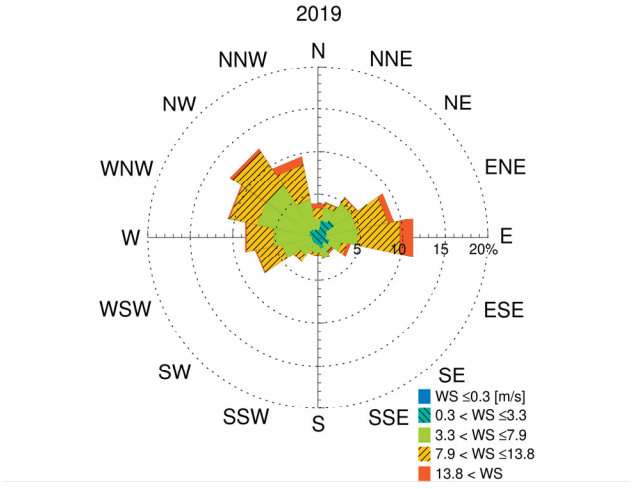


그림 4.1.6 2019년 남극세종과학기지의 풍향 분포.

관측한 CO_2 자료는 다음의 절차에 따라 최종 자료를 산출하였다. 우선, 30초 동안 관측한 자료로부터 평균과 표준편차를 산출한다. 평균으로부터 표준편차 이상의 편차를 보이는 자료는 제거한 후 중앙값(median)을 30초 대푯값으로 정한다. 다음 20개의 30초 대푯값으로부터 10분 평균이 산출된다. 10분 평균 자료에 대해 다음과 같은 조건에 해당하면 그 값은 제거되었다;

1) 장비의 정상 작동 범위(cavity 내부의 온도가 44~46℃, 압력은 139~141 torr)를 벗어난 경우,

2) 10분 동안 관측된 원시 자료의 개수가 200개 이하인 경우,

3) 풍향이 355° 이하 혹은 55° 이상(발전동의 풍하측에 해당),

4) 블랙카본 농도가 100 ng/㎥ 이상인 경우,

5) 평균 산출에 사용한 30초 대푯값의 갯수가 10개 미만인 경우,

6) 10분 동안 표준편차가 0.25 ppm이상인 경우, 10분 평균 자료는 제거되었다.

2019년의 관측 자료의 경우, 서술한 절차를 통해 약 8%의 자료가 제거되었다. 10분 평균을 이용하여 시간 평균, 일 평균, 월 평균을 산출하였고, 상위 시간 평균 산출을 위한 필요한 하위 시간 평균값의 수가 50%이상 가용한 경우에만 상위 시간 평균을 산출하였다. 자료의 품질과 관련한 추가 정보는 부록을 참조하면 된다.

그림 4.1.7은 2019년 세종기지에서 관측한 CO_2 일평균 농도의 연변동이다. 2019년 1월 2일 일평균 406.1 ppm으로 시작하여 2월 중순경까지 감소 추세를 보인 후, 10월까지 지속적인 증가 추세를 보였다. 2019년 10월 1일, 연중 일평균 최댓값인 409.1 ppm이 관측되었고, 11월과 12월이 되면서 다시 감소하는 추세였다. 일평균 최솟값은 2월 15일에 관측된 405.5 ppm이었다.

그림 4.1.8은 2010년부터 2019년까지 관측된 월평균 CO_2의 연변동이다. 월평균은 월별 일수의 1/2이상 일평균이 가용한 경우에만 산출되었다. 2010년부터 세종기지에서 측정된 이산화탄소의 농도는 꾸준히 증가하고 있다. 월평균 CO_2 농도의 연변동은 2.4~3.9 ppm (11개월 이상의 자료가 가용하지 않은 2014년과 2015년은 제외)으로 2019년도 역시 이와 유사한 3.5 ppm이었다. 월평균 농도가 가장 컸던 달과 작았던 달은 작년과 동일하게 각각 10월(407.8 ppm)과 2월(404.3 ppm)에 나타났다. 2010~2018년 관측 결과, 연중 CO_2 월평균 농도의 최솟값은 1~3월 중, 최댓값은 9~10월에 나타나는데 2019년의 경우도 이와 잘 일치한다. 결측이 빈번하였던 6월과 7월을 제외한 나머지 월평균 자료로부터 산출한 2019년 평균 CO_2 농도는 406.2 ppm (gap-filling 된 자료를 이용한 경우, 406.3 ppm)이었다. 장기 추세 및 계절 변동을 감안한 다항식(WMO, 2009)을 이용하여 산출한 2019년 CO_2 농도의 연 증가율은 2.4 ppm/year으로 2010년부터 2019년까지 CO_2 농도의 평균 연 증가율인 2.3 ppm/year보다 높은 증가율을 보였다.

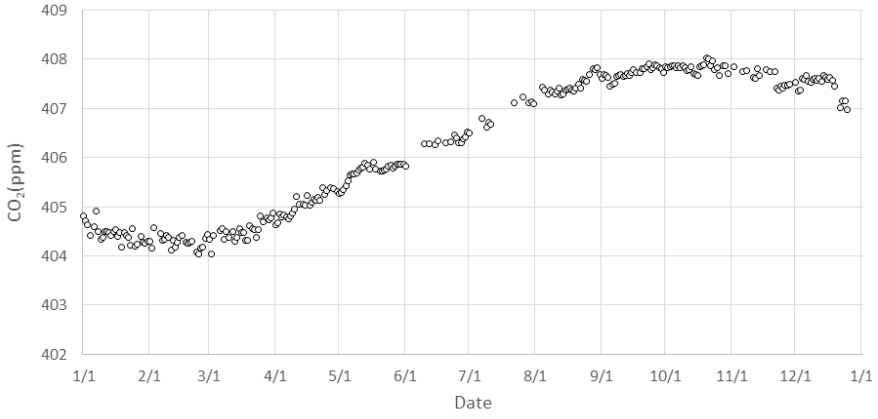


그림 4.1.7 2019년 남극세종과학기지에서 측정된 일평균 CO_2 농도의 변동.

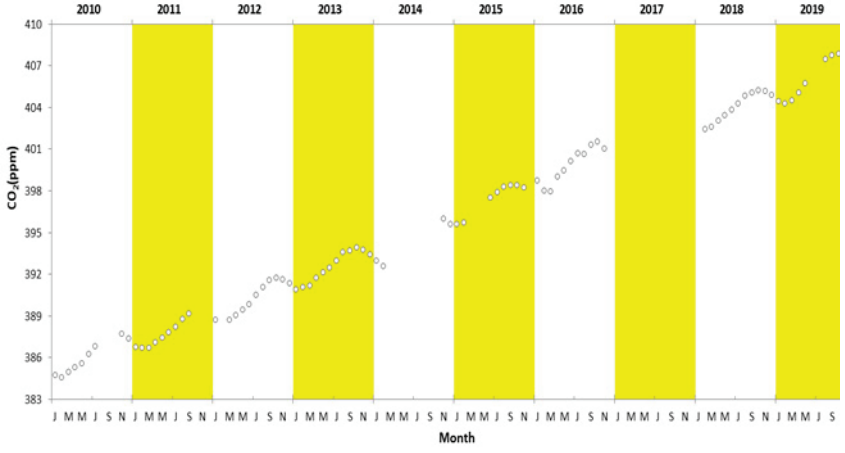


그림 4.1.8 2010~2019년 남극세종과학기지에서 측정된 월평균 CO_2 농도의 변동.

다. 남극 장보고과학기지 위탁관측소

남극장보고과학기지(74.62°S, 164.23°E, 이하 장보고기지)는 동남극 북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 테라노바 만(Terra Nova Bay)에 위치한 대한민국의 두 번째 남극과학기지로 2014년 2월에 준공하였다. 장보고기지는 기상 관측, 라디오존데 및 오존존데를 이용한 고층 관측, 지상 온실기체 분석 등, 대기물리, 화학, 복사 등의 대기과학 전 분야에 걸친 연구 장비를 갖춘 과학기지이다.

장보고기지에서의 CO_2 관측은 본관동으로부터 북서쪽으로 약 1km 떨어진 대기구성물질

관측동에서 이루어지고 있다. 기지는 연중 서풍계열이 우세한 지역에 위치하여 관측동은 기지의 풍상측에 위치하는 경우가 많아, 상대적으로 기지 활동의 영향이 적은 관측자료를 확보할 수 있다. CO_2 농도 관측을 위하여 WS-CRDS (Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy) 방식의 CO_2/CH_4/H2O 분석기(G2301, Picarro, Inc., CA, USA)를 이용하고 있으며, 부속 장치로는 분석 시료로부터 수분을 제거하는 냉동 제습장치, 주기적인 교정 및 기체의 흐름을 조절하는 유량 조절 및 교정 장치가 설치되어 있다(그림 4.1.9). 관측동 옥상에 설치된 흡입구(지상으로부터 약 5 m)로부터 유입된 공기는 실내에 설치된 매니폴드(manifold)를 통해 냉동제습장치로 분기된다. 냉동제습장치는 샘플 공기의 온도를 -80℃까지 냉각하여, 분석용 시료에 포함된 수분의 양을 0.001%이하로 낮춘다. 그러나 2019년 관측 기간 동안, 냉동제습장치 두 대 중 한 대에 문제가 발생하여 격일로 제습이 수행되었다. 유량 조절 및 교정 장치는 기체분석기로 주입하는 유량을 일정하게 유지하며, 자동주입밸브를 통해 주기적으로 표준가스를 주입한다. 2019년 장보고기지에서 정기적으로 주입한 표준가스 3 세트는 국립기상과학원에서 제조한 것으로(1) CO_2: 406.030 ppm, CH_4: 1.99870 ppm, 2) CO_2: 370.380 ppm, CH_4: 1.82690 ppm, 3) CO_2: 400.886 ppm, CH_4: 1.97361 ppm; 2017년 공급) 약 5일 간격으로 주입하여, 기체분석기의 성능을 주기적으로 점검하였다.

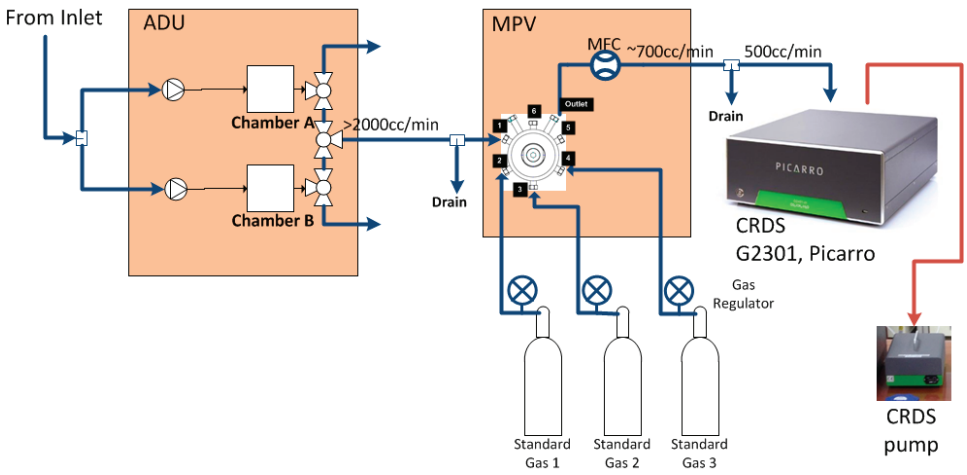


그림 4.1.9 CO_2 측정 시스템 개요도(ADU: 냉동제습장치, MPV: 유량조절 및 교정 장치).

그림 4.1.10은 2019년 장보고기지에서 측정된 월평균 풍속과 기온의 변동이다. 연중 월평균 풍속의 변동이 크게 나타났으나 평균적으로 겨울철에 풍속이 강하고 여름철에 약하였다. 11월의 평균 풍속이 1.7 m/s로 최저로 나타났으며, 6월이 6.7 m/s로 가장 강하였다. 순간 최대풍속은 4월에

기록된 37.9 m/s이었다. 풍향은 작년과 동일하게 서풍과 서남서풍이 각각 약 17%의 비율을 차지하며 우세하였고, 2019년에 기지 주변의 주오염배출원인 발전동 배출 가스에 영향 구간인 185~205°의 풍향이 차지하는 비율은 3% 미만이었다(그림 4.1.11). 연평균 풍속은 4.4 m/s로 지난 4년 평균과 비슷하였다. 기온은 풍속과 비교하여 상대적으로 뚜렷한 계절변동을 보였으며 12월이 -1.7℃로 가장 높았고, 6월이 -22.4℃로 가장 낮아, 연중 영하의 월평균 기온을 기록하였다. 5월과 7월에 뚜렷한 기온 상승 현상이 보였으며 이는 동남극 내륙 기지인 이탈리아-프랑스 남극 공동 연구기지 Dome-C (위도: 75.10°S, 경도: 123.35°E, 고도: 3,233 msl.) 관측소에서도 관측되는 것처럼, 북풍으로의 기류 변화에 기인한 기온상승일 것으로 추정된다 (Argentini et al., 2014). 연평균 기온은 -14.0℃로 나타나, 작년 기록을 갱신하여 2014년부터 관측한 이래 가장 높은 연평균 온도를 기록하였다. 연 평균 기압은 986.5 hPa으로 예년 984.8 hPa보다 1.7 hpa 높은 값이며, 역시 관측 이래 가장 높은 기압을 나타냈다.

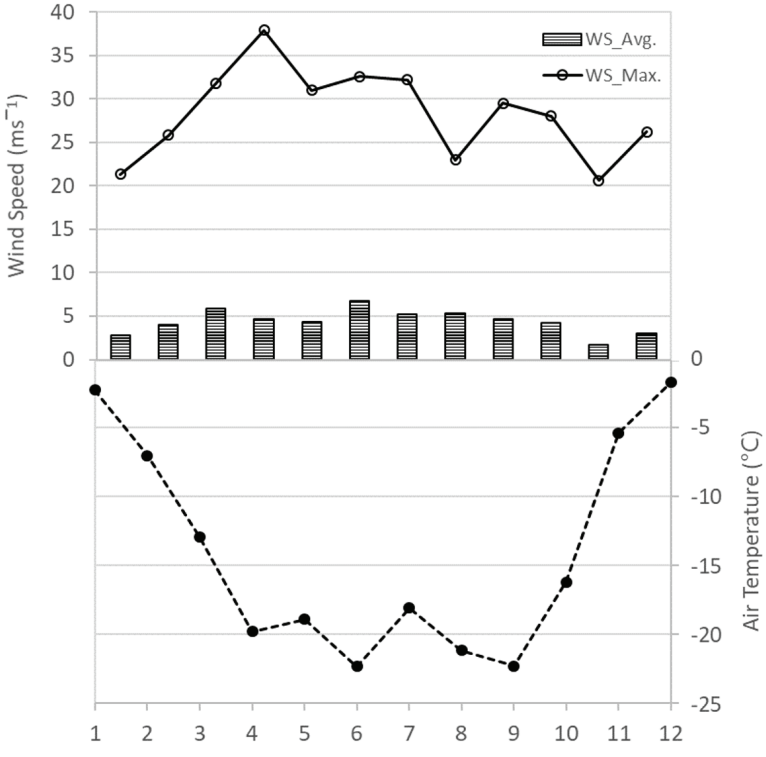


그림 4.1.10 2019년 남극장보고과학기지 월평균 풍속, 최대 풍속 및 기온의 변동.

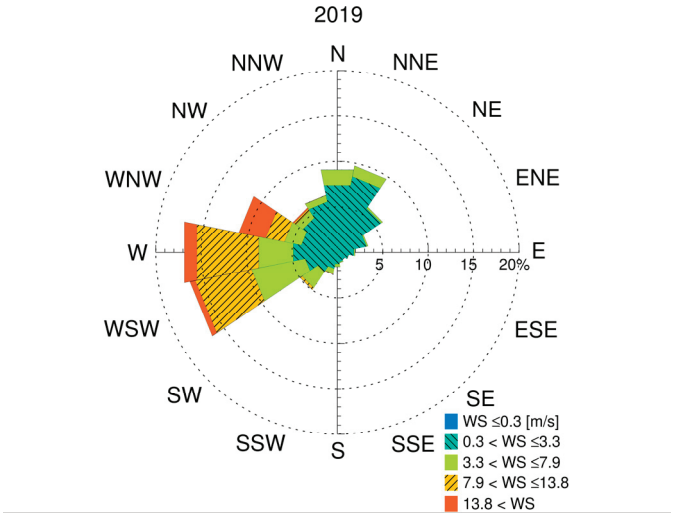


그림 4.1.11 2019년 남극장보고과학기지의 풍향 분포.

이산화탄소 관측은 매 2~3초마다 이루어지며, 10분간 관측자료는 약 200~210개 샘플로부터 결정된다. 10분 동안 산술평균과 표준편차를 구한 후 산술평균으로부터 표준편차의 2배 이상의 잔차를 보이는 자료를 제외한 후, 30초 자료 구간마다 중앙값(median)을 20개를 선정, 평균을 산출하여 10분 대푯값으로 정의하였다. 기지의 풍향에 따른 블랙카본 농도의 분포에 근거하여, 풍향이 발전동이 위치한 185~205°일 때 관측된 자료는 분석에서 우선 제외를 하였다. 그리고 기지에서 관측된 블랙카본의 농도를 기준으로 100 ng/㎥ 이상인 경우, 기지 활동의 영향(혹은 관측동 주변의 인위적 발원)을 받은 것으로 간주, 자료 분석에서 제외하였다. 또 월동대원의 기록에 근거하여 관측동 주변의 오염이 의심되는 자료는 제외 후, 시간 평균을 산출하였다. 자료 품질과 관련한 추가 내용은 부록을 참조하면 된다. 시간 평균으로부터 일평균을 산출 후, 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 추세를 산출하였다. 이후 절차는 기상청의 온실기체 자료 처리 방법(기상청, 2016)에 따랐다.

그림 4.1.12은 2019년에 장보고기지에서 관측된 일평균 CO_2 농도의 변동을 나타낸다. 2019년 일평균 CO_2 농도는 405.5 ppm (2월 14일)에서 409.1 ppm (10월 1일)의 범위를 보였다. 해양에 의한 CO_2 흡수가 우세한 여름철(1~2월) 낮은 농도를 보이다가 겨울철로 가면서 높아지고, 여름이 도래하면서 다시 낮아지는 패턴을 보였다. 2019년 연평균 CO_2 농도는 407.45 ppm이었으며, 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식(WMO, 2009)으로 산정한 연증가율은 2.7 ppm/year 이었다(단, 자료 품질관리에 따라 변동 가능함). 이는 2019년 전지구 평균 이산화탄소 농도 증가율, 2.5 ppm/year보다 높은 수준이었으며[5], 장보고기지 관측이래 가장 높은 증가율이었다. 장보고

기지에서 2015년 2월 CO_2 관측(396.1 ppm)을 시작한 이후로 지속적인 증가추세를 보였고 (그림 4.1.13), 매년 2.3~2.8 ppm/year의 연간증가율을 보여왔다. 2015년부터 2019년까지 평균 연증가율은 2.5 ppm/year이다.

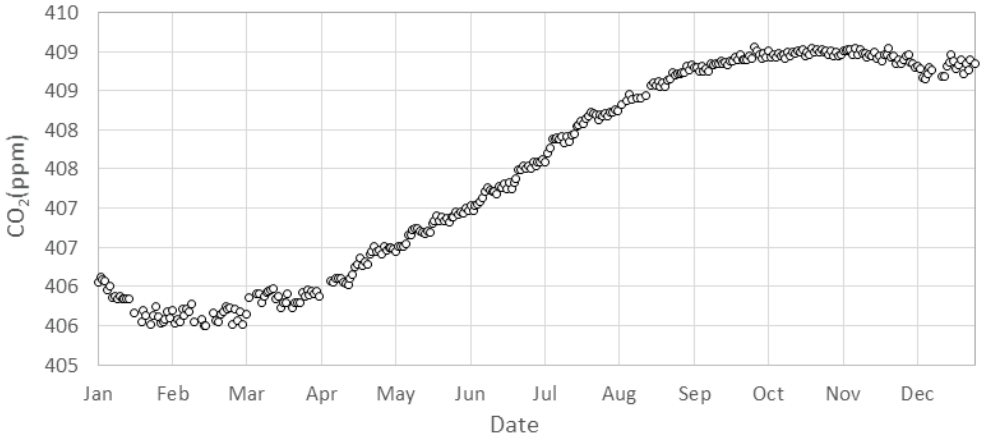


그림 4.1.12 2019년 남극장보고과학기지에서 측정된 일평균 CO_2 농도의 연변동.

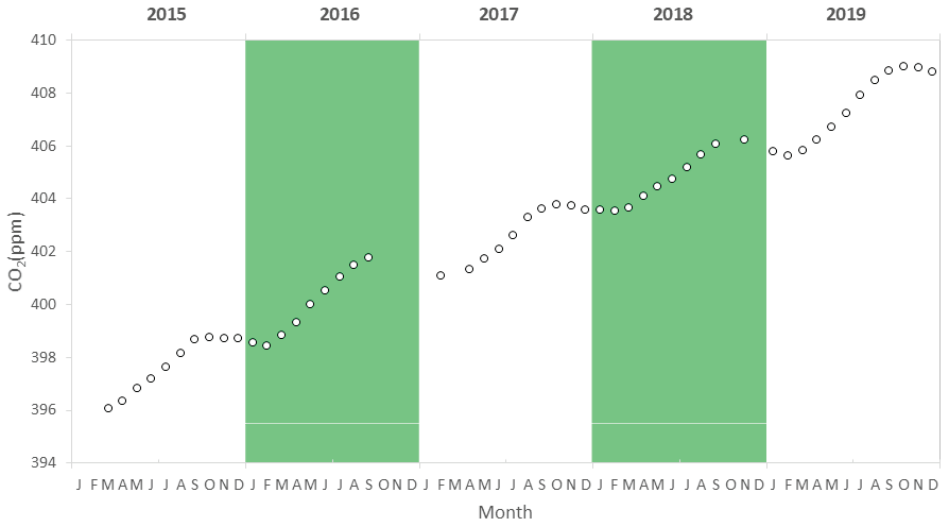


그림 4.1.13 2015~2019년 남극장보고과학기지에서 측정된 월평균 CO_2 농도의 변동.

5) 출처: Ed Dlugokencky and Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)

라. 광릉수목원 위탁관측소

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, 252 m a.s.l.)에 위치한다. 광릉 산림은 500년 간 훼손되지 않는 숲으로 국내에서 가장 잘 보존된 자연림으로 꼽힌다. 광릉 관측지는 80~200년 수령의 졸참나무(Quercus serrata)와 서어나무 (Carpinus laxiflora)가 주종을 이룬다(Lee et al., 2007). 군락 높이(canopy height)는 평균 18 m이고 최대 엽면적 지수(leaf area index)는 약 6으로 여름에 나타난다. 토양은 사양토(75%), 사질식양토(13%), 사토(12%)를 함유하고 있다.

CO_2 플럭스 관측을 위한 에디 공분산 시스템은 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(footprint), 접근성 등을 고려하여 플럭스 타워의 40 m 높이에 설치되어 있다(그림 4.1.14). 에디 공분산 시스템은 삼차원 초음파 풍향풍속계(모델 CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 고속반응 폐회로 적외선 가스분석기(모델 EC155, Campbell Scientific Inc.)로 구성되어 있다. 삼차원 풍속과 CO_2 농도는 10 Hz로 관측하였고, 10 Hz의 원시자료(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 CO_2 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 가스분석기(모델

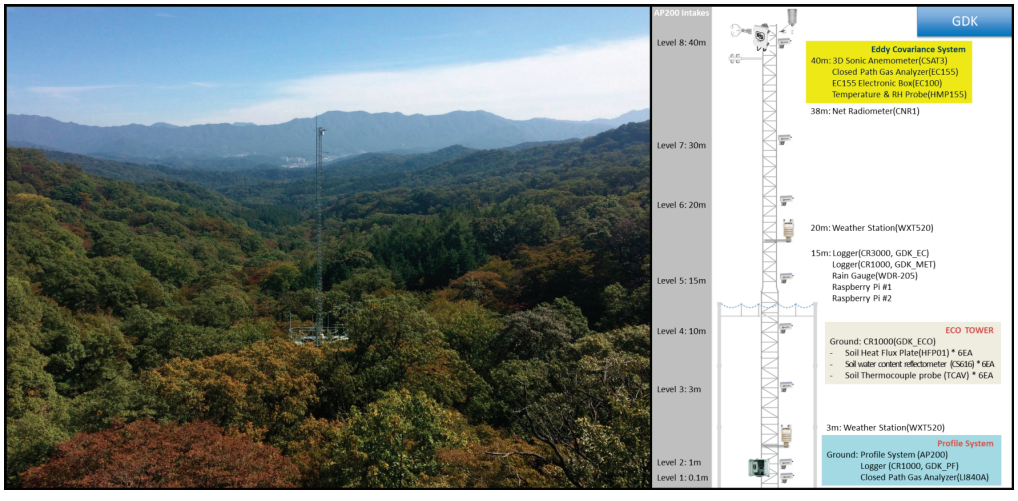


그림 4.1.14 광릉 활엽수림 타워의 모습(왼쪽)과 관측장비 모식도(오른쪽).

LI-840, LI-COR Inc., USA)를 통해 CO_2 농도분석이 초당 2회씩 이뤄지고, 전체높이 분석시간은 120초/회이며, 30분 평균자료를 집록기(모델 CR1000, Campbell Scientific Inc.)에 저장되고 있다.

가스분석기 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 가스 흡입구 청소와 필터 교체 등을 비롯한 기기 유지보수와 함께 수동 보정을 수행한다. 에디 공분산 시스템은 CO_2 농도의 '분산', 프로파일 시스템은 CO_2 농도의 '평균'을 정확히 관측하는 것을 목적으로 하기에 본 보고서에는 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO_2 플럭스와 프로파일 시스템에서 관측된 CO_2 농도를 보고하였다. 자료의 품질관리를 거쳐 2019년도 에디 공분산 시스템에서 관측한 CO_2 플럭스의 자료 수득률은 41%, 프로파일 시스템에서 관측된 CO_2 농도의 자료 수득률은 92%로 작년과 비슷하거나 조금 낮은 수준이었다.

그림 4.1.15는 에디 공분산 시스템으로 관측한 CO_2 플럭스의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 CO_2 플럭스는 40 m 높이에서 에디 공분산 시스템이 관측하는 발자국 영역내(예를 들면

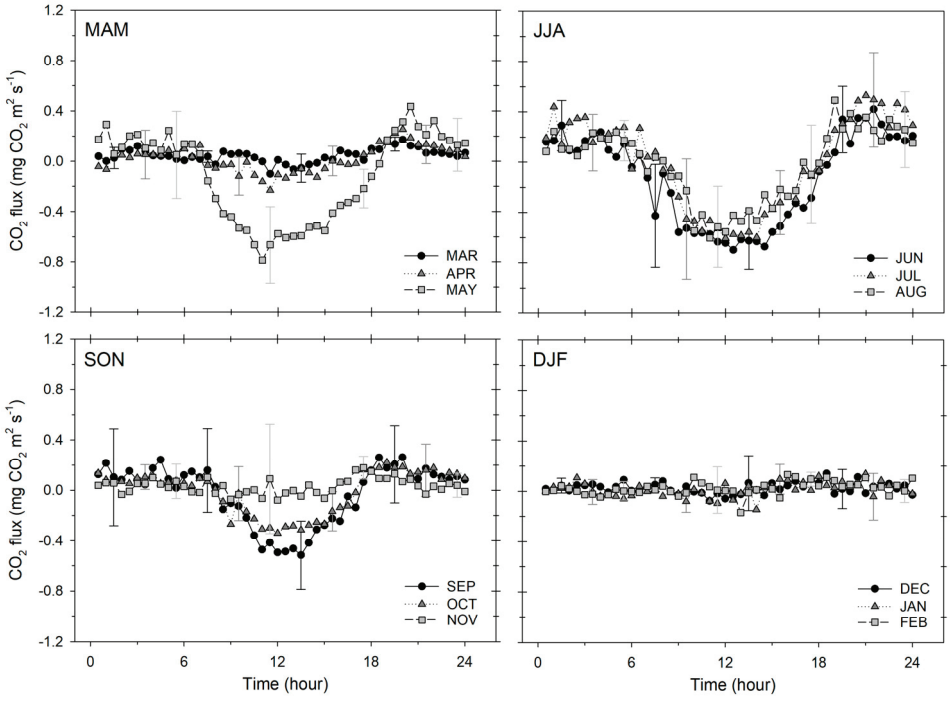


그림 4.1.15 광릉 활엽수림의 월별 CO_2 플럭스의 평균 일 변동. 오차막대는 각 시간대의 가용한 자료들의 표준편차를 나타냄.

200~1000 m)를 대표하는 값이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5~9월)동안 CO_2 플럭스는 밤에는 양의 값(CO_2 방출)을 갖고, 낮에는 음의 값(CO_2 흡수)을 갖는 뚜렷한 일 변동을 보였다.

그림 4.1.16은 프로파일 시스템으로 관측한 CO_2 농도의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 CO_2 농도는 배경대기농도 관측과 같이 넓은 수평적 공간을 대표하는 경계층 내의 잘 혼합된 평균적인 농도이기보다는 에디 공분산 플럭스 관측과 마찬가지로 40 m 높이에서 프로파일 시스템이 관측하는 발자국 영역 내의 CO_2 농도이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5~9월)동안 CO_2 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.

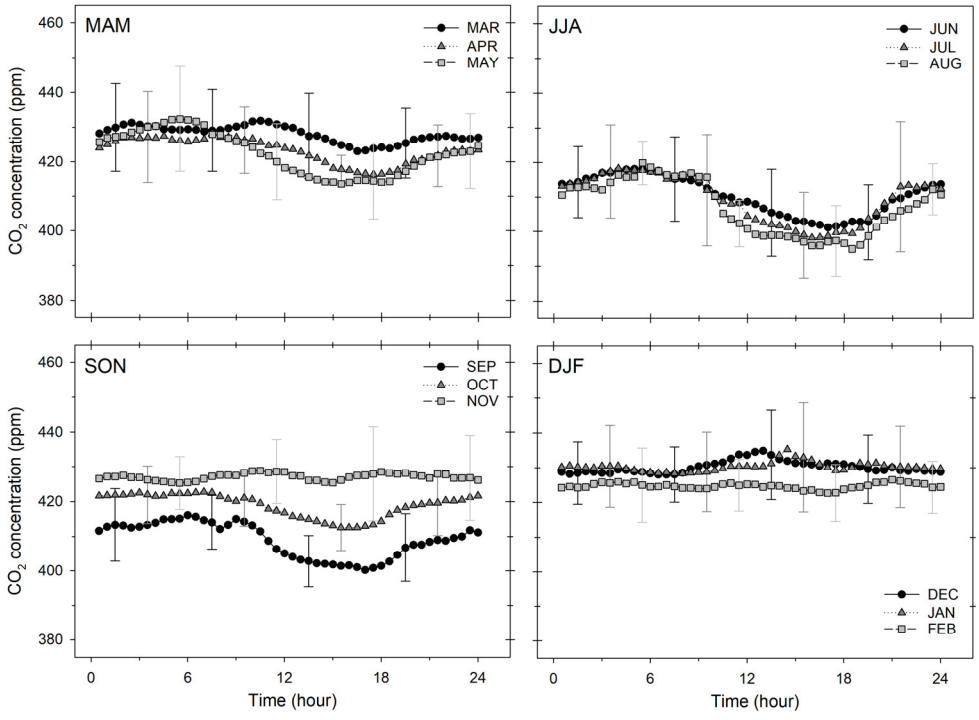


그림 4.1.16 광릉 활엽수림의 월별 CO_2 농도의 평균 일 변동. 오차막대는 각 시간대의 가용한 자료들의 표준편차를 나타냄.

일적산 CO_2 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료)는 -5~8g C m^{-2} day^{-1}의 변동 범위를 보였다. 개엽 후인 4월 중순부터 CO_2 흡수원으로 나타나다가 장마기간 CO_2 중립 또는 발생원으로 변했다. 이후 다시 CO_2 흡수원으로 나타나다가 낙엽이 지기 시작하면서 다시 탄소 발생원으로 바뀌었다(그림 4.1.17).

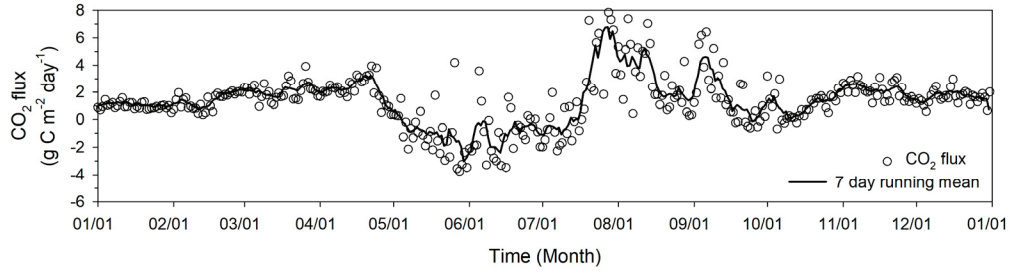


그림 4.1.17 광릉 활엽수림의 일적산 CO_2 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료).

일평균 CO_2 농도는 390~450 ppm의 변동 범위를 보였으며, 개엽(4월 중순)의 시작과 함께 꾸준히 감소하여, 식생의 활동이 최대인 여름에 최솟값을 보였다(그림 4.1.18). 8월초부터 생긴 결측은 적외선 가스 분석기에 들어가는 적외선 광원의 수명이 다 되어 발생한 것으로, 이를 교체한 후부터 정상적인 관측이 다시 이어졌다. CO_2 플럭스 및 농도의 계절 변동은 식생 변화와 상관성이 크며, 식생 계절 변화를 감시하기 위해 낮 동안 한 시간 간격으로 카메라를 이용한 이미지 촬영이 이뤄졌다. 관측 타워의 15 m 높이에 카메라가 설치되어 아래 방향으로 관측지역(에디 공분산 시스템과 프로파일 시스템의 주간 발자국 영역)의 경관을 촬영하였다(그림 4.1.19). 2019년에는 개엽이 4월 중순부터 시작하여 예년과 비슷했거나 조금 빨랐다.

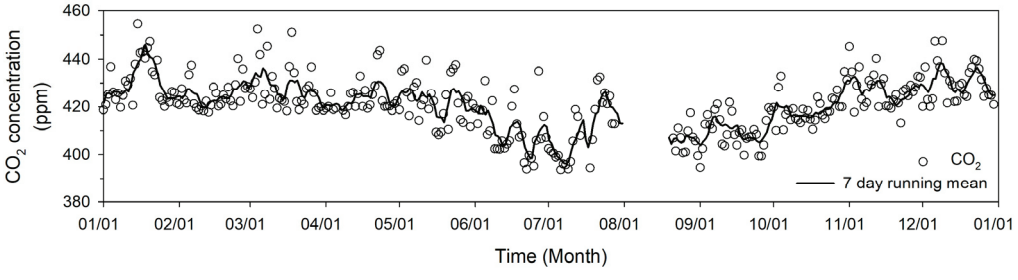


그림 4.1.18 2019년 광릉 활엽수림의 일평균 CO_2 농도.



그림 4.1.19 활엽수림 타워에서 촬영한 타워 주변 경관
(사진 좌측상단에 촬영 날짜 표기).

광릉 활엽수림 관측지는 산림에서 관측된 이산화탄소 플럭스 중 가장 긴 자료를 보유하고 있다(그림 4.1.20). 2006년부터 자료가 안정적으로 수집되어, 10년이 지난 현재도 산림과학원과 기상청의 협력과 지원으로 장비와 타워 구조물들을 교체하면서 꾸준히 관측을 이어나가고 있다. 광릉 활엽수림은 550년간 보존된 숲으로 중부 온대활엽수림의 극상(climax)에 가까운 것으로 알려져 있는데, 그 이유는 (1) 숲의 천이과정의 극상 단계에서 나타나는 수종인 서어나무(Carpinus laxiflora)가 해당 숲의 우점종 중에 하나이며, (2) 극상 단계의 특징들(예, 다양한 식생이 혼재, 수직적 계층 분화, 복잡한 군집 구조)이 나타나기 때문이다. 광릉 활엽수림과 같은 극상림(climax forest)이자 노령림(old-growth forest)의 경우, 광합성량은 상대적으로 적고 고사목의 분해로 인하여 탄소 흡수와 방출이 균형을 이루는 것으로 알려져 있으며, 2006년부터 관측된 이산화탄소 플럭스 결과를 보면 연적산 시 약한 탄소 흡원이거나 중립(0 g C m^{-2} $year^{-1}$ 내외)을 이루는 것을 확인하였다(Kang et al., 2014). 다만 최근(2014년 이후)에 적은 강수량과 높은 기온으로 인해 광합성량은 줄어들고 분해되어 방출되는 이산화탄소량은 늘어나 연적산 시 이산화탄소 발원(100 g C m^{-2} $year^{-1}$ 이상)으로 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

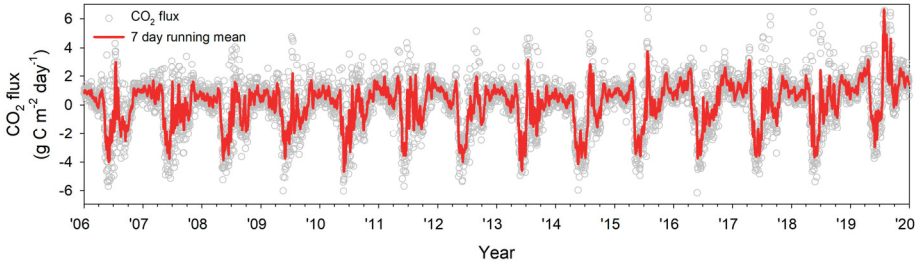


그림 4.1.20 광릉 활엽수림에서 관측된 2006~2019년 일적산 CO_2 플럭스.

4.1.3 메탄(CH_4) 배경농도

메탄은 이산화탄소 다음으로 중요한 온실가스 중 하나로 ppb (part per billion, 10억 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 복사강제력은 0.97 [0.74~1.2] W/m^2로 전지구 온실가스 복사강제력의 32% 기여하고 있다(IPCC, 2013). 남극과 북극에 아이스코어를 분석한 결과 현재 관측되고 있는 메탄의 농도는 지난 650,000년 동안 최고의 농도로 나타났다(IPCC, 2013). 과거 1000 A.D.와 1800 A.D. 사이에 북반구와 남반구의 메탄 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). 메탄의 배출원은 습지, 바다, 대지의 사용, 쌀농사, 발효, 화석연료 등 인위적·자연적 요소가 다양하게 존재하는 반면, 소멸원은 주로 OH 라디칼로 알려져 있다. 메탄은 한번 배출되면 약 9년 정도 대기 중에 체류하고, 다른 온실가스 종에 비해 체류시간이 짧기 때문에 정책적으로 배출량을 줄이면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다.

한반도에서는 안면도에서 1999년부터 메탄을 측정하기 시작하였다. 이후 고산과 울릉도에서 측정이 추가되어 한반도 3면을 둘러싼 메탄에 대한 정보를 얻게 되었다. 본 보고서에서는 고산은 2014년 자료부터, 울릉도는 2018년 자료부터 공식적으로 사용하기 시작하였다(표 4.1.2).

표 4.1.2 2019년 안면도, 고산, 울릉도, 전지구의 CH_4 배경농도 (ppb)

	안면도	고산	울릉도	전지구[1]
2019년 평균값	1991	1967	1960	1867
2019년 대비 절대 증가값[2]	17	20	17	10
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2009~2018년)	8 ppb/year	-	-	7 ppb/year
과거 절대 증가값 평균 (2000~2006년)	1 ppb/year	-	-	0 ppb/year

[1] 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.
[2] 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

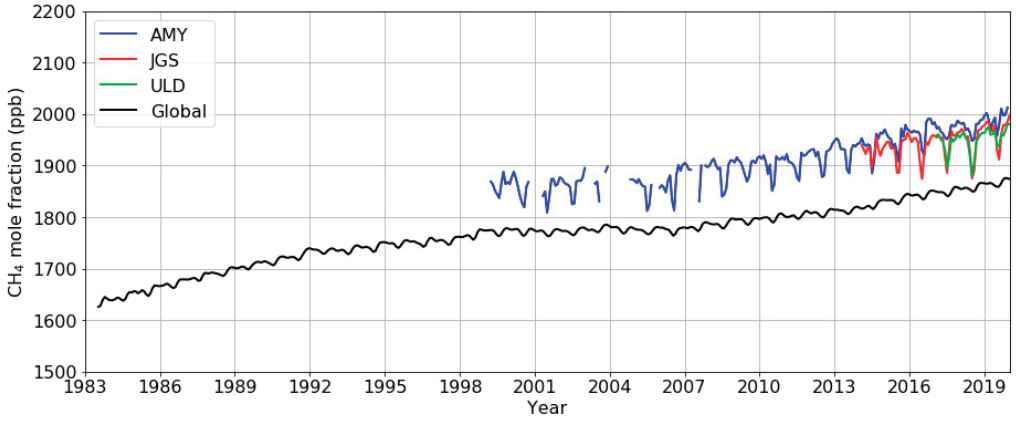


그림 4.1.21 1983년부터 2019년까지 안면도(AMY, 파란색), 고산(JGS, 붉은색), 울릉도(ULD, 초록색), 전지구(Global, 검정색)의 메탄 배경농도.

전세계적으로 메탄의 농도는 1999년부터 2006년까지 증가가 둔화되었다가 다시 2007년부터 꾸준히 증가하는 것으로 나타난다. 안면도도 결측된 기간이 많지만 이러한 경향성을 잘 반영한다(그림 4.1.21). 안면도는 1999년부터 2006년까지 평균 절대 증가값이 약 1 ppb/year로 관측되었으나, 최근 10년 동안은 10 ppb/year로 증가하였으며, 2018년과 2019년 사이의 증가값 17 ppb/year은 과거 10년보다 높다. 고산과 울릉도 또한 전년도에 비해 각각 20 ppb와 17 ppb로 증가하였다(표 4.1.2).

NOAA에서 발표한 전지구 농도도 1999년부터 2006년까지 거의 증가하지 않다가, 최근 10년간 8 ppb/year의 수준으로 증가하였으며, 2018년도에 비해 2019년도는 10 ppb 증가한 것으로 나타났다. 따라서 한반도 뿐 만 아니라 전지구적으로 메탄은 최근 10년간의 증가값보다 2019년의 증가값이 높았다.

2019년 안면도의 메탄 농도는 1991 ppb로 최초 관측을 시작했던 1999년에 비해 130 ppb 증가하였으며, 산업화이전의 농도를 700 ppb로 간주할 때 이 농도는 282% 증가한 값이다. 안면도, 고산, 울릉도는 전지구 평균보다 각각 124 ppb, 100 ppb, 93 ppb 높은 것으로 관측되었다.

메탄의 계절변동은 여러 배출원과 소멸원인 OH라디칼과 계절풍 등에 의해 일어난다. 특히 북반구에서 계절변동의 변동 폭이 크며, 여름철 OH라디칼의 농도가 높아지면서 메탄과 반응하여 메탄의 농도는 낮아진다. 2019년 한반도 감시소에서는 7월 혹은 8월에 가장 낮고 12월에 가장 높은 값을 보였다. 낮은 농도가 여름철에 나타나는 것은 거의 일정하지만, 높은 농도가 나타나는 것은 메탄의 기원인 습지나 생태소각등과도 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 4.1.22a). 세 관측소의 증가율은 2014년에 높게 나타났다가, 2019년에 다시 높게 나타나는 경향을 보여 향후 이에 관한 연구가 필요하다(그림 4.1.22b).

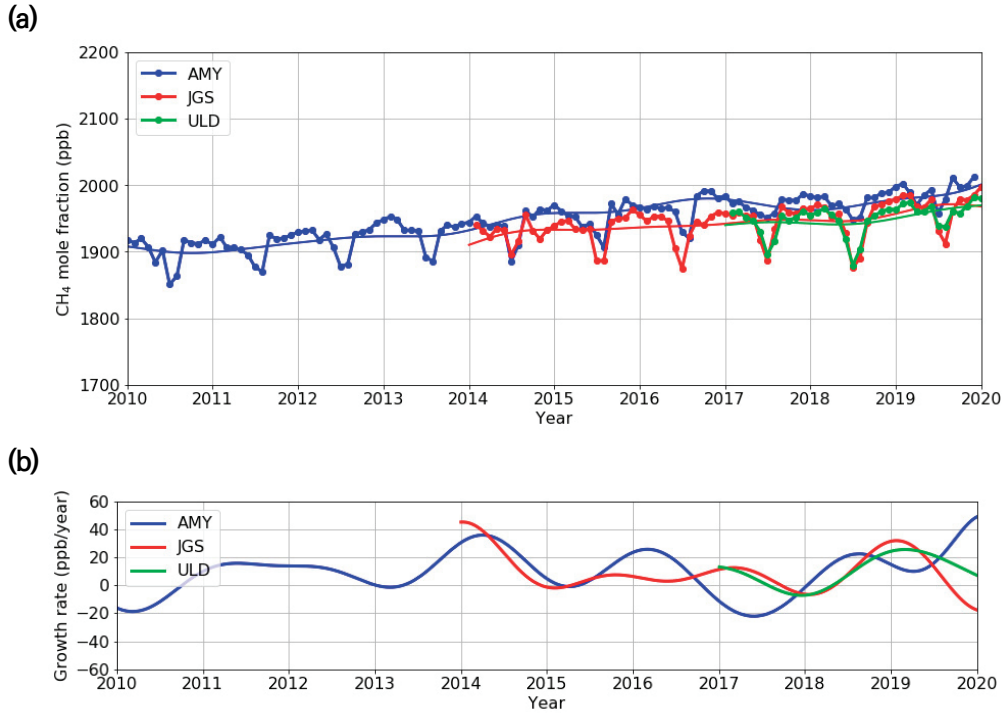


그림 4.1.22 최근 10년간 안면도(AMY, 파란색), 고산(JGS, 빨간색), 울릉도(ULS, 초록색)의 메탄 (a)배경농도와 (b)증가율.

4.1.4 아산화질소(N_2O) 배경농도

아산화질소는 대기중 체류시간이 약 121년 정도 되는 온실가스로 1750년 기준 2011년의 복사강제력이 0.17 [0.13~0.21] W/m^2로 전체 온실가스 중 5%를 차지하였다(IPCC, 2013). 아산화질소는 인위적 온실가스 중 세 번째로 많은 것으로 알려져 있으며, 산업화 이전(1750년)에는 270 ppb 수준으로 존재하였다. 아산화질소의 자연기원은 해양, 토양 등이 있으며, 화석연료, 생태소각, 농업비료의 사용, 여러 산업공정에서 배출되는 인위적 기원 등이 있다. 인위적 배출원과 자연적 배출원의 비율은 거의 같다. 아산화질소는 광분해에 의해 성층권에서 소멸되며 때론 오존층파괴 과정의 촉발제(trigger)로 작용하기도 한다. 그러나 아직도 아산화질소의 전체 순환에 대해서 이해하진 못하고 있다.

표 4.1.3 2019년 안면도, 고산, 전지구의 N_2O 배경농도 (ppb)

	안면도	고산	전지구[1]
2019년 평균값	333.9	333.5	331.9
2019년 증가값[2]	1	1.2	1
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2009~2018년)	1 ppb/year	-	0.9 ppb/year

[1] 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

[2] 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

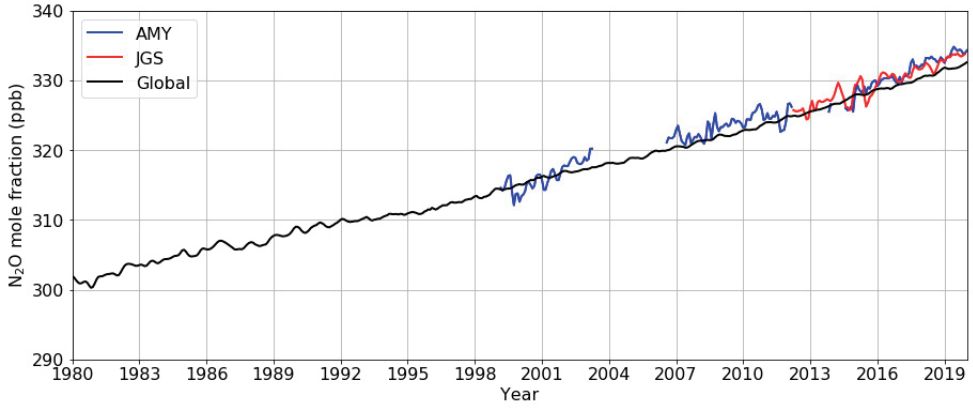


그림 4.1.23 안면도(AMY, 파란색), 고산(JGS, 붉은색), 전지구(Global, 검정색)의 아산화질소 배경농도.

1999년부터 2019년까지 안면도와 고산의 아산화질소의 농도를 전지구와 비교했을 때 그 기울기가 유사하게 나타났으나 변동폭이 컸다(그림 4.1.23). N_2O의 증가율은 남반구(0.2 ppb/year)에 비해 북반구가 높게 나타나며 그 이유는 북반구의 인구밀도가 높고 그로 인한 농업 등의 발달이 아산화질소의 증가율을 높인 것으로 알려졌다. 안면도와 고산 또한 주변 지역의 농업활동 등의 영향으로 변동폭이 전지구보다 높게 나타났을 가능성이 있을 것으로 추측된다.

그러나 자료의 변동폭이 2016년부터는 안정하게 나타나 기기의 안정화와 변동폭의 상관이 있다. 증가율에서도 2017년부터 0~1 ppb에서 일정하게 유지되고 있음을 보인다(그림 4.1.24).

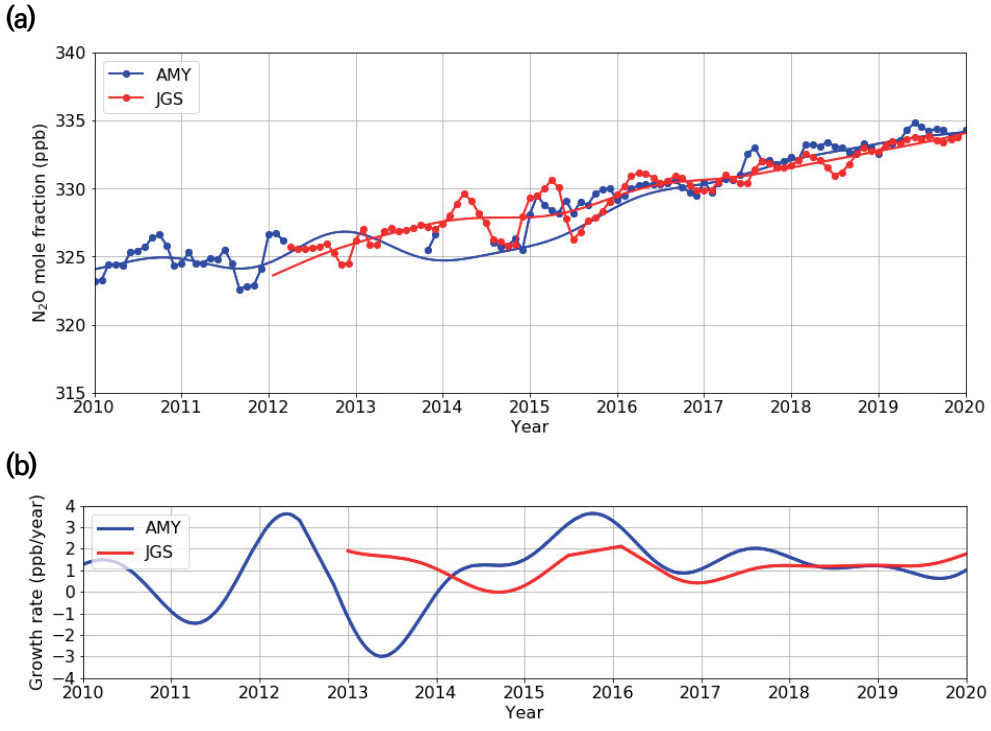


그림 4.1.24 최근 10년간 안면도(AMY, 파란색), 고산(JGS, 빨간색)의 메탄 (a)배경농도와 (b)증가율.

4.1.5 육불화황(SF_6) 배경농도

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

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

2019년 한반도의 육불화황 농도는 안면도 10.3 ppt, 고산 10.2 ppt, 울릉도 10.3 ppt로 나타났으며, 관측소간 차이가 거의 없다(표 4.1.4). 한반도의 값과 전지구 평균(2019년 10.1 ppt)과는 0.1~0.2 ppt 차이가 난다(표 4.1.4). 북반구보다 활발하지 않은 산업활동으로 남반구에서의 육불화황 배출농도가 낮기 때문에 전지구의 평균값이 북반부 관측소인 우리나라나 보다는 낮다. 안면도를 비롯하여 전세계적으로 최근 10년간 0.3 ppt/year씩 증가했으며, 2018년과 2019년 사이 안면도와 울릉도는 0.5 ppt, 고산과 0.3 ppt 씩 증가하였다(표 4.1.4와 그림 4.1.25).

표 4.1.4 2019년 안면도, 고산, 울릉도, 전지구의 SF_6 농도 (ppt)

	안면도	고산	울릉도	전지구[1]
2019년 평균값	10.3	10.2	10.3	10.1
2019년 증가값[2]	0.5	0.3	0.5	0.3
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2009~2018년)	0.3 ppb/year	-	-	0.3 ppb/year

[1] 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

[2] 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

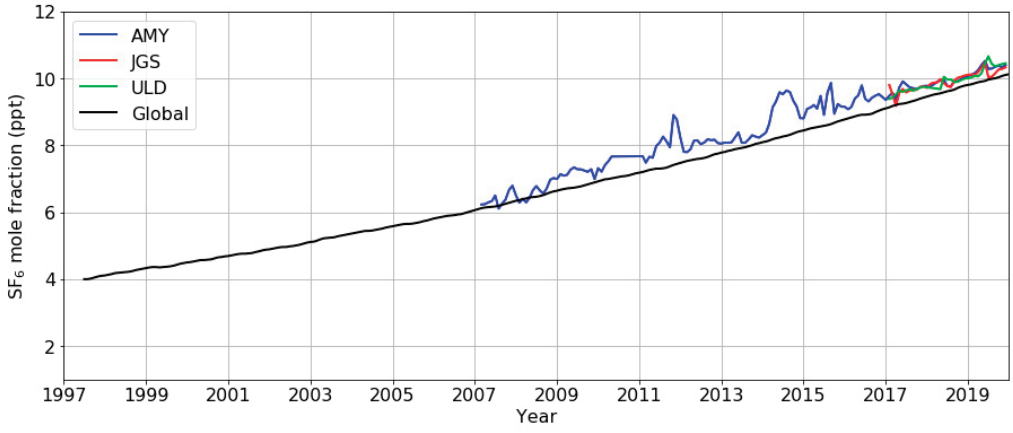


그림 4.1.25 안면도(AMY, 파란색), 고산(JGS, 붉은색), 울릉도(ULD, 초록), 전지구(Global, 검정색)의 육불화황 배경대기 농도.

4.1.6 염불화탄소류(CFCs) 배경농도

염화불화탄소류는 주로 성층권에서 자외선에 의해 분해되며 대기 중 체류시간이 CFC-11은 50년, CFC-12는 110년으로, CFC-113은 85년으로 나타난다. 염화불화탄소류는 냉매제로 주로 사용되며, 성층권의 오존층을 파괴하는 염소와 브로민이 포함되어있어, 1990년대 몬트리얼 의정서를 채택하여 규제를 시작하였다. 북반구의 관측소에서는 CFC-11는 1992년에 최곳값을 보였다가 감소추세를 나타내며, CFC-12는 2005년에 최곳값을 보이고 감소추세를 보이고 있다. CFC-12의 경우 대기 중 체류시간이 다른 두 물질에 비해 상대적으로 길기 때문에 규제에 대한 실제 반응속도는 늦고, 따라서 감소추이가 상대적으로 늦다.

한반도의 염화불화탄소류 또한 감소하고 있다. CFC-11은 점차 감소해 관측을 시작한 1999년에 비해 약 39 ppt 감소하여 2019년 그 농도가 228.8 ppt이다(표 4.1.5). 전년도에 비해 오히려 0.5 ppt 증가한 것으로 관측되나, 이는 기준값의 변경에 기인한 것으로 판단된다. CFCs 3종의 경우 2019년 5월부터 WMO 기준으로 재산정하였으며, 척도간 차이는 온실가스 서론(4.1장 참고)에 서술하였다. 전지구 평균은 227.6 ppt로 안면도보다 1.2 ppt 낮게 보고되었으나, 1~4월까지의 평균값으로 이보다 낮아질 수 있다.

표 4.1.5 2019년 안면도와 전지구의 CFCs 농도 (ppt)

	안면도 (KRISS 기준[3])			전지구 (WMO 기준)		
	CFC-11	CFC-12	CFC-113	CFC-11[4]	CFC-12	CFC-113
2019년 평균값	228.8	497.9	69.6	(227.6)	502	69.9
2019년 증가값[2]	0.5	-5.2	-0.5	(-0.6)	-3.6	-0.4
최근 5년간 절대 증가값 평균 (2014~2018년)	-0.2	-2.9	-1.0	(-1.5)	-3.0	-0.6

[1] 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.
[2] 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값
[3] 안면도는 본래 KRISS 기준을 사용하여 관측하였으나, 2019년 5월부터 WMO 기준을 이용하여 관측을 시작함.
[4] 전지구 CFC11의 농도는 1월부터 4월까지의 평균값으로 향후 변경될 수 있음.

Montzka et al.,(2018)에 의하면 CFC-11를 마우나로아 등 깨끗한 시료를 중심으로 분석하였을 때, 2012년 이후로 그 감소세가 50% 둔화되었다. 그 이유는 2008~2012년에 비해 2014~2017년 중국의 동부 지역에서 7.0 ± 3.0 Gg/year의 배출량이 더 증가했기 때문으로 추정된다(Rigby et al., 2019). 안면도에서도 전세계 경향성과 유사 수준을 보이고 있어, 고농도 관측사례에 대한 추가 연구도 필요하다. 반면, 2004년부터 2016년 초까지 자료의 질을 보증할 수 없는 기간이 있어 사용에 주의할 필요가 있다(그림 4.1.26a).

CFC-12는 전세계 추세와 마찬가지로, 한반도 또한 2002~2005년에 최곳값을 보였으며, 2005년보다 약 42.7 ppt 감소하여 2019년 497.9 ppt를 나타냈다. 같은 해 전지구는 502 ppt로 관측되어 한반도는 이들보다 낮다(그림 4.1.26b).

CFC-113은 2007년부터 관측하였으며, 2019년 69.6 ppt로 관측초기와 비교하면 약 11.8 ppt 감소했다. 같은 해 전지구 평균값은 69.9 ppt를 나타내 안면도보다는 0.3 ppt를 높다(그림 4.1.26c).

CFC-12와 CFC-113의 높은 값이 관측의 불확도에서 기인한 것인지, 실제 대기농도의 차이인지는 차후 연구가 필요하나, 감소 경향성은 전지구와 비슷한 것으로 관측되고 있다. 따라서 몬트리올 의정서 규제에 따른 결과가 주목된다.

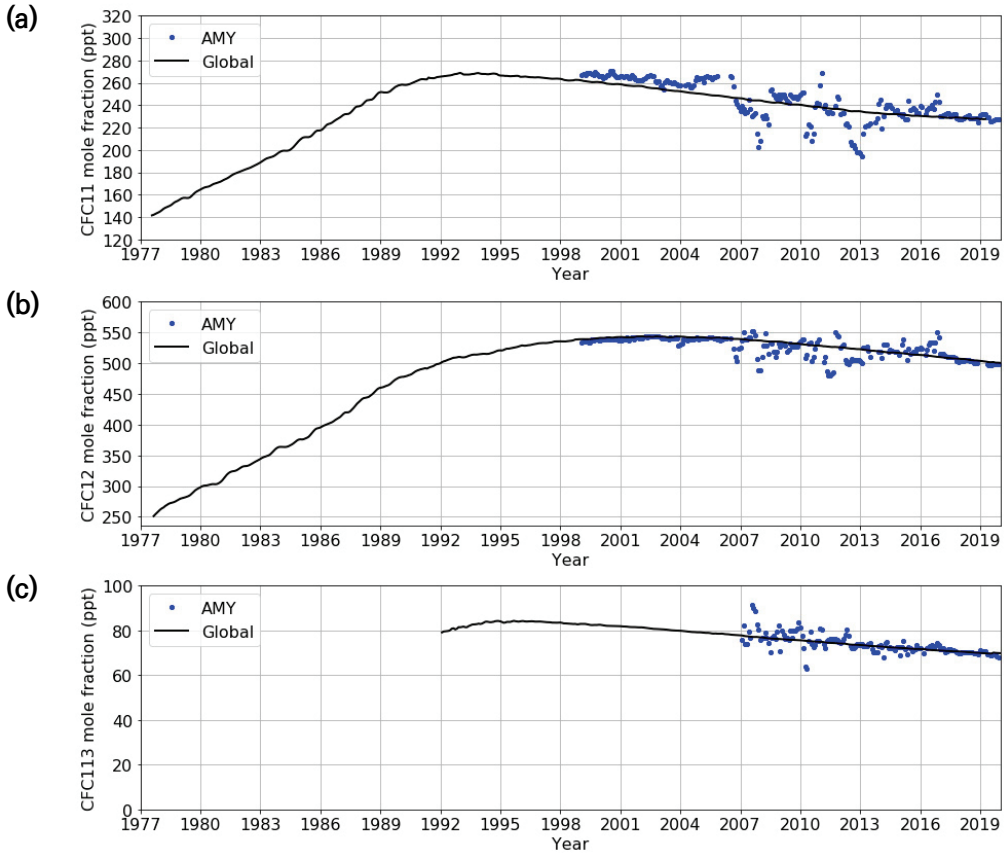


그림 4.1.26 안면도(AMY, 검정색)과 전지구(Global, 검은색)의 (a) CFC-11, (b) CFC-12, (c) CFC-113의 배경농도.

4.2 반응가스

ㅇ 지표오존(O_3) : 안면도 42.2 ppb (최근 10년 대비 +1%),
고 산 45.9 ppb (최근 6년 대비 +6.4%)
ㅇ 전구물질인 NOx와 광화학반응에 관여하는 직달일사 증가로 인해 고산의 지표오존 증가율이 큼
* 전구물질 : 최종 화합물을 생성하는 화학반응에 참여하는 화합물

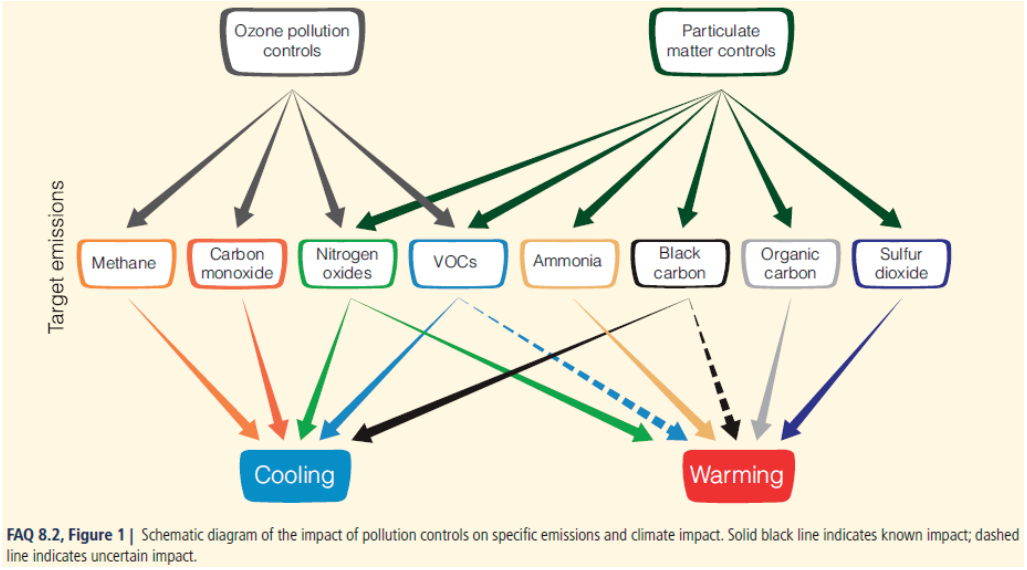
4.2.1 반응가스 감시의 목적

반응가스에는 지표오존(O_3), 일산화탄소(CO), 휘발성유기화합물(VOCs), 질소화합물(NO_X, NO_Y), 그리고 이산화황(SO_2) 등이 있다. 이들은 자연성분이기도 하지만 인위적으로 배출되기도 하며, 대기 내 화학반응에 관여하고 체류시간이 수 시간 ~ 수 개월 정도이다. 따라서 전 지구적으로 봤을 때 지역에 따라 반응가스의 시간과 공간적인 분포가 고르지 않다. 반응가스는 광화학반응에 의한 오존 생성과 에어로졸 생성에 전구체로 작용하여 대기오염뿐만 아니라 기후와의 상호관계에 깊이 관여하고 있으며, 오존의 경우 직접적인 온실가스이기도 하다(IPCC, 2014).

장기적으로 볼 때 CO, NO_X, SO_2 등 배출원에서 직접 배출되는 일차오염물질들을 지역환경에 맞춰 규제하면 이들 전구물질들의 광화학 반응으로 생성되는 이차 오염물질인 지표오존의 생성이 줄어든다(그림 4.2.1). 온실가스인 지표오존의 농도가 줄어들면 궁극적으로 반응가스가 지구온난화에 대한 기여도가 줄어들게 된다.

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

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



FAQ 8.2, Figure 1 | Schematic diagram of the impact of pollution controls on specific emissions and climate impact. Solid black line indicates known impact; dashed line indicates uncertain impact.

그림 4.2.1 반응가스와 에어로졸이 기후에 미치는 영향(IPCC 보고서(WG1AR5 8장) 발췌).

O_3, CO, NO_x, SO_2의 자료는 안면도에서 2004년부터, 고산에서 2012년부터 확보하고 있으며, 울릉도에서는 2015년부터 CO를 측정하고 있다. 2017년에 O_3과 CO는 세계기상기구 지구대기감시(WMO GAW)에서 권고하는 관측 지침을 참고하고 관측환경을 개선한 후 O_3과 CO 세계표준센터의 적합성 평가에서 좋은 결과를 얻었다(WCC-Empa, 2017a, 2017b), NO_x는 GAW와 EMEP[6]에서 지원하는 ACTRIS[7]의 관측 지침을 참고하여(WMO, 2010, 2011, 2013)기후변화감시소의 상황에 맞게 관측환경, 관측방법 및 자료품질처리에 대한 매뉴얼을 작성하고 이에 따라 자료를 생산하고 있다(지구대기감시업무 매뉴얼, 2017). 이러한 과정에서 2014년 3월부터 2017년 3월 중순까지의 자료는 신뢰하기 어려워 본 보고서 부록의 통계표에서 제시하지 않았다.

6) EMEP: The European Monitoring and Evaluation Programme. 유럽 내 월경성 대기오염 문제를 해결하기 위한 과학적 기반의 국제협력 프로그램.
7) ACTRIS: Aerosols, Clouds, and Trace gases Research InfraStructure Network

4.2.2 지표오존(O_3) 농도

지표오존(이하 지표O_3)은 직접 배출원이 없고 대기 중에서 전구물질들의 광화학 반응에 의해 생성된다. 특히, 인위적인 배출로 인한 질소산화물(NO_X)과 휘발성유기화합물(VOC)의 농도가 높고, 기온이 높고, 일사량이 클수록 많이 생성된다. O_3은 강력한 산화제로 사람의 호흡기에 영향을 주고 식생의 성장과 광합성 활동을 저해하여 CO_2 흡수를 방해하며, 화학반응 과정에서 CH_4와 반응하는 등 간접적으로 기후에 영향을 끼친다. 그리고 온실가스로써 직접적인 복사강제력이 0.40±0.20 W/㎡이며 이는 CO_2와 CH_4 다음으로 큰 값이다(IPCC, 2014).

안면도와 고산에서 측정한 지표O_3은 광화학 생성이 활발한 봄과 가을에 높게 분포하였고, 여름과 겨울에 낮게 분포하는 계절 특성을 보였다. 겨울에는 전구물질의 농도가 높더라도 광량이 적어 지표O_3의 농도가 낮으나, 여름에는 전구물질의 농도가 낮고 북상한 해양 기단의 영향을 받아 O_3 농도가 낮게 나타났다(Yamaji et al., 2006).

2019년 안면도 지표O_3의 연평균은 42.2 ppb로 최근 10년(2009~2018년) 평균인 41.8 ppb보다 1% 높았다. 월평균은 32~60 ppb 사이에 분포하며 5월에 농도가 가장 높았고(59.4 ppb), 9월에 가장 낮았다(37.2 ppb)(그림 4.2.2). 최근 10년간(2009~2018년)의 월별 평균과 비교하였을 때, 2019년 지표O_3은 8월에 약 18% 더 높게, 9월에 20% 더 낮게 나타났으며 이를 제외하고 최근 10년간의 평균과 비슷하였다. 이러한 지표O_3의 월별 분포는 직달일사의 월별 분포와 잘 일치하여(6장 그림 6.2.1) 지표O_3의 광화학 생성물로써의 특성을 잘 보여준다.

2019년 고산 지표O_3의 연평균은45.9 ppb로 최근 6년(2009~2018년) 평균인 43.2 ppb보다 6.4% 높았다. 월평균은 안면도와 비슷한 범위에 분포하며 5월에 농도가 가장 높았고(64.4 ppb), 7월에 가장 낮았다(34.9 ppb). 최근 7년간(2012~2018년)의 월별 평균과 비교하였을 때, 2019년 월평균은 5월부터 8월까지 높았고, 그 외 시기에는 최근 6년간의 평균과 비슷하였다. 수 일 이내의 짧은 시간규모에서 지표O_3 농도는 전구물질의 농도와 기상조건, 직달일사에 의한 광화학생성이나 장거리 이동 등에 영향을 받는다. 안면도와 고산에서 측정한 직달일사와 지표O_3의 최근 평균과 2019년의 분포가 비슷하였고(그림 6.2.1(a), (c)), 두 항목의 월평균이 대체로 선형적인 관계를 보여(그림 4.2.3), 지표O_3의 농도가 직달일사의 분포에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 고산에서 직달일사가 최근 6년에 비해 2019년에 약 11.3% 증가함에 따라 지표O_3 또한 최근 6년 대비 6.4% 증가하였다.

안면도와 고산의 연변화 경향을 보면 월평균값의 농도수준과 분포범위가 유사하여(그림 4.2.4) 전구물질의 직접 배출이 거의 없는 해안가에 위치한 두 감시소의 지리적 위치를 고려하면 안면도와 고산은 감시소 주변의 국지적 영향보다 종관규모의 범위에서 영향을 받는 것으로 볼 수 있다.

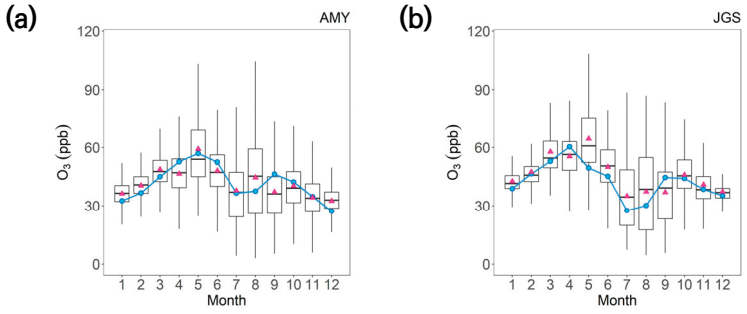


그림 4.2.2 2019년 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산 지표O_3(JGS)의 월변화. 2019년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년(안면도), 2012~2018년(고산)/ 평균(점-선).

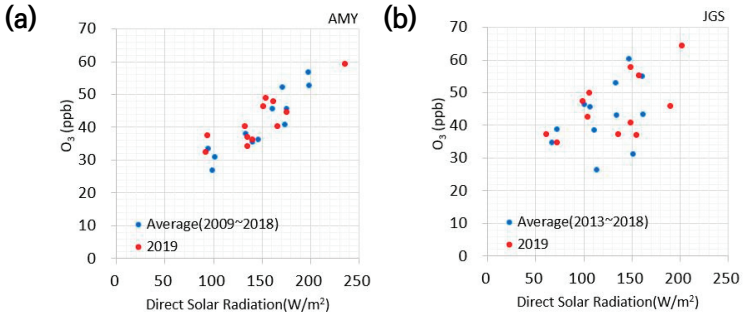


그림 4.2.3 안면도(AMY)와 고산(JGS)에서 관측한 직달일사와 지표O_3 월평균의 관계.

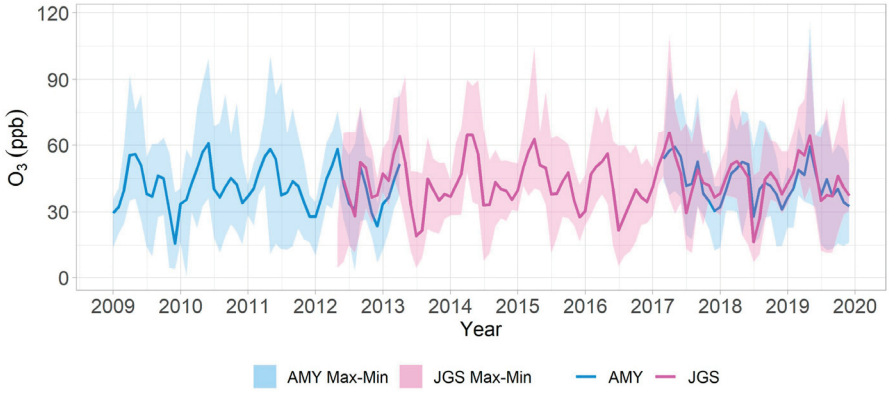


그림 4.2.4 안면도(AMY)(2009~2019년)와 고산(JGS)(2012~2019년)에서 관측한 지표O_3의 연변화경향 (선은 월평균, 음영은 월최댓값과 월최솟값의 차이를 나타냄).

4.2.3 일산화탄소(CO) 농도

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

CO는 안면도, 고산, 울릉도 기후변화감시소에서 측정하고 있다. 2019년에 안면도에서 측정한 CO의 연평균은 290.8 ppb로 최근 10년(2009~2018년) 평균인 270.6 ppb보다 7.5% 높았다. 그러나 2019년 고산과 울릉도 연평균은 198.5 ppb, 177.7 ppb로 최근 평균인 208.5 ppb, 197.6 ppb 보다 각각 4.8%와 1% 감소하였다. 월별 분포를 시간평균을 사용하여 그림 4.2.5에 나타내었다. CO 농도는 세 지점 모두 겨울에 높고 여름에 낮은 계절 분포를 보였다. 안면도에서는 1~3월, 5월 평균이 최근 10년(2009~2018년)보다 높았고, 고산에서는 1~3월 평균이 최근 7년(2012~ 2018년)보다 높았다. 이러한 분포는 안면도와 고산 PM10에서도 같은 결과를 보였고(그림 5.2.1) 이는 1~3월에 평년보다 약한 대륙고기압으로 인해 북서기류가 약하였고, 잦은 이동성 고기압에 의한 오염물질이 이류했을 가능성이 있다(3.1). 우리나라 동쪽에 위치한 울릉도는 1~3월 오염물질 이류의 영향보다 9월 태풍의 영향을 더 크게 받아 안면도, 고산과 달리 9월에 132.3 ppb로 가장 낮은 농도를 보였고, 9월의 농도분포도 그 폭이 가장 좁았다. 세 감시소의 CO 농도 수준은 안면도〉 고산〉 울릉도의 순서로 높았다. 이러한 순서는 연변화 경향에서 매 해 변함없이 나타나 세 감시소 중 울릉도가 오염물질의 영향을 가장 적게 받는 것으로 볼 수 있다. CO의 연변화 경향을 일평균값으로 계산한 월평균, 월최댓값, 월최솟값을 그림 4.2.6에 나타내었다. 세 감시소의 CO 월평균은 여름철에 그 차이가 가장 적고, 겨울에 가장 크게 나타났다. 연중 최고 월최댓값이 나타나는 시기는 세 감시소가 대부분 일치하였으나, 안면도의 연중 최고 월최댓값은 3월에 1087.7 ppb이고 같은 달에 고산과 울릉도는 각각 657.3 ppb, 441.0 ppb로 감시소별 차이가 크고 관측되는 농도 범위도 넓다. 이는 내륙에 붙어 있는 안면도 기후변화 감시소의 위치가 섬에 위치한 고산, 울릉도 두 감시소에 비해 중국과 우리나라와 가까워 장거리 이동 오염물질의 영향을 더 쉽게 받기 때문으로 보인다.

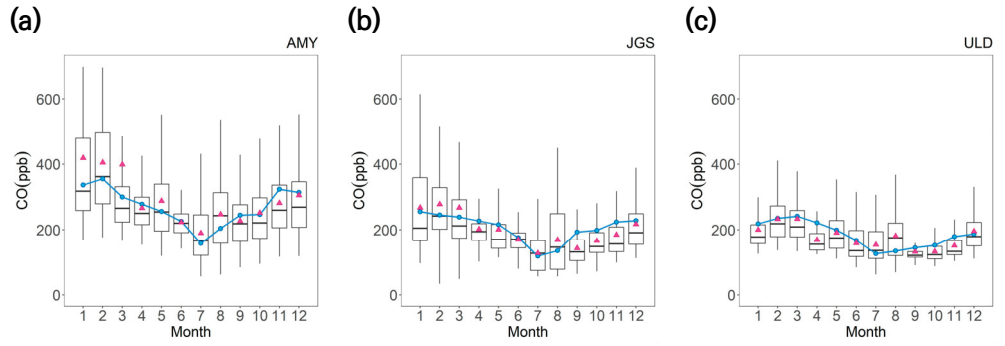


그림 4.2.5 2019년 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD) CO의 월변화. 2019년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년(안면도), 2012~2018년(고산), 2015~2018년(울릉도)의 평균(점-선).

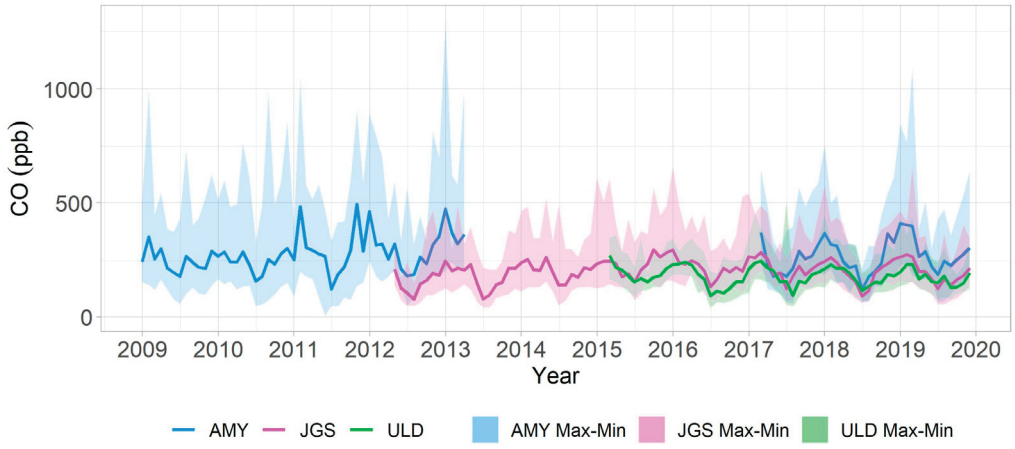


그림 4.2.6 안면도(AMY) (2009~2019년), 고산(JGS) (2012~2019년)과 울릉도(ULD)(2015~2019년)에서 관측한 CO의 연변화 경향(선은 월평균, 음영은 월최댓값과 월최솟값의 차이를 나타냄).

4.2.4 질소산화물(NO_X) 농도

질소산화물(NO_X)은 O_3의 전구물질로 광화학반응을 포함한 대기화학 반응 과정에서 CO_2의 생성에 관여하고, 질산염을 포함하는 에어로졸의 전구물질로 작용하여 간접적으로 음의 복사강제력을 발생시키고, CH_4와의 반응으로 성층권 H_2O에 영향을 미친다(IPCC, 2014). 그러나 NO_X는 반응성이 높아 대기 체류시간이 짧고, 지역에 따라 고르지 않게 분포하며 가스상은 물론 에어로졸과도 상호 작용을 하므로 기후에 미치는 순 영향을 파악하기 어렵다.

NO_X는 자연적으로 대류권 상층에서 번개에 의해 생성되기도 하고, 토양, 식물 등의 질산염에서 광화학 활동으로 발생한다. NO_X는 인위적으로 발전소, 석유계 자동차, 선박, 항공기 등에서 화석연료를 사용한 고온 연소와 산불, 산림 벌채 등의 저온연소에서 발생한다. NO_X는 낮 동안의 빠른 광화학 반응으로 O_3과 OH라디칼의 농도를 조절하고 밤에 광화학 반응이 없는 야간 화학의 주요성분(예, N_2O_5)을 생성하는데 관여한다. NO_X는 대기 중 체류시간이 짧아 발생원에서 높은 농도로 분포하여 자동차, 발전소, 소각 등의 배출원에서는 많게는 수 십 ppb 이상으로 관측되기도 하고, 시골에서는 보편적으로 1 ppb 이하로, 해양이나 자유대기층(free troposphere)과 같은 배경대기 지역에서는 0.1 ppb 수준으로 관측된다.

NO_X는 안면도와 고산에서 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다. 2019년에 안면도에서 측정한 NO_X의 연평균은 6 ppb로 최근 10년(2009~2018년) 평균인 7 ppb보다 14% 낮았다. 반면에 고산 NOx는 연평균 4.7 ppb로 최근 6년(2013~2018년) 평균인 3.6보다 29% 높았다. NOx의 월별 분포를 시간평균을 사용하여 그림 4.2.7과 같이 나타내었다.

2019년에 안면도에서 측정한 NO_X는 여름에 낮고 겨울에 높게 분포하였다. 2019년 월평균은 2~10 ppb 사이로 분포하였고, 최근 10년(2009~2018년)의 월별 평균보다 여름과 겨울에는 낮으나 봄(3, 4월)과 가을(11월)는 높았다. 2019년 10월에는 NOx 세계표준센터의 국제비교실험 참가로 측정을 잠시 중단하였다(부록 1.2.3).

고산 NO_X는 안면도에 비해 뚜렷한 계절변동이 나타나지 않았으며, 2019년 월평균은 3~7 ppb 사이로 분포하였고 최근 7년(2012~2018년)의 월별 평균보다 대부분 높았다. NO_X의 농도가 높을 경우 감시소 주변의 자동차 배출 등 국지 오염의 영향으로 볼 수 있다. NO_X의 일평균으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 4.2.8에 나타내었다. 안면도에서 NO_X의 월평균은 2009년에서 2013년까지 뚜렷한 증감이 드러나지 않았으나 월 최곳값은 꾸준히 감소하였고, 관측환경 개선 후 다시 측정을 시작한 2018년부터 2020년까지도 월 최곳값이 감소하였다. 고산의 월 최곳값은 월평균과 마찬가지로 큰 폭의 변화가 없어 안면도가 고산보다 국지 오염의 영향을 더 크게 받는 것으로 볼 수 있다.

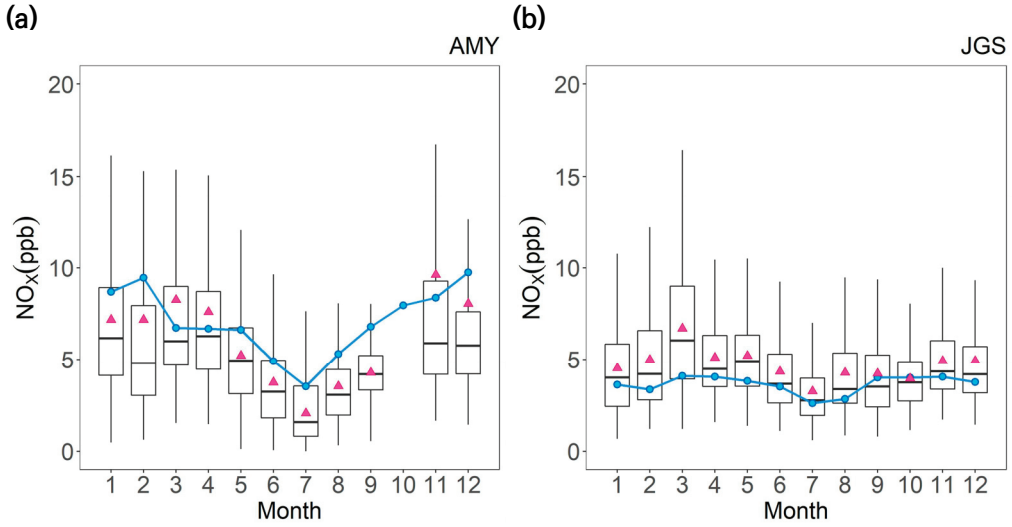


그림 4.2.7 2019년 안면도(AMY)와 고산(JGS) NO_X의 월변화. 2019년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년(안면도), 2012~2018년(고산)의 평균(점-선).

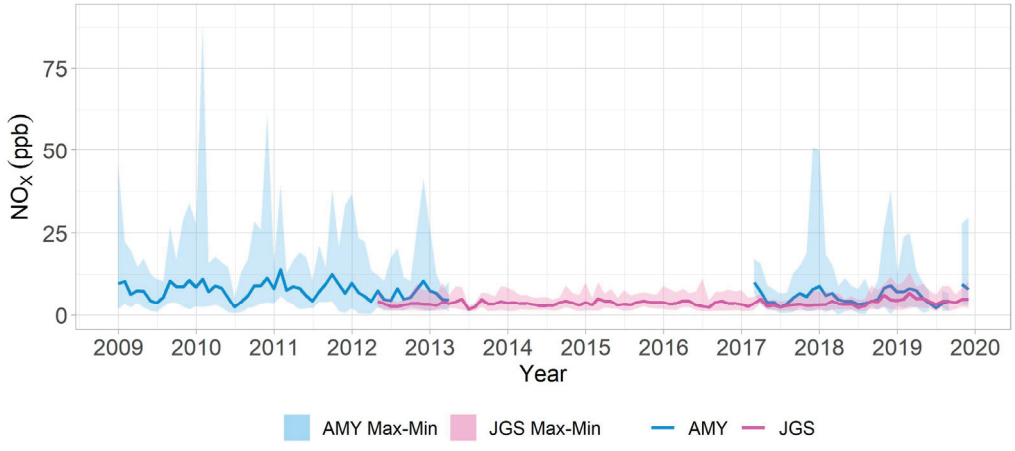


그림 4.2.8 안면도(AMY)(2009~2019년)와 고산(JGS)(2019~2019년)에서 관측한 NOx의 연변화경향 (선은 월평균, 음영은 월최댓값과 월최솟값의 차이를 나타냄).

4.2.5 이산화황(SO_2) 농도

SO_2은 H_2SO_4의 주요 공급원이며, H_2O, O_3과 반응하여 H_2SO_4를 생성한다. H_2SO_4는 산성비를 유발하거나 새로운 입자를 형성하는데 결정적인 역할을 한다. 1980년대부터 1990년대까지 산성비 등 산성강하물이 주요 환경문제였을 때 유럽과 북아메리카에서 대기오염 측정 네트워크와 배경대기 지역에서 관측되었다. 유럽, 북아메리카는 환경정책으로 SO_2 배출을 규제하여 농도가 감소하였다. 우리나라에서도 1990년대 이후 황 저감 정책으로 SO_2의 농도수준이 감소하여 2016년 전국 평균 0.004 ppm(4 ppb) 이하이다(환경부, 2017). 그러나 중국에서는 황을 포함한 석탄을 연료로 사용하고 있어 우리나라보다 SO_2 농도 수준이 높으며 장거리 이동으로 우리나라에 영향을 줄 가능성이 크다. 또, SO_2는 주로 산업공정, 발전소, 화산 분출 등에서 발생하며 지역 오염이나 화산 영향의 좋은 지시자이다. 또, SO_2는 화학반응을 거쳐 황산염 에어로졸을 생성하는 전구물질로 작용한다. 황산염 에어로졸은 태양빛을 산란시켜 지구 냉각화에 기여하고 복사강제력은 약 - 0.41 W/㎡(IPCC, 2014) 로 추정한다. 따라서 SO_2는 간접적으로 기후에 영향을 주는 요소로 지속적인 감시를 통한 장기 변화를 분석할 필요가 있다.

SO_2는 안면도와 고산에서 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 부록 1.2에 소개하였다. 2019년에 안면도에서 측정한 SO_2는 연평균 1 ppb로 최근 10년(2009~2018년) 평균인 2.3 ppb보다 56% 낮았다. 반면에 고산 SO_2는 2019년 연평균 1 ppb로 최근 6년(2013~2018년) 평균인 0.6 ppb보다 높게 나타났다. SO_2는 여름에 낮고 겨울에 높게 분포하였다(그림 4.2.9). 2019년 SO_2 월평균은 0.5~1.4 ppb로 분포하였고 최근 10년(2008~2017년)의 월별 평균보다 봄, 가을, 겨울에 1~4 ppb 이상 낮았으며 여름에는 1 ppb 이내로 낮았다. 고산에서 측정한 2019년 SO_2는 월평균이 0.6~1.1 ppb로 분포하였고 여름에 낮고 봄과 겨울에 높았으며 최근 7년(2012~2018년)의 월별 평균보다 높았다. 또한 2018년에 비해 2019년 1, 2, 3월과 5월의 월평균이 높았다(부록 2.2). 이러한 분포 특성은 CO나 PM10과 같아 SO_2와 이들 감시요소가 같은 기원일 것으로 보인다.

일평균으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 4.2.10에 나타내었다. 2019년 안면도 SO_2는 2018년에 비해 월최댓값이 더 낮았다. 고산에서 SO_2는 2017년부터 2018년까지 안면도에 비해 고산에서 농도가 낮게 분포하였으나 2019년에는 두 감시소의 SO_2의 월평균과 월최댓값이 비슷한 수준으로 관측되었고 월최곳값이 나타나는 시기와 수준도 비슷하였는데 이는 내륙의 영향보다 장거리 이동 등에 의한 외부의 영향을 받았을 가능성을 보여준다.

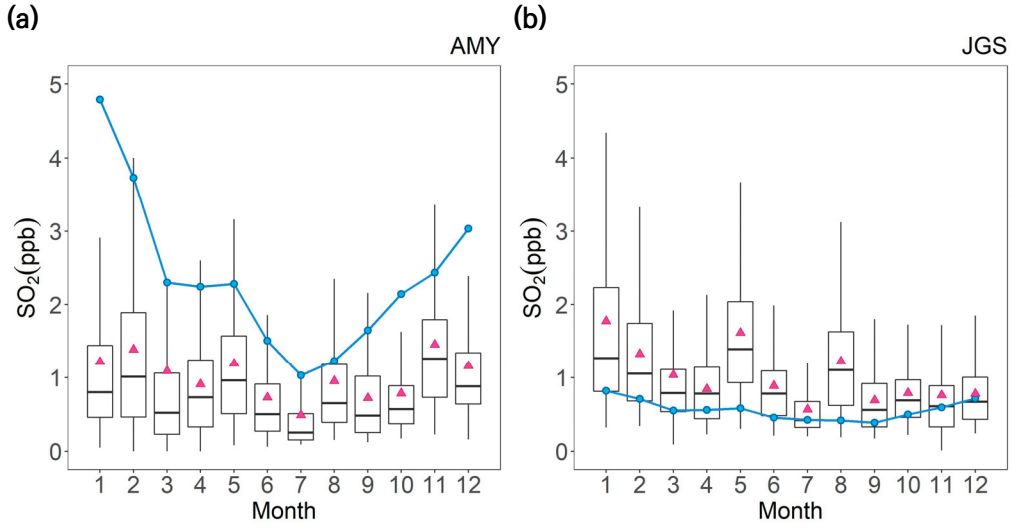


그림 4.2.9 2019년 안면도(AMY)와 고산(JGS) SO_2의 월변화. 2019년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년(안면도), 2012~2018년(고산)의 평균(점-선).

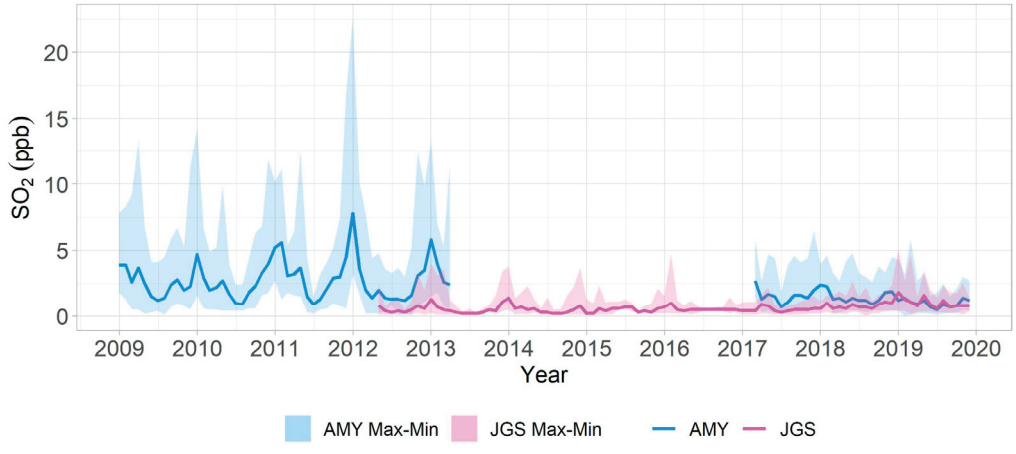


그림 4.2.10 안면도(AMY)(2009~2019년)와 고산(JGS)(2012~2019년)에서 관측한 SO_2 연평균 변화 경향(선은 월평균, 음영은 월최댓값과 월최솟값 의 차이를 나타냄).

4.3 2019년 온실가스 및 반응가스 특성 분석

4.3.1 2019 안면도 온실가스 특성

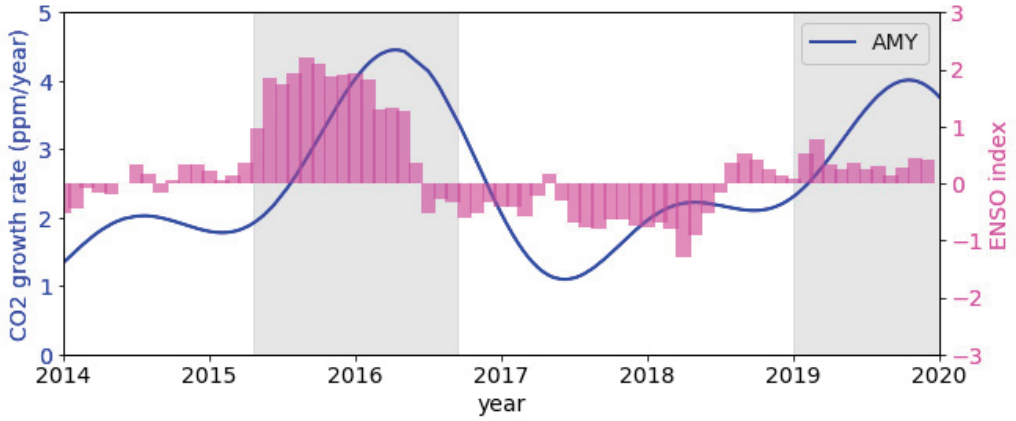


그림 4.3.1 2014년부터 2019년까지 ENSO 지수값과 CO_2 증가율(장기추세곡선으로 산출)의 상관관계. 파란색: 안면도(AMY) CO_2 증가율, 보라색: ENSO 지수(출처: https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei). 회색부분은 양의 ENSO 지수 기간을 나타냄.

2019년 CO_2는 안면도에서 2.7 ppm 증가하였으며, 북반구 대표관측소인 마우나로우(Mauna Loa)에서도 2.9 ppm 증가하였다. 이미 2015년과 2016년에 엘니뇨에 의한 전 지구 높은 CO_2의 증가(3.2 ppm)가 기록된 바 있다(그림 4.3.1). 기온이 증가하면 해양에서의 배출과 토양 미생물활동으로 인한 토양의 배출이 강화되면서(Keeling et al., 1995) 배경농도의 증가율도 높아진다. 2019년에는 엘니뇨가 관측되지 않았으나 전 세계 평균기온이 2016년에 이어 두 번째로 높았던 해였으며, 우리나라도 연 평균기온이 1973년 이래 두 번째로 높았다(3.1). 따라서 최근 10년 대비 2019년에 안면도뿐만 아니라 마우나로아, 남반구의 아메리카 사모아(American Samoa) 등 많은 관측소에서 관측된 높은 CO_2 증가율은 높은 기온의 영향이 크게 역할을 한 것으로 판단된다.

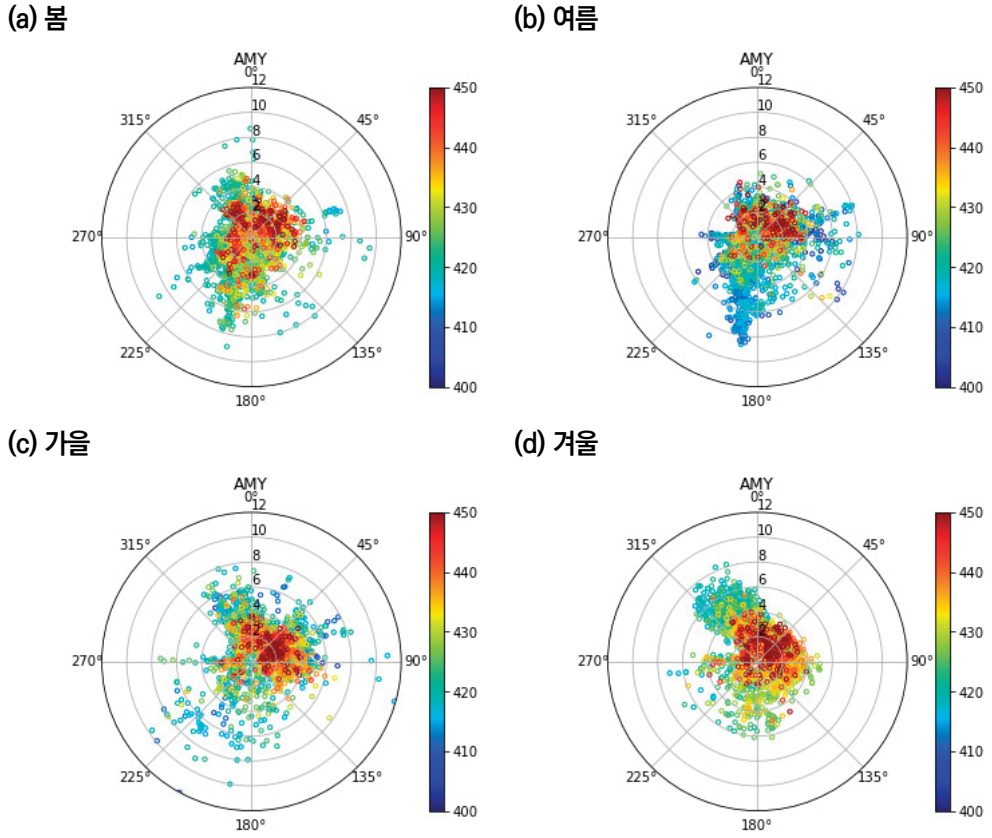


그림 4.3.2 2019년 안면도(AMY)에서 관측한 풍향·풍속에 따른 CO_2 분포.

안면도에서 관측한 배경농도는 여름철에는 주로 남풍, 겨울철에는 북서풍의 영향이 크다(그림 4.3.2). 이는 잘 희석된 농도가 대부분 강풍에 의해 장거리로 유입되는 농도이기 때문이다. 반면 고농도 CO_2는 풍속이 약할 때 주로 관측되며, 계절과 상관없이 북동풍일 때 많이 관측된다. 이를 통해 관측소 주변 배출원 등의 영향이 지속적으로 관측됨을 보인다. 겨울과 봄의 경우 서풍에 의한 고농도사례의 빈도가 증가하여, 주 풍향이 바뀌면서 중국의 풍하지역으로서 영향을 받을 수 있음을 간접적으로 보인다.

울릉도 관측소의 주풍향은 북동과 남서풍이다(그림 4.3.3). 북동풍의 경우 산에서 내려오는 깨끗한 기류로 고농도사례가 많지 않다. 반면, 남서풍의 경우 울릉도 지표에서 유입될 뿐 아니라, 한반도의 울산, 포항, 부산 등 대도시의 유입기류가 많다. 따라서 고농도사례가 빈번히 발생된다. 때문에 풍속과 크게 상관관계가 없고, 풍향에 의존하여 고농도사례가 나타나는 특성이 있다.

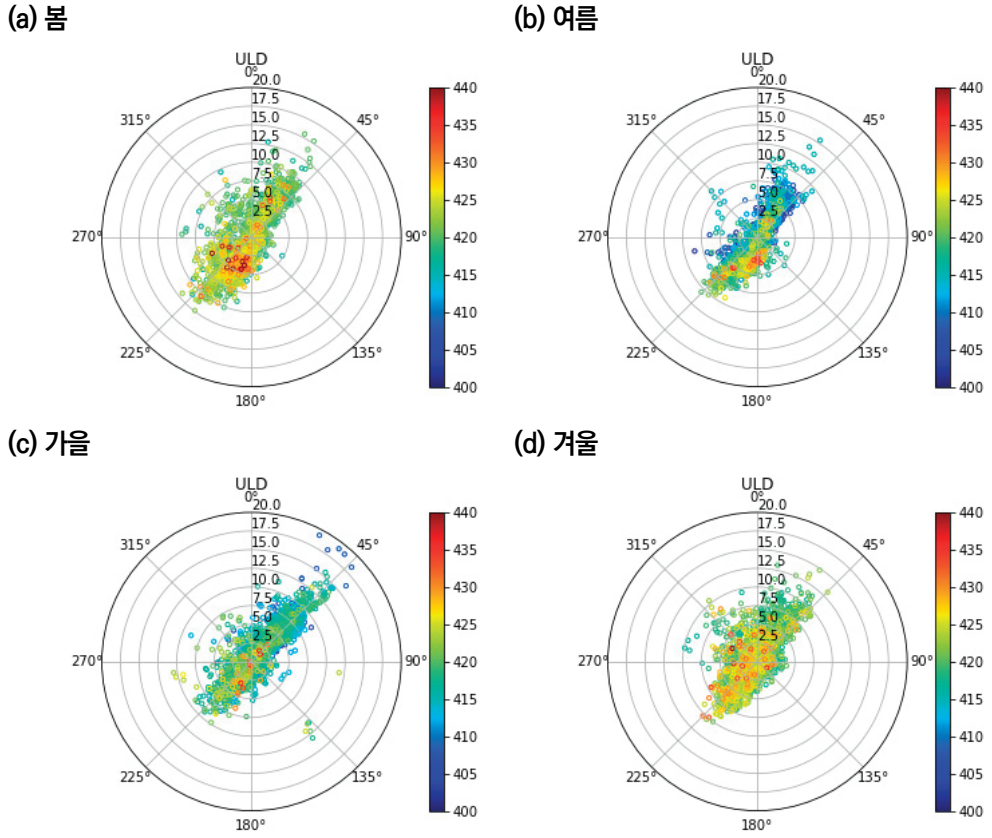


그림 4.3.3 2019년 울릉도(ULD)에서 관측한 풍향·풍속에 따른 CO_2 분포.

4.3.2 2019년 안면도 반응가스의 특성 분석

안면도, 고산, 울릉도 기후변화감시소의 주변 환경은 도심지, 도로 등의 환경과 달리 직접적인 배출원이 없고, 주요 도로에서 멀리 떨어져 있는 대신 논, 밭과 같은 경작지가 많다. 안면도와 고산 감시소는 해안가에 접해 있고, 울릉도는 고지대에 위치하여 배출원에서 직접 배출되는 CO, NOx, SO_2의 농도가 내륙에 비해 낮게 나타난다. 그러므로 반응가스 관측농도는 여러 기상조건 중 풍향과 풍속에 따라 해양 대기나 아시아 대륙, 우리나라 내륙에서 바람이 불면 농도가 낮은 배경대기, 장거리 이동 또는 정체에 의한 고농도 사례의 영향을 잘 반영한다.

이 장에서는 2019년 반응가스의 농도특성을 종관규모의 관점에서 분석하고자 하며, 이를 위해 풍향과 풍속을 함께 살펴보았다. 세 감시소 중 안면도가 가장 내륙에 가깝고 그에 따라 월평균 분포범위가 다른 감시소에 비해 넓어 안면도를 중심으로 기상자료와 함께 해석하였다.

CO는 반응가스 중 반응성이 가장 약하고 대기 체류시간이 가장 길어 장거리 이동의 영향을

분석하는 데 활용하기 좋다. 2019년 CO의 월평균값은 2018년보다 1, 2, 3, 5월에 높았고, 9, 10, 11월에 낮았다(그림 4.3.4). 제3장 기상특성에서 설명한 바와 2019년 1, 2, 3월에는 평년보다 약한 대륙고기압으로 인해 북서기류가 약하였고, 잦은 이동성 고기압의 영향을 받아 풍속이 약하여 이 시기에 CO의 농도가 작년보다 높았다. 또한, 2019년 9월에는 3개의 태풍이 있었고, 여름부터 10월 초순까지도 북태평양고기압의 영향을 받았으며, 11월에는 평년보다 기온이 높아 난방을 시작한 시기가 작년에 비해 늦었을 것으로 추정된다. 이러한 기상특성으로 인해 2019년 가을에 관측한 CO의 농도는 작년보다 낮았던 것으로 보인다.

오염물질의 기원을 파악하기 위하여 풍향과 풍속에 따라 최근 10년과 2019년 월별로 CO의 고농도가 분포할 확률을 그림 4.3.5에 CBPF (Conditional Bivariate Probability Function)로 나타내었다. 이는 풍향에 대한 고농도 분포 확률을 보여주는 CPF (Conditional Probability Functions)를 개선하여 bipolar plot으로 표현할 때 풍속을 polar plot의 축으로 하고, 확률분포 수준을 색으로 나타낸 것이다(Uria-Tellaetxe et al., 2014). 확률분포 수준은 전체 자료 중 임계값을 설정하여 (임계 농도 수준 = 75%) 풍향 풍속별 윈드 섹터에 속한 자료 중 임계값의 개수를 윈드 섹터 자료의 개수로 나눈 값으로 표현되었다. 확률이 1에 가까울수록 해당 풍향의 방향으로 배출원이 존재할 가능성이 높다고 볼 수 있다.

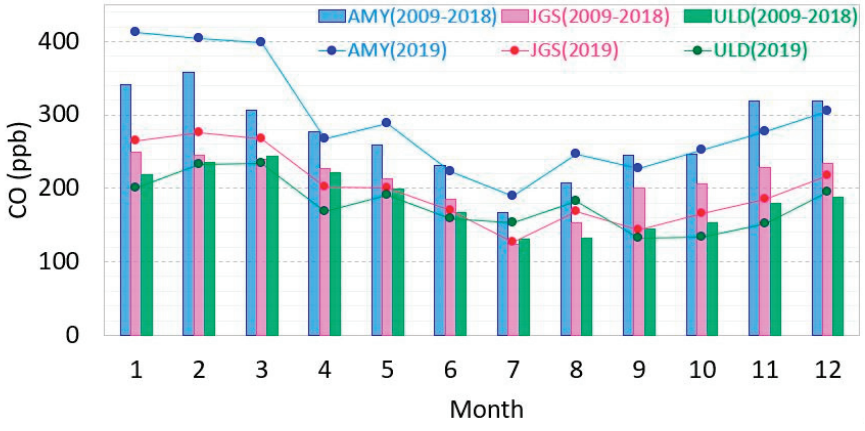


그림 4.3.4 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 감시소에서 관측한 CO의 최근 평균(막대)과 2019년 (점-선) 월평균 비교.

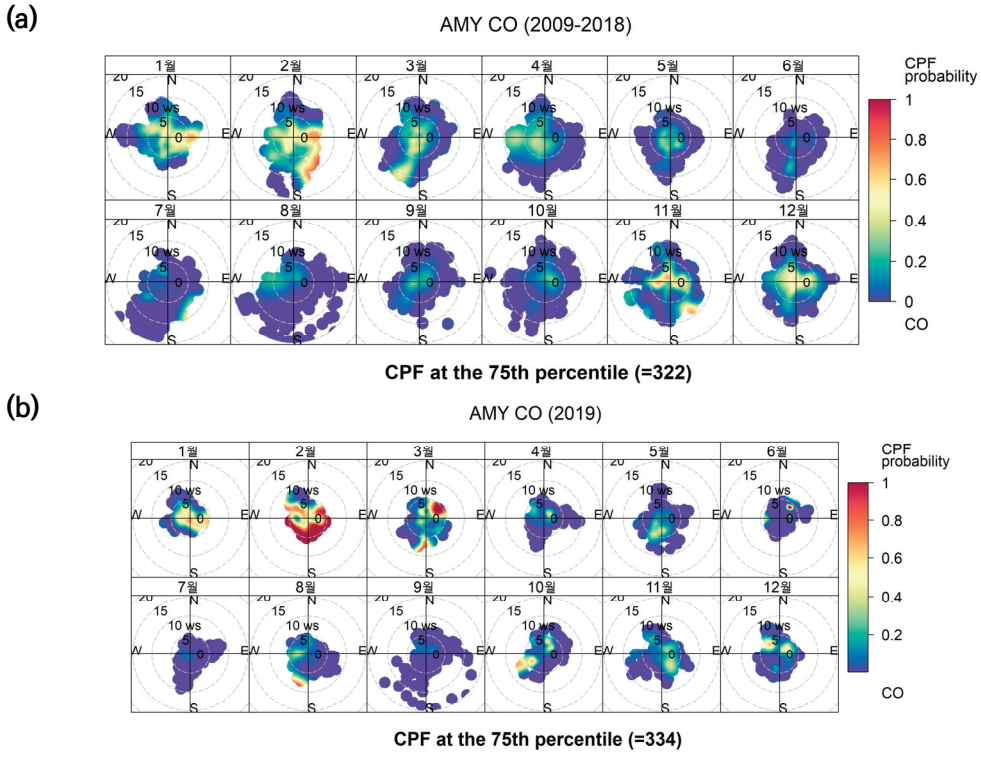


그림 4.3.5 안면도(AMY) CO의 (a)최근 10년(2009~2018년)과 (b)2019년 월별 고농도 확률분포.

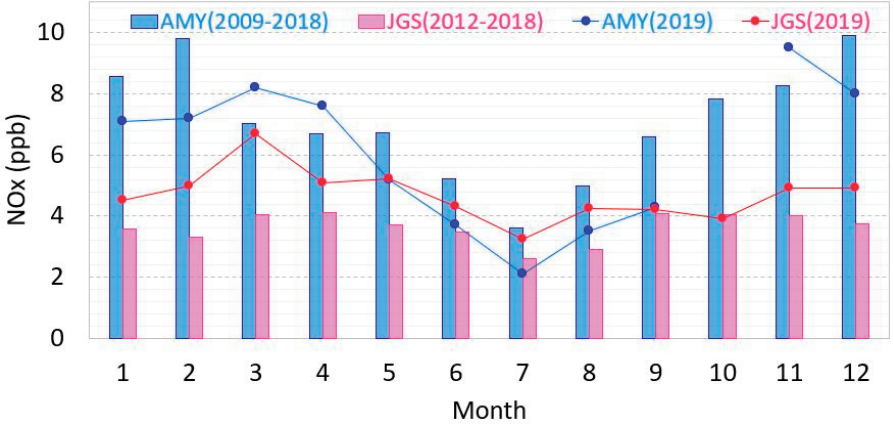


그림 4.3.6 안면도(AMY), 고산(JGS) 감시소에서 관측한 NO_X의 최근 평균(막대)과 2019년(점-선)의 월평균 비교.

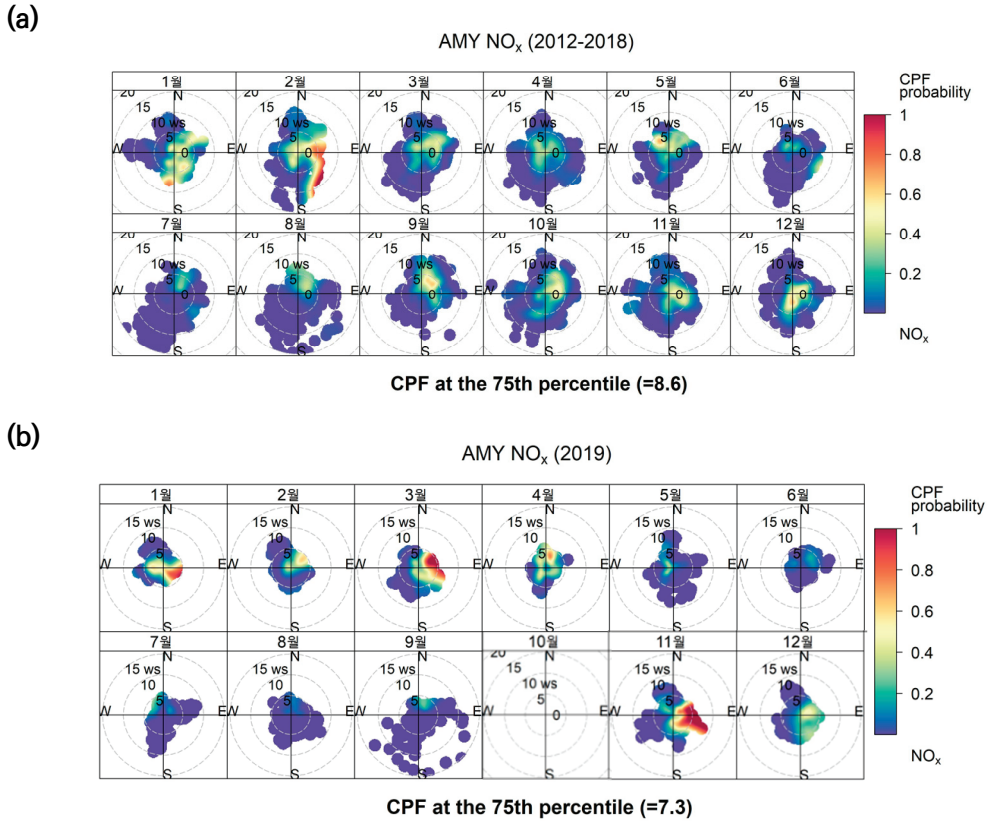


그림 4.3.7 안면도(AMY) NOx의 (a)최근 10년(2009~2018년)과 (b)2019년 월별 고농도 확률분포.

최근 10년 동안 1, 2월에는 CO의 배출원(source)이 안면도의 동쪽에 있는 것으로 보이나(그림 4.3.5a), 2019년 1월에는 풍향에 상관없이 풍속이 낮을 때 CO 고농도 빈도가 높았고, 2월에는 남쪽 계열의 바람이 불 때 CO의 고농도 사례가 나타날 확률이 높았다(그림 4.3.5b). 최근 10년 동안 3, 4월에는 CO 고농도가 감시소의 서쪽(서해)에서 나타나 장거리 이동의 가능성을 알 수 있으나 2019년 3월에는 내륙 방향인 북동쪽에 배출원이 있는 것으로 보인다. 최근 10년 동안 4~10월까지 CO의 고농도 사례는 거의 없었으나, 2019년 8월에는 풍속은 강하지 않았더라도 남서와 서쪽에서 고농도 사례의 확률이 약하게 나타났다. 따라서 안면도 CO 고농도 사례의 확률분포로 살펴본 2019년 CO농도 특징을 정리하면 약한 대륙고기압의 영향으로 풍속의 약화로 전년 대비 1~3월에 농도 높았고, 9~12월에는 태풍과 늦게까지 이어진 북태평양고기압의 영향으로 전년대비 농도가 낮았다.

NO_x는 주로 자동차, 화력발전소 등의 고온 연소과정에서 발생하며 기후변화감시소에서 측정

하는 반응가스 중 대기 중 체류시간이 가장 짧아 국지오염의 영향을 분석하는데 활용하기 좋다. 2019년 NO_x의 안면도 월평균은 모두 2018년보다 낮았던 반면 고산 월평균은 모두 최근 7년보다 높았다(그림 4.2.7). 이는 NO_x의 특성상 각 감시소 주변에서 자동차 배출과 같은 요인이 농도에 더 큰 영향을 끼쳤을 것으로 보인다. 따라서 2019년에 9월의 태풍 영향을 제외하고 풍속이 약하거나 강함에 상관없이 NO_x의 배출원은 동쪽(내륙)에 있는 것으로 나타났다(그림 4.3.7). NO_x의 월평균이 최근 10년보다 낮고 11월에 높았던 패턴은 에어로졸 중 검댕의 월평균 분포와 비슷하고(그림 5.3.6), 고농도 확률분포로 본 배출원의 방향도 비슷하여(그림 5.5.5) 두 요소의 배출원이 유사함을 추측할 수 있다. 2019년도 NO_x 농도분포의 특징은 가을에 감시소 주변의 자동차 배출, 소각, 난방 등에서 발생하는 고농도 사례의 영향을 받았을 것으로 보인다.

4.3.3 2019년 안면도 반응가스의 기준농도

안면도 감시소의 반응가스는 풍향에 따라 국외 혹은 내륙으로부터 고농도 사례의 영향을 받는다. 이때 얼마나 영향을 받는지를 알기 위해서는 기준 농도를 설정할 필요가 있다. 이 보고서에서 기준농도(baseline concentration)를 국지오염의 영향이 없을 때의 측정값으로 정의하고자 한다. Parrish et al. (2012)가 북반구 지표O_3의 장기 변동을 연구하였을 때 이와 같은 정의를 사용하면서 국지오염이 거의 없는 북반구 GAW 관측소들의 장기 관측 자료를 분석하였다. 그러나 우리나라의 지정학적 위치는 국지오염의 영향이 없는 지역을 찾기 어렵다. 지표O_3의 GAW 관측지침(WMO, 2013)에서는 지역급 감시소의 경우 풍향과 풍속 및 다른 감시 요소들(특히 오염의 지표가 되는 요소나 추적자)의 시계열 분석을 통해 고농도 오염사례를 걸러내어(filtering) 오염의 영향이 없는 배경대기 농도(본 보고서에서는 기준농도)가 나타나는 조건(background wind sector)을 찾도록 제시하였다.

안면도 반응가스의 기준농도를 찾기 위해 2018~2019년의 관측값을 풍향·풍속과 함께 시계열로 표출하였고(그림 4.3.8), 그 중 국지오염이나 장거리 이동된 오염의 영향이 없다고 판단되는 때의 종관기상 패턴을 분석하였다.

풍향과 풍속을 나타내는 시계열에서 색깔은 시간의 변화를 나타내며, 선의 길이는 풍속의 세기, 방향은 풍향을 의미한다. 2018년과 2019년 반응가스 농도의 시계열 분석결과 겨울철 대륙고기압이 확장하면서 북서풍이 강하게 불 때 반응가스의 농도가 낮아졌다. 2019년에는 강한 북서기류가 드물어 2018년의 사례를 찾아 함께 그림 4.3.8에 나타내었다. 2018년 1월 11일과 12일, 2019년 1월 16일에는 풍속 5 m/s 이상의 강한 북서풍이 불었고, 이 때 CO, NO_x, SO_2는 다른 날보다 농도가 감소하였다. 지표O_3의 경우 농도가 감소하지 않고 일정한 농도수준을 유지하였고, 북서풍이 불지 않던 시기에는 새벽마다 농도가 낮아지고 늦은 오후 농도가 높아지는 일변화를 보였다. 겨울에 대륙고기압이 확장하면서 반응가스의 농도가 낮게 나타나는 것처럼 여름에 북태평양고기압이 확장하여 우리나라에 영향을 줄 때 반응가스의 농도가 낮아졌다(그림 4.3.10). 2018년 7월 12~14일과 2019년 7월 12 ~30일에 북태평양고기압의 영향으로 남풍이 3~4 m/s 이상으로 불면서 CO의 농도가 약 74 ppb로 낮아졌고, 지표O_3은 일변화를 보였으나 다른 날보다 농도가 낮았다. 시계열 분석을 통해 산출한 기준농도를 표 4.3.1에 정리하였으며, 2018년과 2019년의 기준농도는 지표O_3과 CO의 경우 비슷한 수준이었다. 기준농도가 관측되는 지상일기도와 850 hPa 일기도를 그림 4.3.7에 나타내었다. 이와 같은 방식으로 반응가스 기준농도를 분석함으로써 국지 또는 장거리 오염의 영향정도를 파악하고, 장기간 경향 분석을 통해 반응가스 배출 정도의 변화를 확인할 수 있을 것으로 기대한다.

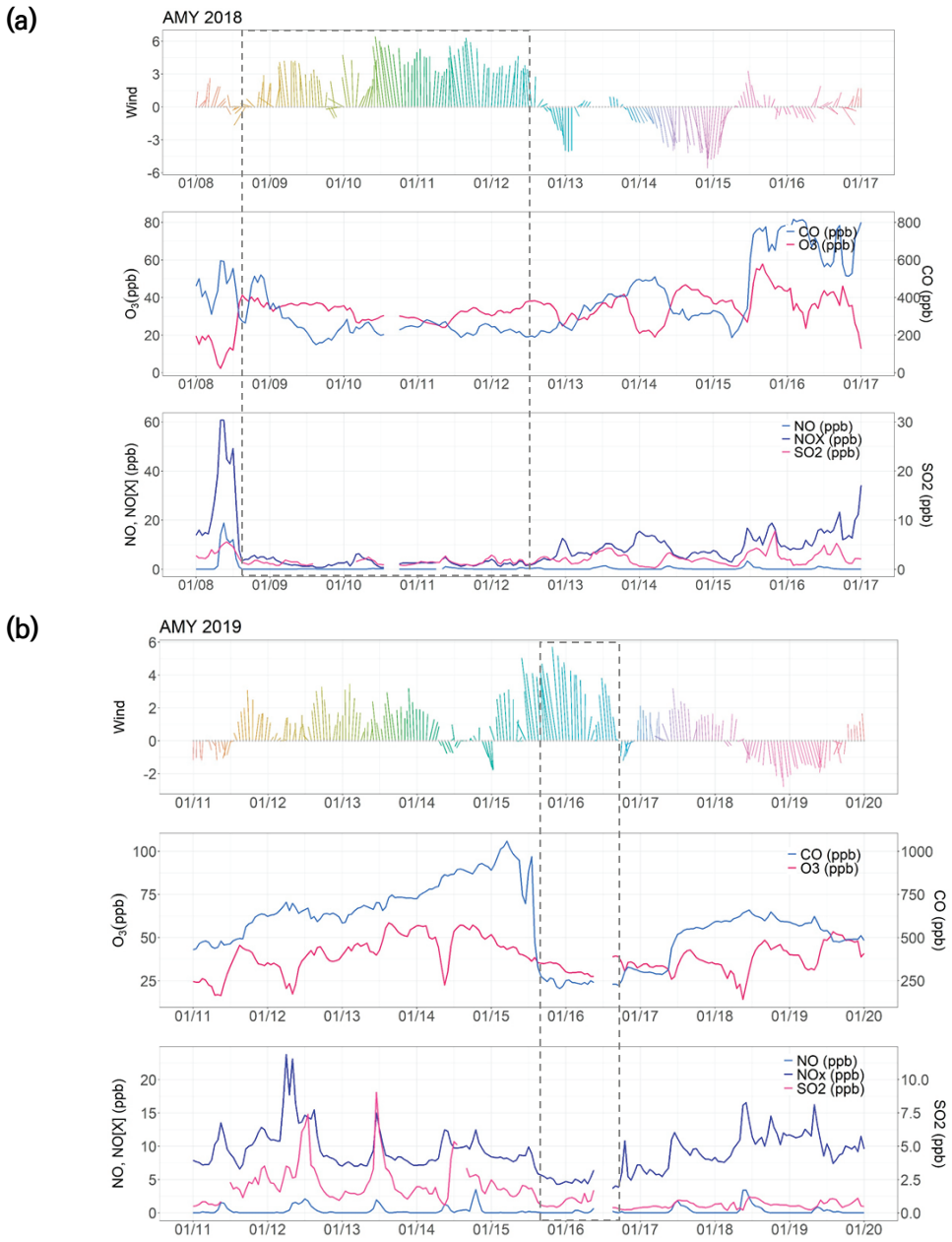


그림 4.3.8 안면도(AMY)에서 (a)2018년과 (b)2019년에 관측한 풍향, 풍속과 반응가스 시계열 중 시베리아 고기압의 영향을 관측한 사례.

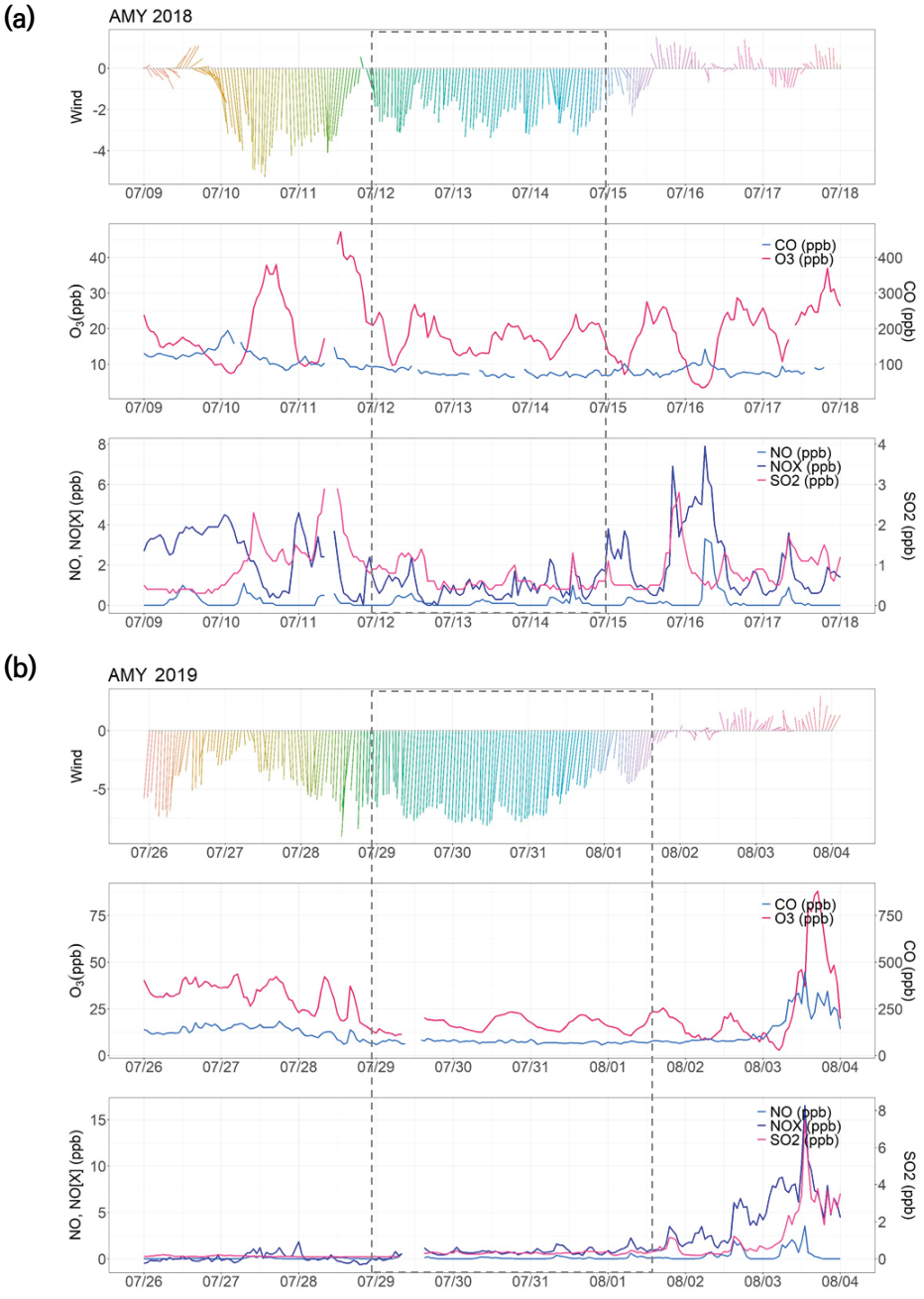


그림 4.3.9 안면도(AMY)에서 (a)2018년과 (b)2019년에 관측한 풍향, 풍속과 반응가스 시계열 중 북태평양고기압의 영향을 관측한 사례.

표 4.3.1 안면도 반응가스의 겨울과 여름의 대표적인 기준농도

[unit: ppb]

Date	O_3	CO	NO_x	SO_2
2018. 1. 9. 4h – 1.12. 13h	32.0	230.1	2.4	1.4
2019. 1. 15. 21h – 1.16. 18h	32.1	234.2	4.7	0.8
2018. 7. 12. 1h – 7.14. 22h	17.5	74.5	0.9	0.7
2019. 7. 28. 19h – 8.1. 11h	16.8	73.8	0.6	0.3

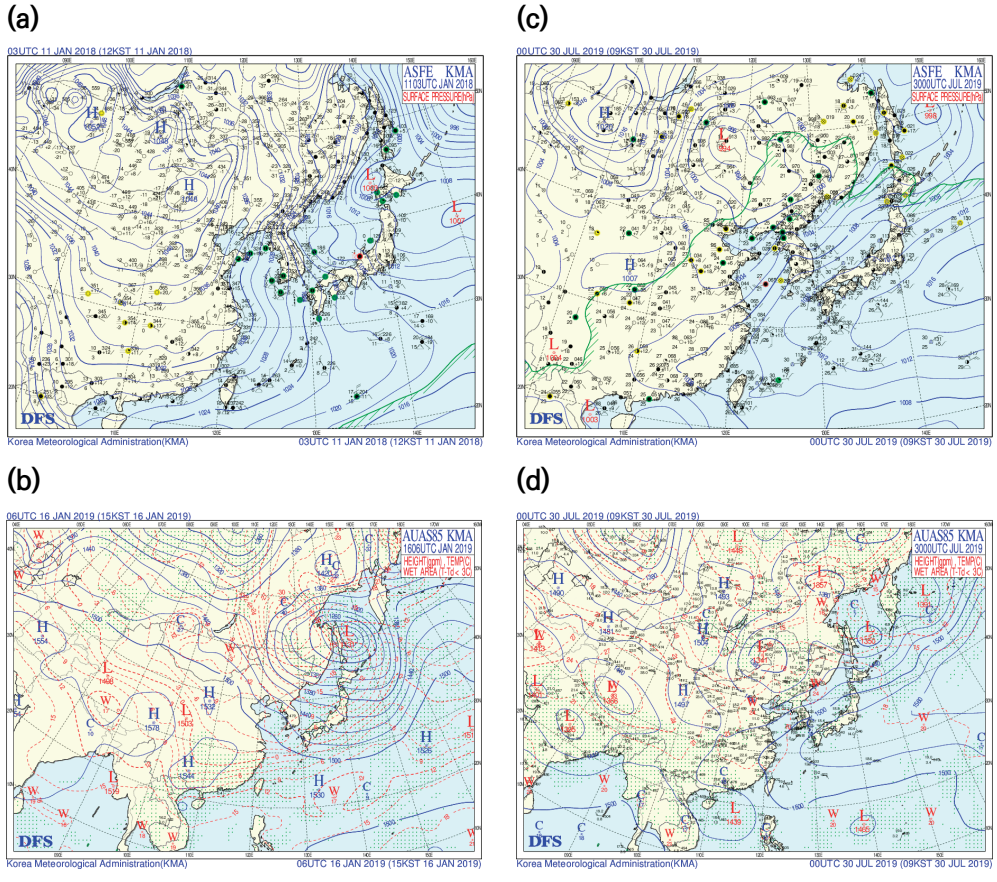


그림 4.3.10 안면도에 기준농도가 관측된 날의 일기도. 2018년 1월 11일의 (a) 지상일기도와 (b) 850 hPa 일기도, 2019년 7월 30일의 (c) 지상일기도와 (d) 850 hPa 일기도.

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제5장

에어로졸



제5장 에어로졸

ㅇ PM10 : 안면도 39 ㎍/㎥ (최근 10년 대비 +8.3%)
고 산 35 ㎍/㎥ (최근 8년 대비 +16.7%)

ㅇ 연무 현상일수가 북서계절풍 약화, 풍속 감소에 따라 최근 10년 대비 증가

5.1 에어로졸 감시의 목적

에어로졸은 공기 중에 떠 있는 고체 또는 액체 상태의 다양한 크기(수 nm~수십 ㎛)로 존재한다. 에어로졸은 대기 중으로 직접 배출되거나(1차 에어로졸: 검댕(black carbon, BC), 유기 탄소(organic carbon, OC), 해염(sea salt), 먼지(dust) 등) 배출된 입자나 가스가 대기 중 화학 반응을 통해 생성된다(2차 무기 에어로졸: 황산염(sulfate), 질산염(nitrate), 암모늄(ammonium); 2차 유기 에어로졸(secondary organic aerosols, SOA)). 배출된 에어로졸은 추가적인 화학 반응, 응결, 증발, 응집 등의 과정을 거치며 크기와 화학 조성이 변한다. 또한 에어로졸의 분포는 수송과 침적 등에 의해 영향을 받으며, 대기 중에 수 일 정도 체류한다(IPCC, 2014).

에어로졸은 호흡기질환, 심질환 발병 등 건강에 영향을 주는 것으로 알려져 있을 뿐 아니라 대기오염물질과 결합하여 산성비, 스모그, 시정 감소의 원인이 되기도 한다. 또한, 지표로 들어오는 태양복사에너지를 산란하거나 흡수하여 기후변화를 유발하는 강제력으로 작용하기도 한다. 에어로졸의 복사 강제력은 세 가지 효과로 구분한다;

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

1750년과 2011년 사이 에어로졸-복사 상호작용에 의한 강제력의 전지구 평균은 -0.35 (-0.85~+0.15) W/㎡이고, 에어로졸-복사 상호작용과 에어로졸-구름 상호작용을 모두 고려한 평균 강제력은 -0.9 (-1.9~-0.1) W/㎡이며 중간 수준의 신뢰도를 가지는 것으로 보고되었다(IPCC, 2014). 검댕은 대기 중에 존재하는 동안 태양복사에너지를 흡수할 뿐만 아니라 눈과 얼음에 쌓여 지표의 알베도를 증가시켜 총 +0.64 W/㎡의 강제력을 가지는데, 이는 이산화탄소 다음으로

두 번째 큰 강제력이다(그림 5.1.1)(IPCC, 2014). 에어로졸이 기후에 미치는 영향에 대해서는 점차 과학적 이해수준이 높아져 가고는 있지만, 에어로졸과 구름 간의 상호 작용에 대한 부분은 여전히 과학적 이해도가 낮으며 시간적, 공간적 다양성이 크기 때문에 전지구적 복사 강제력을 추산하는 데 있어 여전히 가장 큰 불확실도를 제공하는 요소이다. 따라서, 지정된 장소에서 종합적인 에어로졸 장기관측을 수행함으로써 에어로졸과 기후 상호작용을 과학적으로 이해하고 미래 기후 변화를 예측하는 데 기여할 수 있다.

세계기상기구(WMO) 지구대기감시프로그램(GAW)의 권고에 따라 안면도, 고산, 울릉도에서 PM10 질량농도, 이온성분, 에어로졸 광산란계수 등 에어로졸 분야 11종을 관측하고 있다.

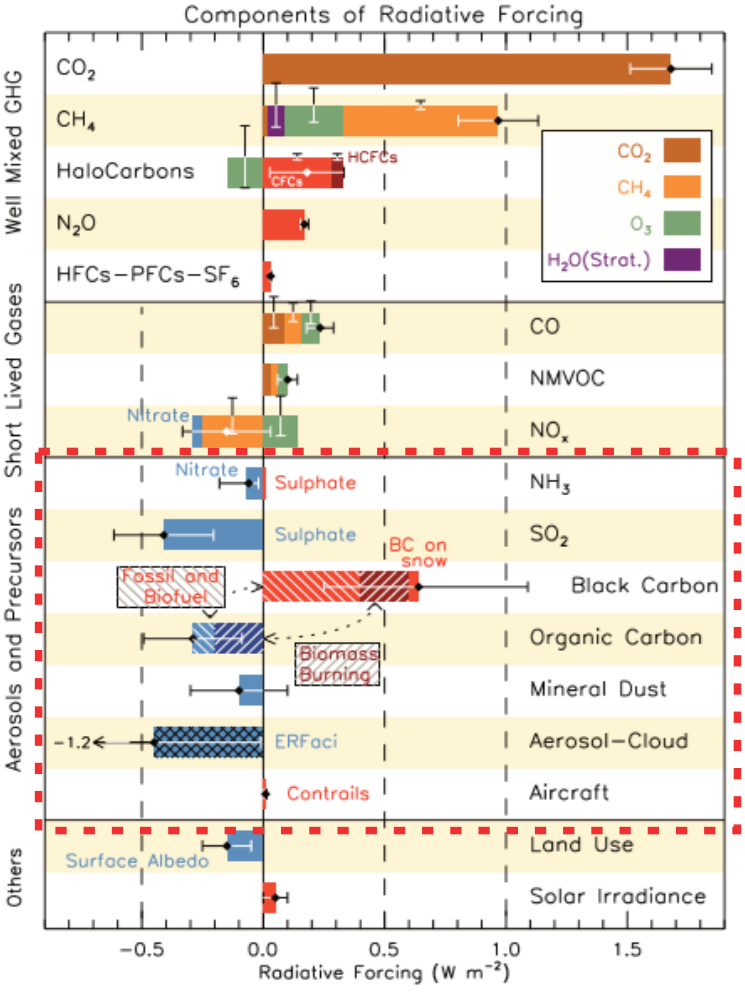


그림 5.1.1 대기조성물질의 복사 강제력(1750~2011년)(IPCC, 2014).

5.2 에어로졸 물리특성

한반도 배경대기 에어로졸 물리특성 감시를 위해 에어로졸 질량농도와 수농도를 측정하여 분석한다. 질량농도는 부유분진측정기(이하 β-ray PM10)로 연속 관측하며 이 장비는 국내 황사 관측망의 기본 관측장비로 운영되어 자료가 실시간 공개되고 있다. 광학입자계수기(OPC)도 질량농도를 산출하고 있으나, 정확도가 낮고 유입 공기 제습에 어려움이 있어 같은 장소에서 운영되는 부유분진측정기나 공기역학입자계수기의 품질 관리와 상대적인 입자 크기 분포의 정합성 확인에 활용되고 있다. 에어로졸 총수농도는 응결핵계수기(CPC)로, 에어로졸 입경별 수농도는 공기역학입자계수기(APS)와 전자기유도입자계수기(SMPS)를 이용하여 관측한다.

5.2.1 PM10 질량농도

안면도에서 측정한 PM10 질량농도의 2019년 월평균은 23~62 ㎍/㎥ 사이에 분포하며 1~3월, 5월을 제외하고 최근 10년간 (2009~2018년) 월별 평균보다 낮았다. 7월의 평균 농도가 가장 낮고(23 ㎍/㎥), 3월 평균이 62 ㎍/㎥로 연중 가장 높았다(그림 5.2.1a). 안면도 PM10 질량농도 연평균은 2004년 이후로 꾸준히 감소하는 추세였으나, 2019년에는 39 ㎍/㎥로 최근 10년(2009~2018년) 평균인 36 ㎍/㎥보다 약 8.3% 높으며, 2013년 이후 최댓값이다(그림 5.2.2).

2019년 고산의 PM10 질량농도 월평균은 26~49 ㎍/㎥ 사이이며 최근 8년간(2011~2018년) 월별 평균과 비교할 때 2, 3, 8, 11월은 과거보다 높고, 나머지는 비슷하거나 낮았다(그림 5.2.1b). 월별 변동은 봄철에 가장 높고, 여름과 가을에 낮아 안면도와 유사한 양상을 보였다. 고산의 2019년 PM10 질량농도 연평균은 35 ㎍/㎥로 2011년 관측 이래 가장 높은 값으로 최근 8년(2011~2018년) 평균보다 16.7% 증가한 수준이다(그림 5.2.2).

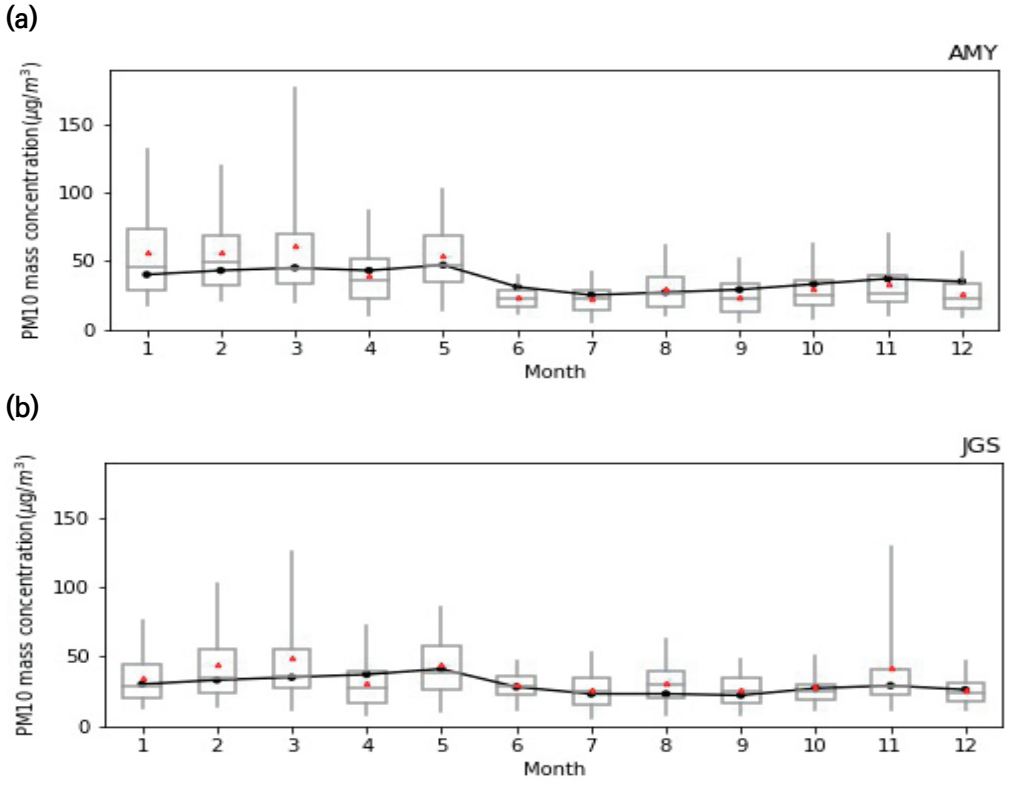


그림 5.2.1 (a) 안면도(AMY)와 (b) 고산(JGS)의 PM10 질량농도(㎍/㎥) 월변화. 2019년 월별분포(상자의 세로실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25,% 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년(안면도), 2011~2018년(고산) 평균(점-선).

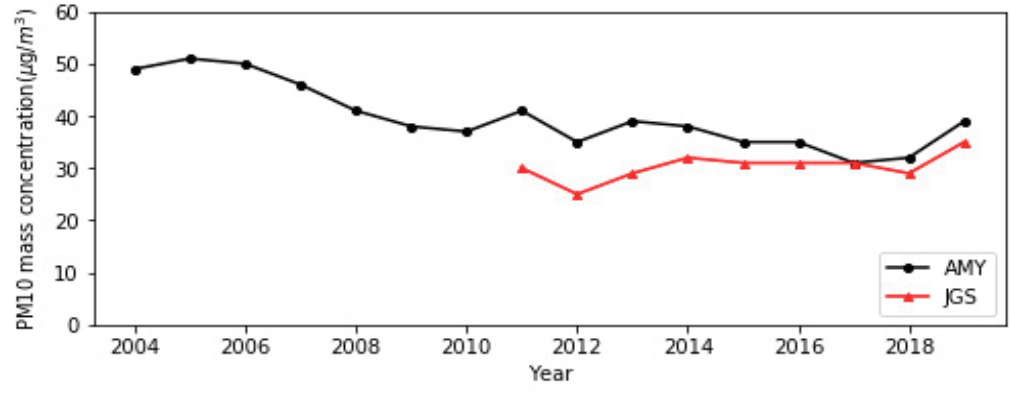


그림 5.2.2 안면도(AMY)와 고산(JGS) PM10 질량농도(㎍/㎥)의 최근 연평균 변화.

5.2.2 에어로졸 총수농도

에어로졸 총수농도는 모든 에어로졸 과정에 있어 가장 기본이 되는 정보이다. 고산에서 응결핵 계수기(0.01~3 ㎛)로 관측한 에어로졸 총수농도(응결핵 수농도)의 월변동을 그림 5.2.3에 보였다. 2019년에 관측한 월별 총수농도는 5월을 제외하고 최근 7년(2012~2018년)의 월평균과 비슷하였다. 연평균 총수농도는 변동 경향이 뚜렷하지 않다(그림 5.2.4).

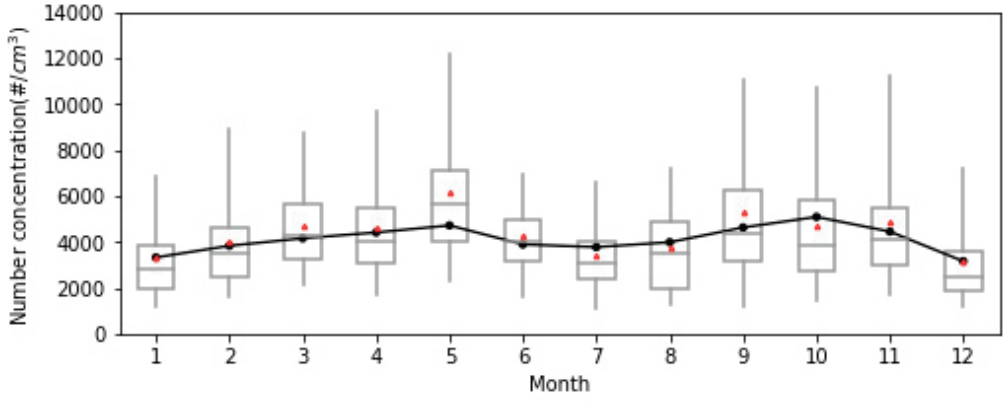


그림 5.2.3 고산 에어로졸 총수농도(#/㎤) 월변화. 2019년 월별분포(상자의 세로실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25,% 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

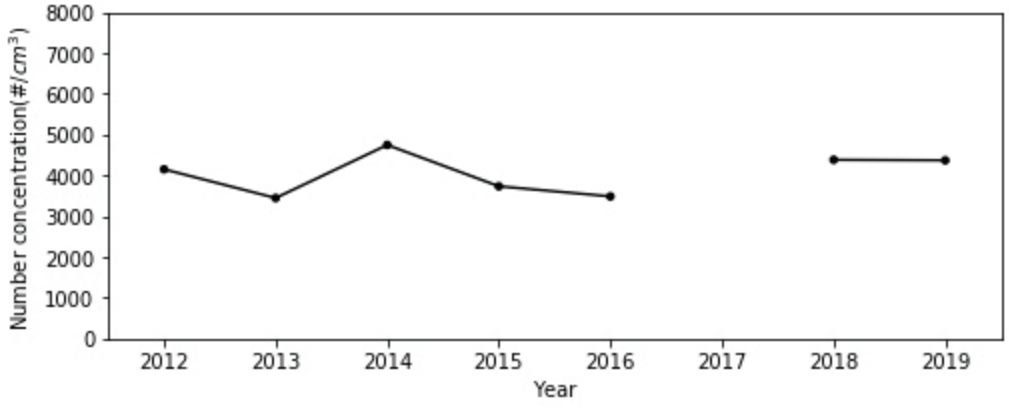


그림 5.2.4 고산 에어로졸 총수농도(#/㎤)의 최근 연평균 변화.

5.2.3 에어로졸 크기 분포

2019년에 관측된 안면도, 고산, 울릉도의 입자 크기별 부피농도 분포(0.5~20 ㎛)를 그림 5.2.5에 보였다. 세 지점 모두 미세입자 영역(1 ㎛ 이하)과 조대입자 영역(1 ㎛ 이상)에 피크가 관측되는 이산형(bi-modal) 분포를 보였으며, 안면도와 고산은 고농도 출현 기간이 유사하였다(그림 5.2.5). 울릉도는 안면도와 고산에 비해 전 기간에 걸쳐 농도가 낮게 측정되었다. 1~3월에 고농도 미세먼지 사례가 빈번하게 보였으며, 울릉도에서도 고농도 사례가 관측되었다. 안면도와 고산에서는 6월과 7월에도 미세입자 고농도가 관측된 것이 눈에 띈다. 안면도와 울릉도에서는 6~7월 사이 조대입자 농도가 다른 계절에 비해 감소하였다. 10월 28일~11월 2일 사이와 11월 18일 관측된 황사 등의 영향으로 11월에는 세 지점 모두 조대입자 농도가 높게 관측되었다.

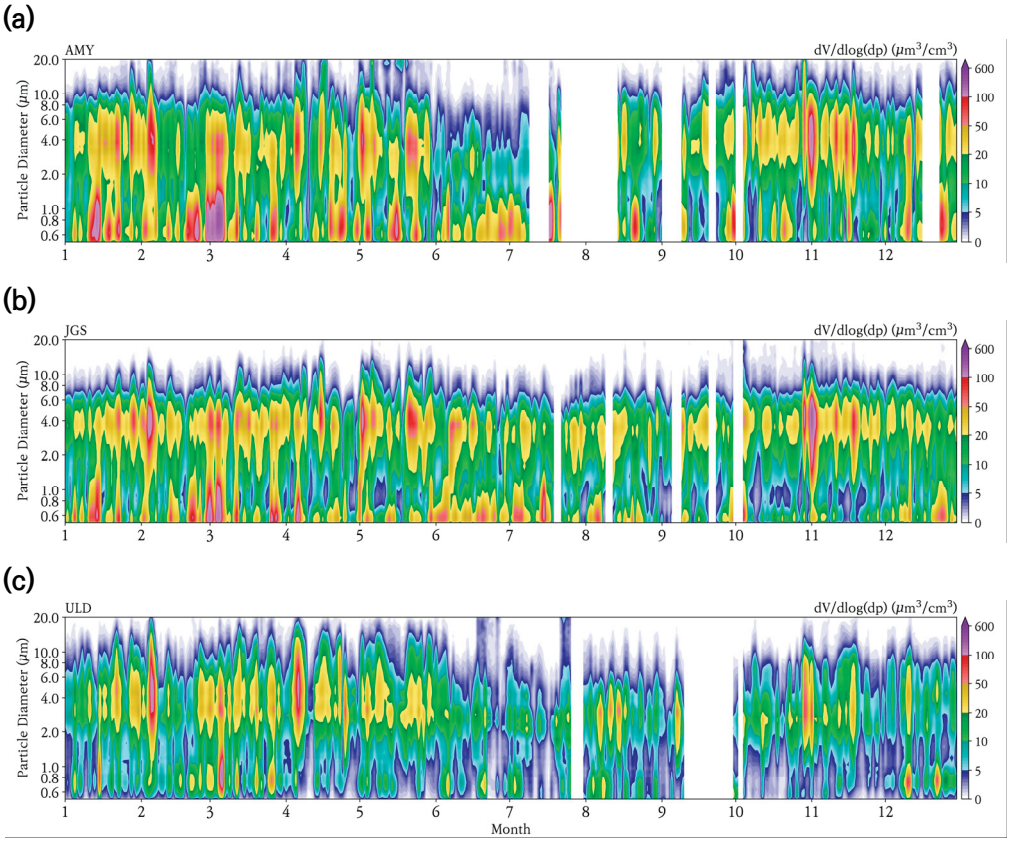


그림 5.2.5 (a) 안면도(AMY), (b) 고산(JGS), (c) 울릉도(ULD)에서 관측한 2019년 크기별 에어로졸 (0.5~20 ㎛, 52 채널) 부피농도(㎛³/㎤) 분포.

2019년 안면도에서 SMPS로 측정한 초미세먼지 입자크기별 수농도는 그림 5.2.6과 같다. 장비 장애가 발생한 8월부터 11월까지 제작사 수리로 인해 관측이 수행되지 못하였다. 5~7월이 다른 계절에 비해 입자 수농도가 높아 이 기간의 입자 생성이 활발했던 것으로 해석된다.

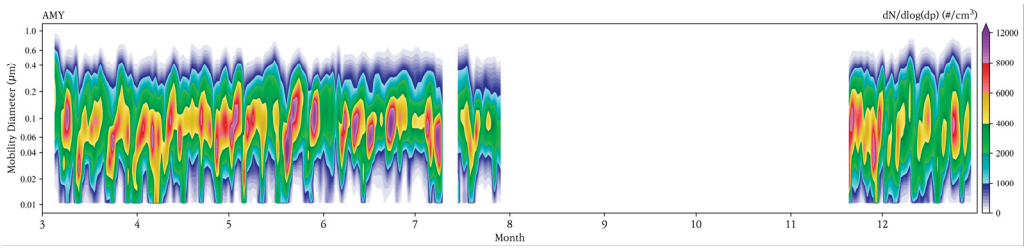


그림 5.2.6 2019년 안면도 미세입자 크기별 수농도 분포(개/㎤).

5.3 에어로졸 광학특성

에어로졸은 태양빛을 산란하거나 흡수하여 지구의 에너지 평형에 직접 영향을 미친다. 따라서 에어로졸 광산란계수, 광흡수계수, 에어로졸광학깊이(Aerosol optical depth, AOD) 등의 광학특성은 지역 에어로졸에 의한 복사강제력을 이해하기 위해 장기 관측이 필요한 요소이다. 안면도에서는 3파장 광산란계수와 7파장 광흡수계수를 관측하고 있으며 광흡수계수(800nm) 자료로부터 검댕(black carbon) 질량농도를 산출한다. 안면도, 고산, 울릉도에서는 4개 파장에서의 AOD를, 서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 자외선 영역의 AOD를 관측 중이다.

5.3.1 에어로졸 광산란계수

2019년 안면도의 월평균 에어로졸 광산란계수(550 nm)는 48.5~123.3 Mm^{-1}이며, 월평균 최댓값과 최솟값은 각각 3월과 9월에 관측되었다(그림 5.3.1). 1월과 3월에는 중간값보다 평균값이 훨씬 높고, 상자의 수염(75%~95% 자료)이 길어 광산란계수에 영향을 주는 미세입자 고농도 사례가 빈번하게 일어났을 것으로 추정할 수 있다. 각 월의 평균값은 3월과 7월을 제외하고 최근 10년(2009~2018년) 평균보다 낮았고, 특히 6월의 에어로졸 광산란계수는 최근 10년 평균의 53% 수준에 불과할 정도로 낮았다. 에어로졸 광산란계수의 2019년 연평균은 80.2 Mm^{-1}으로 2016년부터 유사한 값을 보이고 있다(그림 5.3.2).

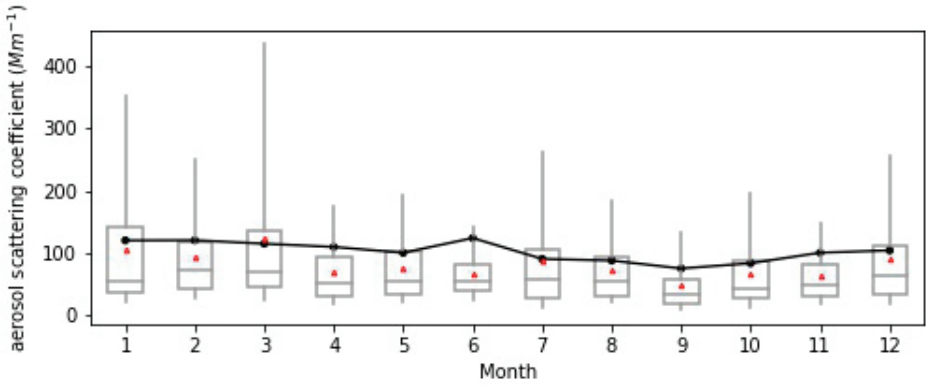


그림 5.3.1 안면도의 550 nm 에어로졸 광산란계수(Mm^{-1}) 월변화 2019년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

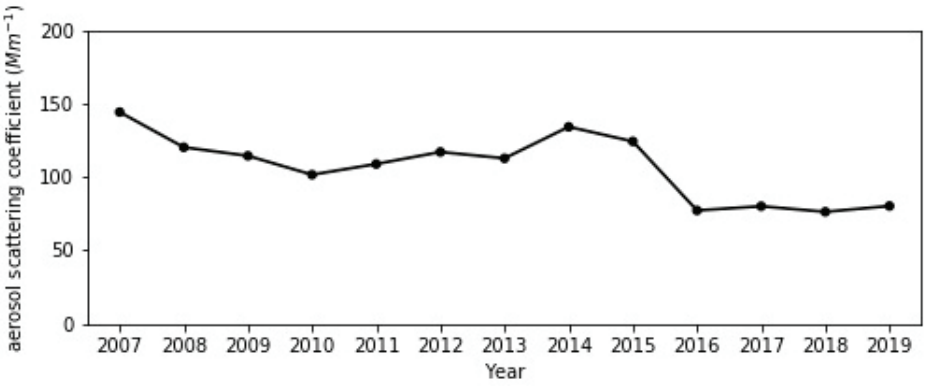


그림 5.3.2 안면도 550 nm 에어로졸 광산란계수(Mm^{-1})의 최근 연평균 변화.

2019년 안면도에서 측정한 월평균 에어로졸 산란 옹스트롬 지수를 그림 5.3.3에 보였다. 에어로졸 산란 옹스트롬 지수의 월평균은 1.34~1.71이며 최댓값은 6월, 최솟값은 11월에 관측되었다. 최근 10년(2009~2018년) 평균과 비교할 때 1~8월 사이에는 10% 내외의 차이로 비슷하나, 9~11월에는 최대 20%까지 낮았다. 최근 10년에 비해 상대적으로 큰 입자가 우세했던 것으로 추정할 수 있다. 에어로졸 산란 옹스트롬 지수 연평균은 2017년부터 낮아져 3년간 비슷한 수준(1.51~1.52)을 유지하고 있다(그림 5.3.4).

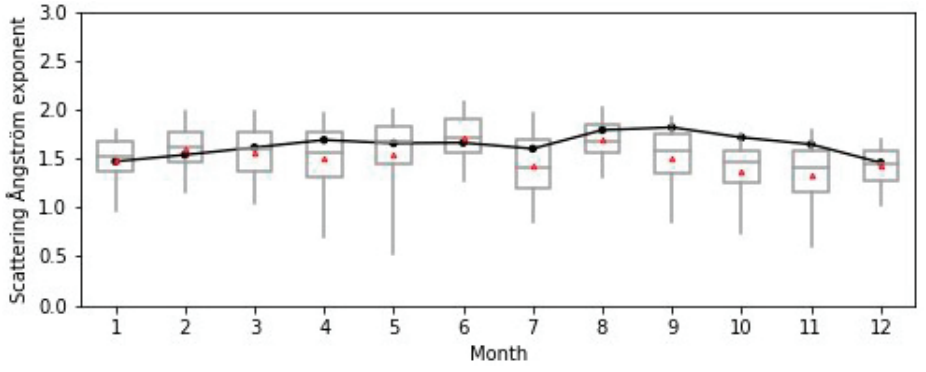


그림 5.3.3 안면도의 450-700 nm 에어로졸 산란 옹스트롬 지수 월변화. 2019년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

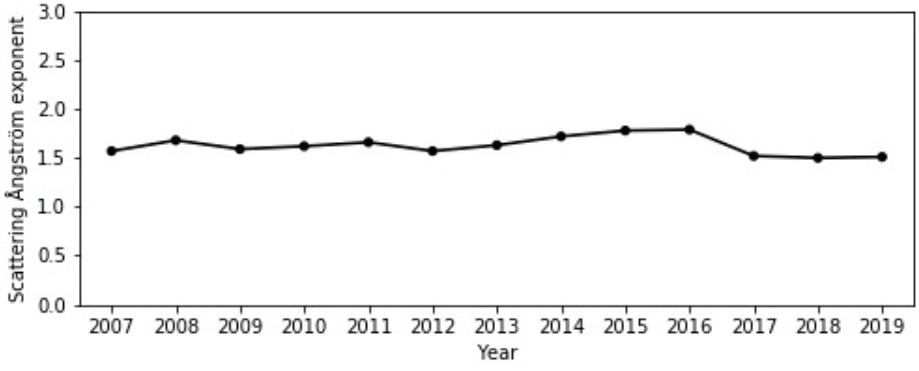


그림 5.3.4 안면도 에어로졸 산란 옹스트롬 지수(450-700 nm)의 최근 연평균 변화.

5.3.2 에어로졸 광흡수계수

2019년 안면도 기후변화감시소에서 측정한 검댕 질량농도를 그림 5.3.5에 나타내었다. 2019년 검댕 질량농도 월평균은 0.5~1.5 ㎍/㎥으로 관측되어 7월에 최소, 11월에 최대였다. 각 월의 평균 검댕 농도는 4~9월에는 최근 10년(2009~2018년) 평균보다 10%~40% 낮았으나 10~12월에는 최근 10년 평균보다 10%~38%까지 높았다(그림 5.3.5). 2010년 9월부터 7파장 광흡수계수측정기로 교체하여 550 nm에서의 광흡수계수를 산출하기 시작하였다. 광흡수계수(550 nm) 월평균은 3.3~12.3 Mm^{-1}으로 관측되었으며, 1~9월은 최근 8년(2011~2018년) 평균과 비슷하거나 그보다 4%~26% 낮았다(그림 5.3.6). 그러나 10~12월에는 최근 8년 평균보다 12%~37% 높았다.

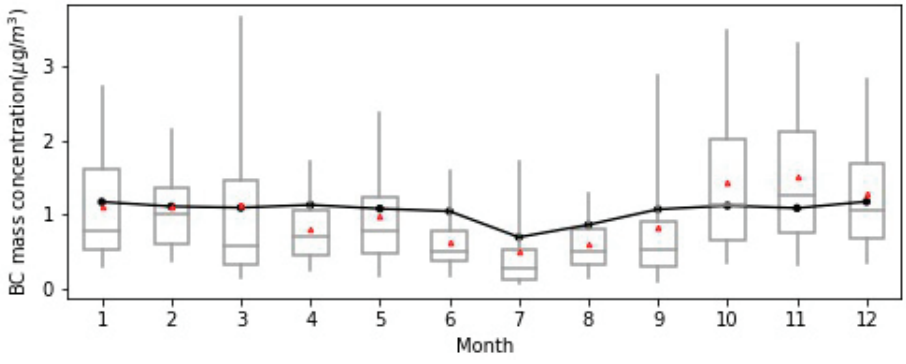


그림 5.3.5 2019년 안면도의 880 nm 검댕 질량농도(㎍/㎥). 월변화 2019년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2009~2018년 평균(점-선).

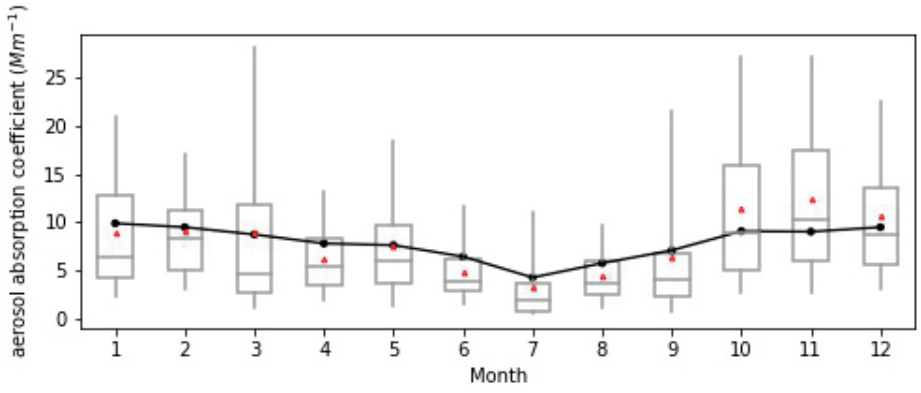


그림 5.3.6 2019년 안면도의 550 nm 에어로졸 광흡수계수(Mm^{-1}) 월변화. 2019년 월별 분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2011~2018년 평균(점-선).

검댕의 질량농도는 2007년과 2013년에 1.2 ㎍/㎥로 가장 높았으며 점차 감소하는 추세를 보이다 2018년에 0.7 ㎍/㎥로 가장 낮았다(그림 5.3.7). 그러나 2019년에는 1.0 ㎍/㎥로 2018년에 비해 약 48% 증가하였으나, 최근 10년(2009~2018년) 평균과는 유사한 수준이다. 에어로졸 광흡수계수(550 nm)의 연평균은 2012년에 가장 높고(9.4 Mm^{-1}), 2016년 이후 점차 감소하다가 2019년에는 8.2 Mm^{-1}로 2016년 수준으로 높아졌고, 최근 8년(2011~2018년) 평균과는 약 3% 차이로 유사한 값을 보였다(그림 5.3.8). 그림 5.3.5, 그림 5.3.6에서 보는 바와 같이 10~12월에 관측된 고농도 사례가 연평균 상승에 기여한 것으로 보인다.

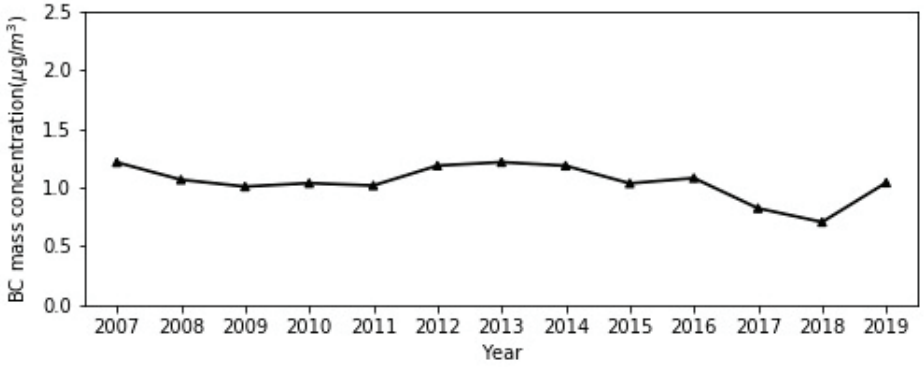


그림 5.3.7 안면도 880 nm 검댕 질량농도의 최근 연평균 변화.

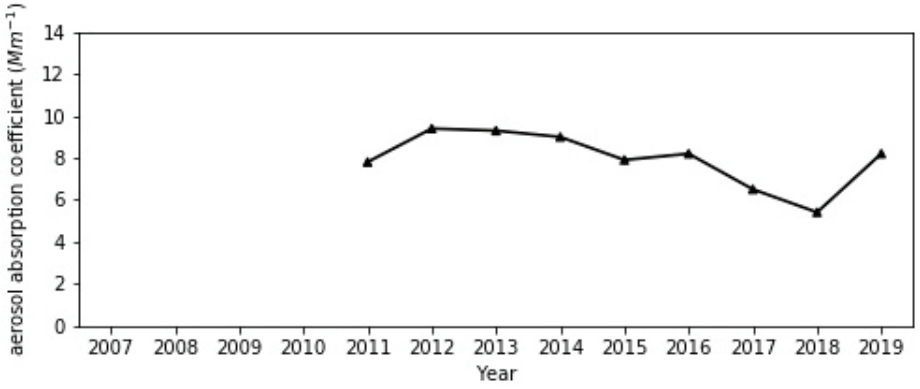


그림 5.3.8 안면도 550 nm 에어로졸 광흡수계수의 최근 연평균 변화.

5.3.3 에어로졸 광학깊이(AOD)

가. 안면도, 고산, 울릉도

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

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

GAW-PFR은 4개의 스펙트럼 대역(862, 500, 412, 368 nm)으로 전송되는 직달 일사를 다양한 기상조건에서 1분 간격으로 관측하고, 세계광학깊이연구 및 교정센터(WORCC: World Optical depth Research and Calibration Centre)에서 제공한 알고리즘을 적용하여 대기의 에어로졸 광학깊이를 산출한다. WORCC의 AOD는 아래와 같은 WMO(1996) 권고사항에 따라 계산된다.

$$AOD = \delta_A = \frac{\log(S_0) - \log(S) - 2\log(R) - \delta_R m_R - \delta_0 m_0}{m_A}$$

이 식에서 S는 측정된 신호이고 S_0는 교정상수이다. R은 천문단위로 표시되는 태양과 지구 간의 거리이며, m_A는 에어로졸 air mass이다. δ_R과 δ_0는 공기분자와 오존의 광학깊이이며, m_R과 m_0는 공기분자와 오존의 air mass이다.

그림 5.3.9과 5.3.11은 안면도에서 2013~2019년까지 관측한 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수를 보여준다. 2013년 1월~ 2014년 4월의 관측결과는 WORCC에서 품질관리가 완성된 자료(○ 모양)이며, 2014년 5월부터는 자체 분석자료(• 모양)이다. 그림 5.3.10과 5.3.12는 안면도의 2019년 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수의 월 변동성을 나타낸 것이다. 해당월에 30% 이상의 관측이 이루어졌을 경우 월평균값, 중간값 및 백분위수(5%, 25%, 75%, 95%)를 표현하였다. 에어로졸 광학깊이는 에어로졸의 양에 대체로 비례하며, 옹스트롬 지수는 에어로졸의 크기와 반비례 관계를 나타낸다. 즉, 상반기(1~6월)에는 에어로졸 광학깊이가 비교적 크고, 옹스트롬 지수가 작게 나타나는데 큰 입자로 구성된 황사 등의 영향을 받은 것으로 사료된다. 한편, 하반기(7~12월)로 갈수록 옹스트롬 지수가 크고 에어로졸 광학깊이가 비교적 작게 나타나, 전체적으로 에어로졸의 영향은 약했으며 큰 입자보다는 작은 에어로졸의 영향을 받은 것으로 나타났다.

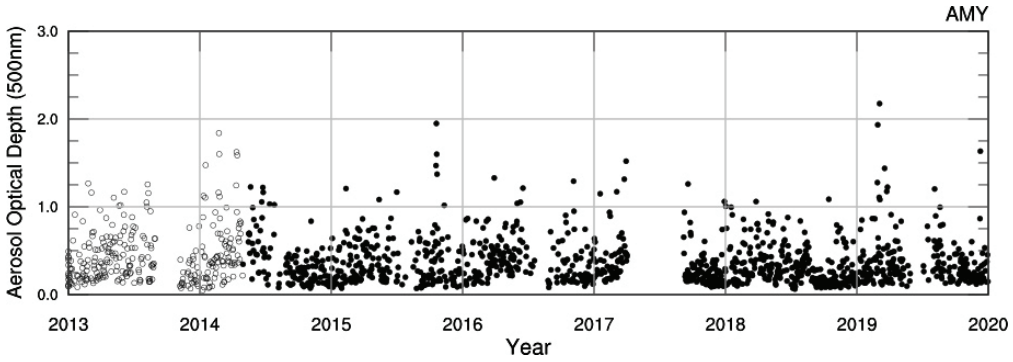


그림 5.3.9 안면도(AMY)의 에어로졸 광학깊이(2013~2019년).

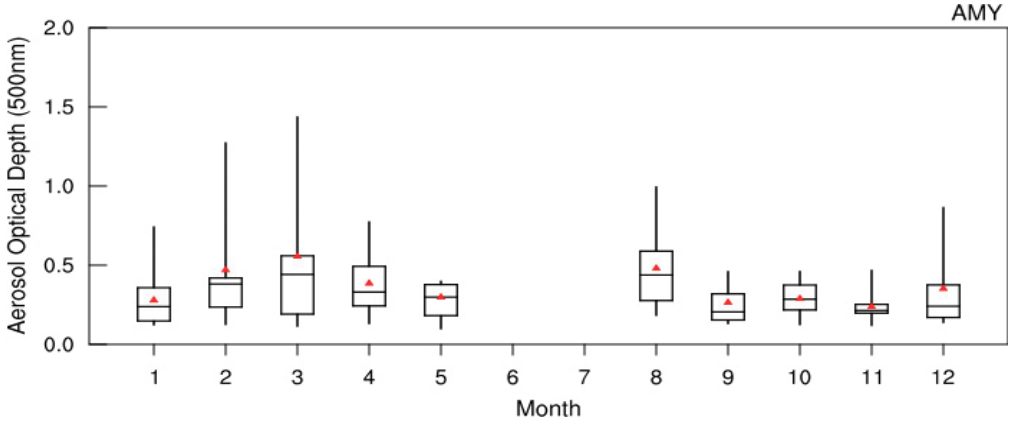


그림 5.3.10 2019년 안면도(AMY)의 에어로졸 광학깊이 월 변동성(선의 양끝: 5%, 95%, 상자 양끝: 25%, 75%, 상자 가운데 선: 중간값, 붉은 삼각형: 월 평균값).

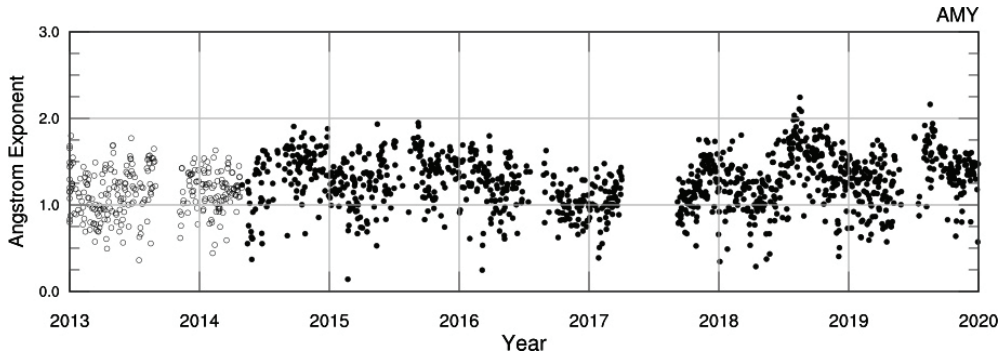


그림 5.3.11 안면도(AMY)의 에어로졸 옹스트롬 지수(2013~2019년).

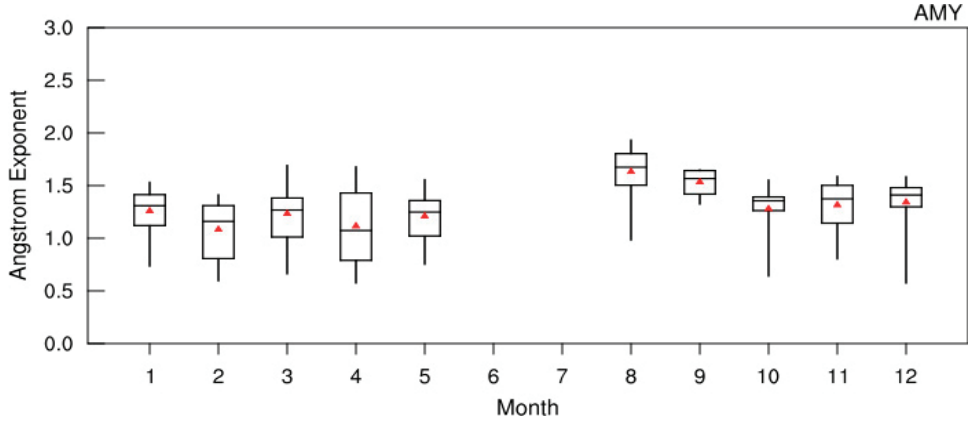


그림 5.3.12 2019년 안면도(AMY)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월 변동성.

그림 5.3.13과 5.3.14에는 안면도에서 정밀필터복사와 유사한 원리로 관측하는 태양광도계로부터 2019년에 관측한 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수를 나타내었다. 태양광도계로 관측한 결과는 정밀필터복사계(그림 5.3.9, 5.3.11의 2019년 부분)와 유사한 계절 변화를 나타내고 있다. 11월 21일 이후에는 기기교정을 위해 NASA로 반출하여 관측이 이루어지지 않았다. 한편, 정밀필터복사계와 상호 비교한 그림 5.3.15를 보면, 두 장비의 에어로졸 광학깊이는 거의 유사하나, 정밀필터복사계의 옹스트롬 지수는 태양광도계에 비해 약 5% 가량 크게 산출되었다. 이는 각 기기별로 사용 파장대가 달라 직접적인 비교에는 한계가 있다.

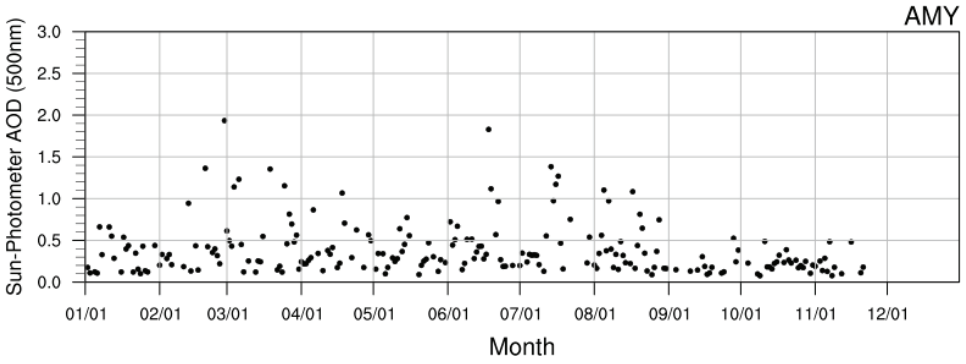


그림 5.3.13 태양광도계로 측정한 안면도(AMY)의 에어로졸 광학깊이(2019년).

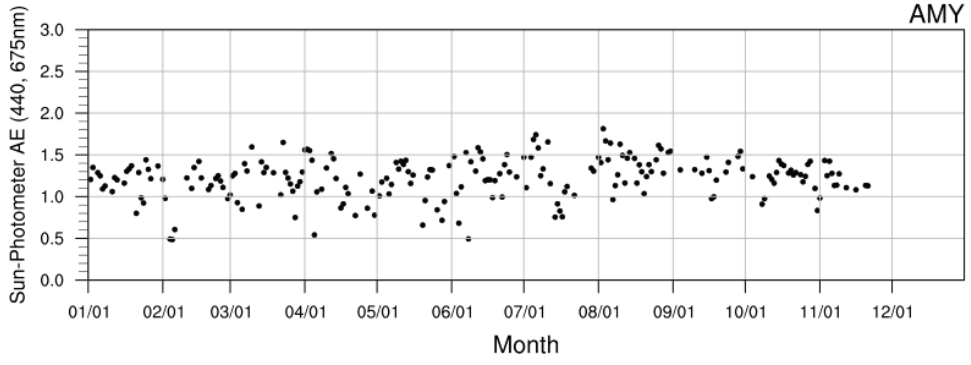


그림 5.3.14 태양광도계로 측정한 안면도(AMY)의 옹스트롬 지수(2019년).

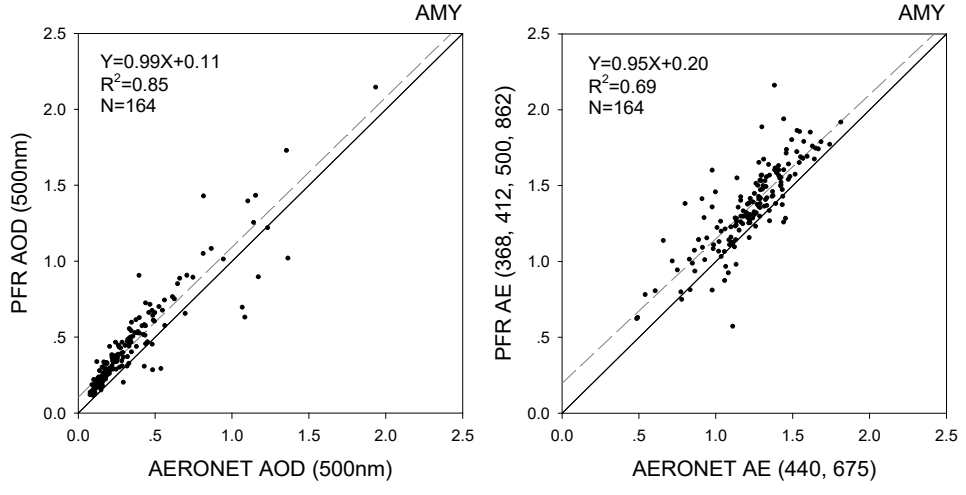


그림 5.3.15 태양광도계와 정밀필터복사계로 안면도(AMY)에서 측정한 에어로졸 광학깊이(좌)와 옹스트롬 지수(우)의 비교(2019년).

그림 5.3.16은 2013년부터 2019년까지 고산에서 관측한 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이를 보여주며, 그림 5.3.17은 2019년에 고산에서 관측한 에어로졸 광학깊이의 월변동성을 나타낸 것이다. 이 그림들을 통해 대체로 봄철과 여름철에 에어로졸 광학깊이가 높고, 가을철과 겨울철에는 낮은 것을 알 수 있다. 봄철에는 황사, 연무 등의 영향으로, 여름철에는 흡습성장하는 에어로졸의 영향으로 인해 에어로졸 광학깊이가 높아진 것으로 사료된다. 안면도와 마찬가지로 하반기로 갈수록 고산 에어로졸의 광학깊이는 낮게 관측되었다.

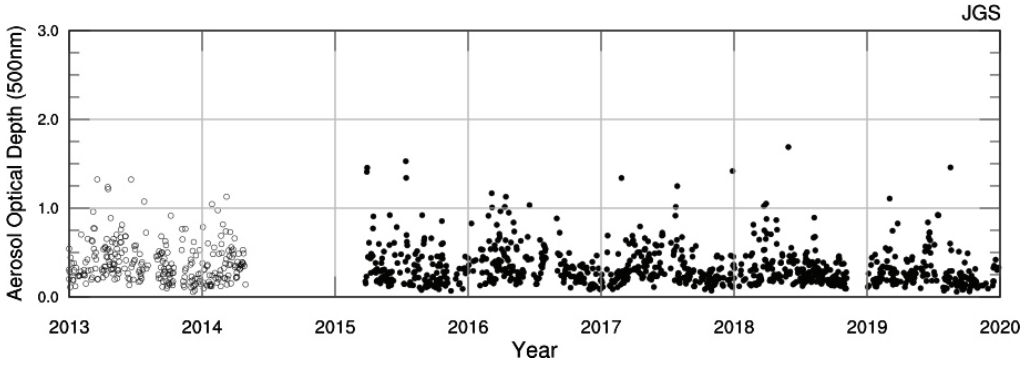


그림 5.3.16 고산(JGS)의 에어로졸 광학깊이(2013~2019년).

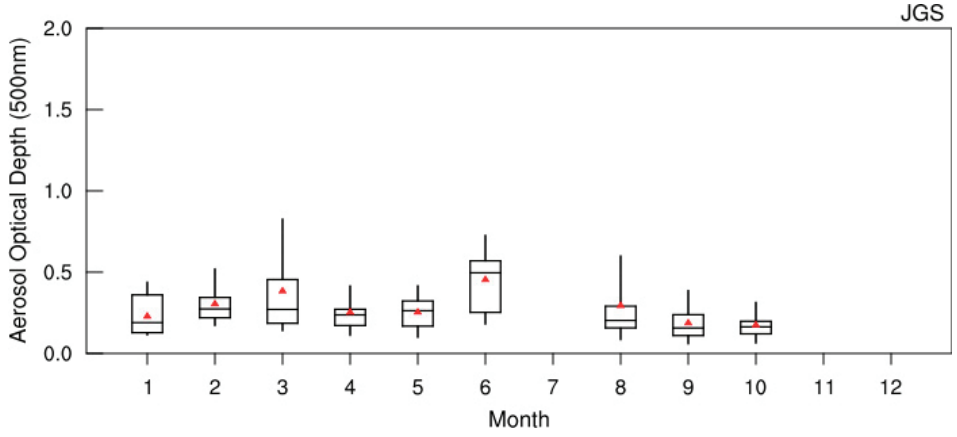


그림 5.3.17 2019 고산(JGS)의 에어로졸 광학깊이 월 변동성.

그림 5.3.18과 5.3.19는 고산에서 2013~2019년까지 관측한 옹스트롬 지수이다. 옹스트롬 지수는 대체로 봄철에 낮고 가을, 겨울철에는 높았다. 종합적으로 고산에서 에어로졸의 광학 특성은 안면도와 유사하게 상반기에는 황사와 같은 조대입자의 영향을 받다가 하반기로 갈수록 상대적으로 미세입자의 영향을 받은 것으로 사료된다.

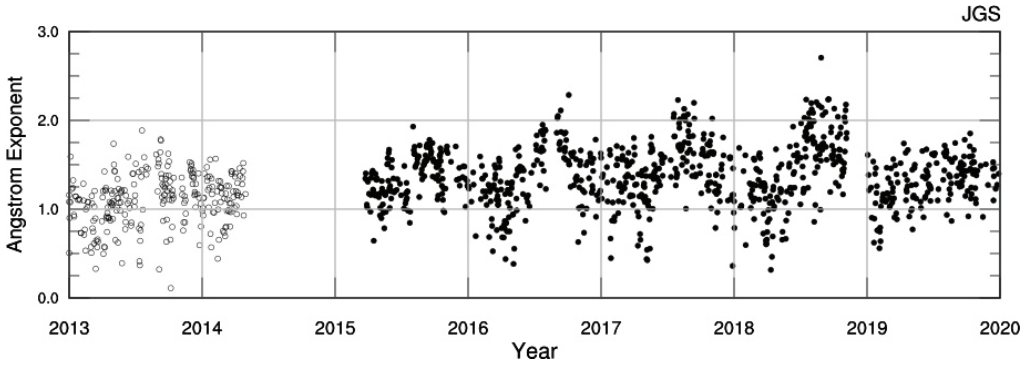


그림 5.3.18 고산(JGS)의 에어로졸 옹스트롬 지수(2013~2019년).

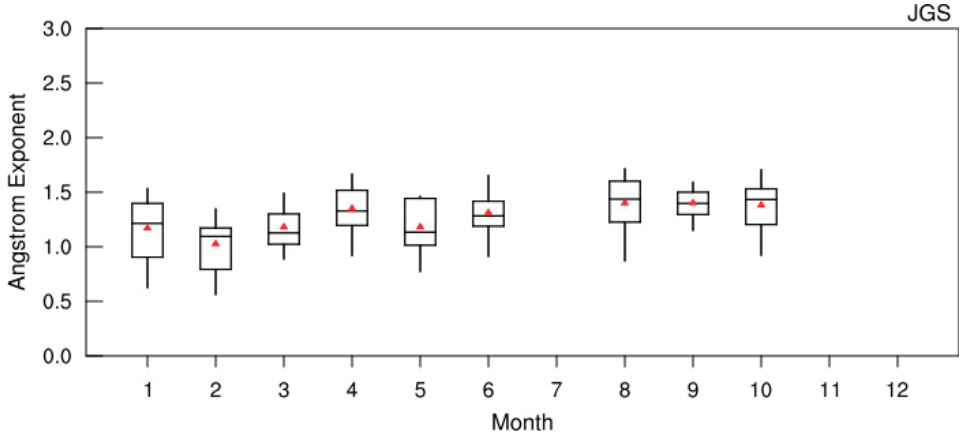


그림 5.3.19 2019년 고산(JGS)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월 변동성.

그림 5.3.20과 5.3.22는 울릉도의 2013년부터 2019년까지의 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수를 보여주고 있으며, 그림 5.3.21과 5.3.23은 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수의 월변동성을 나타내고 있다. 울릉도의 기기는 2018년 7월부터 862 nm의 감도가 급격히 낮아졌으며, 2018년 8월부터는 412 nm의 감도도 낮아져서 그대로 활용할 수 없는 상황이다. 따라서 2018년 7월부터 두 파장(368, 500 nm)을 이용하여 옹스트롬 지수를 계산하였으며, 862 nm의 광학깊이는 옹스트롬 지수와 500 nm의 광학깊이를 활용하여, 412 nm의 광학깊이는 옹스트롬 지수와 368 nm의 광학깊이를 활용하여 산출하였다. 이러한 조치는 2019년 8월까지 지속되었고, 8월 20일부터는 새로 교정된 기기를 이용하여 관측하였다. 울릉도에서는 에어로졸 광학깊이가 안면도, 고산과 유사하게 봄철 중심의 상반기에 높게 나타나고 하반기로 갈수록 낮게 나타났다. 그러나 옹스트롬 지수는 기기의 민감도에 이상이 생긴 2018년 7월부터 2019년 8월

까지 낮은 값을 보였다. 이는 옹스트롬 지수를 산출하면서 두 파장만의 광학깊이를 사용하는 한계로 인해 울릉도의 일반적인 특성으로 논의하기에는 부족한 실정이다.

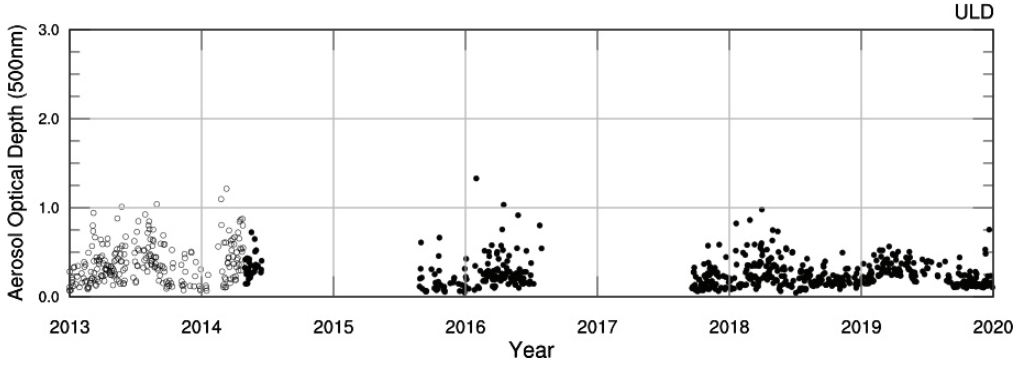


그림 5.3.20 울릉도(ULD)의 에어로졸 광학깊이(2013~2019년).

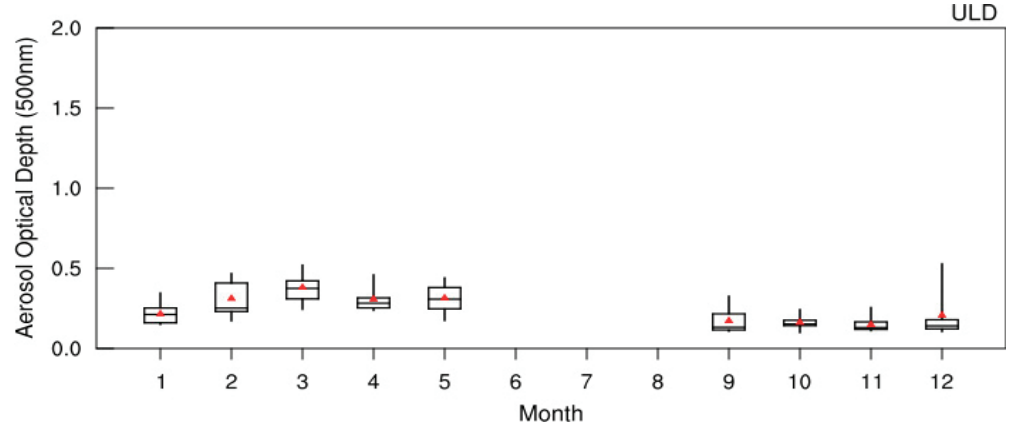


그림 5.3.21 2019년 울릉도(ULD)의 에어로졸 광학깊이 월 변동성.

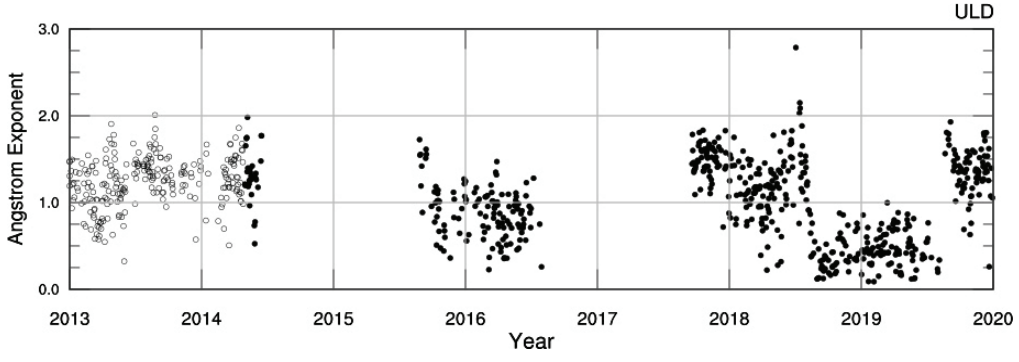


그림 5.3.22 울릉도(ULD)의 에어로졸 옹스트롬 지수(2013~2019년).

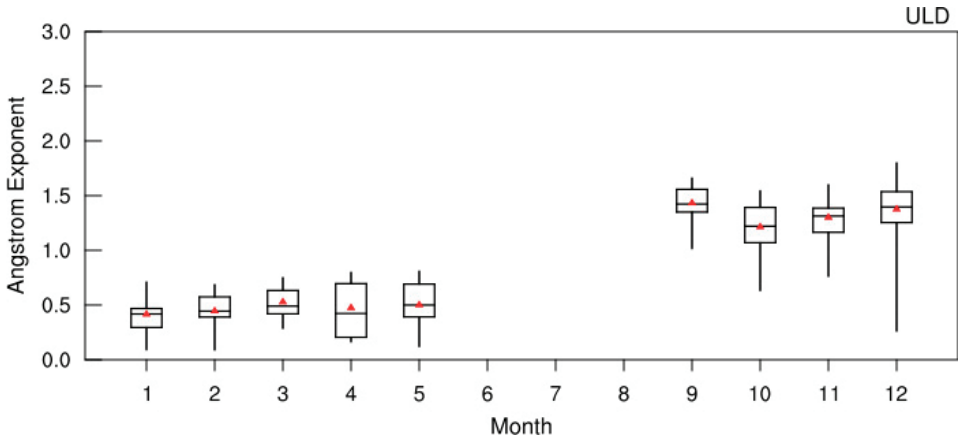


그림 5.3.23 2019년 울릉도(ULD)의 에어로졸 옹스트롬 지수 월 변동성.

나. 서울(연세대학교) 위탁관측소

서울(연세대학교) 위탁관측소는 2004년부터 현재까지 Brewer 분광광도계(SCI-TEC #148)를 이용하여 에어로졸 광학깊이(Aerosol optical depth, AOD)를 관측하고 있다. Brewer 분광광도계는 290.5nm부터 363.0nm 사이의 일사를 관측하고 있고, 그 중에서 320.1 nm의 파장의 직달일사로부터 AOD를 산출하고 있다(Carvalho and Henriques, 2000). Brewer 분광광도계는 일별로 계산된 태양 천정각을 따라서 관측을 수행하기 때문에, 강수가 있는 날에는 직달 관측을 수행할 수 없고, 천정 관측만 수행이 가능하다. 2019년도의 관측은 장비의 통신연결과 관측에 중요한 부품인 slitmask의 이상으로 2018년 3월 8일부터 관측이 중단된 이후 2019년 8월 29일부터 관측이 재개되었으나, 표준원기와의 검보정 이후 장기간이 경과하여 관측 자료의 품질에 대한 신뢰도가 낮다(Dobson 분광광도계와의 오존 전량 비교 결과 상관계수가 0.81로 나타남). 따라서 본 보고서에서는 Brewer 분광광도계의 자료 대신 Aerosol Robotic Network (AERONET)의 태양광도계 자료로부터 산출한 AOD를 제시하였다.

서울(연세대학교) 위탁관측소의 태양광도계는 2011년 3월부터 현재까지 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640 nm 파장에서 매 3분마다 관측을 수행하고 있다(Holben et al., 1998, Eck et al., 1999). 본 보고서에서는 340 nm AOD를 이용하였고 구름이 있는 날을 제외한 2019년도의 관측일은 206일이다. 그림 5.3.24는 2011년 3월부터 2019년 12월까지의 일평균 AOD의 시계열이고, 그림 5.3.25는 일평균 AOD의 2019년 연변화와 장기월평균 연변화(2011~2018)이다. 장기월평균의 연변화는 여름철에 최대, 겨울철에 최소를 보인다. 이는 여름철 습도가 높기 때문에 흡습성장으로 AOD의 농도가 높아짐을 유추할 수 있다. 2019년의 AOD

연변화는 최근 8년(2011~2018년)과 유사한 변동을 보이나 3월에 최댓값이 높게 나타나고 변동폭이 증가하는 모습을 보이는데, 이는 봄철 황사 및 미세먼지 유입으로 인한 것으로 해석된다.

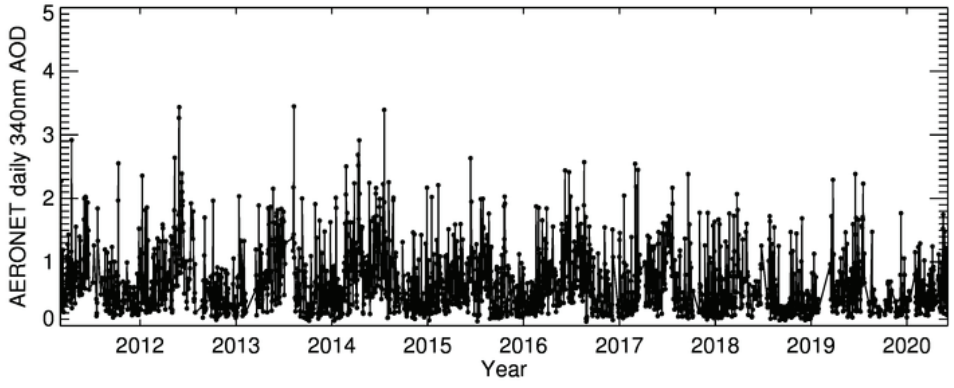


그림 5.3.24 서울의 에어로졸 광학깊이(340 nm, 2011~2019년).

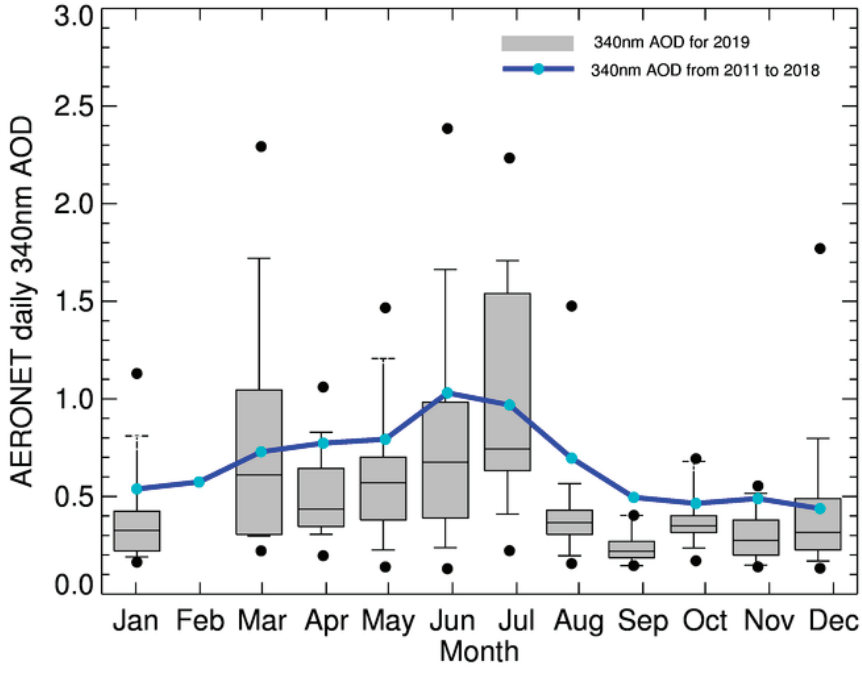


그림 5.3.25 2019년 서울 에어로졸 광학깊이(340 nm)의 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 10%, 90% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 검은 점은 최댓값 및 최솟값)와 최근 8년(2011~2018년) 평균(점-선).

5.3.4 에어로졸 연직분포

대기 중 부유물질의 연직 광학특성을 감시하기 위하여 안면도 기후변화감시소에서 에어로졸 라이다(LIDAR, Light Detection and Ranging)를 운영하고 있다. 에어로졸 라이다는 강수 시나, 정기 점검 또는 장애 시에도 관측을 중단하여 2019년의 자료 취득률은 약 75% 수준이다. 에어로졸 라이다는 2019년 9월부터 레이저 출력이 점차 감소하여 자료 해석이 어려워 9~12월의 자료는 보고서에 제시하지 않았다. 레이저 등 소모품교체, 수리 후 2020년 1월에 정상화되었다.

그림 5.3.26은 2019년 1월부터 8월 사이 안면도 에어로졸 라이다 원시자료로부터 생산한 후방산란신호, 편광소멸도의 연직 일평균 시계열이다. 황사가 유입된 날의 날짜축에 주황색으로 표시하였다. 후방산란신호는 대기 중에 부유물질이 많거나 구름이 있을 경우 큰 값으로 관측된다. 2019년의 고도별 후방산란신호를 보면 1~3월에 지표 부근(1 km 이하)에서 상대적으로 강한 신호가 관측되었다(그림 5.3.26a). 편광소멸도는 비구형 입자들이 많을 경우 값이 높아지는데, 대체로 빙정 상태의 구름이나, 황사 탐지에 유용하다. 울릉도에서 황사가 관측된 2월 5일 주변에는 안면도 라이다 편광소멸도 자료에서 비구형 입자(황사) 특징을 보여주고 있다(그림 5.3.26b).

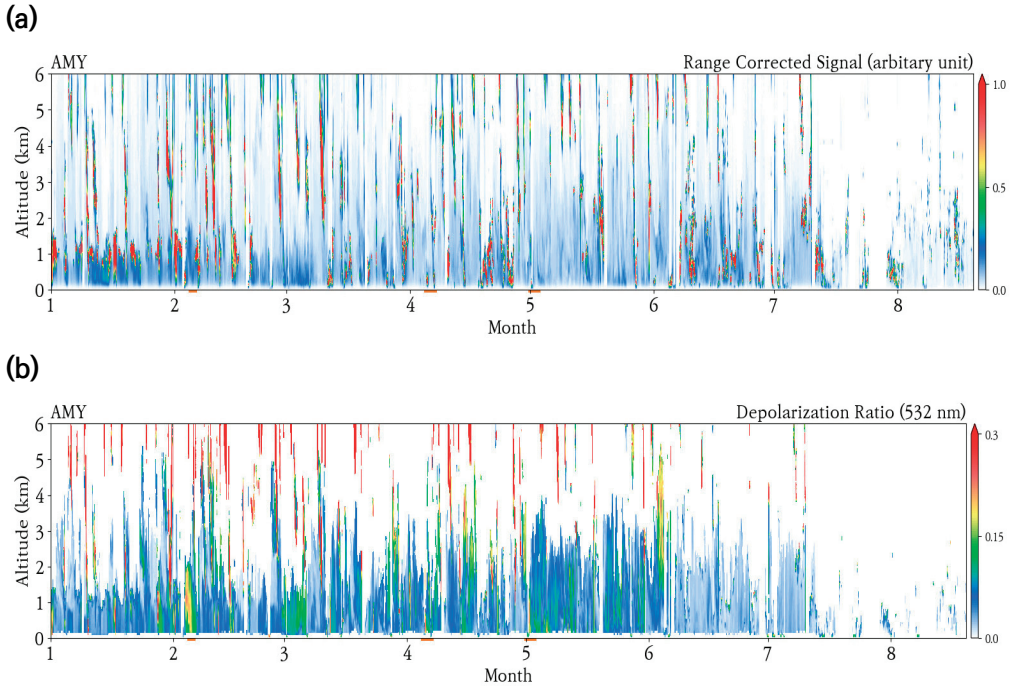


그림 5.3.26 2019년 안면도 기후변화감시소에서 측정된 에어로졸 라이다 (a) 후방산란강도와 (b) 편광소멸도. 주황색 사각형(▬)은 우리나라 황사발생일.

5.4 에어로졸 화학특성

5.4.1 PM10, PM2.5 수용성 이온성분 특성

가. 2019년 특성

2019년 1월부터 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 분석하였고 그 결과를 그림 5.4.1와 그림 5.4.2에 보였다. nss-SO_4^{2-}는 와 nss-Ca^{2+} 은 각각 비해염(non-sea salt) 황산염(SO_4^{2-})과 비해염 Ca^{2+}의 농도를 가리키며, 총 농도에서 해염 기원 농도를 뺀 값이다(Ho et al., 2003).

$$[nss\text{-}SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - [Na^+] \times 0.251$$
$$[nss\text{-}Ca^{2+}] = [Ca^{2+}] - [Na^+] \times 0.04$$

2019년 PM10과 PM2.5 중 수용성 이온성분의 일별 농도와 조성비를 각각 그림 5.4.1과 그림 5.4.2에 나타내었다. PM10 수용성 이온성분의 총합이 50 ㎍/㎥(우리나라 연평균 PM10 대기환경기준)보다 높은 시료는 4개(1월 11일, 1월 22일, 3월 2일, 3월 27일)였고, 40~50 ㎍/㎥ 사이의 자료는 2개(2월 20일, 12월 23일)였다(그림 5.4.1). 이들 6개(빨간 화살표) 사례일에는 연무 또는 박무가 관측되었고, 모두 NO_3^-이의 농도와 조성비가 가장 높았다. 한편, 2월 5일과 5월 1일은 황사로 인해 nss-Ca^{2+}성분의 농도가 다른 사례에 비해 높아진 것으로 판단된다.

PM2.5의 경우에도 붉은색 화살로 표시된 사례에서 보는 바와 같이 연무와 박무 현상 시 총이온 농도의 합이 증가하였다(그림 5.4.2). 1~4월 사이에는 NO_3^-성분의 농도와 조성비가 가장 높았으나, 5~10월에는 nss-SO_4^{2-}성분의 농도와 비중이 높아졌다.

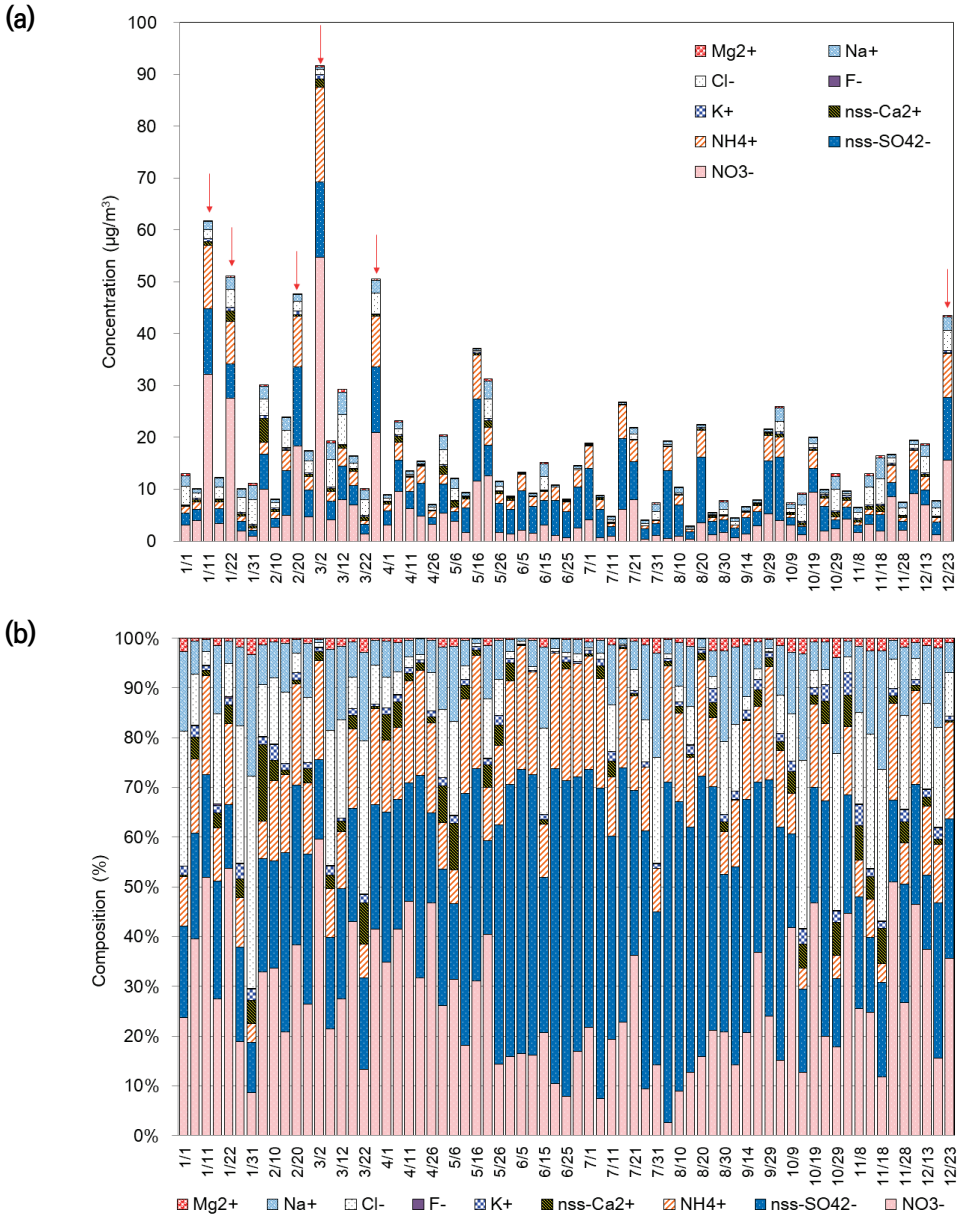


그림 5.4.1 안면도(AMY) 2019년 PM10 수용성 이온성분의 (a)농도, (b)조성.

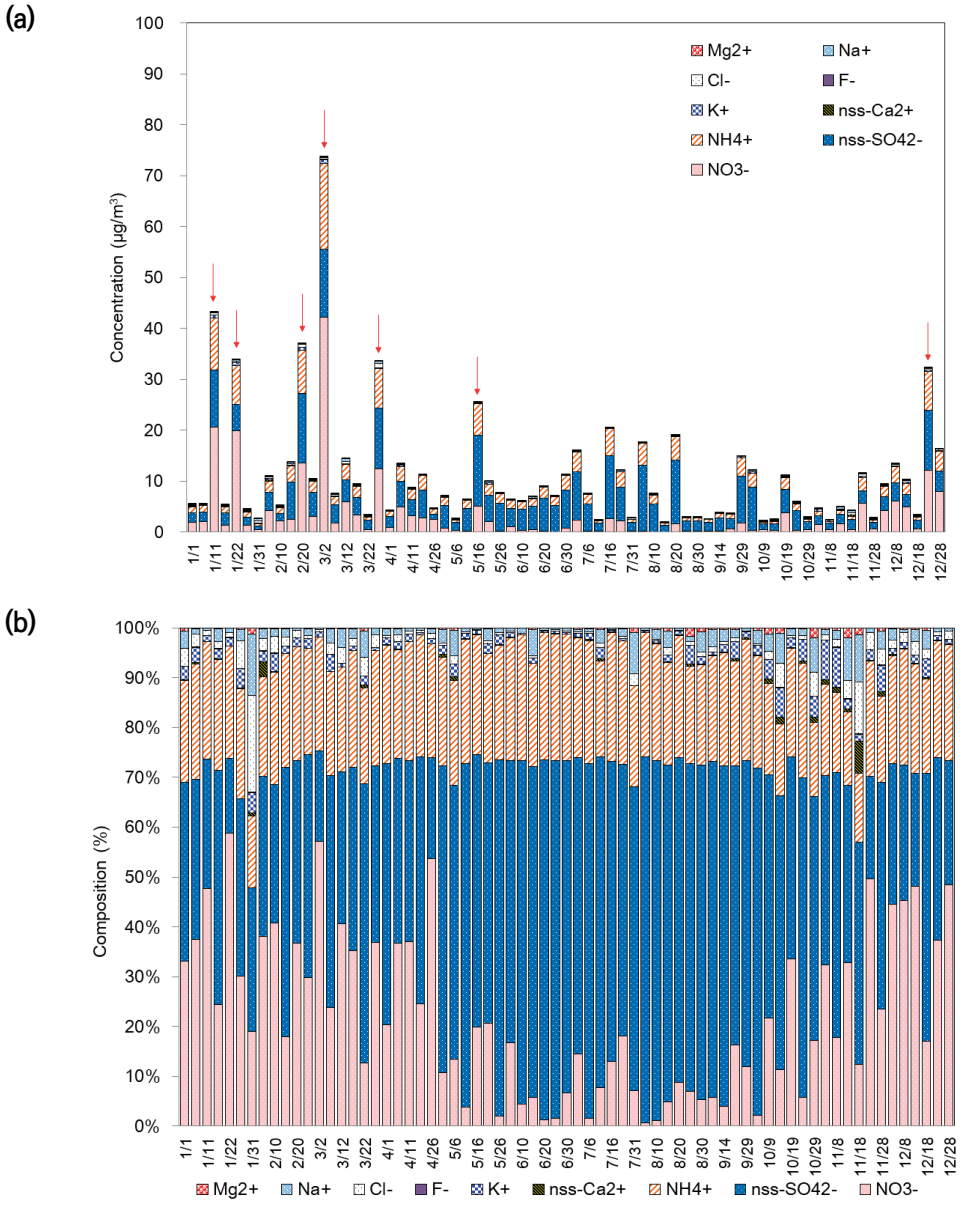


그림 5.4.2 안면도(AMY) 2019년 PM2.5 수용성 이온성분의 (a)농도, (b)조성.

나. PM10, PM2.5 수용성 이온성분 연평균 농도

2009년부터 안면도에서 측정한 PM10, PM2.5의 수용성 이온성분의 연평균 농도를 그림 5.4.3과 5.4.4에 나타내었다. 인위적 활동에서 기원한 이차오염물질의 2019년 평균은 최근 10년(2009~2018년) 평균에 비해 낮았으며, nss-SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 성분은 각각 13%, 12%이며 NO_3^- 는 25% 낮아져 다른 성분에 비해 감소폭이 컸다. 연평균 변화를 보면 2014년도에 세 가지 이차오염물질 모두 가장 높았다. 농도가 가장 낮은 해는 nss-SO_4^{2-}의 경우 2012년, NO_3^-은 2018년, NH_4^+은 2016년이었다. 토양에서 주로 기원한 nss-Ca^{2+}은 최근 10년 평균(0.6 ㎍/㎥)에 비해 2019년에는 0.5 ㎍/㎥로 약 17% 낮았다. nss-Ca^{2+}농도는 2011년에 가장 높고, 2018년에 가장 낮았다. 이 밖에 Na^+, Cl^-, K^+, Mg^{2+} 성분은 최근 10년 평균보다 약간 높았다(그림 5.4.3a).

2009년부터 2019년까지 PM10 중 이차오염물질(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+)의 조성범위는 77.3%~86.0%로 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 한편, 해염기원 성분들(Na^+, Cl^-, Mg^{2+})의 조성범위는 9.6%~18.0%, 토양기원인 nss-Ca^{2+} 성분은 전체의 1.4%~4.7%를 차지하였다(그림 5.4.3b).

2019년 PM2.5 중 nss-SO_4^{2-} 연평균(4.7 ㎍/㎥)은 최근 10년 평균(5.5 ㎍/㎥)보다 약 15% 낮았고 연도별로는 2011년에 가장 높고, 2012년에 가장 낮았다. 2019년 NO_3^- 농도는 3.3 ㎍/㎥로 최근 10년 평균(6.2 ㎍/㎥)의 약 1/2 수준이었으며, 연도별로는 2009년에 가장 높고, 2017년에 가장 낮았다. NH_4^+ 역시 최근 10년 평균(3.3 ㎍/㎥)에 비해 약 24% 낮아진 2.5 ㎍/㎥였으며, 2014년에 가장 높고, 2016년에 가장 낮았다. 토양 기원인 nss-Ca^{2+}은 최근 10년 평균농도의 약 1/11로 낮았으며, 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 2019년에 가장 낮았다. 그 외 성분들(Na^+, Cl^-, F^-, K^+, Mg^{2+})의 2019년 평균도 최근 10년에 비해 모두 낮았다(그림 5.4.4a).

2009년부터 2019년까지 PM2.5의 수용성 이온성분 중 이차오염물질(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+)의 조성범위는 82.3%~95.6%이며, 2019년에 가장 높고, 2009년에 가장 낮았다. 한편, 해염기원 성분(Na^+, Cl^-, Mg^{2+})의 조성비는 2.8%~12.2%이며, 이차오염물질과는 반대로 2009년에 가장 높고, 2019년에 가장 낮았다. 토양기원의 nss-Ca^{2+} 성분은 0.2%~2.7%의 조성비를 보였다(그림 5.4.4b). 즉, 2019년 PM2.5의 수용성 이온성분 중 인위적 기원의 이차오염물질들의 조성비는 다른 성분에 비해 증가하는 것으로 확인되었다.

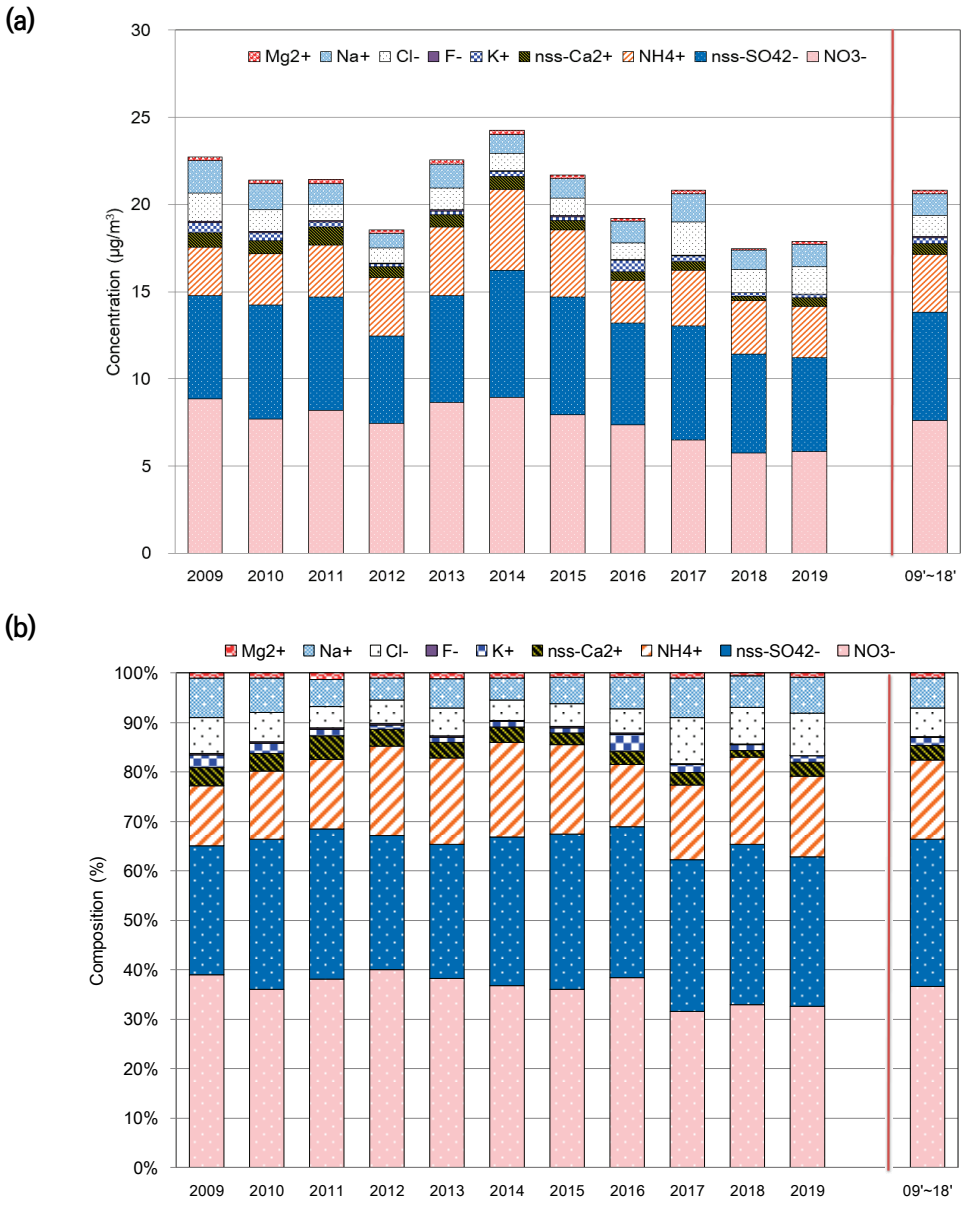


그림 5.4.3 안면도(AMY) 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 PM10 수용성 이온성분의 연평균 (a)농도, (b)조성.

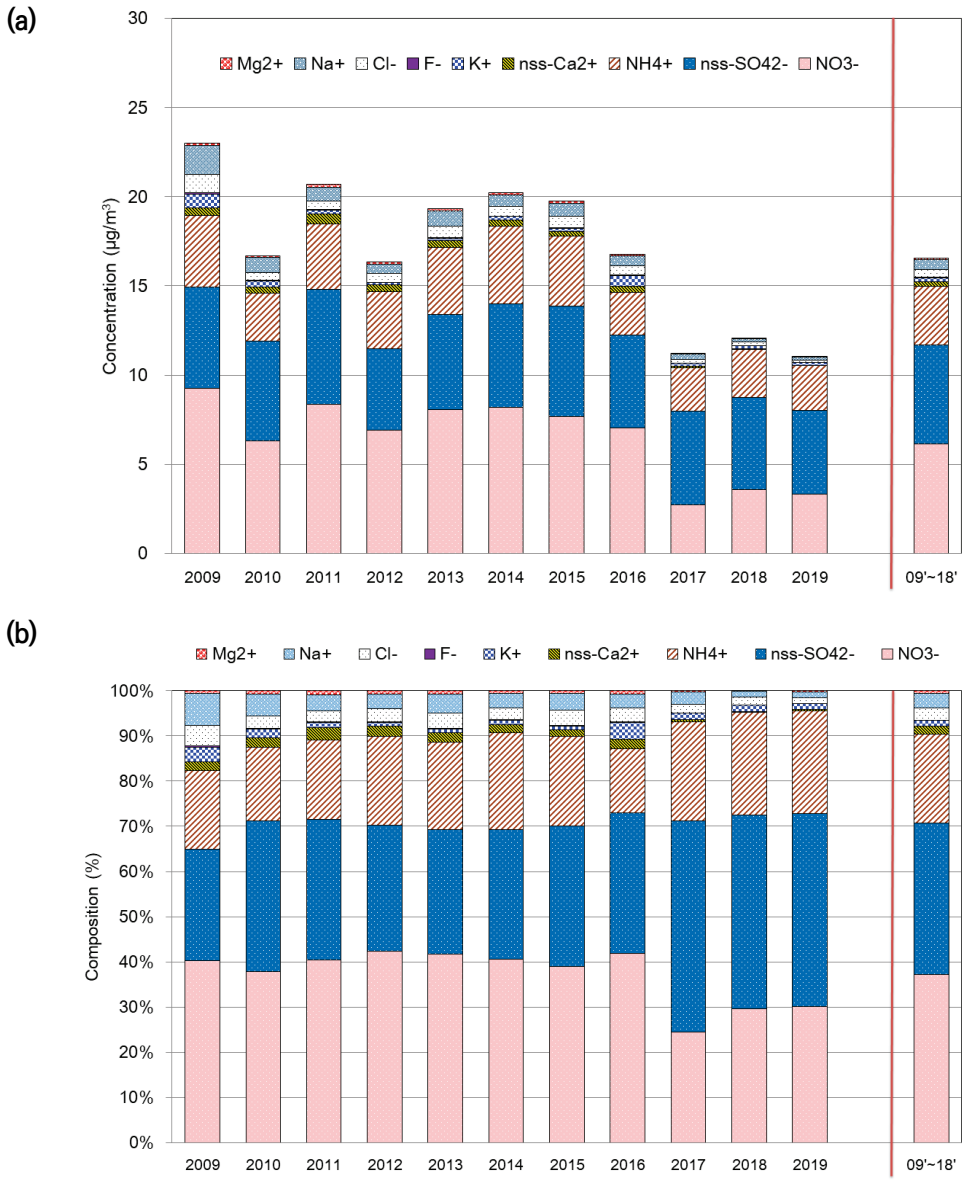


그림 5.4.4 안면도(AMY) 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 PM2.5 수용성 이온성분의 연평균 (a)농도, (b)조성.

다. PM10, PM2.5 수용성 이온성분 계절별 농도

안면도에서 측정한 PM10, PM2.5의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 5.4.5와 그림 5.4.6에 보였으며, 계절별 평균농도는 2009년부터 2018년까지 평균한 값이다. 단 겨울철의 경우 지난해 12월과 당해년도 1,2월의 자료를 평균한 값이다.

2009년부터 2019년까지 PM10 중 이차오염물질(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+)의 농도는 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 3.6~7.6, 2.1~9.0, 1.6~3.8 ㎍/㎥였다(그림 5.4.5a). 2019년 nss-SO_4^{2-}의 계절별(겨울, 봄, 여름, 가을) 농도는 각각 5.0(n=19), 5.9(n=18), 6.2(n=19), 3.6(n=16) ㎍/㎥, NO_3^-는 7.9, 9.0, 2.1, 3.4 ㎍/㎥, NH_4^+는 3.3, 3.8, 2.4, 1.6 ㎍/㎥였다. nss-SO_4^{2-}는 여름철에 가장 높았고, NO_3^-, NH_4^+성분은 봄철에 가장 높았다. 토양에서 기원한 nss-Ca^{2+}은 최근 10년 계절별 농도 범위는 0.4~0.9 ㎍/㎥, 2019년 계절별 농도 범위는 0.1~0.7 ㎍/㎥로 최근 10년간 평균과 2019년 모두 봄철에 가장 높았다.

이차오염물질들(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+)의 계절별 조성비는 최근 10년 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 77.7%, 83.5%, 88.9%, 80.7%로, 여름철에 높고, 겨울에 낮았다(그림 5.4.5b). 2019년의 계절별 조성비는 각각 74.8%, 80.9%, 88.3%, 69.7%로, 여름철에 가장 높고, 가을철에 가장 낮았다. 그리고 해염기원 성분(Na^+, Cl^-, Mg^{2+})들의 계절별 조성비는 최근 10년 평균은 17.2%, 11.3%, 7.8%, 14.0%, 2019년에 각각 20.7%, 15.1%, 9.9%, 24.6%로, 가을철과 겨울철에 높았다. 토양기원의 nss-Ca^{2+}의 계절별 조성비는 최근 10년간 각각 20.7%, 15.1%, 9.9%, 24.6%, 2019년에는 2.8%, 2.9%, 1.0%, 3.6%로 가을철에 가장 높았다.

PM2.5 중 이차오염물질(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+)의 최근 10년 계절별 농도는 각각 3.0~6.4, 0.7~7.1, 1.2~3.8 ㎍/㎥였다(그림 5.4.6a). nss-SO_4^{2-}의 2019년 계절별 농도는 4.4(n=18), 5.2(n=18), 6.0(n=17), 3.0(n=16) ㎍/㎥, NO_3^-는 5.3, 5.0, 0.7, 1.2 ㎍/㎥, NH_4^+는 3.0, 3.2, 2.2, 1.2 ㎍/㎥였다. nss-SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 농도는 봄과 여름에 높았고, NO_3^-는 겨울철에 높았다. nss-Ca^{2+}의 경우 최근 10년은 봄철에, 2019년에는 가을철에 가장 높았다. 이차오염물질들(nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+)의 계절별 조성비는 최근 10년간 각각 85.1%, 90.8%, 94.4%, 90.0%, 2019년에는 94.7%, 96.4%, 97.6%, 91.5%로 여름철에 가장 높았다(그림 5.4.6b). 그리고 해염기원 성분(Na^+, Cl^-, Mg^{2+})들의 계절별 조성비는 최근 10년은 11.1%, 6.2%, 3.6%, 6.1%로 겨울에 가장 높고, 2019년은 3.1%, 2.4%, 1.6%, 5.0%로 가을에 가장 높았다. nss-Ca^{2+} 의 최근 10년간 계절별 조성비는 각각 1.5%, 1.9%, 1.3%, 1.6%, 2019년에는 0.2%, 0.1%, 0.1%, 0.7%로 비중이 낮아졌다.

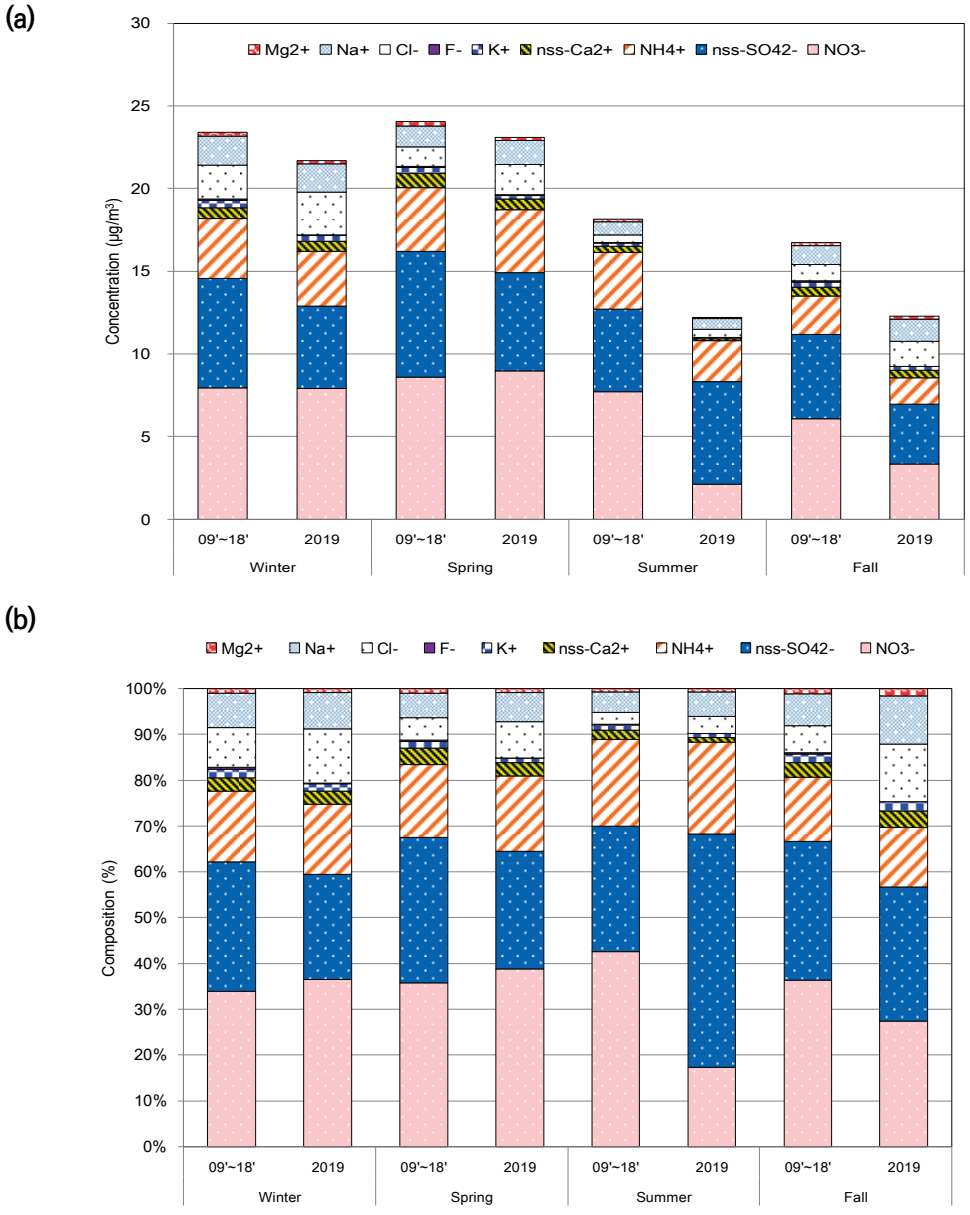


그림 5.4.5 안면도(AMY) 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 PM10 수용성 이온성분의 계절별 평균 (a)농도, (b) 조성.
*Winter의 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균

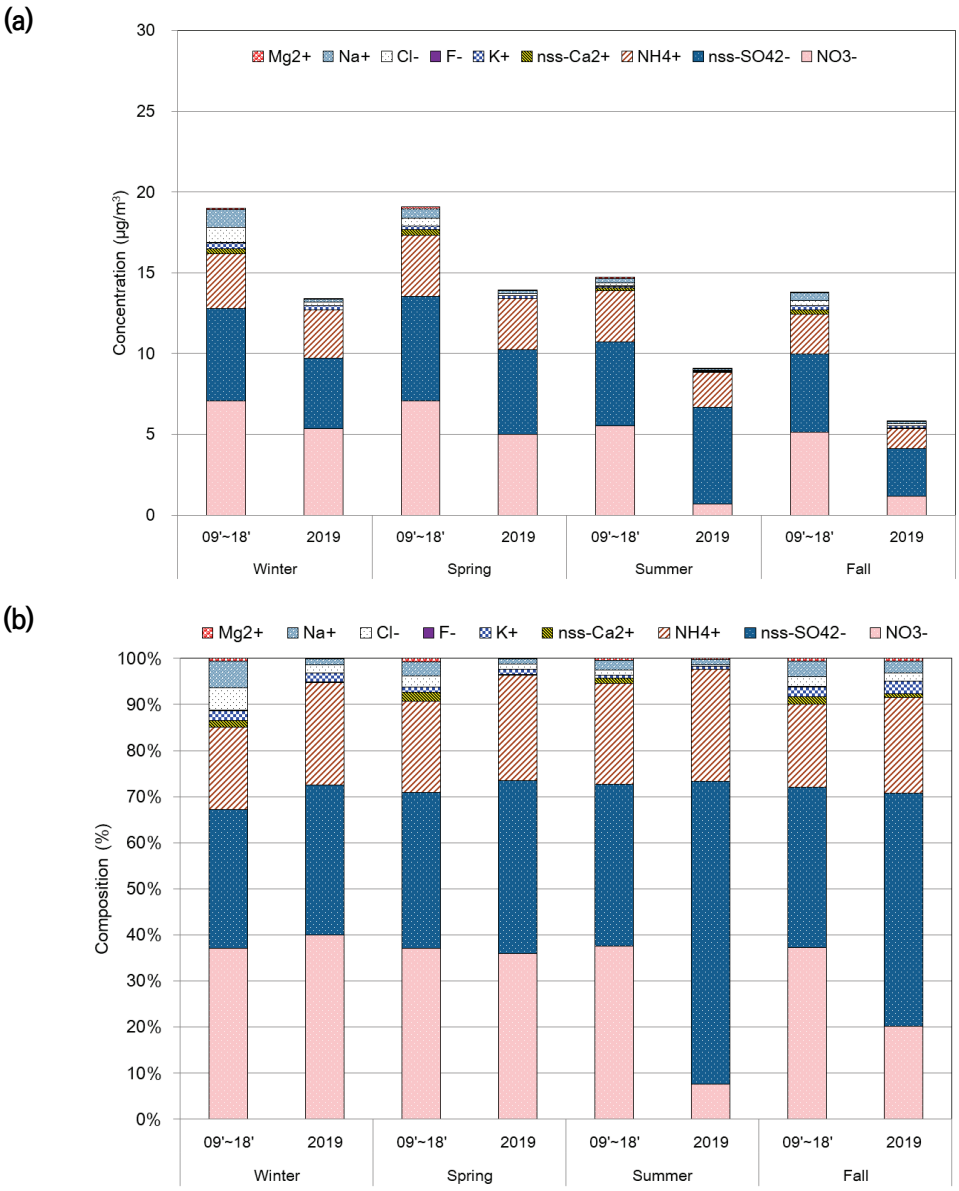


그림 5.4.6 안면도(AMY) 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 PM2.5 수용성 이온성분의 계절별 평균 (a)농도, (b)조성.
*Winter의 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균

5.4.2 PM10, PM2.5 원소성분 특성

2018년 1월부터 12월까지 안면도에서 PM10, PM2.5 중 원소성분 13종(Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti, Mn, Zn, Cu, V, Cr, Co, Ni, Sr, Co, Ba, Pb, Mo)의 농도와 조성비를 분석하였다. 2018년과 2019년에 분석된 원소성분 중 S(황)의 농도가 가장 높았다(그림 5.4.7a). PM10과 PM2.5 모두 S, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na 성분의 조성비가 분석된 원소 성분의 96%~97%를 차지하는 것으로 확인되었다(그림 5.4.7b). 특히 PM2.5에서 S는 분석된 원소 성분의 약 59%~68%를 차지하였다. PM10과 PM2.5 원소성분의 계절별 평균에서도 S의 농도가 가장 높았다(그림 5.4.8a). 특히 여름철에 55.3%(PM10), 78.3%(PM2.5)로 가장 높았다. 2019년 봄철에는 Al, Ca, Mg, Fe, Zn, Ti 등 토양에서 발생한 성분이 다른 계절보다 높은 농도를 보여 황사의 영향으로 해석된다.

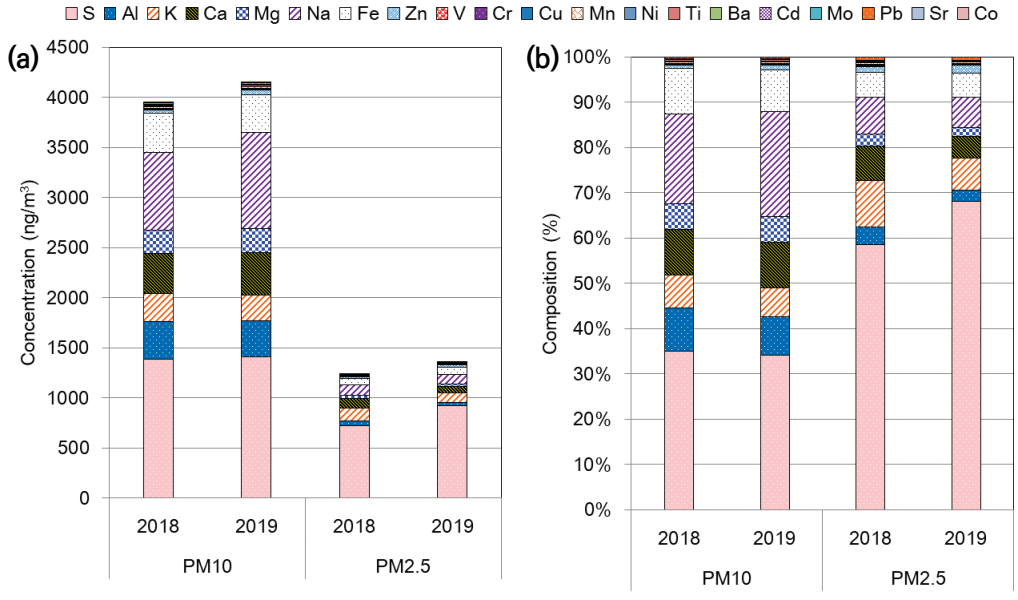


그림 5.4.7 2018~2019년 안면도 (AMY)에서 측정한 PM10, PM2.5 원소성분(a)농도, (b)조성.

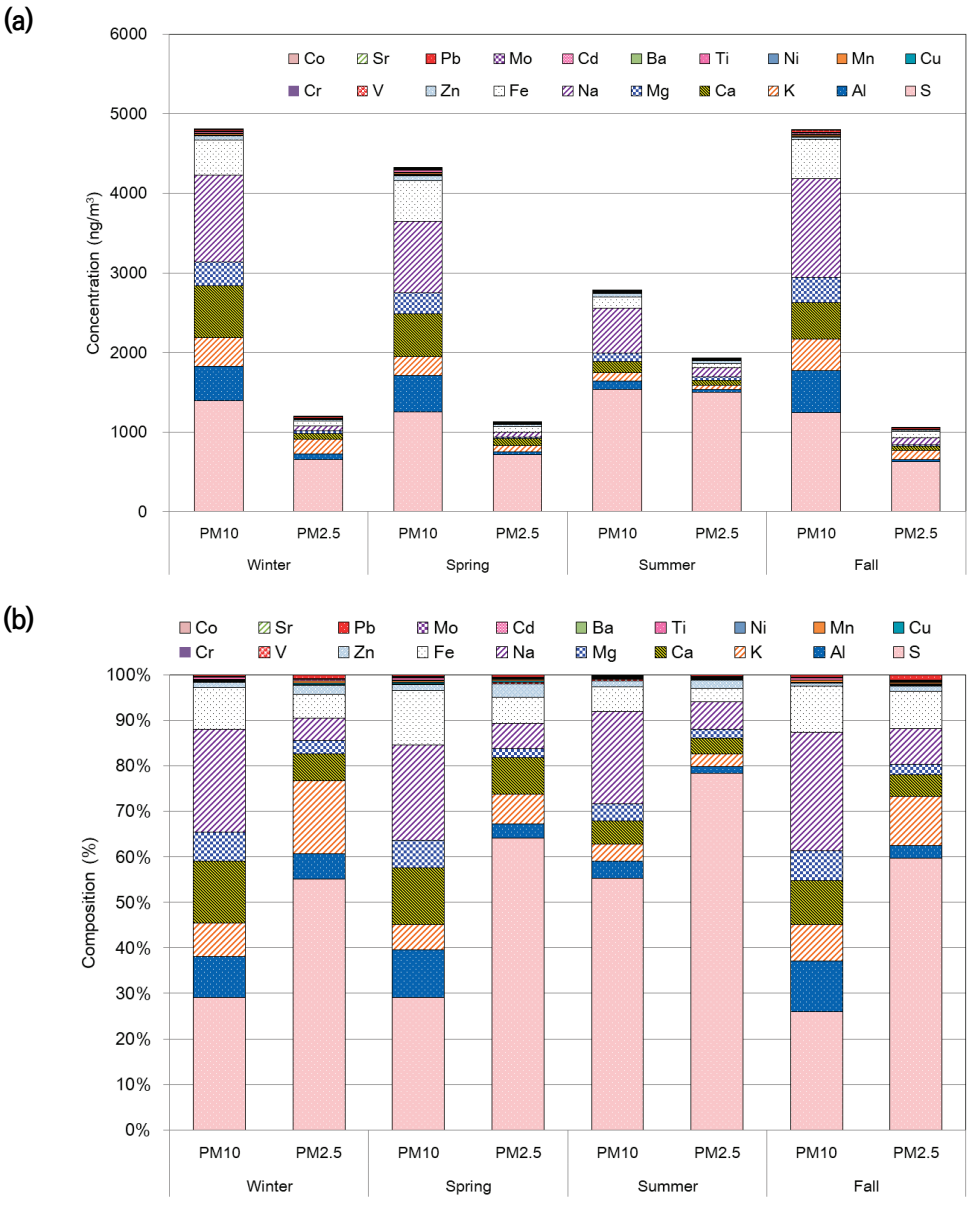


그림 5.4.8 2019년 안면도(AMY)에서 측정한 PM10, PM2.5 원소성분의 계절별 평균 (a)농도, (b) 조성.
*Winter의 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균

5.5 2019년 에어로졸 특성 분석

5.5.1 2019년 에어로졸 물리·광학특성의 변동 원인

2019년 에어로졸 관측자료의 특징 중 하나는 안면도와 고산의 PM10 질량농도가 최근 평균(안면도: 2009~2018년, 고산: 2011~2018년)에 비해 증가(각각 8.3%, 16.7%)했다는 점이다(그림 5.2.2 참고). 한편, 광산란계수와 광흡수계수(검댕)의 연평균은 최근 평균과 큰 차이가 없었다. 또한, PM10 질량농도와 광학특성의 월별 농도 분포 경향이 서로 달랐는데 PM10의 질량농도는 1~3월, 5월에 높았던 반면 광흡수계수(검댕)는 10~11월에 높았다(그림 5.2.1, 5.3.5, 5.3.6).

PM10 질량농도 변동은 먼지 현상과 관련이 있으므로 안면도와 고산에서 가장 가까운 목측 지점(홍성, 제주)의 월별 연무 관측일수와 황사 관측일수를 조사하였다. 홍성(2017년까지는 서산)의 연무 관측일수는 1~3월, 5월과 12월에 매월 10~14일씩 관측되어 최근 10년 평균보다 최대 3배 이상으로 증가한 수준이었다(그림 5.5.1). 제주의 1~3월 연무 관측일수는 홍성과 비슷하였고, 역시 최근 10년 평균보다 증가하였다. 최근 10년 평균에 비해 연무 관측일수가 증가한 월은 PM10 질량농도가 과거보다 상승한 기간과 대체로 일치하였다. 2019년 1~3월과 5월의 안면도 PM10 질량농도 월평균은 최근 10년 평균보다 17%~50% 증가한 수준으로 분석되었다. 같은 월의 고산 PM10 질량농도 월평균은 최근 8년 평년에 비해 30%~88%로 안면도에 비해 증가폭이 컸다. 3장 기상특성에서 기술된 바와 같이 2019년 1~3월에 우리나라 부근에서는 기압경도력과 그에 따른 북서기류가 강하지 못하고 평년보다 남서기류가 우세했는데(그림 3.1.2, 3.1.9 참고), 이로 인해 중국 대륙(화남지방)의 오염된 공기가 남서풍을 타고 우리나라로 이류되는 사례가 더 많았을 가능성이 있다. 또한, 이 기간 안면도의 풍속은 최근 10년보다 약해(그림 3.2.6 참고) 국외에서 유입된 에어로졸과 국내에서 기원한 에어로졸이 빠르게 확산되지 못하여 PM10 질량농도 상승의 원인이 되었을 것으로 추정한다. 비슷한 이유로 2019년 여름은 평년 대비 상대적으로 깨끗한 북쪽 찬공기의 유입이 잦아(그림 3.1.15 참고) PM10 질량농도를 비롯한 에어로졸 관측 요소들의 농도가 대체로 낮은 것으로 해석할 수 있다. 한편, 황사 관측일수는 안면도와 고산 모두 10월과 11월에 증가하였다(그림 5.5.2). 따라서 PM10 질량농도가 증가한 원인은 과거에 비해 빈번했던 연무(고농도 미세먼지 사례)와 황사(조대입자) 등 먼지 현상이 증가했기 때문으로 해석된다. 안면도와 고산 PM10의 월변화 및 연평균 경향이 유사한 것으로 보아 국지적인 영향보다는 종관규모의 영향을 받는 것으로 보인다.

(a) (b)

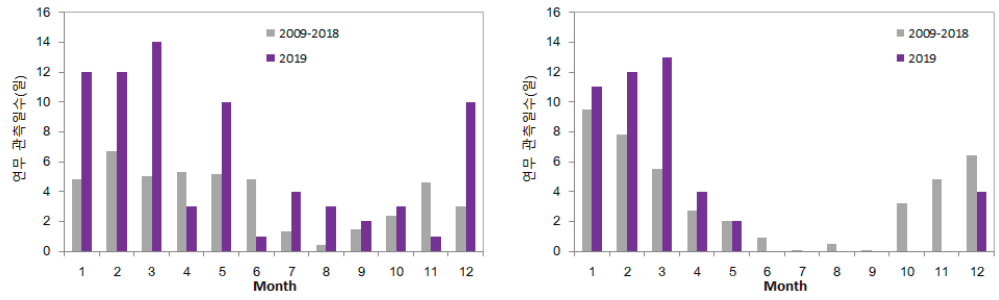


그림 5.5.1 (a)홍성(2017년까지는 서산)과 (b)제주의 연무 관측일수.

(a) (b)

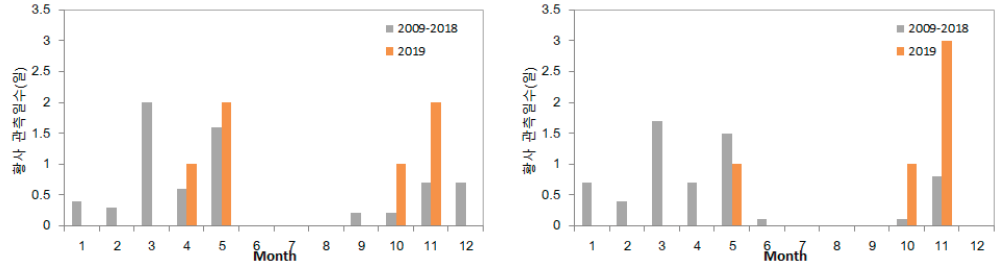
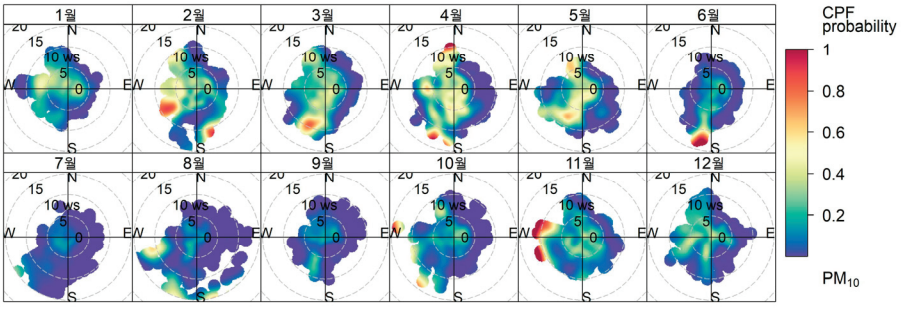


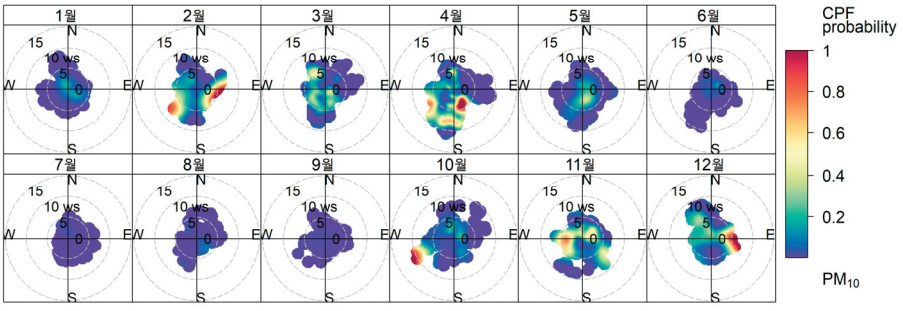
그림 5.5.2 (a)홍성(2017년까지는 서산)과 (b)제주의 황사 관측일수.

그림 5.5.3은 PM10 질량농도와 풍향, 풍속을 파악하여 고농도 오염 사례의 기원 가능성이 높은 방향을 보여주는 CBPF(4.3.2 참고)이다. 최근 10년(2009~2018년)의 PM10 중 75 퍼센타일에 해당하는 값인 44 ㎍/㎥를 임계값으로 정하여 풍속, 풍향과 함께 나타내었다. 최근 10년 안면도에서 PM10 고농도는 주로 서쪽에서 기원했던 것으로 보인다(그림 5.5.3a). 2019년에는 1~3월과 5월에 고농도 출현 빈도가 높았으며, 과거와 다른 점은 2월에 남동계열 바람이 불 때 고농도가 자주 나타났다는 것이다. 다만 이때도 풍속이 낮았기 때문에 국지적인 영향으로 단정하기에는 한계가 있다. 또한, 일 년 중 풍속이 가장 낮은 6월에 과거보다 고농도가 적게 나타난 것도 특징이다. 2018년과 비교하면 2019년 1~3월, 5월에 바람이 약하고 고농도 빈도가 높았고, 6월은 바람이 더 약했으나 고농도 빈도도 낮았다. 또한, 12월에도 고농도가 적게 나타났다.

(a) 2009~2018년



(b) 2018년



(c) 2019년

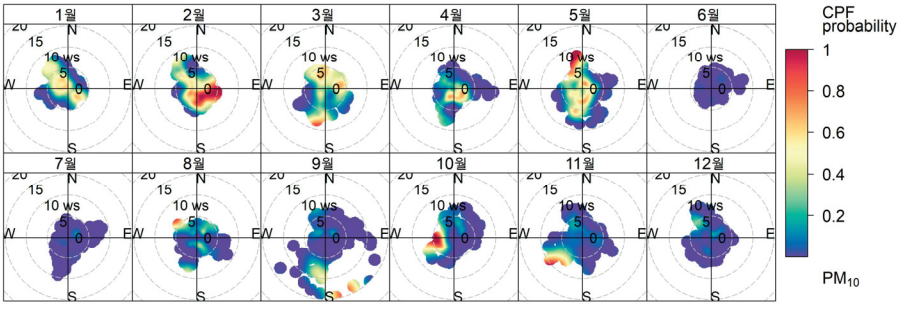


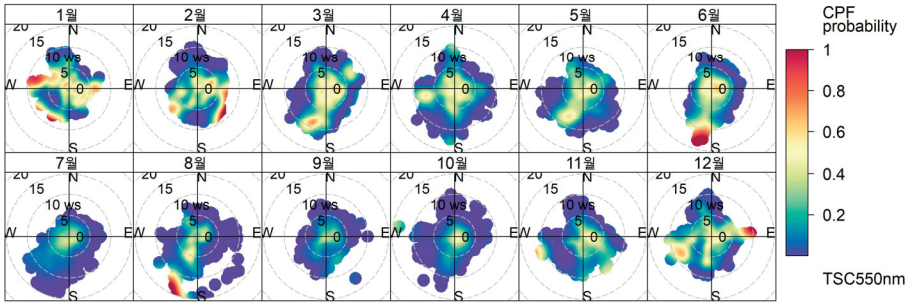
그림 5.5.3 안면도(AMY) 월별 PM10 질량농도 고농도(〉44 ㎍/㎥) 확률 분포. (a)최근 10년(2009~2018년), (b)2018년, (c)2019년.

연무 관측일수가 증가했음에도 불구하고 2019년의 월별 에어로졸 광산란계수는 최근 10년(2009~2018년) 평균보다 낮지만 2018년과 큰 차이가 없었다. 다만 상대적으로 1~3월의 농도가 다른 계절에 비해 더 높았다. 2019년 고농도 미세먼지로 인한 사례일이 증가하였지만, 에어로졸 광산란계수 수준은 사례별로 다르므로 연무 관측일수 증가가 광산란계수 연평균 농도 증가로 이어지지는 않은 것으로 판단된다. 에어로졸 광산란계수의 CBPF 플롯에서는 100 Mm^{-1}을 고농도 임계값으로 정의했는데, 고농도 확률 분포는 PM10과 대체로 유사한 경향을 보였다. 과거 6월에는 남서풍이 불 때 고농도 광산란계수 빈도가 높았으나 2019년 6월에는 고농도 사례가 거의 없었다(그림 5.5.4).

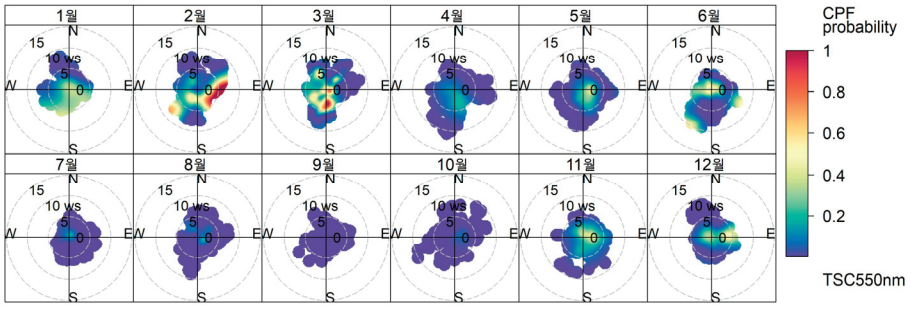
검댕(black carbon)의 질량농도는 광흡수계수측정기(Aethalometer, AE31, Magee Scientific)로부터 산출된다. 대기 중 검댕은 주로 화석연료(자동차, 공장 등), 바이오 연료, 바이오매스(산불, 논밭 소각 등) 등의 연소 과정에서 배출되며, 태양 복사에너지를 흡수하여 지구 온난화여 기여하는 것으로 알려져 있다. 검댕은 대기 중에서 지름 0.02~0.06 ㎛ 크기로 존재하며, 다른 에어로졸 입자와 혼합체(internal mixture)가 되면서 0.1~0.4 ㎛로 성장하므로(Alexander et al., 2008) 검댕의 질량농도는 PM10(10 ㎛ 이하) 질량농도에 기여하는 비중이 크지 않다. 이러한 이유로 PM10(10 ㎛ 이하 입자) 질량농도 월변화와 검댕 농도 변화는 다른 경향을 보일 가능성이 있다. 검댕은 화석연료나 바이오연료의 소비가 많은 높은 가을과 겨울에 주로 배출되어 대기 중 농도가 높아지고, 그렇지 않은 여름철의 농도가 가장 낮다. 2019년 검댕의 계절변동을 보면 이러한 특성이 잘 나타나는데 특히 10월과 11월의 농도가 최근 10년 평균에 비해 더 높았던 점이 눈에 띈다(그림 5.3.5, 그림 5.3.6 참고). 이 계절에는 안면도 주변의 농지에서 추수 후 노지 소각이 활발하며, 난방(화석연료, 나무 등)이 시작된다. 따라서 주변 소각으로 인해 검댕의 대기 중 농도가 높아졌을 것으로 보인다. 검댕 질량농도와 직접 관계가 있는 광흡수계수는 최근 9년(2010~2018년) 평균에 비해 2019년 10~12월에 고농도 확률이 두드러지게 높았으며, 10월에 서쪽에서 유입된 고농도 사례도 있지만 대체로 동풍 계열 바람일 때 고농도가 나타나 감시소 동쪽 지역의 연소 활동(소각, 난방 등)의 영향 가능성을 뒷받침해준다(그림 5.5.5). 또한 NO_x 역시 연소 과정에서 배출되는 성분인데, 광흡수계수(검댕)와 유사하게 동풍 계열에서 고농도 확률이 높았다(그림 4.2.11 참고). 또한, 안면도에서 관측한 원소 칼륨(K)의 농도가 과거 가을철 농도에 비해 20% 이상 증가하였는데(그림 5.4.8 참고), 이것도 연소로 인한 검댕 농도 증가와 관련이 있을 것으로 보인다. 왜냐하면 칼륨(K)은 토양과 바이오매스 연소에서 주로 기원하는데, 10월과 11월에 분석된 시료 중 토양의 영향을 받은 황사 사례를 제외하더라도 과거 가을철보다 K 성분의 농도가 높았기 때문이다. 1월과 12월에도 낮은 풍속에서 광흡수계수 고농도가 나타났고, 2월과 3월에도 동풍 계열일 때 고농도 확률이 높았는데, 이는 인근에서 발생하는 화석연료 연소,

난방(가정, 하우스 등)에서 사용하는 화목보일러(바이오연료) 연소로 인해 생성된 에어로졸과 장거리 이동 에어로졸이 대기 정체로 인해 확산이 억제되었을 가능성을 보여준다.

(a) 2009~2018년



(b) 2018년



(c) 2019년

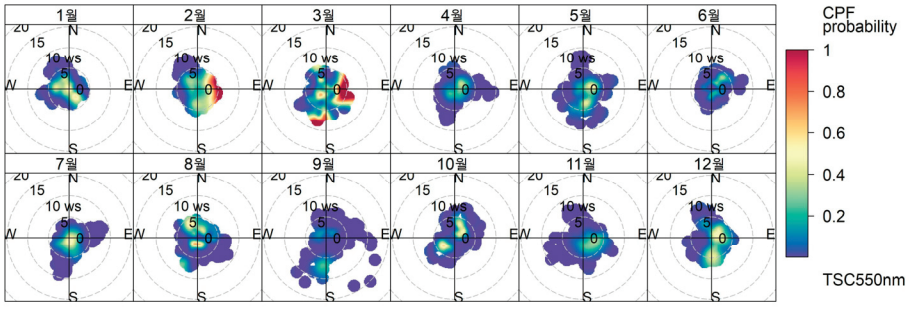
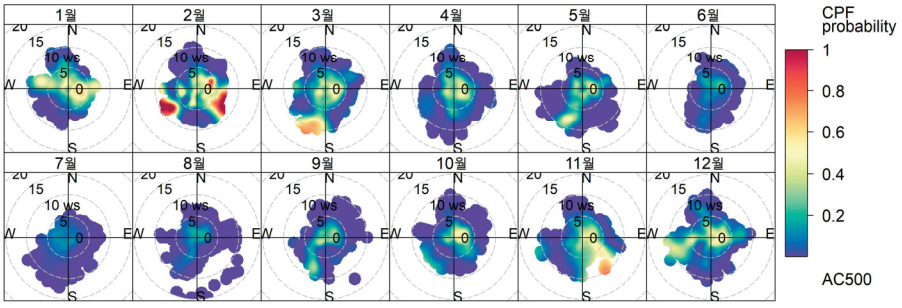
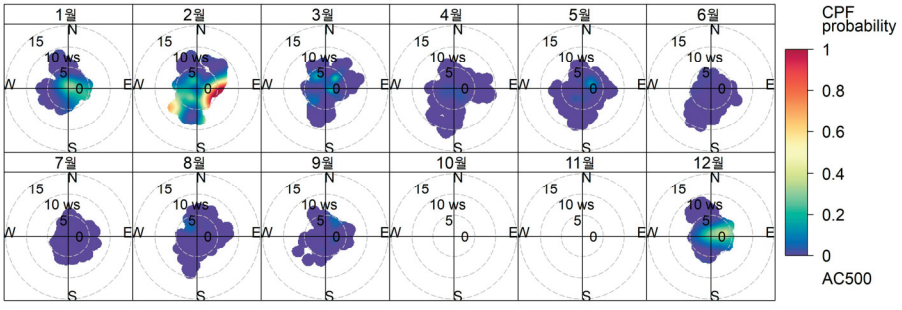


그림 5.5.4 안면도(AMY) 월별 광산란계수 고농도(〉100 Mm^{-1}) 확률 분포. (a) 최근 10년(2009~2018년), (b) 2018년, (c) 2019년.

(a) 2009~2018년



(b) 2018년



(c) 2019년

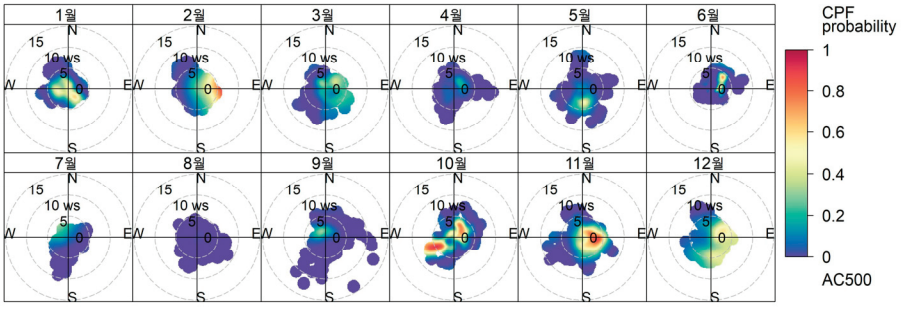


그림 5.5.5 안면도(AMY) 월별 광흡수계수 고농도(〉10 Mm^{-1}) 확률 분포. (a) 최근 8년(2011~2018년), (b)2018년, (c)2019년.

5.5.2 광학 및 화학성분의 발생기원 분석

2019년 PM10과 PM2.5의 발생기원을 살펴보기 위하여 수용성 성분과 광산란계수를 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 2019년 전체자료 PM10, PM2.5의 발생원 성분은 네 가지로 분류할 수 있으며, 고농도(연무, 황사; 그림 5.4.1 참고) 사례를 제외한 PM10, PM2.5의 발생기원은 다섯 가지로 분류할 수 있다.

PM10과 PM2.5 모두 황산암모늄과 질산암모늄에 의한 영향이 약 30% 이상으로 가장 크며, 그다음으로는 PM10은 해염, 자동차와 생체연소반응, 토양 순이며, PM2.5은 자동차와 생체연소반응, 해염, 토양 순이었다(그림 5.5.6). 고농도 사례를 제외한 경우 PM10의 발생원은 해염 〉 황사암모늄·질산암모늄 〉 토양 〉 생체연소 〉 자동차 연소 순으로 나타났다(그림 5.5.7a). PM2.5의 경우는 황산암모늄, 질산암모늄 〉 해염 〉 석탄 및 자동차 연소 〉 토양 〉 생체연소 순이었다(그림 5.5.7b). 해염과 토양의 영향은 PM10의 경우 약 46%이며, PM2.5는 32.1%로 자연적 발생원에 대한 영향이 PM10 영역에서 더 크게 나타났다.

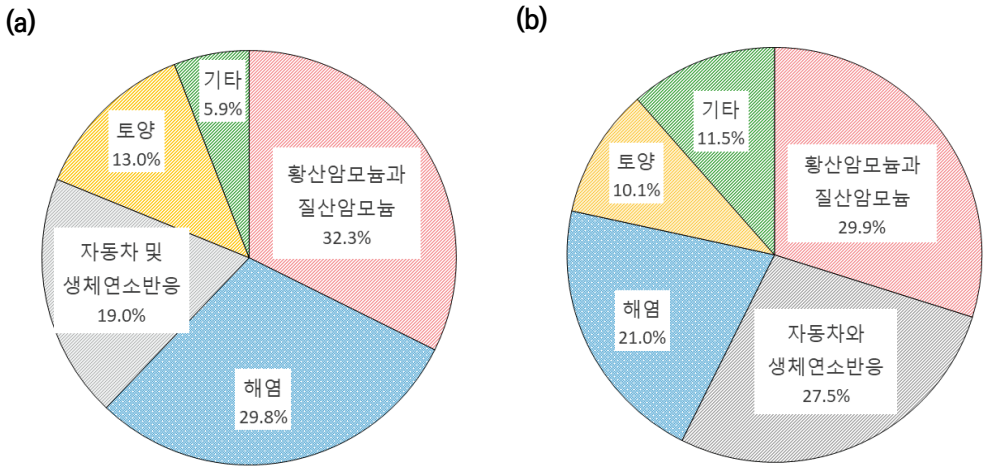


그림 5.5.6 2019년 안면도 (a)PM10, (b)PM2.5 발생원 분석 결과.

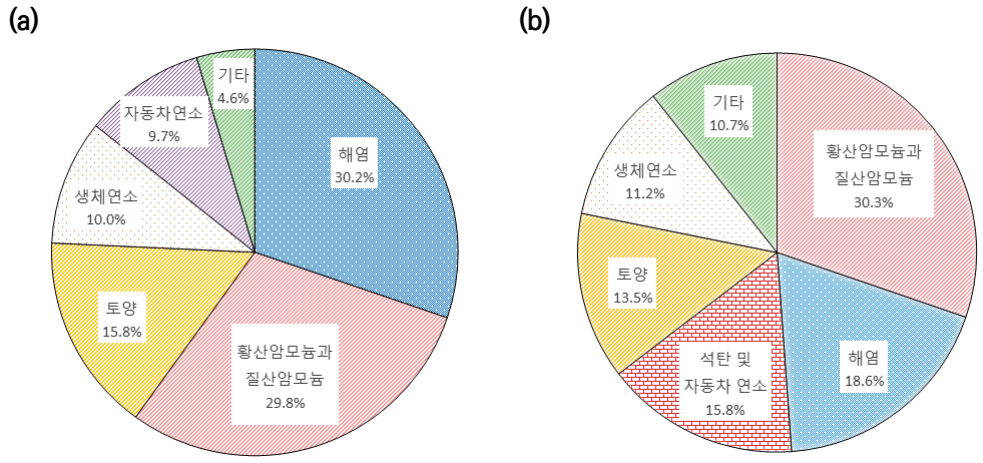


그림 5.5.7 2019년 안면도 에어로졸 고농도 사례 제외 시 (a)PM10, (b)PM2.5 발생원 분석 결과.

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제6장

대기복사



제6장 대기복사

ㅇ 태양하향복사(전천일사) : 안면도 173.2 W/㎡ (최근 10년 대비 +4.6%)
고 산 165.4 W/㎡ (최근 10년 대비 +3.9%)

ㅇ 태양하향복사는 평년보다 높은 기온과 길어진 일조시간의 영향으로 증가, 고산은 강수량 증가로 그 증가폭이 작음

6.1 대기복사 감시의 목적

태양복사에너지 및 그 변화를 감시하기 위한 대기복사 관측은 안면도와 고산에서 수행하고 있다. 지구 대기에 유입되는 에너지는 주로 태양에 기원하며, 태양에너지는 대기를 통과하면서 일부는 대기 구성 성분에 의하여 산란 및 반사되거나 흡수되고, 나머지가 대기를 통과해 지표에 도달한다. 대기복사 자료는 기후학적으로 장기간의 대기복사량 및 지구 열수지 변화를 파악하기 위한 기본 자료로 활용되며, 이를 통해 지구온난화의 진단 및 대응에 기여한다.

복사자료는 크게 태양복사와 지구복사로 나뉘며, 각각의 상향·하향복사(총 4개 요소), 태양하향복사의 두 요소인 직달일사와 산란일사, 지표면의 에너지 수지를 관측하는 순복사까지 총 7가지 요소로 구분된다. 안면도는 7가지 요소 모두를 관측하고, 고산은 태양복사의 3개 요소(태양하향, 직달, 산란)를 관측하고 있다. 관측 자료는 1분 간격으로 생산되며 단위는 W/㎡이다.

6.2 직달일사, 산란일사

직달일사는 대기 중에서 산란 또는 흡수되지 않고 태양으로부터 직접 입사되는 복사량을 말하며, 직달일사의 양과 강도는 일사계에 도달하는 직달 광선의 경로에 있는 공기분자와 구름, 황사, 안개, 먼지 등의 산란과 흡수에 의해 영향을 받는다. 산란일사는 태양복사가 지표면에 도달하기 전에 적어도 한 번 이상 산란된 복사를 말하며, 차폐 판을 이용하여 직달일사를 차단하고 관측된다. 산란일사 역시 마찬가지로 공기분자, 구름, 황사, 안개, 먼지 등의 영향을 받지만 직달일사와는 달리 광선의 경로가 아닌 주변의 입자 분포 특성에 따라 강도가 크게 달라진다.

그림 6.2.1은 안면도, 고산의 2019년 직달일사, 산란일사 월평균을 최근 10년 평균(2009~2018년)과 비교한 것이다. 안면도의 직달일사 월평균 최대는 일조시간이 가장 길었던 5월의 235.5 W/㎡이었고, 최근 10년 대비 약 15% 높게 나타났다. 고산의 직달일사 월평균 최대 역시 마찬가지로 5월에 202.1 W/㎡으로 가장 높았고, 이는 최근 10년보다는 약 30% 높은 수치이다. 산란일사는 안면도, 고산 모두 최근 10년과 비슷한 수준이었으나, 안면도는 8월, 고산은 6월에 최근 10년보다 각각 24%, 13% 높은 값을 보였고, 최댓값은 안면도가 7월, 고산이 6월에 각각 120.4 W/㎡, 129.5 W/㎡이었다.

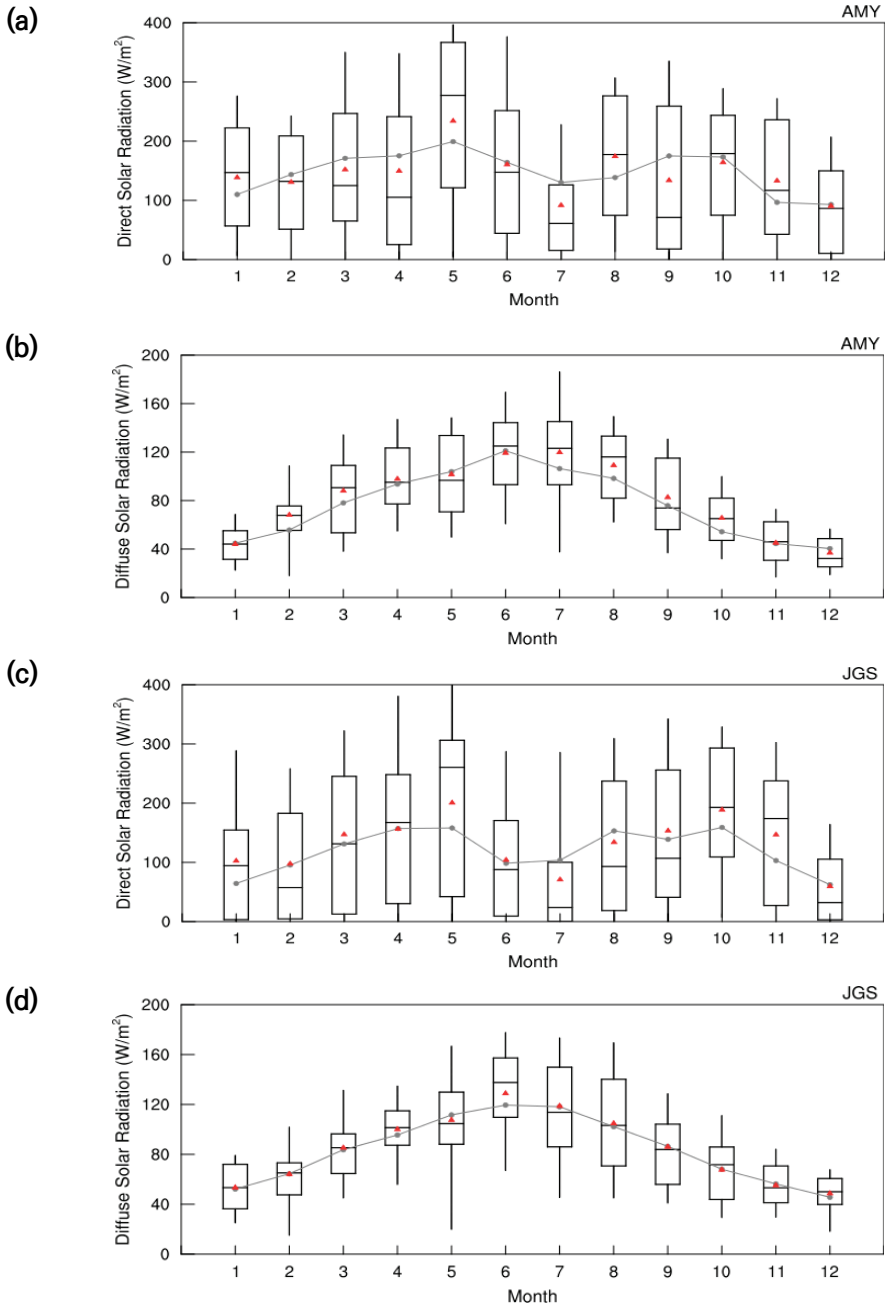


그림 6.2.1 2019년 안면도(AMY)의 (a)직달일사, (b)산란일사 고산(JGS)의 (c)직달일사, (d)산란일사 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균)와 2009~2018년(안면도), 2009~2018년(고산)의 평균(회색 점-선).

6.3 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)

지표에 도달하는 태양하향복사는 전천일사라고도 부르며, 운량, 수증기, 에어로졸, 오존 등 태양복사를 흡수하는 성분들의 연직 분포에 의해 영향을 받는다. 태양상향복사는 태양으로부터 유입된 단파복사 중 지면에 의해 다시 반사되어 나가는 복사량을 의미한다.

그림 6.3.1은 2019년 안면도의 태양상향복사와 태양하향복사의 월평균과 고산의 태양하향복사의 월평균을 나타낸 것이다. 안면도의 태양상향복사 월평균 최대는 5월에 50.7 W/㎡, 최소는 12월에 17.6 W/㎡이었고, 안면도의 태양하향복사 월평균 최대는 5월에 276.2 W/㎡, 최소는 12월에 65.5 W/㎡이었다. 고산의 2019년 태양하향복사 최대는 5월에 254.1 W/㎡, 최소는 12월에 74.4 W/㎡이었다. 태양복사의 월평균은 태양천정각 및 일조시간 변화에 따라 계절변동을 가지며, 봄철부터 증가하여 겨울로 갈수록 감소한다. 여름철에는 구름과 강수로 인해 오히려 봄철보다 낮은 값을 보이기도 하는데 2019년 서산과 고산의 경우에도 여름철에 강수가 집중되어 안면도와 고산 모두 5월에 월평균 최댓값을 보였다.

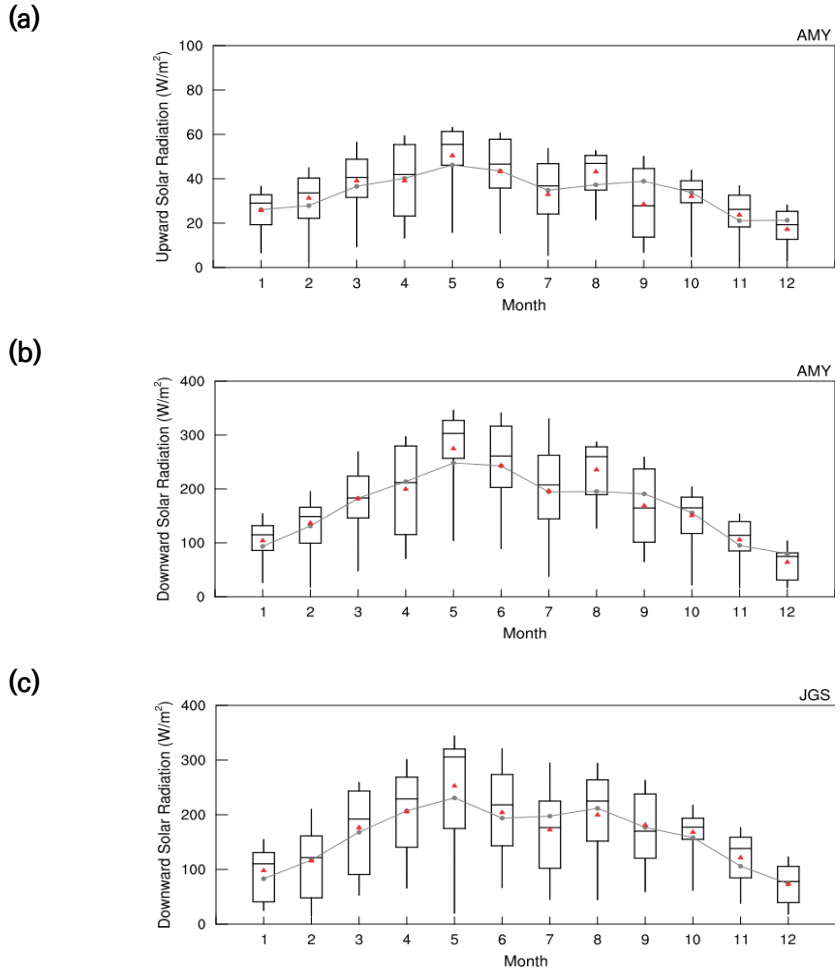


그림 6.3.1 2019년 안면도(AMY)의 (a)태양상향복사, (b)태양하향복사와 고산(JGS)의 (c)태양하향복사의 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균)와 2009~2018년(안면도), 2009~2018년(고산)의 평균(회색 점-선).

6.4 지구상향복사, 지구하향복사

지구상향복사는 지표에 의해 방출되는 복사요소로서 지면온도의 영향을 크게 받는다. 지구하향복사는 대기에서 지표로 방출되는 복사요소로서 주로 기온과 습도의 연직분포, 운량, 구름물리 성분 등에 따라 달라진다. 지구복사는 태양복사에 비해 일변화 폭이 적고, 하층운이 지속적으로 있는 경우나, 기온 역전현상이 있을 시를 제외하고는 지구상향복사량이 하향복사량보다 크다. 안면도에서는 2019년에 지구상향복사 연평균이 지구하향복사 연평균보다 약 63 W/㎡ 정도 높았다. 그림 6.4.1은 2019년 안면도 지구복사의 월평균 분포를 나타내며, 월평균 지구상향복사의 최대는 7월에 433.9 W/㎡, 최소는 1월에 314.4 W/㎡이었다. 지구하향복사의 경우 최대는 7월에 377.0 W/㎡, 최소는 1월에 254.7 W/㎡이었다.

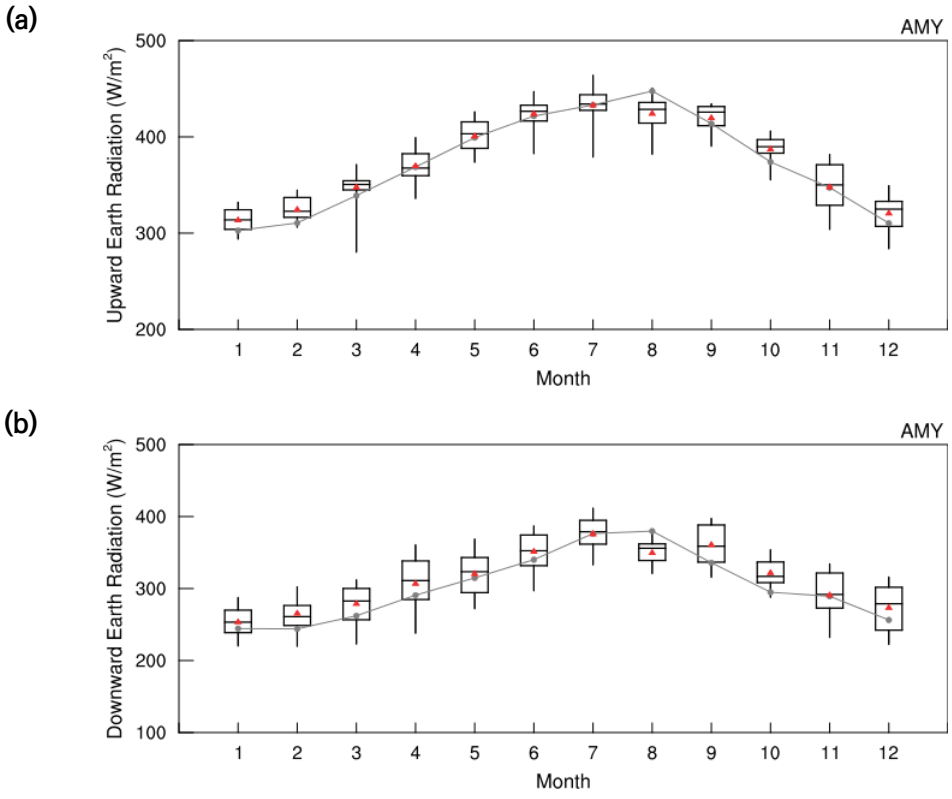


그림 6.4.1 2019년 안면도(AMY)의 (a)지구상향복사, (b)지구하향복사의 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균)와 2009~2018년(안면도), 2009~2018년(고산)의 평균(회색 점-선).

6.5 순복사

순복사는 태양과 지구사이의 복사에너지 수지로서 태양으로부터 들어오는 태양복사와 지구에서 방출하는 지구 복사의 관계식(산출 순복사 = 태양하향복사 – 태양상향 복사 + 지구하향 복사 – 지구상향복사)을 통해 얻을 수 있다. 일반적으로 순복사는 봄과 여름에 높고, 겨울에 낮다. 열대 및 아열대 지역과 적도 근처에서 일별 순복사는 일 년 내내 양의 값을 가지는 반면, 그 외의 지역에서는 양의 값과 음의 값이 계절에 따라 다양하게 나타난다. 맑은 날의 시간별 순복사량은 태양고도 각이 증가함에 따라 서서히 증가하여, 정오에 최대가 된다. 그림 6.5.1은 2019년 안면도 순복사의 월평균 분포를 나타내며, 월평균 최대는 5월에 141.6 W/㎡, 최소는 12월에 5.6 W/㎡으로 겨울철에 낮고 여름철에 높은 분포를 보였다.

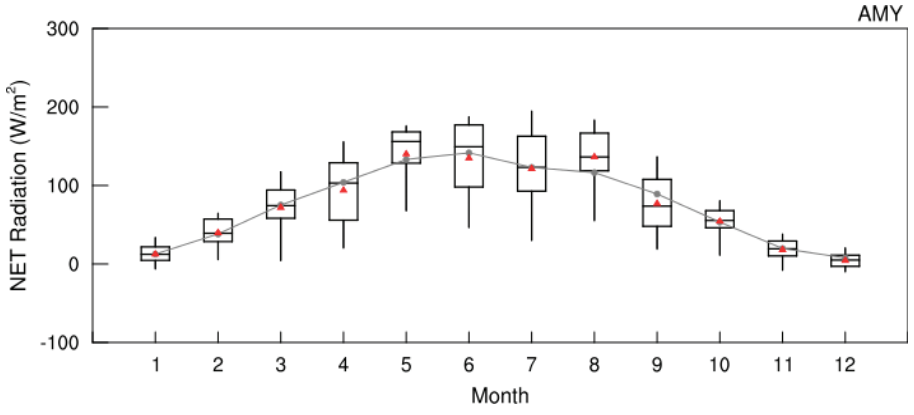


그림 6.5.1 2019년 안면도(AMY) 순복사의 월변화(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 붉은색 점 평균)와 2009~2018년 평균(회색 점-선).

6.6 2019년 대기복사 특성 분석

안면도의 태양상향복사, 태양하향복사, 직달일사, 산란일사, 지구상향복사, 지구하향복사, 순복사 평균값은 각각 34.2 W/㎡, 173.2 W/㎡, 147.5 W/㎡, 82.2 W/㎡, 377.0 W/㎡, 313.7 W/㎡, 76.8 W/㎡으로 최근 10년 대비(2009~2018년) 1.2%, 4.6%, 1.3%, 8.1%, 1.6%, 4.6%, -1.1%, 2018년 대비 -12.8%, (2018년 연평균 결측), -8.6%, (2018년 연평균 결측), 4.0%, 6.9%, -8.4%의 변화를 보였다. 고산의 경우에는 직달일사, 산란일사, 태양하향복사 평균값이 131.5 W/㎡, 85.7 W/㎡, 165.4 W/㎡으로 최근 10년 대비 11.3%, 3.0%, 3.9%, 2018년 대비 -3.1%, 3.9%, -1.1%의 차이를 나타냈다.

대기복사자료는 입사되는 태양에너지의 강도와 직접적으로 관련되는 구름, 강수량과 일조시간 등의 영향을 크게 받기 때문에 월 강수량과 월평균 일조시간을 같이 살펴보았다(그림 6.6.1). 강수량과 일조량을 함께 살펴보기 위해 안면도와 고산 기후변화 감시소에서 가장 가까운 종관기상관측소의 자료를 활용하였다. 안면도의 경우 기후변화감시소에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129) 자료를 이용하였고, 고산은 감시소에서 약 4 km 떨어져 있는 고산(185) 자료를 이용하였다. 2019년 서산의 연 강수량은 915.0 mm였고, 고산은 1560.9 mm였다. 서산의 연 강수량은 최근 10년 대비 26%(2018년 대비 25%) 감소하였으며, 고산은 최근 10년 대비 32%(2018년 대비 16%) 증가하였다. 일조시간의 경우, 서산은 일평균 6.9 시간으로 최근 10년 대비 8% 증가(2018년 대비 5% 감소)하였으며, 고산은 일평균 6.2 시간으로 최근 10년 대비 13%(2018년과 동일) 증가하였다. 2019년에는 이동성 고기압의 영향으로 전국적으로 5월에 매우 고온 건조했고, 이로 인해 안면도에서는 직달일사, 태양상향, 태양하향 복사가, 고산에서는 직달일사, 태양하향 복사가 5월에 최댓값을 보였다. 또한, 8월에는 늦더위와 전국적 폭염의 영향으로 안면도의 태양하향 복사가 눈에 띄게 높았던 반면, 고산은 8월 후반 남부지방 정체전선의 영향을 받아 최근 10년 평균보다 다소 낮았다. 지구복사의 경우 기온의 영향을 주로 받는데 안면도의 2019년 평균 기온은 13.2℃로 최근 10년(2009~2018년) 평균값(12.3℃)보다 1℃ 가량 높은 편이었으며(표 3.2.4), 이로 인해 지구복사(지구상향, 지구하향)가 전체적으로 최근 10년 평균보다 높게 나타난 것으로 사료된다.

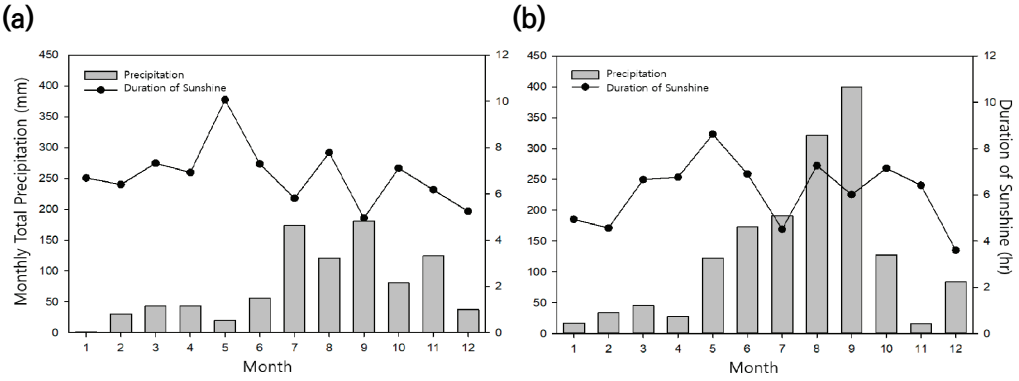


그림 6.6.1 2019년 (a)서산, (b)고산의 월 강수량과 월별 일평균 일조시간.

대기복사의 최근 10년 변화추세를 살펴보면(그림 6.6.2), 안면도 지구복사 요소들의 경우 눈에 띄는 경향성은 보이지 않고 있지만, 안면도의 기온 증가(표 3.2.4)의 영향으로 2017년부터 연속적으로 증가하고 있어 지속적인 감시가 필요해 보인다. 태양복사 요소들은 주로 강수량과 일조시간의 영향을 받는데, 안면도에서는 최근 10년간 강수가 줄고 일조시간이 다소 증가했지만(그림 6.6.3), 결측값으로 인해 그 연관성이 뚜렷하게 보이지 않고 있다. 그러나 계절별 태양복사 관측값이 강수와 일조시간의 영향을 크게 받고 있어 이 같은 기상 특성 변화가 지속된다면 장기적으로는 태양복사 요소들에 그 영향이 나타날 것으로 추정된다. 고산의 경우에는 최근 일조시간의 증가와 함께 태양복사 요소들이 약하게 증가하는 모습을 보이고 있으며(3개 요소 평균 1.09 W/㎡/year, p-value:0.150) 2018년에 비해서는 2019년 그 기세가 다소 약화되었다.

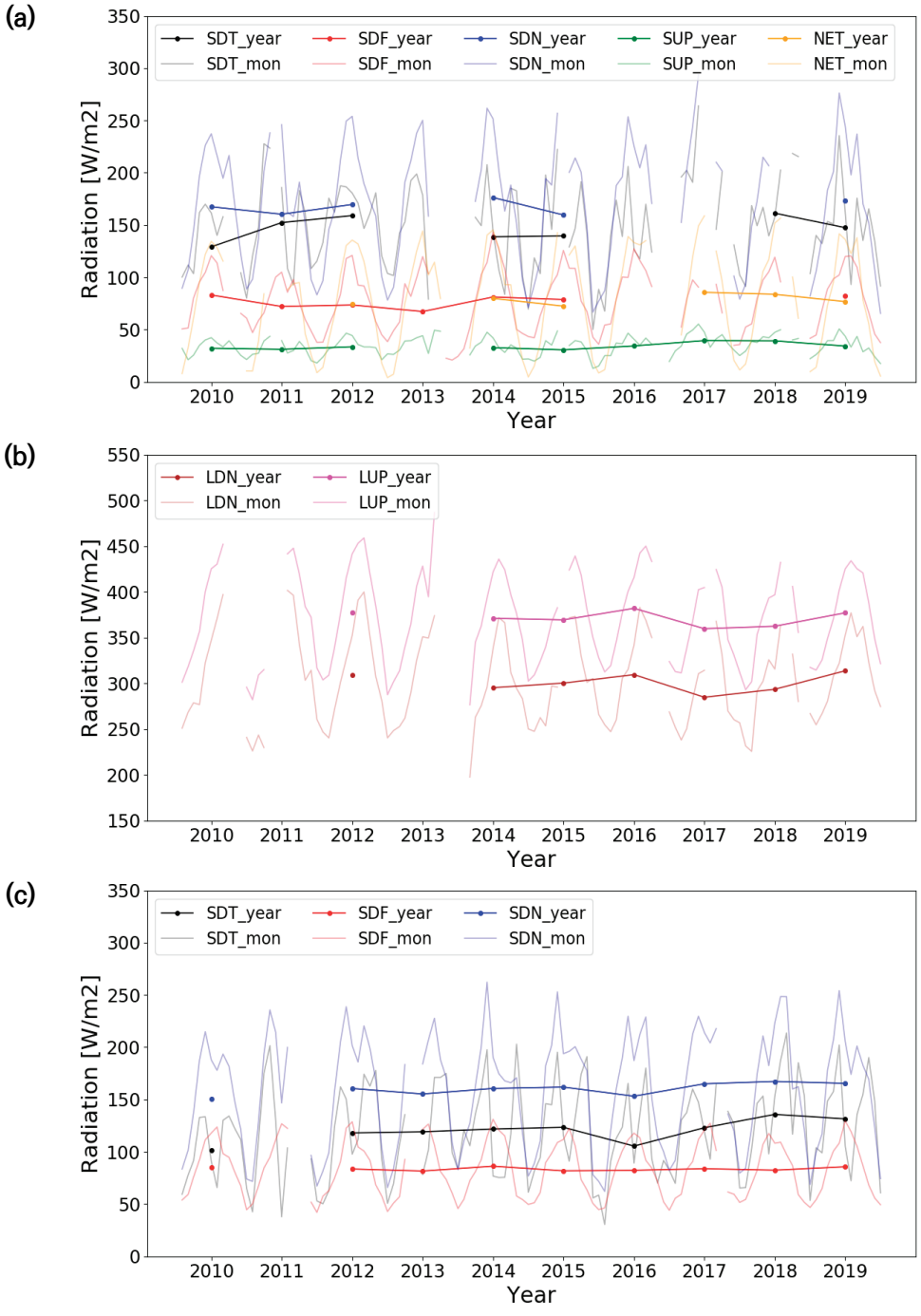


그림 6.6.2 2010~2019년 (a, b)안면도와 (c)고산의 복사량 변화(SDT:직달일사, SDF:산란일사, SUP:태양상향복사, SDN:태양하향복사, NET:순복사, LUP:지구상향복사, LDN:지구하향복사).

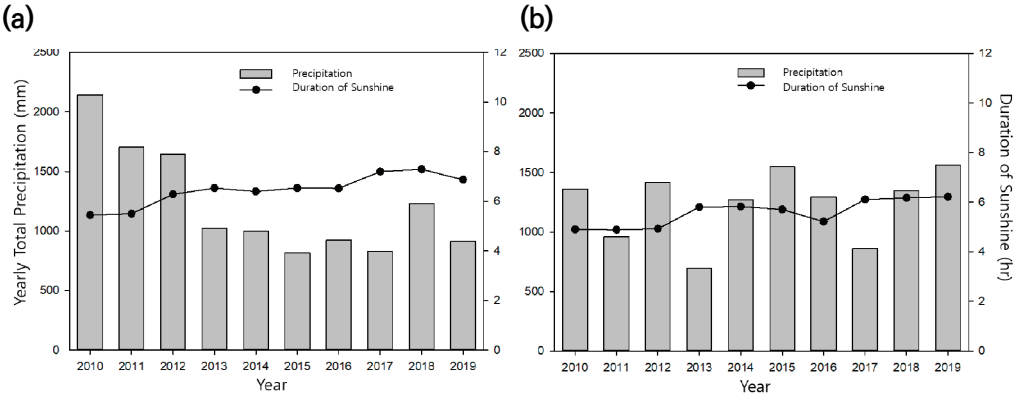


그림 6.6.3 2010~2019년 (a)서산, (b)고산의 연 강수량과 일평균 일조시간 변화.

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제7장

성층권 오존



제7장 성층권 오존

ㅇ 오존전량 : 안면도 315 DU (최근 6년 대비 -2.9%)
고 산 294 DU (최근 8년 대비 -2.8%)

ㅇ 겨울철 시베리아 고기압의 영향이 약해 고위도 지역에 존재하는 고농도 성층권 오존의 한반도 유입 약화

7.1 성층권오존 감시의 목적

대기 중의 오존은 연직적으로 성층권과 대류권 오존으로 구분되며, 생태계에 미치는 영향에 있어서 각기 다른 성격을 갖는다. 성층권에서 오존은 6~8 ppm으로 대기 중 가장 높은 농도로 분포하여 오존층을 형성하며, 태양으로부터 유입되는 유해 자외선을 차단해 생태계를 보호한다. 또한, 오존은 상당량의 태양에너지를 흡수하여 지구 대기의 복사 에너지 균형 및 대기대순환과도 직접적인 연관성을 갖기 때문에 기후변화 감시를 위해 필수적으로 살펴야 할 인자이다 (Williamson et al., 2014). 한편 대류권에 분포하는 오존은 성층권과는 달리 주로 배기가스로 알려진 질소산화물이나 휘발성 유기화합물의 광화학반응에 의해 생성되며 산화제로 작용하여 인간뿐만 아니라 식물과 건물 등에도 악영향을 미친다. 오존은 성층권에 90% 가량이 존재하여 전지구적인 오존량의 변화를 주도하고 있지만 연직적으로 대류권과 상호 영향을 미치기 때문에 연직적인 분포 또한 중요하게 여겨지고 있다.

태양 자외선 복사에 의한 오존 생성 비율은 열대지방에서 평균적으로 최고치를 보인다. 그러나, Brewer-Dobson 순환이라 불리는 전지구적 오존 순환을 통해 열대 오존이 극지방으로 서서히 수송되기 때문에 오존층의 두께는 중위도와 고위도에서 두껍고, 저위도에서는 상대적으로 얇아진다(Butchart, 2014; Hu et al., 2017). 계절적으로는 늦가을과 겨울 동안 열대지방에서 극지방으로의 오존 수송이 증가하기 때문에 오존전량은 봄철 고위도에서 최댓값을 갖는다.

대기 중 오존 농도의 관측은 단위면적 상공에 분포하는 오존의 전체 양을 관측하는 오존전량 관측과 오존의 연직 분포를 관측하는 연직오존 관측으로 구분된다.

7.2 오존전량

안면도와 고산에서는 오존분광광도계(Brewer MkⅢ)를 이용하여 각각 2013년과 2011년부터 오존전량을 관측하고 있으며, 서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 Dobson 오존분광광도계(Beck #124)를 통해 1984년부터 오존전량관측을 수행 중이다. 안면도와 서울(연세대학교) 위탁관측소는 WMO GAW의 세계 오존 및 자외선 자료센터(World Ozone and Ultraviolet Data Center, WOUDC)와 관측 자료를 공유하고 있다. 오존전량은 해당 지점의 상공에 존재하는 오존의 총량으로 정의되며, 돕슨 단위(Dobson Unit, DU)로 기록된다.

7.2.1 안면도, 고산

안면도와 고산에서 관측한 2019년의 오존 전량은 그림 7.2.1에 나타낸 바와 같다. 그림에 표시된 붉은색과 회색 점은 각각 안면도, 고산에서 관측한 2019년 오존전량 월평균과 최근 평균(안면도: 2013~2018년, 고산: 2011~2018년)을 의미한다. 북반구의 오존전량은 봄에 뚜렷한 최댓값을 갖고 여름부터 가을까지 값이 낮아지는 계절변동을 보인다. 2019년 안면도와 고산의 월 변동성을 살펴보면, 안면도의 월평균 최댓값은 3월(354 DU), 최솟값은 9월(282 DU)에, 고산의 최댓값은 6월(324 DU), 최솟값은 1월(257 DU)에 각각 나타났다. 안면도는 최근 평균 대비 2월의 감소폭이 가장 컸으며, 고산 역시 마찬가지로 2월에 최근 평균보다 낮은 값을 나타냈다.

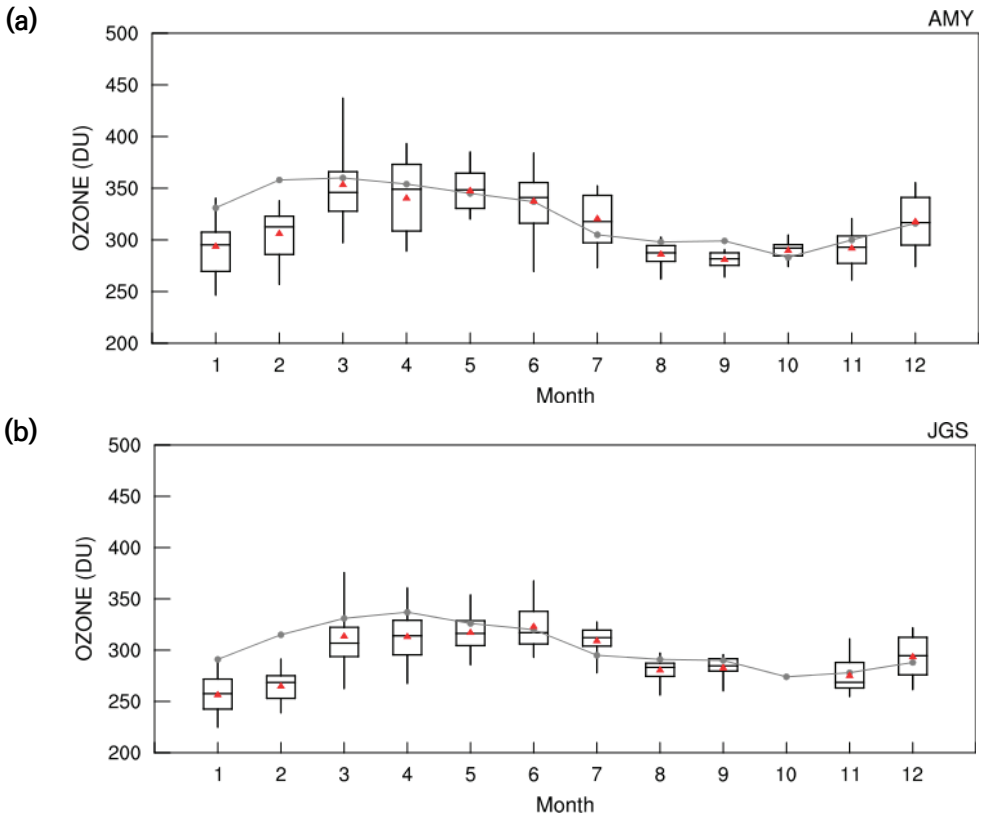


그림 7.2.1 2019년 월평균 (a)안면도(AMY), (b)고산(JGS) 오존전량의 월변화. 2018년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 붉은색 점은 월평균)와 2013~2018년(안면도), 2011~2018년(고산)의 평균(회색 점-선).

그림 7.2.2(a), (c)는 각각 안면도와 고산의 일 오존전량을 시계열로 나타낸 것으로서 오존전량은 매년 규칙적인 계절변동을 나타내고 있다. 2019년 안면도와 고산의 오존전량 최댓값은 각각 462 DU(3월 15일), 402 DU(3월 15일)이며, 최솟값은 각각 247 DU(1월 29일), 225 DU (1월 19일)이었다.

오존전량의 단기 일변화는 주로 종관기상장의 일변화에 의해서 나타난다. 그림 7.2.2(b), (d)는 각각 안면도와 고산의 일일차 변화율을 나타낸 것으로서, 일일차 변화율은 일일 자료를 근거로 당일과 바로 전 날짜의 일 오존전량 차이값의 비율(%)을 의미한다. 안면도, 고산의 증가율 최댓값은 각각 27%, 18%, 감소율 최댓값은 각각 22%, 21%로 나타났으며, 이는 일 종관기상장의 변화가 오존전량의 변화에 크게 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

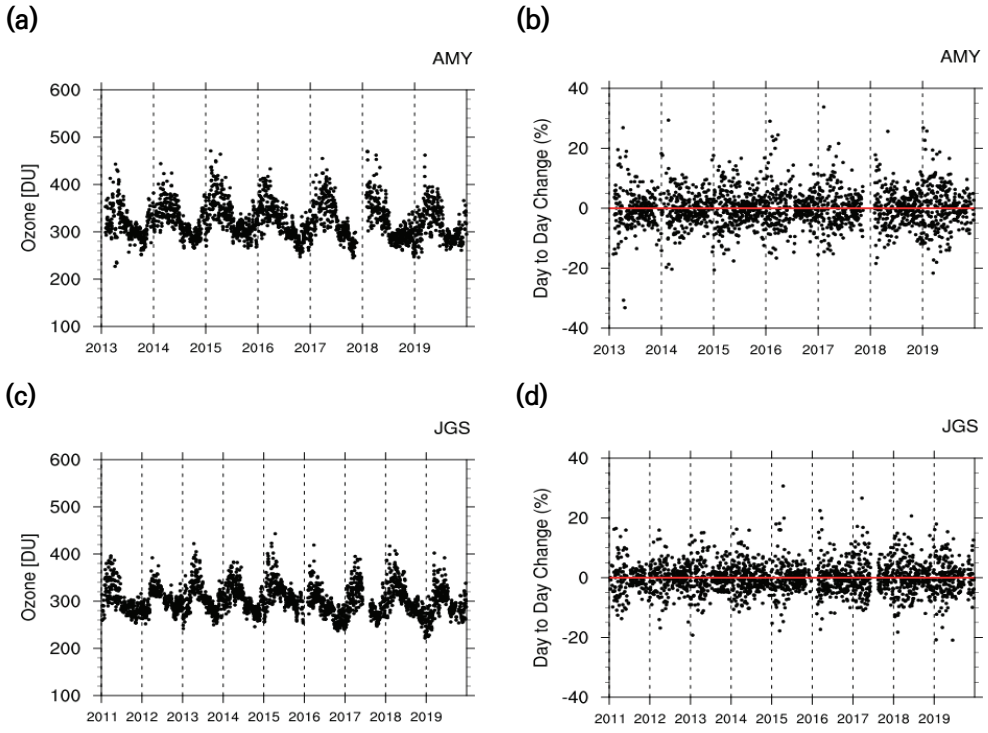


그림 7.2.2 안면도(AMY) (a)오존전량, (b)일일차변화율, 고산 (JGS) (c)오존전량, (d)일일차변화율의 시계열.

표 7.2.1은 오존전량의 일일차 변화율 절댓값의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 안면도의 일일차 변화율 절댓값은 최근 평균(2013~2018년)에서는 주로 4월에 가장 높은 값이 나타났으나 2019년에는 1월에 9.3%로 가장 높았으며, 같은 기간 표준편차도 7.0%로 가장 높았다. 고산의 경우에도 최근 평균(2011~2018년)에서는 3월에 주로 최댓값이 나타났으나 2019년에는 1월에 7.4%로 가장 높았으며, 표준편차도 같은 기간 5.9%로 가장 높았다. 일일차 증가율의 연평균 값은 안면도 5.6%, 고산 4.4%, 감소율은 안면도 -5.3%, 고산 -4.4%로 증가율과 감소율의 큰 차이는 없었다.

표 7.2.1 안면도, 고산지역의 오존전량 일일차 변화율 월 평균값

	Difference (%)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
안면도	(2019) Absolute (Stddev)	9.3 (7.0)	5.7 (3.5)	8.2 (5.5)	5.8 (4.5)	6.1 (4.3)	5.0 (3.7)	6.5 (4.9)	2.2 (1.5)	2.6 (1.6)	2.2 (2.0)	4.5 (3.0)	- -	5.3 (3.8)
	(2013~2018) Absolute (Stddev.)	5.3 (5.4)	7.3 (6.0)	6.4 (5.1)	8.4 (7.7)	4.8 (4.0)	4.7 (3.3)	3.5 (3.1)	2.5 (2.1)	2.3 (1.9)	2.7 (2.1)	3.9 (3.0)	5.2 (4.5)	4.8 (4.0)
	(2019) Increase	12.5	5.6	8.6	5.2	6.8	5.1	6.8	2.0	3.0	2.1	3.6	-	5.6
	(2019) Decrease	-6.8	-5.9	-7.8	-6.5	-5.4	-5.7	-7.0	-2.6	-2.4	-2.5	-5.8	-	-5.3
고산	(2019) Absolute (Stddev)	7.4 (5.9)	3.8 (3.1)	5.6 (4.1)	4.8 (3.8)	4.0 (3.7)	4.5 (4.8)	2.4 (2.3)	2.6 (1.8)	2.0 (1.1)	_	3.5 (2.2)	5.1 (3.9)	4.2 (3.3)
	(2011~2018) Absolute (Stddev.)	5.0 (3.8)	5.1 (4.1)	5.5 (4.6)	5.1 (4.4)	4.2 (3.2)	4.2 (3.4)	2.2 (1.8)	2.2 (1.8)	2.4 (1.9)	2.3 (2.0)	2.8 (2.1)	4.0 (3.0)	3.7 (3.0)
	(2019) Increase	8.4	4.7	4.8	5.4	5.3	4.2	1.7	2.3	2.1	-	3.3	6.6	4.4
	(2019) Decrease	-6.6	-3.1	-6.3	-4.3	-3.3	-5.8	-5.7	-3.1	-1.9	-	-4.0	-4.1	-4.4

7.2.2 서울(연세대학교) 위탁관측소

서울(연세대학교) 위탁관측소는 2004년부터 오존 관측 시스템의 자동화를 통해 객관적인 관측 방법을 구축하여 보다 정확한 관측 자료를 생산하고 있다. 1997년 Brewer 분광광도계(SCI-TEC, #148)가 설치되어 자외선과 오존전량을 동시에 관측하고 있고, 2012년에 오존과 이산화질소를 중점으로 관측하는 Pandora가 설치되었다. 이들 자료는 Dobson 오존 분광광도계에서 관측된 오존전량과의 비교, 검증 자료로 사용되어 한반도 상공의 오존전량 관측의 정확도 향상에 기여하고 있다. 이 관측소는 2004년부터 지구대기감시위탁관측소로 지정되어 운영되고 있다. 여기에서는 2019년도 한반도 상공의 오존전량 변화를 과거 장기간 참조값(1984~2018년)과 비교분석하였다.

그림 7.2.3(a)는 2019년도 서울 상공의 일 오존전량의 시계열, 그림 7.2.3(b)는 서울 상공 오존전량의 장기평균 연변화(1984~2019년)를 나타낸 것이다. 기상 및 장비 보정으로 인한 결측 날짜 동안의 관측 자료는 OMI-TOMS 오존전량 관측 자료로 재구성하였다. 2019년의 일 최댓값은 4월 26일에 460 DU, 일 최솟값은 1월 29일에 256 DU로 나타났으며, 이 최솟값은

기존 1월 최솟값(262 DU; 2002년 1월 12일, 15일)을 갱신하였다. 1월과 2월에는 평년보다 낮은 오존전량을 나타냈으며 5~7월에는 평년보다 높은 오존전량을 보이는 등 기존 패턴과는 다른 모습을 보였다. 특히 2019년 6월 평균 오존전량은 370 DU으로 평년 6월 오존 전량 338 DU에 비해 30 DU 가량 큰 값을 보였다.

오존전량의 연(계절) 변화는, 그림 7.2.3(b)와 표 7.2.2에서 보는 바와 같이 서울 상공의 1984~2018년까지의 연평균 오존전량은 324 DU로 나타났으며, 3월에 최대인 362 DU, 10월에 최소인 289 DU로 월평균 기준으로 연교차가 73 DU이며 연평균 오존전량 기준으로 23%의 변동폭을 보였다. 그리고 오존량의 변동은 2월에 표준편차가 20.6 DU로 가장 심하고, 9월에 7.4 DU로 가장 안정한 변동을 나타내었으며, 계절 변화의 폭이 3월을 중심으로 봄에 가장 많고, 9월을 중심으로 가을철에 적은 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 6~7월에 걸쳐 여름에 오존의 감소가 급격히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

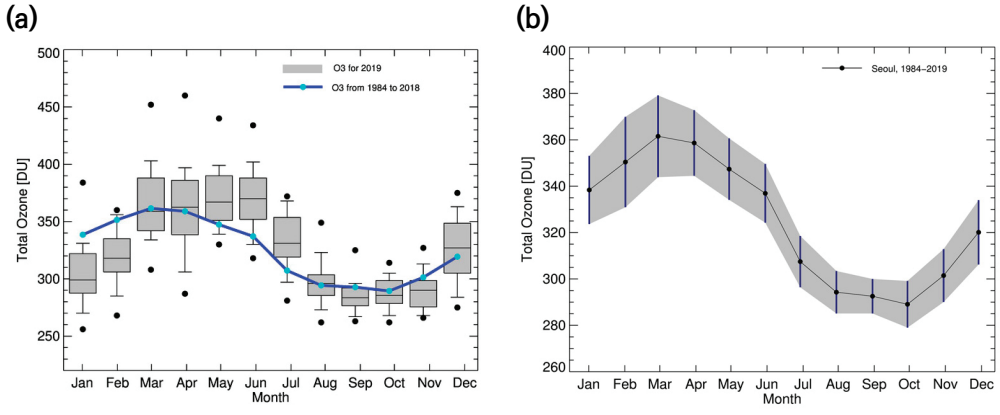


그림 7.2.3 서울 상공 오존전량의 (a)2019년 연변화(회색 박스 플롯 2019년의 오존전량 ; 상자 선의 양끝 10%, 90% 상자 양끝 25%, 75% 상자가운데 선은 중앙값 검은 점은 최댓값 및 최솟값) 및 (b)장기월평균 연변화(1984~2019).

표 7.2.2 서울 상공의 장기 오존전량 및 참조값(1984~2018년)과 2018년 값과의 비교, 장기기후 평균값 (1984~2019년) 및 극값(최대와 최소), (단위 : DU)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
참조값 (Ref. 84-18)	339	352	362	359	347	337	307	294	293	289	301	319	324
2019	303	319	366	361	371	370	333	297	285	287	290	324	325
Diff (%)	-10.5	-9.3	1.1	0.5	6.8	9.7	8.4	0.8	-2.8	-0.7	-3.6	1.5	0.5
기후값 (Avg. 84-19)	338	351	362	359	348	338	308	294	293	289	301	320	324
Stdev	15.5	20.6	17.1	13.9	13.5	13.5	11.6	8.9	7.4	10.0	11.3	14.2	9.1
Max	451	498	499	516	518	449	411	401	354	398	383	434	518
(Date, YY/DD)	(03/4)	(87/27)	(04/6)	(10/30)	(10/11)	(98/3)	(10/14)	(09/3)	(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)

2019년의 연평균 오존전량은 325 DU로 나타났다. 이는 과거 참조값(1984~2018년)인 324 DU에 비해서 약 0.5% 증가하였으며, 월별로는 6월에 최대 증가 9.7%를 보이고, 1월에 -10.5%로 최대 감소를 보였다. 2019년의 연교차는 5월의 371 DU와 9월의 285 DU로 86 DU의 연교차를 보이고 있다. 이는 과거 참조값의 연교차인 72 DU보다 높게 나타났다.

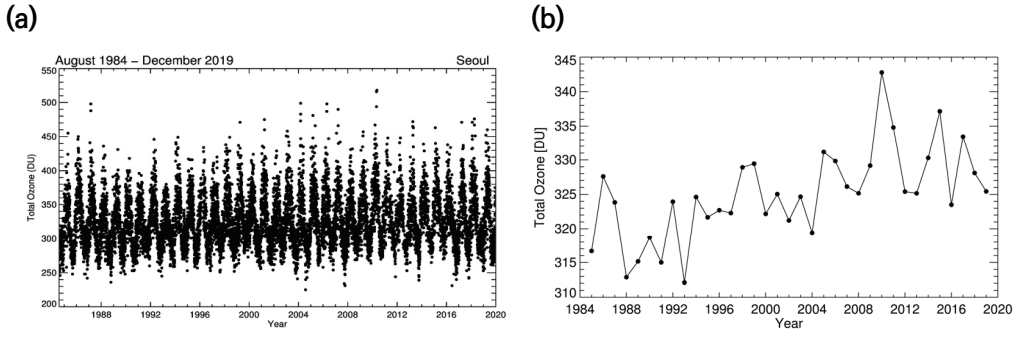


그림 7.2.4 (a)1984년부터 2019년까지 일 오존전량의 장기 시계열 및 (b)1985년부터 2019년까지 연평균 값의 경년 변화.

그림 7.2.4a는 1984년부터 2019년까지의 일 오존전량의 장기간의 시계열을 나타낸 그림이다. 서울 지역의 오존은 매년 규칙적인 계절변동이 나타나며, 최대극값은 2010년 5월 11일의 518

DU이며, 최소극값은 2004년 7월 29일의 225 DU로 나타나 그 차이는 293 DU로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 주로 종관기상장의 변화에 의해서 나타나고 있으며, 연변화는 대기대순환의 영향을 받고 있다. 그림 7.2.4b의 연평균 오존전량의 경년변화를 볼 때, 과거 관측기간(1985~2018년)동안 연평균 오존전량이 가장 높았던 시기는 2010년도로 343 DU이었으며, 최솟값은 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 7.2.4a에서 보인 일 오존전량으로 일일차 변화율(Day To Day Change, DTDC)을 계산하여 그림 7.2.5에 나타내었다. DTDC는 전일 오존량에 대한 그 다음날 오존량의 차이에 대한 변화율로 정의하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 오존전량의 일일차 변화율은 -31.7~41.7%의 범위에서 나타났다. 오존전량은 ±10% 이내에서 변화하는 것으로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 종관 기상장의 일변화에 기인한 것으로 생각된다. 표 7.2.3은 서울 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 증가 및 감소율, 절대값의 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 일일차 변화율은 평균 5.3% 변화하는 것으로 나타났다. 그리고 일일차 변화율의 증감 경향에서 증가 경향의 평균은 5.5%, 감소 경향의 평균은 -5.0%로, 오존전량의 일일차 변화는 감소 경향보다는 증가 경향이 더 큼을 알 수 있다.

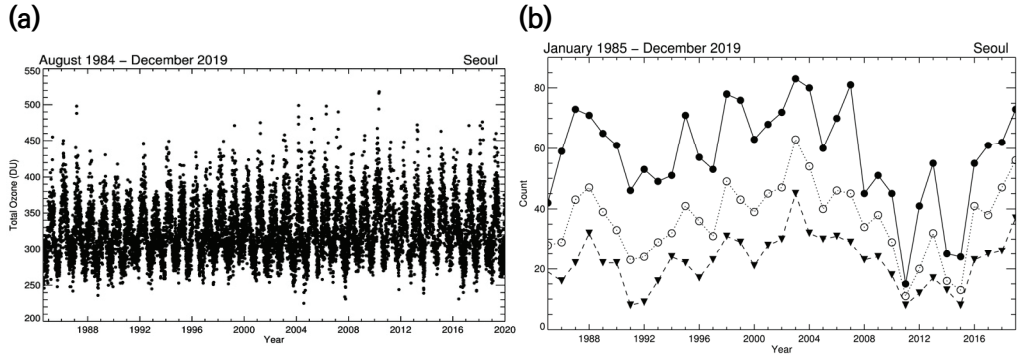


그림 7.2.5 서울 지역 오존전량의 일일차변화율의 (a)시계열 및 (b)증가 경향의 일일차 변화율에 대한 관측횟수.

표 7.2.3 서울 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 월평균 및 연평균(1984~2019년)

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	4.7	5.7	5.3
Stddev.	5.3	5.5	5.7	5.4	4.9	4.2	4.3	3.9	3.4	3.5	3.9	4.9	4.7
Increase	6.6	6.8	7.4	6.4	6.2	5.3	4.7	3.8	3.7	3.7	4.7	6.0	5.5
Stddev.	5.8	6.1	6.2	6.2	6.0	4.6	4.5	4.4	3.9	3.6	4.2	5.5	5.3
Decrease	-6.0	-6.2	-6.4	-5.8	-5.3	-4.9	-4.8	-3.9	-3.5	-3.7	-4.3	-5.2	-5.0
Stddev.	4.7	4.9	5.2	4.6	3.9	3.7	4.2	3.4	3.0	3.4	3.6	4.2	4.2

종관 규모 기상장은 매년 여러 자연 진동 때문에 그 기상장의 패턴이 변화하게 되므로 오존전량의 변화에도 이러한 영향을 미치게 된다. 따라서 오존전량이 급변하는 경우에 대해서 경년변화가 다르게 나타날 수 있으며, 이는 오존전량의 장기 변화경향을 분석하는 데에 영향을 미칠 수 있다. 특히 오존전량의 급증은 오존층의 시간적인 변화 뿐 아니라 오존층보다 하층에 위치한 고도에서의 오존량의 변화, 2차 오존피크 등에 의해서도 민감하게 변화하기 때문에(Park et al., 2012) 증가 경향을 보이는 일일차 변화율의 경년변화는 오존전량의 경년변화 및 장기변화 경향을 파악하는 데 있어서 매우 중요한 분석이다. 그림 7.2.5(b)는 일일차 변화율에 대한 관측횟수를 나타낸 것이다. 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측횟수를 볼 경우, 2011년에 15회로 최소로 나타났으며, 2003년에 84회로 최대로 나타났다. 10% 이상 증가한 관측횟수의 경우에는 1991년과 2011년에 8회로 최소로 나타났으며, 2003년에 46회로 최대로 나타났다. 2019년도의 경우, 전날보다 5% 이상 증가한 관측횟수는 73회, 7.5% 이상 증가한 관측횟수는 56회, 10% 이상 증가한 관측횟수는 37회이다. 그림 7.2.4b의 오존전량의 연평균 경년변화와 비교할 경우, 오존전량의 증가를 나타내는 일일차 변화율의 관측횟수는 대체적으로 오존전량의 연평균 경년변화와 유사한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 오존전량의 연변화 경향은 오존층의 장기적인 회복경향의 영향 뿐 아니라 단기적인 오존량의 급변에도 영향을 일부 받는 것으로 보인다.

7.3 오존 연직분포

오존의 수평, 연직적 이동을 추정하여 각 대기권의 오존량이 상호 미치는 영향을 이해하기 위해서는 오존의 수직분포에 관한 연구가 대단히 중요하다(Kim et al., 2000). 오존 연직분포는 연직 공기기둥에 존재하는 각 층의 오존량을 의미하며 오존 생성 과정에 의해 결정된다. 오존은 성층권 중·하부(20~30 km 상공)에서 강한 자외선으로 인한 광화학 작용을 통해 최고 농도대를 형성한다. 성층권의 고농도 오존은 대류권으로 유입되어 Second Ozone Peak(SOP)를 생성하며, 때때로 지표까지 영향을 주기도 한다. 포항 기상관측소에서는 1995년부터 ECC (Electro-chemical Concentration Cell Ozonesonde) 오존존데를 이용해서 오존의 연직분포를 관측하고 있다. 또한, 서울(숙명여자대학교) 위탁관측소에서는 마이크로파 수신기를 이용하여 2008년부터 연직오존을 관측하고 있으며, 서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 오존분광광도계를 이용하여 연직오존자료를 생산하고 있다.

7.3.1 포항

오존존데 관측은 WMO의 권고에 따라 주 1회의 관측주기로 매주 수요일에 연직 오존 관측을 실시하는 것을 원칙으로 하며, 악천후일 경우 수요일 전후의 날을 택하여 관측을 실시하고 있다. ECC 오존존데는 정기적으로 연직오존분포를 관측하기 위하여 NOAA에서 개발된 측기로서 1200~2000 g 정도로 무게가 가볍고 부피가 작아 일반적으로 30 km 이상 올라갈 수 있다. ECC 오존존데의 원리는 반응 셀 안에서 KI (potassium iodide) 용액과 흡입된 공기 안에 있는 오존 분자가 반응하여 전류가 발생하는데, 이때 나타나는 전류의 강약으로 오존량을 관측한다 (Komhyt and Harris, 1971, Kivi et al., 2007, Smit et al., 2007). 2019년에는 총 51회 관측이 실시되었으며, 이 중 30 km까지 관측을 성공한 49회를 분석에 이용하였다. 그림 7.3.1은 2019년 포항 상공의 월평균 연직 오존분포를 오존분압(mPa)으로 나타낸 그림이다. 고농도 오존은 주로 20~26 km에 존재하며, 2~7월에 높게 나타났다. 특히, 3월에서 4월 걸쳐 약 22~26 km 고도에서 최대 농도 값이 나타나며, 7월에 최대 농도가 나타나는 층이 가장 높았다. 대류권에 해당하는 9 km 이하의 고도에서는 5월과 6월에 최대 농도가 나타났으며, 이는 강한 태양복사에 기인한 것으로 보인다. 계절별 연직 농도 변화는 성층권 하층과 대류권 상부 (9~16 km)에서 가장 뚜렷하게 나타난다. 이 고도에서는 대류권-성층권 상호교환으로 인해 SOP라는 오존전량 급증 현상이 봄철에 발생하는데 최근 연구에 의하면, 이러한 대류권-성층권의 상호교환은 활발해지고 있다고 보고되고 있다(Park et al., 2012).

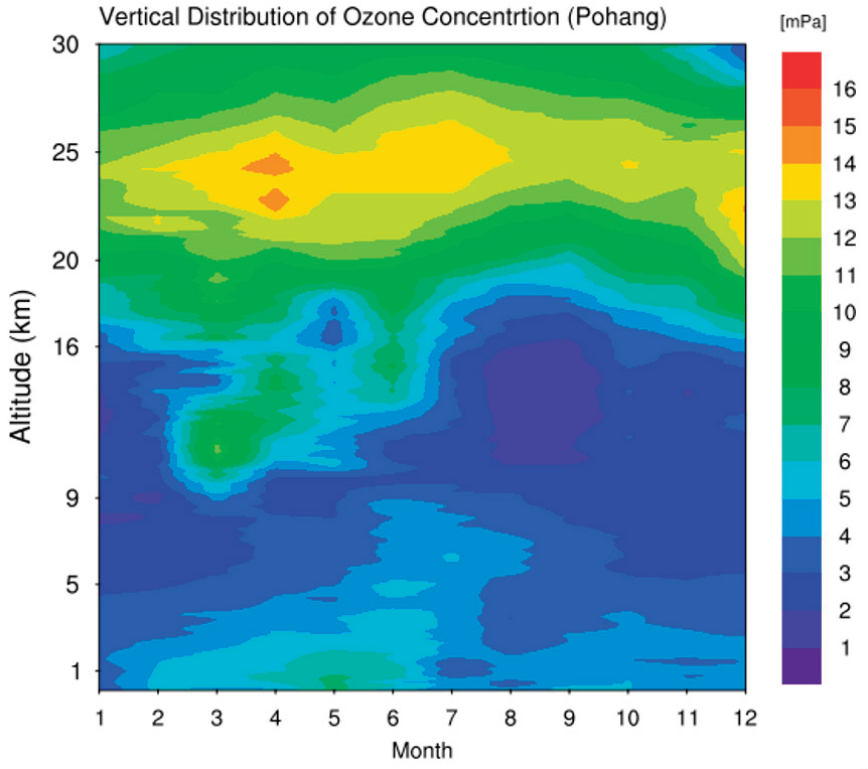


그림 7.3.1 2019년 포항지역의 오존농도 연직분포.

7.3.2 서울(숙명여자대학교) 위탁관측소

서울(숙명여자대학교) 위탁관측소에서는 오존이 집중 분포하는 성층권부터 중간권 영역을 대상으로 24시간 오존연직분포 연속 관측을 수행하고 있다. 관측 장비로는 110 GHz 마이크로파 전파수신기를 사용하고 있으며, 실내에서 스티로폼 창문을 통해 대기 중 오존 분자가 방출하는 110 GHz 전파를 수신하여 스펙트럼을 관측하고, 스펙트럼의 모양 분석을 통해 성층권 영역의 오존 연직 분포를 관측한다(그림 7.3.2). 관측 스펙트럼의 잡음 비율을 낮추기 위해 본 보고서에서는 2시간마다 관측한 스펙트럼의 평균치를 이용하여 농도 분석을 하였으며, 2019년 연중 성층권오존 연직분포 변화와, 2013년부터 2019년까지의 변화, 그리고 고도별 오존 농도 변화를 나타내었다.

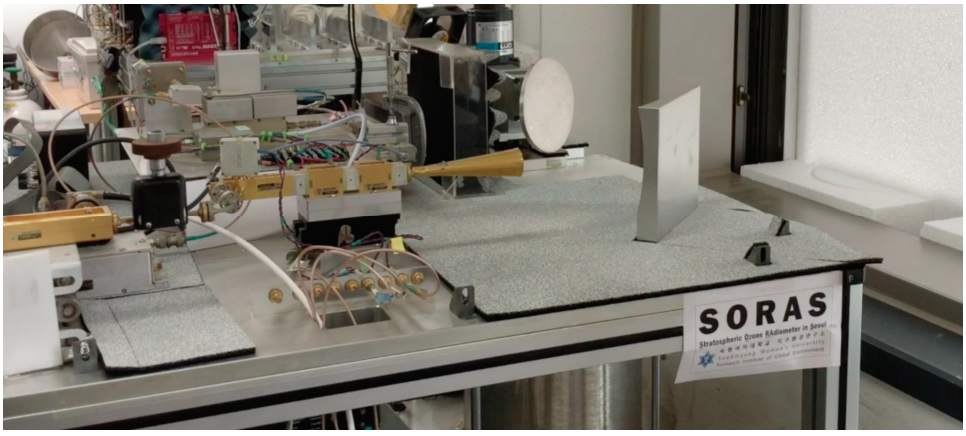


그림 7.3.2 숙명여대 지구환경연구소 110GHz 오존관측용 마이크로파 수신기(SORAS).

2019년의 오존층 분석 결과를 보면, 예년과 같이 계절적 변동 특성을 뚜렷하게 보였으며, 주로 봄부터 가을에 걸쳐 안정된 농도를 유지하다가 오존 부피혼합비가 작아지는 양상을 보이고 있다(그림 7.3.3).

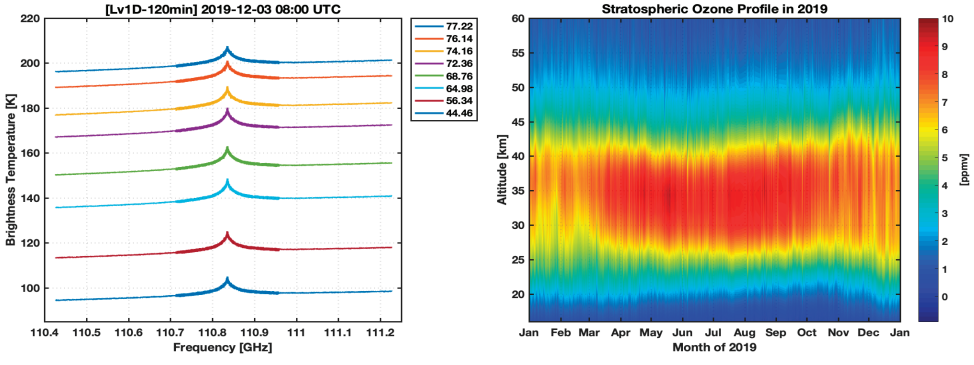


그림 7.3.3 오존전파수신기로 관측한 오존방출스펙트럼(좌)와 2019년 서울 상공의 오존 연직분포 변화(우).

2013년부터 2019년의 오존 연직분포 관측값을 부피혼합비와 분압 단위로 표현하면 그림 7.3.4과 같다. 마이크로파 수신기로 관측한 성층권 영역의 오존 연직분포의 경우, 미량의 분포량을 나타내기 위해 건조 공기에 대한 상대적 비율을 의미하는 부피혼합비(ppmv) 단위로 표현한다. 단위의 차이로 인하여 분압 단위(mPa)에서 나타나는 오존층의 고도와는 차이가 있다. 오존의 절대량이라 볼 수 있는 분압으로 나타낼 경우 오존층의 고도는 25~30 km로 나타나나, 공기에 대한 존재 비율인 부피혼합비로 나타낼 경우 최고 농도는 30~40 km 구간에 나타난다.

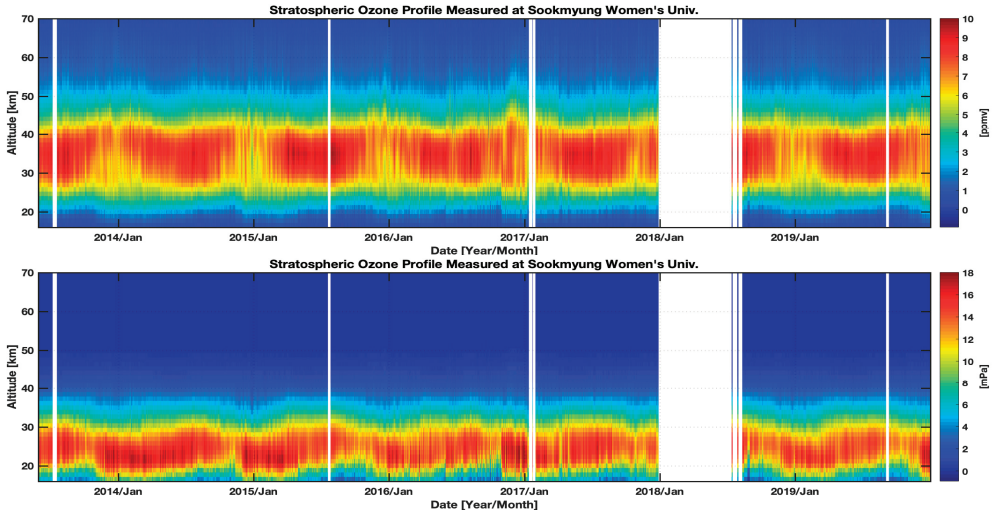


그림 7.3.4 2013년-2019년 서울 상공 오존연직분포 관측값(위: ppmv 단위, 아래: mPa 단위).

2019년의 오존 부피혼합비 농도를 다른 해와 비교하면, 예년에 비해 겨울철 농도 감소폭이 줄어든 양상을 보이고 있어 주목할 필요가 있다. 2013년부터 2019년까지 16~60 km 고도에 분포하는 오존의 월평균 농도 변화를 5 km 구간별로 나누어 비교한 결과를 그림 7.3.5에 나타내었다. 오존의 최대 부피혼합비는 계절에 따라 다르나 6~9.5 ppmv 사이의 농도를 보이며 계절 변동하고 있음을 볼 수 있다.

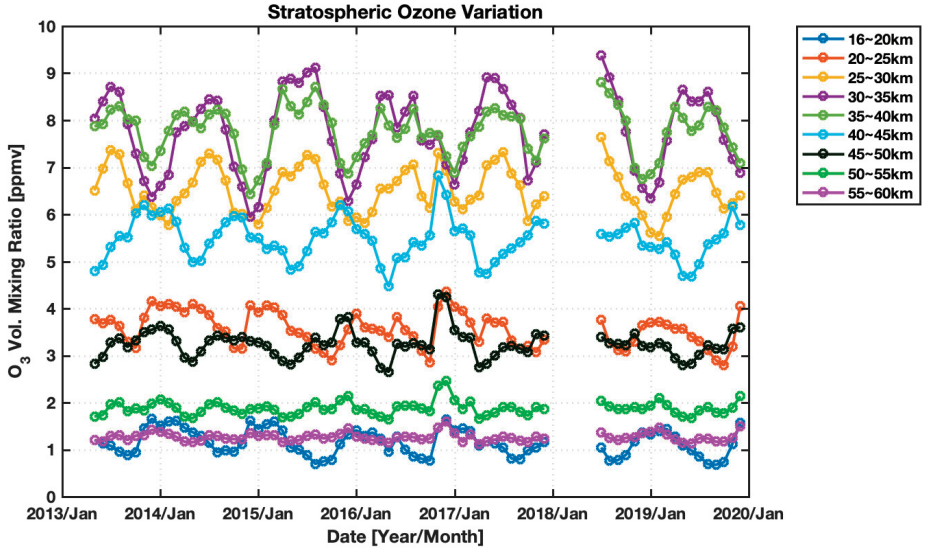


그림 7.3.5 2013년-2019년 서울 상공 성층권 오존의 고도별 월평균 부피혼합비 변동.

또한 오존의 부피혼합비는 성층권 하층(16~25 km) / 중층(25~40 km) / 상층(40 km 이상)의 구간별로 서로 다른 변동 특성을 뚜렷하게 보여주고 있다(그림 7.3.6). 성층권 하층의 경우에는 8~10월에 연중 최저 부피혼합비를 보이고 있으나, 성층권 중층에서는 12~1월에 연중 최저치를 보여주고 있다. 반면 성층권 상층에서는 4~5월 연중 최저치를 보이고 있어, 성층권 내에서도 오존 농도의 변동이 입체적으로 다르게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 55 km 이상의 고고도 영역에서도 오존 농도의 증감이 1.1~1.6 ppmv 범위에서 계절적 변동 특성을 보여주고 있다. 서울상공의 오존층 농도는 2016년 겨울철에 오존 농도가 급격하게 증가한 것을 제외하고는 큰 특이 변동사항은 없으나, 2019년 10월 이후 성층권 하층에서의 오존 농도가 예년과 달리 급격하게 증가한 것으로 나타났다.

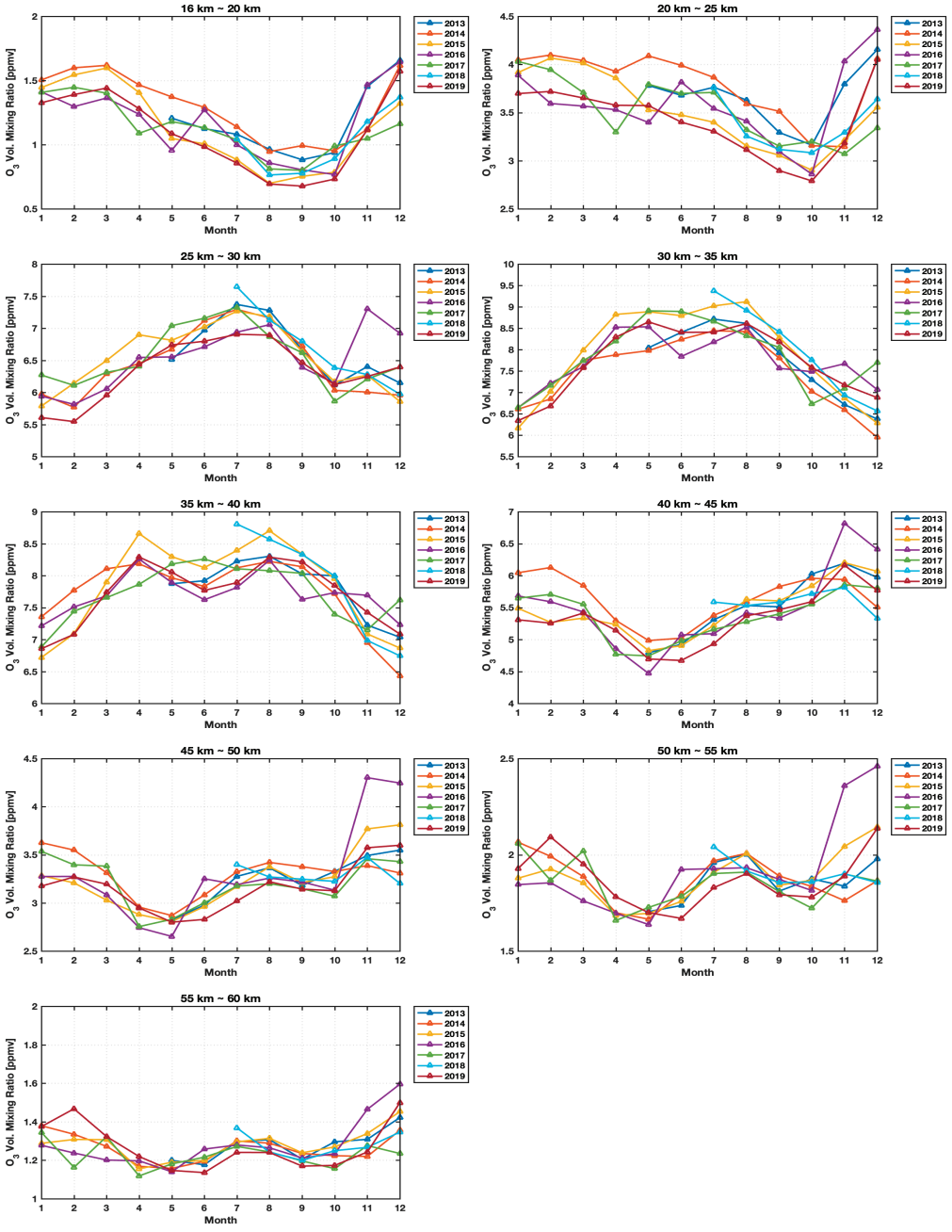


그림 7.3.6 서울 상공 오존 농도의 고도별 연직분포 변동(월평균 변동).

표 7.3.1은 2013년 5월부터 2019년까지 월별 최대 오존 부피혼합비를 나타내었다. 2018년 1월부터 6월까지는 장비 수리로 인한 결측 기간으로 관측치가 없다.

표 7.3.1 2013~2019년 월별 오존 최고 부피혼합비

단위 [ppmv]	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1월	-	7.4	6.7	7.2	6.9	-	6.9
2월	-	7.8	7.1	7.5	7.4	-	7.1
3월	-	8.1	8.0	7.7	7.7	-	7.7
4월	-	8.2	8.8	8.5	8.2	-	8.3
5월	8.0	8.0	8.9	8.5	8.9	-	8.6
6월	8.4	8.2	8.8	7.8	8.9	-	8.4
7월	8.7	8.4	9.0	8.2	8.7	9.4	8.4
8월	8.6	8.4	9.1	8.5	8.3	8.9	8.6
9월	8.0	8.1	8.3	7.6	8.1	8.4	8.2
10월	8.0	7.7	7.9	7.7	7.4	8.0	7.8
11월	7.2	7.0	7.1	7.7	7.2	7.0	7.4
12월	7.0	6.4	6.9	7.2	7.7	6.7	7.1

7.3.3 서울(연세대학교) 위탁관측소

서울(연세대학교) 위탁관측소에서는 1986년부터 Umkehr 방법으로 Dobson 및 Brewer 분광광도계를 이용하여 연직 오존 분포를 관측하고 있다. 날씨가 맑을 때, 오전에는 해가 뜨기 직전부터 태양 천정각이 60°이하가 될 때까지, 그리고 오후에는 태양 천정각이 60°일 때부터 일몰 무렵 태양 천정각 90°부근이 될 때까지 관측하여 0~60 km까지 총 10 개의 층에 대한 오존량을 산출한다. 이 때, 태양 천정각 별 관측값이 기후값과 비교하여 큰 차이를 보일 경우 에어러졸 또는 구름 등의 영향을 받았다고 판단하여 이후 분석에서 제외시켰다. 2019년 한 해 동안 Dobson 분광광도계를 통해 총 91번의 Umkehr 관측이 있었다. 표 7.3.2는 1986년부터 2019년까지 각 층별 월평균 오존량을 나타낸 것이다. 표 하단의 연평균 값을 보면 19~28 km(Umkehr 4, 5번 층) 고도의 성층권에서 약 142.6 DU의 오존량을 함유하고 있는데, 이는 평균 오존전량의 약 46.4%로 전체 고도 중 가장 많은 오존을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 대류권 오존량(1번 층, 0~10 km)은 Umkehr 관측을 시작한 이래로 2010년까지 오존전량의 약 10% 이하를 차지하고 있었으나, 2011년 이후로는 꾸준히 10% 이상의 값을 보이고 있는데 이는 최근 20여 년간 꾸준히 증가하고 있는 지표면 오존 농도와 연관지어 생각해 볼 수 있다(환경부, 2018).

표 7.3.2 서울 오존 연직분포 월평균 자료(1986~2019년) [단위: Dobson Unit (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**
평균	34.2	25.1	45.1	76.2	66.4	43.4	22.5	9.1	3.2	1.4	**307.4**
(%)	11.1	8.2	14.7	24.8	21.6	14.1	7.3	3.0	1.0	0.4	**100**

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 자료임.

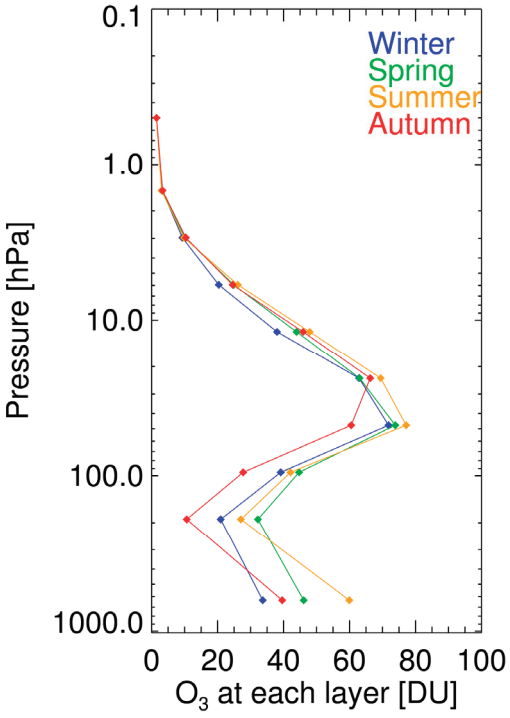


그림 7.3.7 2019년 서울 오존 연직분포의 계절 평균.

그림 7.3.7은 2019년 오존의 사계절 연직 분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 여름철의 19~28 km(Umkehr 4, 5 번 층)에서 최대의 오존 분포를 보이고 있다. 한편 하부 성층권과 상부 대류권(Umkehr 2, 3 번 층)에서는 봄에 가장 큰 오존 분포를 보이며 가을로 가면서 오존량이 감소하고 있는 패턴을 보였으며, 그 변동폭도 상부 성층권에 비해 더 컸다.

7.4 남극 오존홀

남극장보고과학기지(74° 37.4'S, 164° 12.0'E, 이하 '장보고기지')에서는 2015년부터 남극 대륙 성층권 오존 농도의 연직분포 변화를 감시하기 위해 오존존데를 이용한 관측을 수행해 오고 있다. 오존센서(ECC6AB, Science Pump Corporation, USA)는 라디오존데(RS92/RS41, Vaisala, Finland)와 연결, 기상관측용 풍선(1200 g)에 결속하여 관측 당일 2300 UTC 비양된다. 관측 자료는 라디오존데를 통해 1초마다 지상 수신장치로 자료가 보내져 약 100분 동안 기록된다. 관측 목표 고도는 약 32 km이나, 상층 최저 기온이 풍선의 최저 운영 기온(-80℃)보다 낮아지는 시기에는 이 고도에 도달하지 않는 경우도 있다. 이에 매년 5월부터 8월까지는 풍선에 기름피막 처리를 한 후 비양이 실시된다. 장보고기지는 5월 8일부터 8월 7일까지 태양이 뜨지 않는 극야가 지속되며, 극야가 끝나고 생성되는 오존홀(ozone hole) 내부에 대체로 위치한다. 2019년에는 1월부터 11월까지 총 21회의 오존존데 관측을 수행하였다(그림 7.4.1). 월별 비양횟수는 1~7월에는 월 1회, 8월에는 2회 관측을 수행하였고, 오존홀 생성 기간을 포함하는 9~11월에는 매월 4회 관측을 수행하였다. 오존 존데가 도달한 고도는 대부분 30 km 이상이었고, 2회는 약 20 km 이었다(그림 7.4.2). 오존존데가 관측 중 이동 거리는 1월 약 30 km에서 6월의 230 km 이상 이었고, 이동 방향은 이동거리가 짧았던 1월의 북쪽을 제외하면 모두 상층 편서풍의 영향으로 동쪽이었다(그림 7.4.3).

그림 7.4.4는 2019년 1월부터 11월까지 총 21회의 관측 결과를 이용하여 장보고기지에서부터 성층권까지 고도에 따라 관측된 오존 농도 프로파일의 연변동이다. 12월은 관측이 수행되지 않았다. 연중 10 km 고도 이하 대류권에서 오존 농도는 4 mPa로 낮았다. 오존 최대 농도가 나타나는 고도는 하계기간 20~25 km 인데 반해 동계기간에는 다소 낮은 15~20 km에서 최대 농도가 나타났다. 유사한 고도에서 8월과 9월의 최대 오존 농도는 10~15 mPa 전후로, 특히 8월말~9월초 오존홀이 발생했음을 알 수 있다. 이 시기는 뒤에서 논의되는 대로 이전에 비해 빨랐다. 대체로 9~11월에 관측이 집중됐으며, 2019년에는 이 기간에는 월 4회 관측이 수행되었다. 2019년 결과에 근거하면 8월에 관측횟수를 늘이는 것이 필요해 보인다.

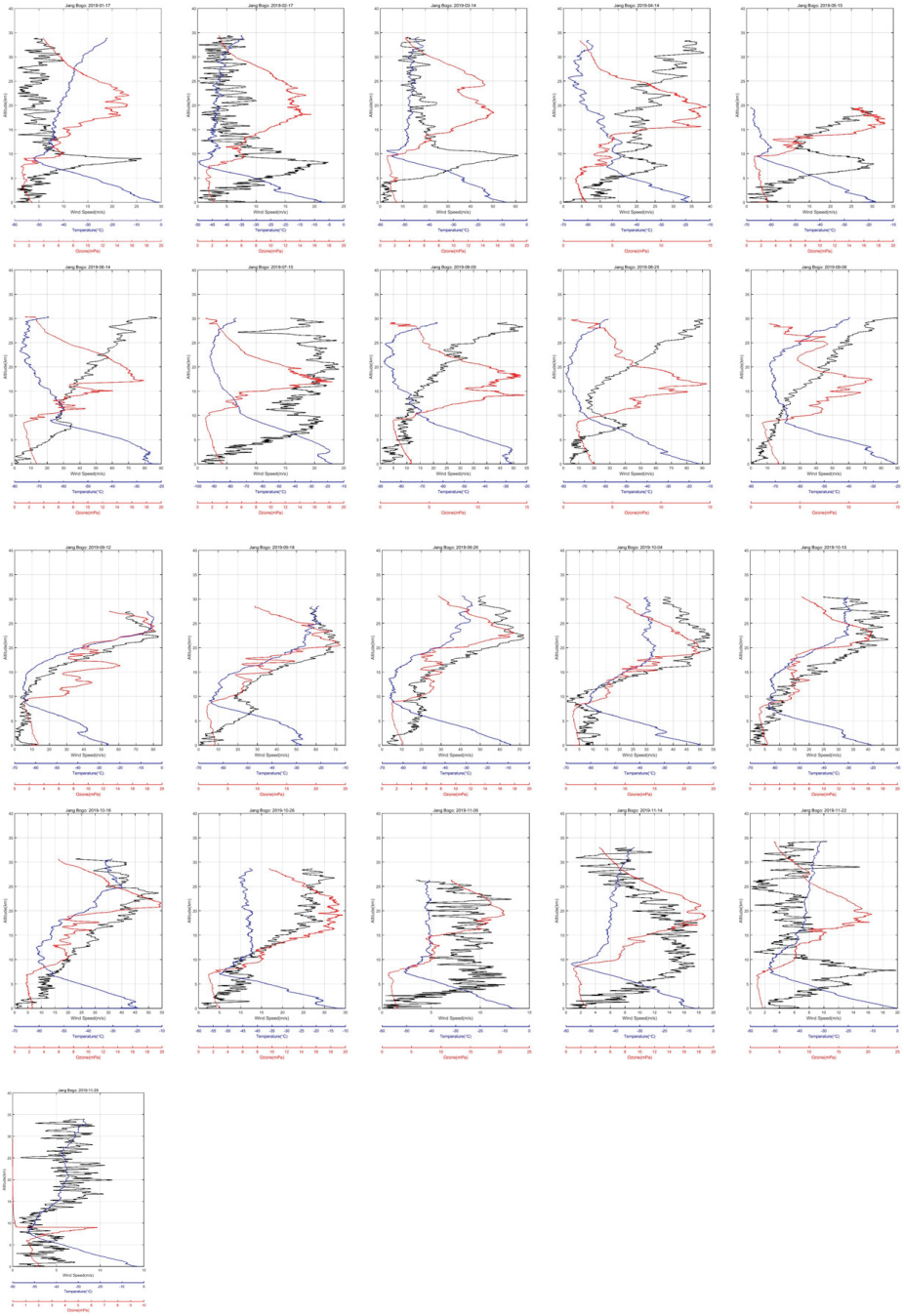


그림 7.4.1 2019년 1~12월 장보고기지에서 오존 존데로 관측한 오존농도(빨간색), 기온 (파란색) 및 풍속 (검은색) 연직 분포.

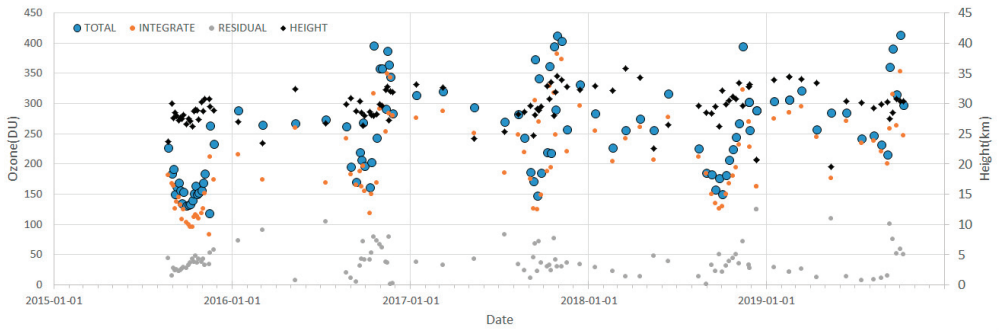


그림 7.4.2 2015~2019년 장보고기지의 오존전량(파란색), 관측한 오존전량(오렌지색), 미관측 오존전량(회색) 및 관측 높이(검은색)의 변동. 오존전량=관측한 오존전량(지상에서부터 관측높이까지 적분된 오존량)+미관측 오존전량(관측 종료고도로부터 대기 최상층까지 추정되는 오존전량).

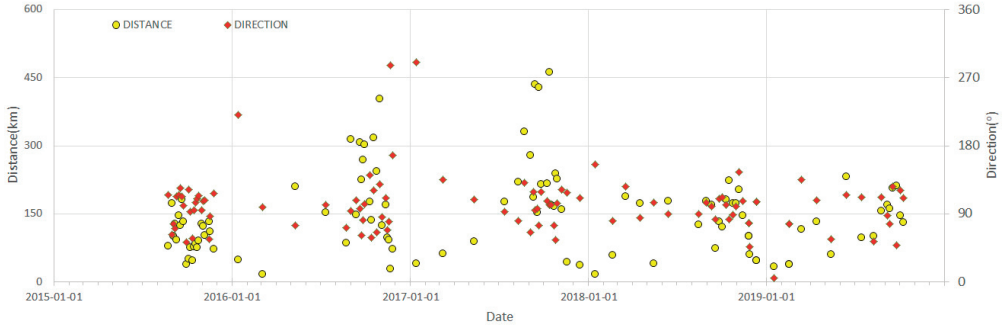


그림 7.4.3 2015~2019년 장보고기지에서의 비양된 오존존데의 관측시작 지점으로부터 최종 이동거리와 방향.

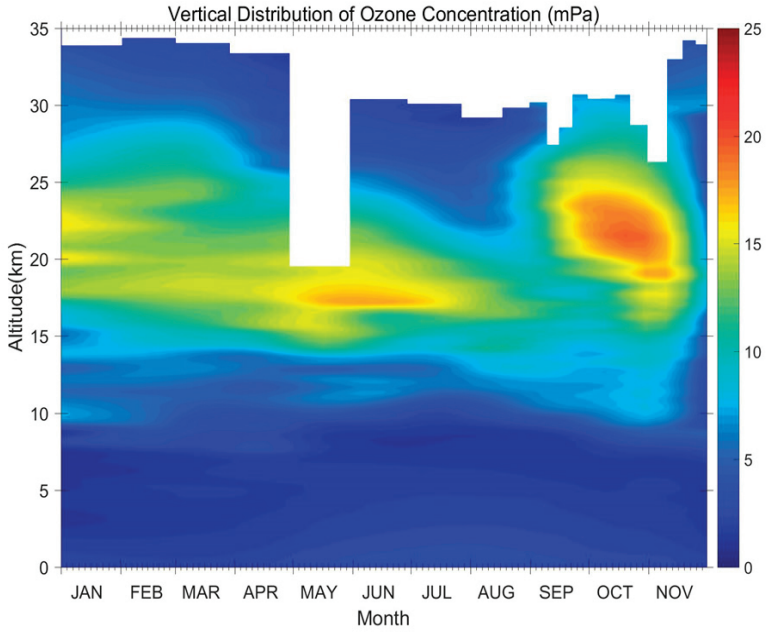


그림 7.4.4 2019년 장보고기지의 오존농도 연직분포.

그림 7.4.5은 8월 중순에서 9월 중순에 걸쳐 4회 관측된 오존 농도, 기온 및 풍속의 연직 분포이다. 8월 9일 약 -30℃의 지면 근처에서의 기온은 성층권인 20-25 km 고도에서 -80~-90℃로 매우 낮은 최저 기온을 기록하였다. 풍속은 고도에 따라 지속적으로 증가하여 같은 고도에서 25~33 m/s로 강하였다. 오존 농도는 약 14.5 km 고도에서 약 15 mPa로 최댓값을 보였고, 약 18 km 고도에서 두 번째 높은 농도(약 14 mPa)가 나타났다. 14일 후인 8월 25일 최저기온은 약 18 km 고도에서 -79℃로 조금 높았지만, 풍속은 8월 9일보다 강하였다. 오존 농도의 최댓값은 약 16 km 고도에서 약 15 mPa 이었으며, 15 km 고도에서 2차 피크가 나타났다. 9월 6일 관측된 오존 농도 최댓값은 약 12 mPa로 앞의 두 날에 비해 작았으며, 그 고도는 약 17.5 km 부근이었다. 지면 근처 기온은 8월과 비슷하였으나 오존 농도가 최대치를 보인 고도의 기온은 -70℃ 근처로 다소 증가하였다. 오존 농도가 최대로 나타나는 구간인 15~20 km 에서 풍속은 25-50 m/s로 강하였다. 9월 12일 오존 농도는 약 25 km 부근에서 최대 약 19 mPa로 농도가 상당히 증가하였으며, 9월 6일과 비교할 때 성층권 중부인 25 km 고도에서 최댓값이 나타났다. 오존 농도 증가로 인해 25 km 고도에서의 기온은 약 -25℃의 지상보다 21℃나 높은 -4℃를 기록하였다. 풍속의 경우 지상에서부터 계속 증가하여 오존농도가 최대가 나타나는 고도에서 83 m/s로 매우 강하였다. 그림 7.4.6은 그림 7.4.5에서 오존홀이 나타난 시기와 그렇지 않은 시기를

구분하여 오존 농도 프로파일을 보여준다. 비교를 위해 9월 18일 자료를 추가하였다. 두 시기에 있어서 최대 농도 및 최대 농도 발생 위치의 차이가 뚜렷하다.

2019년 오존전량이 가장 낮은 시기는 9월 6일로 지난 4년과 비교할 때 그 농도는 가장 높았다 (그림 7.4.2). 2019년 9월 6일 오존전량은 약 215 DU로 일반적인 오존홀에서의 오존전량 220 DU보다 약간 낮았다. 이는 지난 2015년(130 DU)에 비해 약 85 DU만큼 높았다. 미국 NASA와 NOAA의 연구자들은 2019년 9월 8일의 남극 오존홀 면적이 1982년 관측이래 가장 작았음을 보고하였다. 그리고 그 원인을 남극 상층대기에서의 비정상적인 날씨 패턴을 원인으로 들었다 (NASA, 2019). 9월 8일 위성 자료에 의하면 오존홀의 위치는 주로 서남극과 남극반도 및 주변 남빙양에 위치하여 장보고기지의 경우 오존홀의 경계 밖에 있었다. 이런 이유로 장보고기지는 9월 6일 오존홀의 경계 근처에 있었으며, 9월 12일 오존홀에서 벗어남에 따라 오존전량은 360 DU로 급격히 증가하였다. 같은 날 오존농도가 최대인 고도에서의 기온 또한 급격히 증가하여 -4℃를 기록하였다.

Koo et al.(2018)는 남극세종과학기지를 포함한 남극반도와 웨델해 주변 기지에서 15년간 관측된 오존농도 분석 결과 9월의 오존 농도 최솟값이 점차 증가하고 있음을 보였다. Solomon et al. (2016)는 남극 지역의 장기간 관측 자료 및 위성, 모델링에서 생산된 오존전량 및 연직 분포를 분석한 결과 성층권 오존층 파괴 현상 둔화가 뚜렷하였으며, 이는 오존량 회복 신호를 확신할 수 있는 단계로 진입한다고 보고한 바 있다. 그리고, 9월과 10월의 오존 관측값 비교를 통해 9월의 오존량 증감의 패턴이 10월보다 두드러지게 나타나기에 오존층 회복세를 판단하는 데 9월이 적합한 시기로 제안하였다. 장보고기지에서의 9월과 10월 관측 자료에 근거하면 이 기간 장기 집중 관측이 남극 상공 오존층 회복 감시에 중요하게 활용될 수 있을 것으로 보인다. 다만, 2019년의 경우 비정상적인 대기 순환과 그에 따라 관측된 높은 오존전량으로 인해 오존홀 회복의 자료로 활용되기 어렵고, 따라서 지속적인 관측이 필요하다. 또한 오존농도에 영향을 미치는 기상 변수, 대기순환 등과 연계한 분석이 동반되어야 한다.

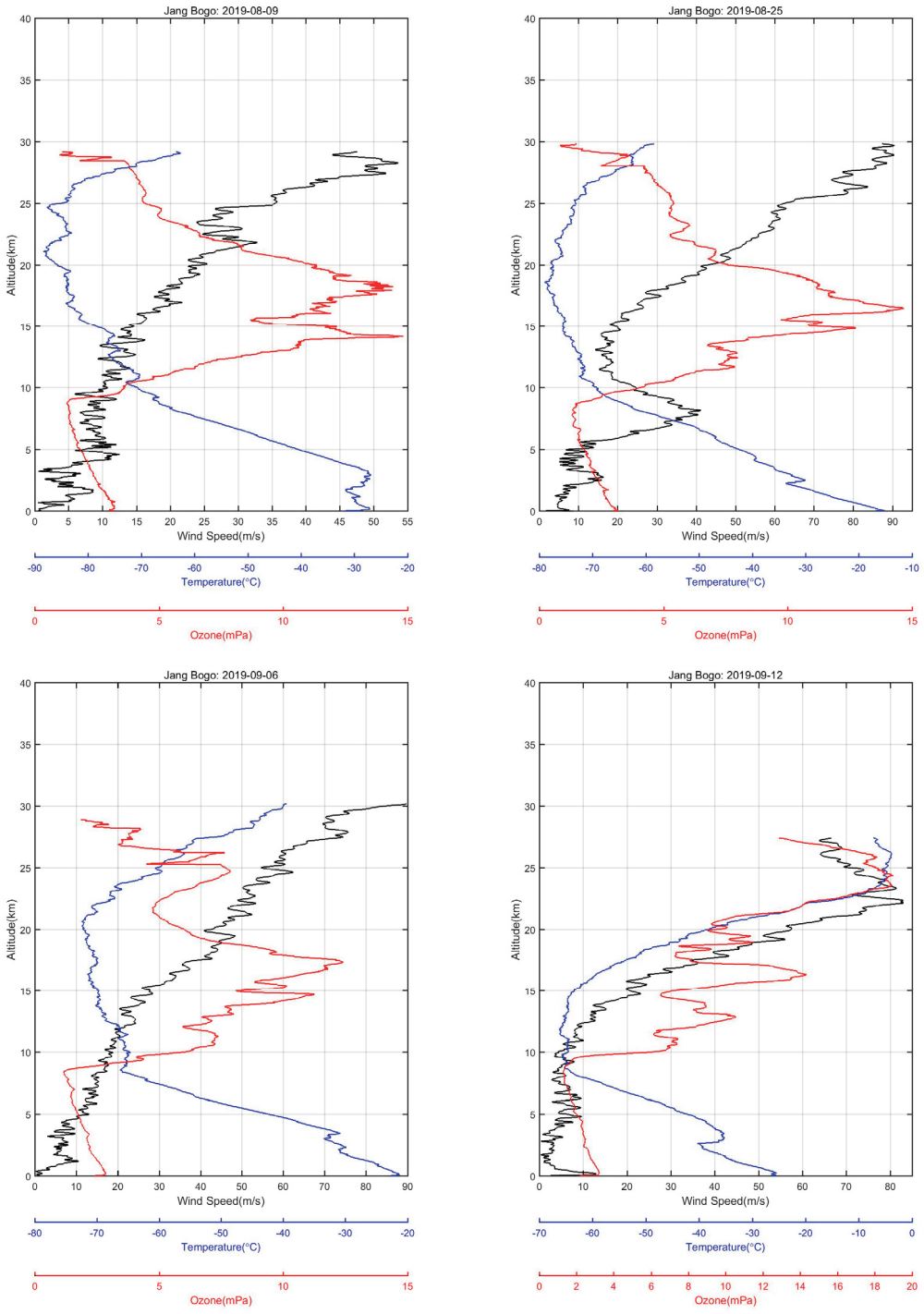


그림 7.4.5 2019년 8월 9일, 25일 (상)과 9월 6일, 12일(하)에 관측한 오존농도(빨간색), 기온(파란색), 풍속(검은색) 연직분포.

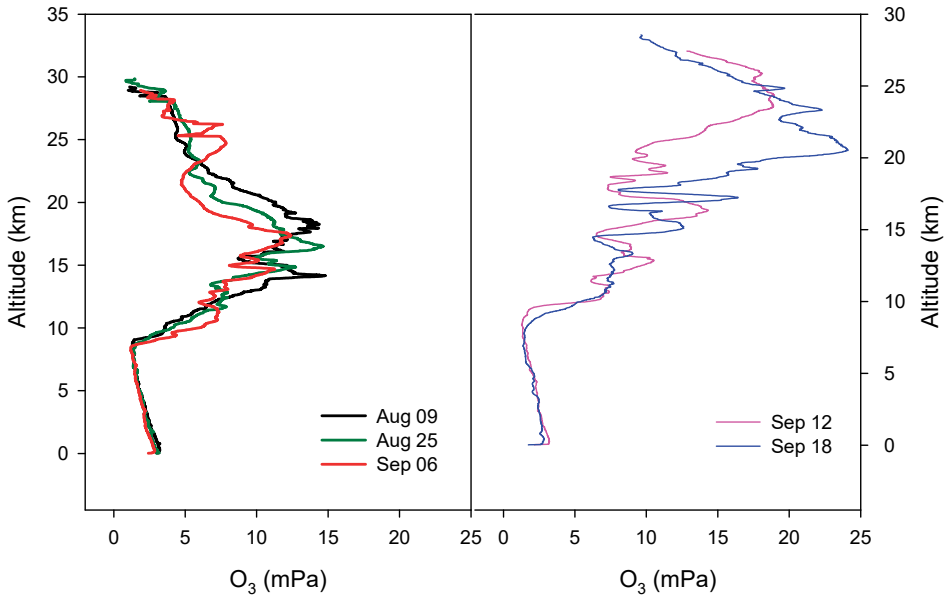


그림 7.4.6 2019년 오존홀 발생 시기 전후 관측한 오존농도의 연직분포. 8월 9, 25일과 9월 6일(좌), 9월12, 18일(우)에 오존 전량이 220 DU보다 낮은 215 DU를 기록함.

7.5 2019년 성층권오존 특성 분석

안면도와 고산의 오존전량 연평균은 315 DU와 294 DU으로, 각각 최근 평균(안면도: 2013~2018년, 고산: 2011~2018년) 대비 각각 -2.9%, -2.8%의 차이를 보였고, 2018년에 비해서는 각각 -1.6%, -3.3%의 차이를 보였다.

그림 7.5.1은 포항, 안면도, 고산의 오존전량 연평균을 1994년부터 나타낸 것이다. 처음 오존전량 관측이 시작되었던 포항은 2012년부터 장비 노후화로 관측값이 불안정해지기 시작했고 2017년 12월 관측이 공식적으로 중단되었다. 안면도의 경우 포항과 비슷한 위도대에 위치하며 2013년부터 관측이 시작되어 포항 자료와 연속성을 갖는다. 장기적으로 오존 전량은 몬트리올 의정서 발효 이후(1989년 1월) 약하게 증가하는 모습을 보였으나(3개 지점 평균 0.27 DU/year, p-value: 0.334), 2015년 이후에는 감소 추세(3개 지점 평균 -3.25 DU/year, p-value: 0.205)가 두드러지고 있어 지속적인 감시가 필요해 보인다.

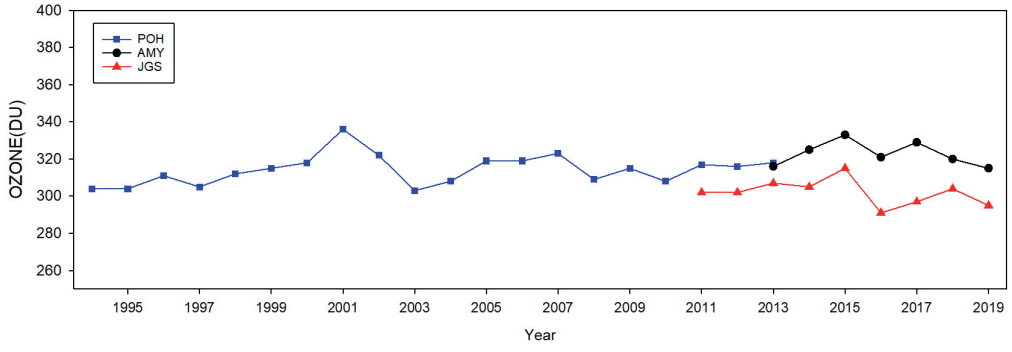


그림 7.5.1 안면도(AMY), 포항(POH), 고산(JGS)에서 관측된 연평균 오존전량.

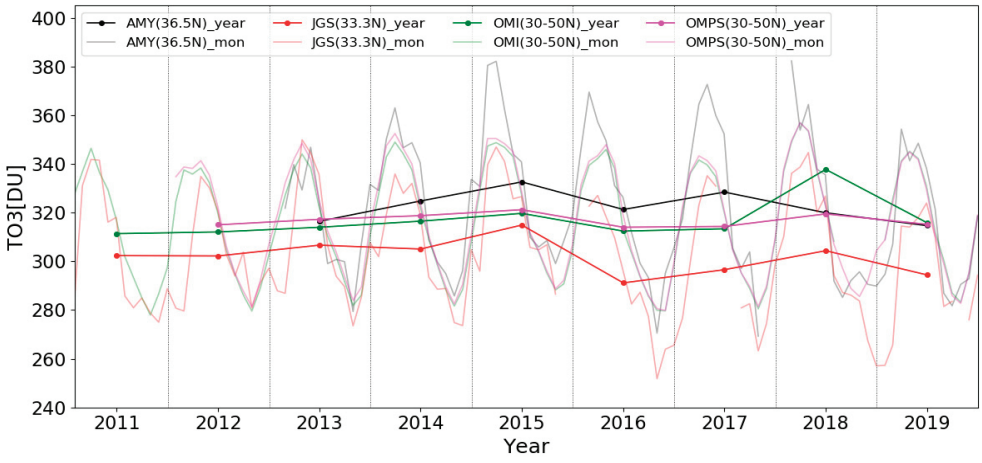


그림 7.5.2 안면도(AMY), 고산(JGS)과 위성(OMI, OMPS)에서 관측된 오존전량의 추세 비교.

OMI/Aura와 OMPS/Suomi-NPP 위성자료로 분석한 전 지구 추세와 비교해 보면 그림 7.5.2와 같다. 오존 전량은 2015년 이전까지는 약하게 증가하다가 2015년 이후 약하게 감소하는 경향을 공통적으로 보이고 있고, 안면도와 고산은 30~50°N 평균보다 빠르게 증가하고 빠르게 감소하는 특성을 보였다. 한편, 2018년 OMI 관측값과 2017년 안면도 관측값의 경우, 결측으로 인한 통계적인 오류로 인해 당해 높은 값을 나타냈다. 전체적으로 안면도는 북반구 330~50°N 평균보다 높고, 고산은 30~50°N 평균보다 낮은 값을 보이는데 이는 한반도가 지리적으로 제트류가 지나는 지역에 위치하여 오존의 농도변화가 매우 크게 나타남을 의미한다.

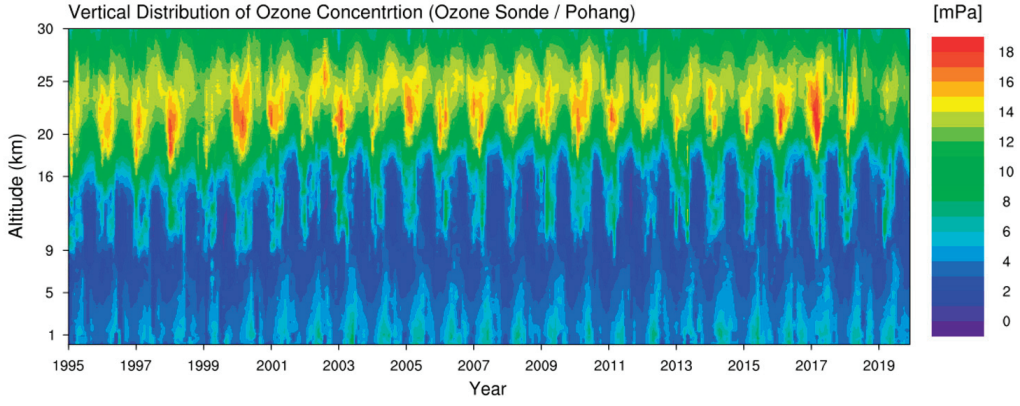


그림 7.5.3 포항지역의 오존농도 연직분포(1995~2019년).

오존은 고도별로 발생 특성에 차이가 있기 때문에 오존 농도의 변화를 분석하기 위해서는 연직적인 분포를 함께 살펴볼 필요가 있다. 그림 7.5.3은 포항에서 오존존데 관측이 시작된

1995년부터 2019년까지의 오존 연직분포이며, 주로 봄철에 약 9~16 km 고도에서 오존량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 한반도에서 봄철에 대류권계면 근처에서 나타나는 SOP 현상은 주로 제트기류로 인해 발생하며, 고위도의 성층권 오존이 폴딩(folding) 현상을 통해 대류권 상층까지 내려오는 것으로 알려져 있다. 오존농도의 급증이 일어나는 경우에는 그 경로를 역추적하면, 오존전량이 높지 않은 경우에 비해서 그 기원지가 극 지역으로 치우치고 있다고 보고되고 있다(Park et al., 2012). 2019년의 경우, 오존층에 해당하는 20~25 km 고도의 농도가 다른 해에 비해 낮은 모습을 보이며, 포항과 비슷한 위도대인 안면도의 오존전량 변화 역시 성층권 오존 감소로 인한 것임을 추정할 수 있다. 한반도가 위치하는 중위도의 성층권오존은 전지구 오존순환(Dobson-Brewer Circulation)과 관련이 깊으며, 성층권 오존농도의 변화는 전지구 오존순환 또는 저위도지역 오존 생성량, 종관 기상특성 등의 영향을 받는다. 2019년은 특히 1월과 2월 평년에 비해 낮은 오존전량 농도를 보였는데 해당 기간의 기상특성을 분석해 봤을 때, 시베리아 고기압이 평년보다 약하게 작용하여 고위도의 고농도 오존대가 한반도까지 충분히 영향을 미치지 못한 것을 하나의 원인으로 볼 수 있다. 그림 7.5.4는 OMPS/Suomi-NPP 위성 관측값을 이용하여 2019년 1월과 2월의 오존전량 평균값과 최근 7년(2012~2018년) 1월과 2월의 오존전량 평균값을 각각 나타낸 것인데, 2019년에는 최근 7년 평균에 비해 고농도 오존대가 훨씬 고위도쪽에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 밖에도 남극의 오존홀을 발생시킨 오존 파괴물질 농도의 변화 또한 성층권 오존 농도에 영향을 줄 수 있다. 최근 중국동부지역을 중심으로 오존 파괴물질인 CFC-11의 배출이 증가하고 있어(Rigby et al., 2019), 이로 인해 대기 중 CFC-11의 감소세가 둔화되고 있음이 보고되었다(Montzka et al., 2018). 따라서 장기적으로는 CFC-11의 배출량 변화가 2019년의 오존농도변화에 기여했을 가능성이 있다(그림 4.1.26). 그러나 오존 농도의 경우 매우 다양한 요인들이 직, 간접적으로 영향을 주고 있기 때문에 농도 변화의 정확한 원인을 규명하기 위해서는 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

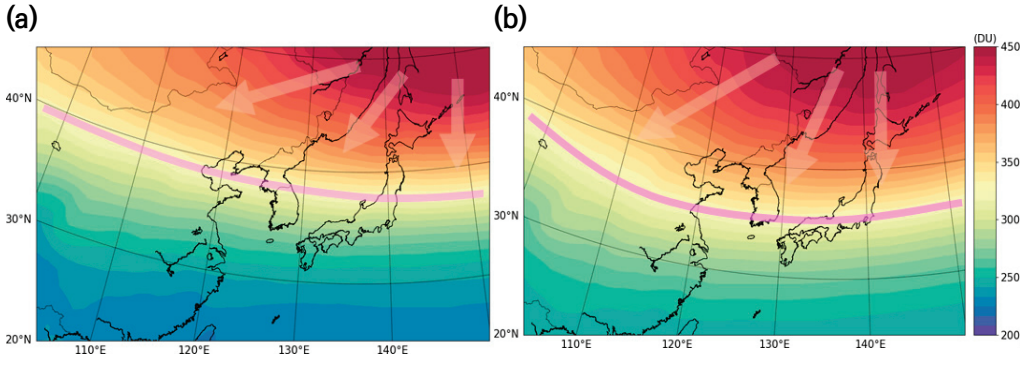


그림 7.5.4 (a)2019년과 (b)최근 7년(2012~2018)의 1~2월 평균된 OMPS 오존전량 분포.

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제8장

자외선



제8장 자외선

- 자외선A 일누적 복사량 : 안면도 0.78 MJ/㎡ (최근 10년 대비 +9.2%)
  고 산 0.77 MJ/㎡ (최근 7년 대비 +8.3%)
- 자외선B 일최대 복사량 : 안면도 0.126 W/㎡ (최근 10년 대비 +2.9%)
  고 산 0.140 W/㎡ (최근 7년 대비 +2.0%)
- 자외선A 일누적 복사량은 최근 10년 평균보다 높은 일조시간, 자외선B 일최대 복사량은 높은 일사량과 낮은 오존전량의 영향

8.1 자외선 감시의 목적

자외선 복사는 파장에 따라 자외선A(320~400 nm), 자외선B(280~320 nm), 자외선C(100~280 nm)로 분류된다. 파장이 짧은 자외선C는 대기 상층에서 모두 흡수되거나 산란되기 때문에 지표에 도달하는 자외선 복사는 자외선A와 자외선B가 대부분을 차지한다. 자외선A는 인체의 피부 조직에 가장 깊숙이 침투하며 피부노화나 색소침착 등의 피부손상을 일으킬 수 있다. 한편, 자외선B는 피부암, 면역성 감퇴, 백내장, DNA 손상 등의 피해를 일으키며 가축, 물고기, 농작물 등의 생육에도 크게 피해를 준다. 그러나 자외선B는 인체에 적당히 노출시켰을 경우 인체의 비타민 D 합성에 도움을 주는 긍정적인 효과도 있다(곽민경과 김재환, 2011).

자외선 복사는 태양 천정각, 오존 및 기타 미량가스, 구름, 에어로졸, 알베도, 고도, 지구와 태양 간 거리 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 자외선 복사는 대기 변화에 크게 영향을 받고 그 변화폭이 매우 크다.

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

8.2 자외선A 복사량

자외선A는 인체의 피부 조직에 가장 깊숙이 침투하며 피부노화 등 장기적인 피부손상을 일으킬 수 있기 때문에 일 누적 값의 분석이 중요하다. 2019년도 자외선A 일누적 복사량의 최댓값은 울릉도 1.56 MJ/㎡(5월 29일), 안면도 1.60 MJ/㎡(6월 24일), 포항 1.58 MJ/㎡(6월 24일), 고산 1.61 MJ/㎡(7월 6일) 이었다. 그림 8.2.1은 2019년 자외선A의 일 누적 복사량 월 변화를 최근 평균값과 같이 비교하여 나타낸 것이며, 최근 평균은 관측 시작년도의 차이로 인해 지점마다 상이한 평균 기간을 갖는다(고산, 울릉도 : 2012~2018년, 안면도, 포항: 2009~2018년). 각 지역별 최근 평균값 대비 2019년 월평균 값은 전체적으로 5월을 전후하여 증가하였으며, 고산을 제외한 세 지역은 8월에도 최근 평균보다 상당히 높은 값을 보였다. 일누적 복사량의 월평균 최댓값은 울릉도(1.24 MJ/㎡), 고산(1.16 MJ/㎡), 안면도(1.22 MJ/㎡), 포항(1.10 MJ/㎡) 모든 지역에서 5월에 가장 높았다. 여름철인 7~8월에는 일사는 강하지만 강수의 영향으로 인해 자외선이 낮은 경향이 있다. 따라서 최근 평균 값들은 주로 5월에 월 최댓값을 보이며, 2019년에도 마찬가지로 전 지역에서 5월에 가장 높은 값이 나타났다.

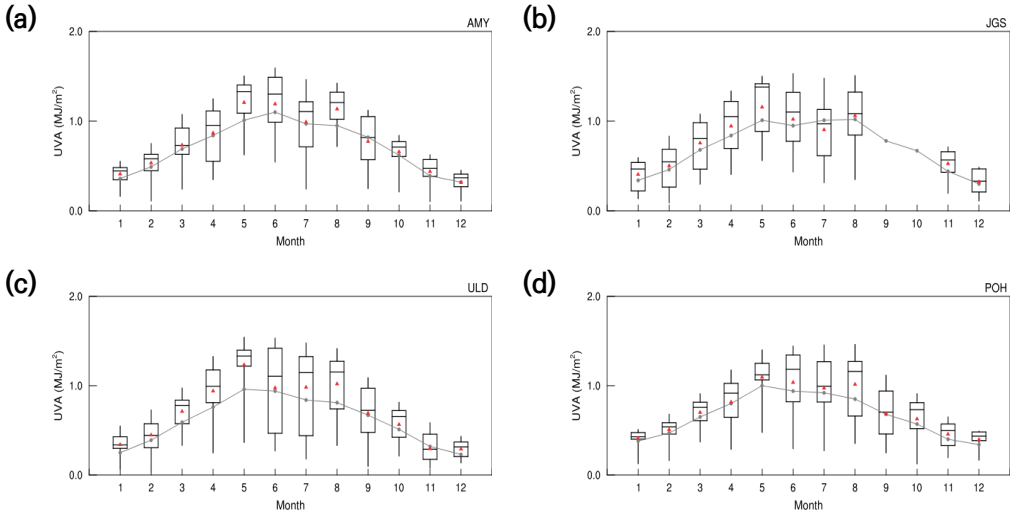


그림 8.2.1 2019년 (a)안면도(AMY), (b)고산(JGS), (c)울릉도(ULD), (d)포항(POH) 자외선A 일 누적 복사량의 월 변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 붉은색 점은 평균, 회색 점-선은 최근 평균값을 나타냄).

8.3 자외선B 복사량

UV-Biometer를 이용해 관측하는 자외선B는 홍반에 대한 가중함수가 적용된 홍반자외선(Erythemal ultraviolet, EUV-B) 복사량이다. 자외선B의 관측단위는 MED이며, MED는 유해 자외선 파장영역(280~320 nm)의 최소 홍반점 조사(Minimum Erythemal Dose)를 나타내는 값으로 1 MED는 210 J/㎡의 복사량 값으로 환산된다. 자외선B는 지속시간도 중요하지만 높은 자외선 값일수록 인체에 미치는 영향이 크기 때문에 일 최댓값 분석이 중요하다. 2019년 자외선B 일 최대 복사량의 최댓값은 울릉도 0.331 W/㎡(7월 29일), 안면도 0.309 W/㎡(7월 20일), 포항 0.299 W/㎡(8월 10일), 고산 0.283 W/㎡(8월 10일)으로 나타났다. 그림 8.3.1은 자외선B 일 최대 복사량의 월변동성을 최근 평균값과 비교한 그림이다. 최근 평균값은 관측 기간의 차이로 인해 안면도, 포항은 2009~2018년, 고산, 울릉도는 2012~2018년을 평균하였다. 최근 평균값들에 의하면 자외선B는 여름에 높은 계절변화를 뚜렷하게 보이고 있으며, 가장 높은 일 최대복사 월평균은 주로 7~8월에 나타났다. 2019년의 경우 자외선B 일 최대복사의 월평균은 고산을 제외하고 최근 평균값에 비해 여름에 더 높은 값을 나타냈으며, 지점별로는 고산(0.202 W/㎡)은 5월에, 안면도(0.216 W/㎡), 울릉도(0.206 W/㎡), 포항(0.222 W/㎡)은 8월에 가장 높았다.

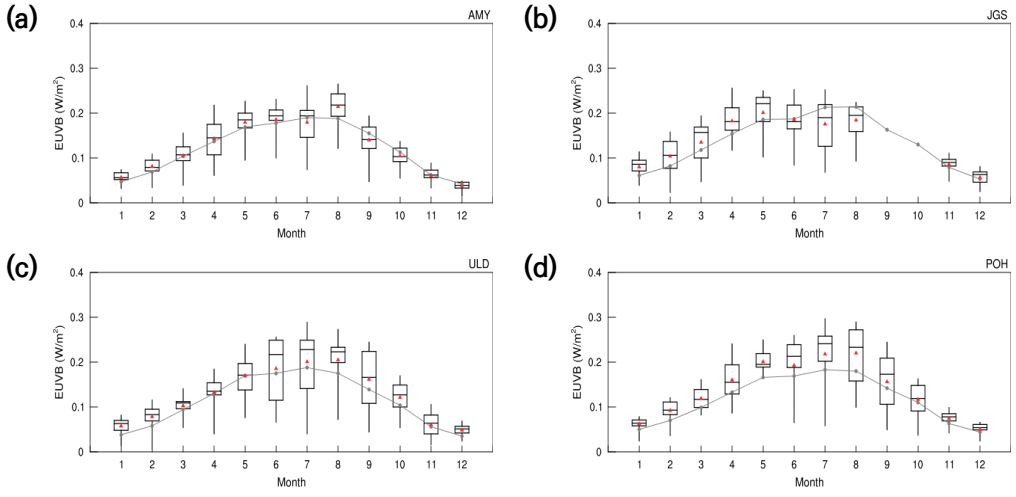


그림 8.3.1 2019년 (a)안면도(AMY), (b)고산(JGS), (c)울릉도(ULD), (d)포항(POH)자외선B 복사량의 일 최댓값 월변화(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 붉은색 점은 평균과 회색 점-선은 최근 평균값을 나타냄).

8.4 서울 자외선 복사량

서울(연세대학교) 위탁관측소는 2004년부터 위탁감시망에 등록되어 현재까지 Brewer 분광광도계(SCI-TEC #148)로 자외선 복사(290~363 nm)를 0.5 nm 간격으로 측정하고 있다. 2019년도의 관측은 장비의 통신연결과 관측에 중요한 부품인 slitmask의 이상으로 2018년 3월 8일부터 관측이 중단된 이후 2019년 8월 29일부터 관측이 재개되었으나, 표준원기와의 검보정 이후 장기간이 경과하여 관측 자료의 품질에 대한 신뢰도가 낮다(Dobson 분광광도계와의 오존전량 비교 결과 상관계수가 0.81로 나타남). 따라서 본 보고서에서는 Brewer 분광광도계의 자외선 복사량 관측 자료 대신 Ozone Monitoring Instrument (OMI)/Aura의 자외선 복사량 관측 자료를 이용해 2019년의 자외선 복사량 변동성을 분석하려 한다.

Brewer 분광광도계에서는 측정된 자외선 복사 중 290~363 nm 파장역의 적분을 총자외선(Total ultraviolet radiation, TUV)이라고 하며, 290~320 nm의 영역에 피부 홍반에 대한 가중함수를 적용하여 홍반 자외선(Erythemal ultraviolet, EUV) 복사량을 계산한다. OMI는 관측된 오존전량 값을 이용하여 clear-sky 조건에서 지표 자외선 복사조도를 lookup table로부터 추정한다. 추정된 지표 자외선 복사조도에 360nm 파장대로부터 계산된 cloud modification factor를 곱하여 구름과 비흡수성 에어로졸의 영향을 고려한다(OMI OMUVBd, Krotkov et al., 2002). 이후, Brewer 분광광도계와 마찬가지로 피부 홍반에 대한 가중함수를 적용하여 EUV와 자외선 지수를 계산한다. 자외선 복사량의 변화는 태양천정각과 일조시간의 천문학적 원인과 날씨에 의해 영향을 주로 받아 뚜렷한 계절변화를 보이고 있어서, 여름에 높고 겨울에 낮은 특징을 보인다. 그림 8.4.1은 일 적산된 EUV의 시계열이다. EUV의 연 최댓값은 7~8월에 나타났다.

그림 8.4.2는 EUV의 2019년 월 평균값과 장기평균값(2004~2018)을 각각 나타낸 것이다. 장기평균값은 8월에 최댓값(3.22 kJ/m^2)을 가지며, 12월에 최솟값(0.63 kJ/m^2)을 가지며, 이는 2019년 8월에 월평균 최댓값이 나타난 것(3.49 kJ/m^2)과 12월에 최솟값이 나타난(0.61 kJ/m^2) 경향과 일치한다. 이와 같은 수치로 보았을 때, 평년 대비 변동의 폭이 더 커진 것으로 보인다.

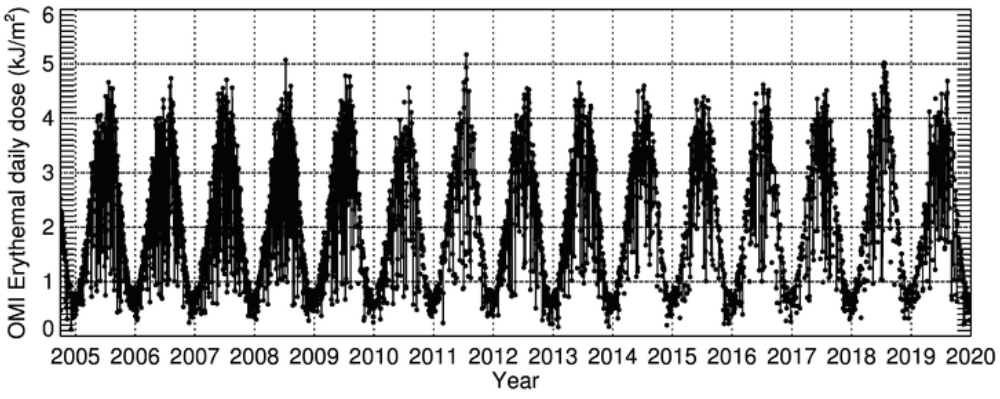


그림 8.4.1 서울 상공 일 적산된 홍반 자외선의 시계열(2004.10.~2019.12.).

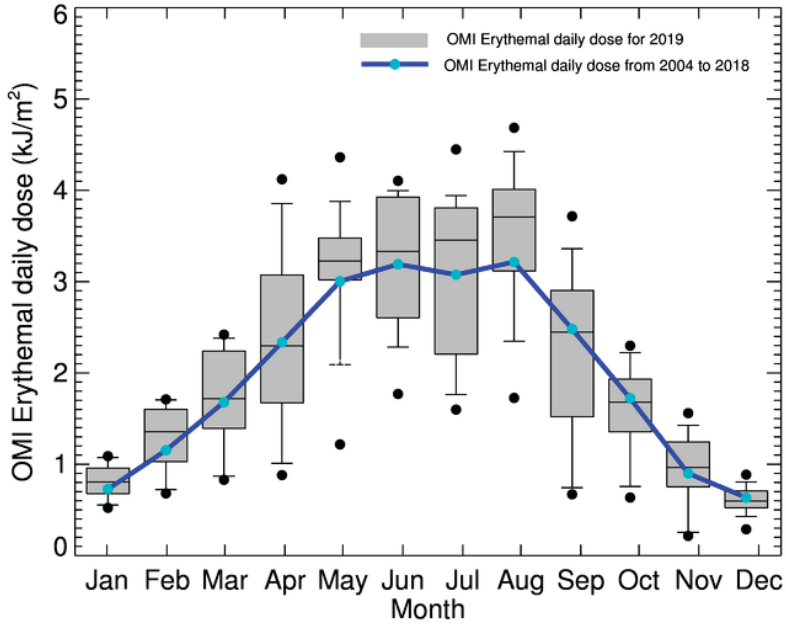


그림 8.4.2 서울 상공 일 적산된 홍반 자외선의 2019년 연 변화(회색 박스 플롯 2019년의 홍반 자외선 ; 상자 선의 양 끝 10%, 90% 25%, 75% 상자 가운데 선은 중앙값, 검은 점은 최댓값 및 최솟값) 및 장기월평균 연변화(1984~2018).

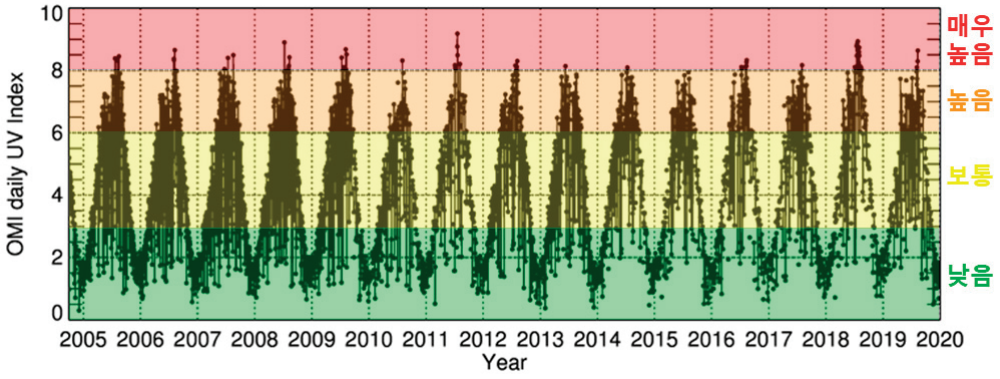


그림 8.4.3 서울 상공 일 평균 자외선 지수(UV-Index)의 시계열(2004.10.~2019.12.).

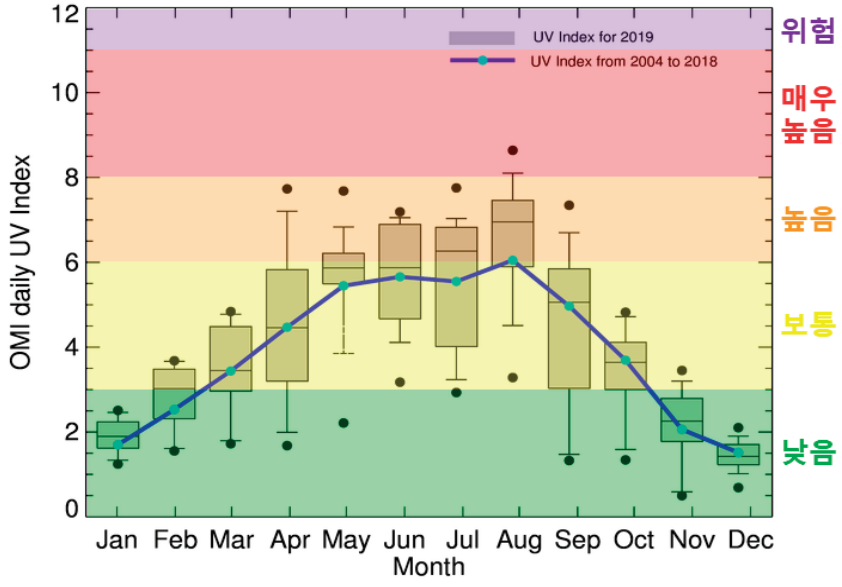


그림 8.4.4 서울 상공 일 평균 자외선 지수(UV-Index)의 2019년 연 변화(회색 박스 플롯 2019년의 자외선 지수 ; 상자 선의 양 끝 10%, 90% 25%, 75% 상자 가운데 선은 중앙값, 검은 점은 최댓값 및 최솟값) 및 장기월평균 연변화(1984~2018).

그림 8.4.3은 2004년 10월부터 2019년 12월까지 일별 자외선 지수(UVI)의 값을 시계열로 나타내었고, 기상청 생활기상정보의 자외선 지수의 등급에 따라서 나누었다. 연도별 최댓값은 주로 7~8월에 나타나고 있으며, 7~8월에 나타나지 않았던 2013년의 경우에도 극댓값의 시기가

6월 10일로 여름철에 높은 관측값이 나오고 있음을 알 수 있다. 관측 기록 중 최댓값은 2011년 7월 20일에 관측된 9.18로 UVI 중, '매우 높음'에 해당하는 값이 관측되었다. 또한 2019년의 연 극댓값도 8월 11일에 관측한 8.64로 '매우 높음'에 해당하는 관측 값이었고, '매우 높음'은 비상대비가 필요하고 한낮 시간에는 외출 자제를 권고하는 수준이다.

그림 8.4.4는 UVI의 2004년부터 2018년까지의 장기월평균을 나타낸 그림이다. 8월에 최댓값(6.05)을 보였으며, 12월에 최솟값(1.51)을 보이고 있다. 가장 높은 자외선 지수를 보이는 8월은 월평균 값 모두, '보통'에서 '높음' 사이에 해당하고 있고, 겨울철에는 '낮음'에 해당하는 자외선 강도가 관측되었다. 봄과 가을의 최댓값의 변동성에 '높음'의 강도가 포함되고 있기 때문에, 여름철 뿐만 아니라 봄과 가을철에도 강한 자외선을 주의해야 할 것이라고 사료된다.

8.5 2019년 자외선 특성 분석

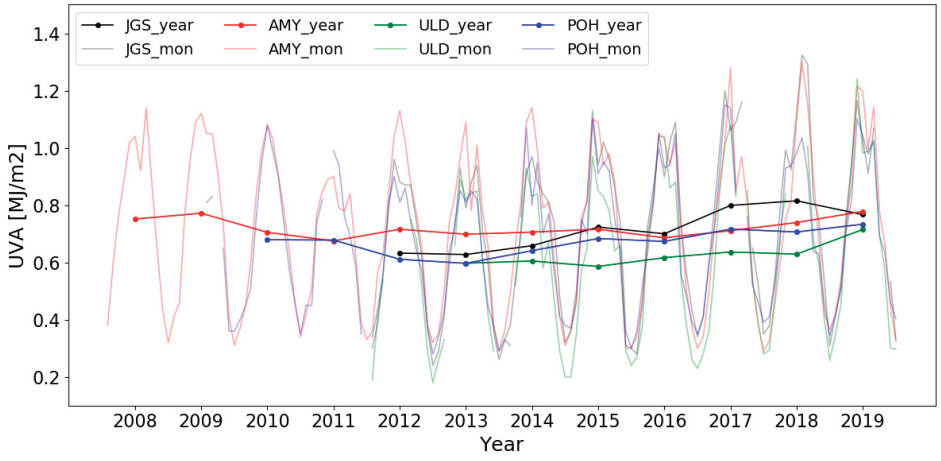
자외선A 일누적 복사량의 연 평균값은 울릉도 0.71 MJ/㎡, 안면도 0.78 MJ/㎡, 포항 0.73 MJ/㎡, 고산 0.77 MJ/㎡으로 각각 최근 평균(안면도, 포항: 2009~2018년, 고산, 울릉도: 2012~2018년) 대비 16.9%, 9.2%, 10.3%, 8.3%, 2018년 대비 13.7%, 5.3%, 3.8%, -5.9%의 변화를 보였다. 자외선B 일최대 복사량의 연 평균값은 울릉도 0.128 W/㎡, 안면도 0.126 W/㎡, 포항 0.140 W/㎡, 고산 0.140 W/㎡였으며, 각각 최근 평균(안면도, 포항: 2009~2018년, 고산, 울릉도: 2012~2018년) 대비 10.8%, 2.9%, 18.1%, 2.0%, 2018년 대비 2.4%, -11.5%, 25.8%, -6.7%의 변화를 보였다.

자외선은 태양복사의 일부로서 전천일사와 관련이 깊으며, 파장이 짧기 때문에 대기 투과길이에 따라 산란량이 증가하는 레일리 산란의 영향을 받는다. 따라서 자외선 관측값은 태양천정각에 따라 크게 달라지며, 지표면에 도달하는 태양복사의 양에 의해 결정되기 때문에 구름과 강수와 같은 기상 요소의 영향을 크게 받는다. 이 밖에도 미량기체나 수증기 등에 의해 흡수되거나 산란되는데 특히 대기 중의 오존에 의해 상당량의 자외선이 흡수된다. 따라서 장기적인 자외선 관측값 변동을 이해하기 위해서는 기상 요소와 미량기체의 변화를 모두 살펴야 한다. 그림 8.5.1은 지점별 자외선 관측량의 변화를 나타낸다. 지점별로 비교해 봤을 때, 태양천정각이 가장 낮은 저위도에 위치한 고산에서 자외선A와 자외선B 모두 전체적으로 높은 관측값이 나타났으며, 이러한 경향은 특히 일 최댓값으로 분석한 자외선B에서 뚜렷했다. 자외선 관측값은 최근 전체적으로 조금씩 상승하는 경향을 보이고 있다.

자외선A의 경우, 일 누적값의 평균이기 때문에 일조시간의 영향을 크게 받으며, 최근 일조시간의 증가 추세를 따라(그림 6.6.3) 자외선A의 일누적값도 2012년을 전후해서 증가하는 모습(4개지점 평균 0.02 MJ/㎡/year, p-value:0.001)을 보인다. 한편, 2019년에는 이동성 고기압의 영향으로 5월에 특히 강수가 적은 기상 특성을 보였으며, 자외선A는 모든 지점에서 5월에 최댓값을 보였다.

자외선B는 일최댓값으로써, 전천일사와 오존 농도의 영향을 많이 받는다. 고산과 안면도의 전천일사 관측값에 의하면 2019년 전천일사는 최근 10년 평균보다 다소 높았고(그림 6.3.1), 안면도와 고산의 오존 전량은 2015년을 전후하여 낮아지는 경향을 보였다(그림 7.5.2). 2014년 이후 나타나는 자외선B의 약한 증가 추세(4개지점 평균 0.004 W/㎡/year, p-value=0.001)는 최근의 오존 전량 감소가 상당부분 기여한 것으로 보이며, 일사량 약한 증가도 일부 영향을 미친 것으로 사료된다.

(a)



(b)

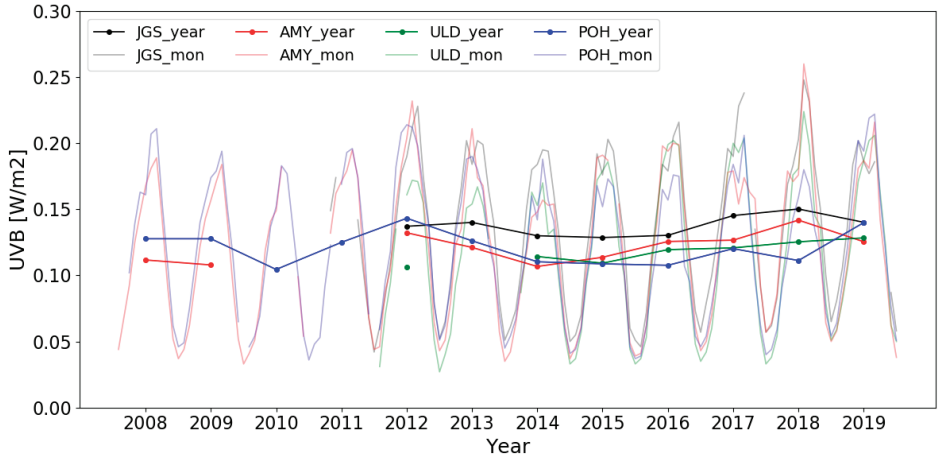


그림 8.5.1 지점별 (a)자외선A와 (b)자외선B 월별/연별 관측값의 변화(안면도: AMY, 고산: JGS, 울릉도: ULD, 포항: POH).

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제9장

총대기침적



제9장 총대기침적

ㅇ 습성침적: 안면도 7,235.7 ㎎/㎡/year (최근 10년 대비 -6.2%)
고 산 8,410.9 ㎎/㎡/year (최근 10년 대비 -19.7%)
울릉도 21,897.6 ㎎/㎡/year (최근 10년 대비 -17.3%)

ㅇ 최근 10년보다 적은 강수량(특히 봄철)로 인해 습성침적량 감소

9.1 총대기침적 감시의 목적

9.1.1 목적

대기 중에 부유하는 오염물질은 습성침적과 건성침적의 형태로 지면에 도달하게 되며, 이를 총대기침적이라 한다. 습성침적은 오염물질이 강수(눈, 비, 우박 등)에 의해 지면에 도달하는 것을 의미하며, 건성침적은 입자상 또는 가스상 물질이 중력에 의해 지면에 떨어지는 것을 말한다. 특히 습성침적은 가스상과 입자상 물질의 용해 또는 혼합하여 대기 중에 부유하는 오염물을 제거시키거나 이동시키는 역할을 한다. 이 중 강수는 지표면에 오염물질을 이동시켜 토양이나 호수를 오염시키거나 생태계에 피해를 준다(NADP, 1999; 방소영 등, 2003). 특히 대기 중 SO_2, 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 대기 중의 수용성 이온(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+})의 양이라 할 수 있으며, 이 수용성이온의 변화 특성을 통해 산성비의 영향을 분석할 수 있다(Chung et al., 2003). 이를 위해 기상청은 1997년부터 한반도 청정지역인 안면도, 고산, 울릉도의 3개 지점으로 구성된 총대기침적 관련 관측망을 구축·운영하고 있다.

9.1.2 채취 및 분석 방법

습성침적(강수)은 전일 9시부터 당일 9시까지 채수하여 분석하며, 강수량이 0.5 ㎜ 이하의 시료를 제거한 후 나머지 시료를 유효시료로 판단한다. 각 지점에서 채취된 강수시료는 여과지로 시료에 포함된 불순물을 제거한 후 pH(산성도)와 전기전도도를 즉시 측정하고, 이온크로마토그래피를 이용하여 수용성 이온성분인 양이온 5개성분(Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+})과 음이온 4개성분(F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-})을 분석한다. 분석된 자료는 품질관리(QA/QC)를 거쳐 강수화학 세계자료센터 등 국내·외로 자료를 공유하고 있다. 또한 건성침적(강하분진)을 분석하기 위해 자유낙하하는 강하분진을 한 달 동안 누적·채취하여 이온크로마토그래피를 이용하여 강수시료와 같은 수용성 이온성분(양이온 5개 성분, 음이온 4개 성분)을 분석한다.

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

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

C_{PW}: 강수량이 가중 평균된 농도

C_i: i 번째 강수시료의 분석된 농도

P_i: i 번째 강수시료의 강수량, m: 평균하려는 기간의 강수시료들의 총 개수

P_{tot}: 평균하려는 기간 동안 강수량 총합

9.2 2019년 강수채취율

강수채취율이란 총강수량 중 채취한 강수량의 비율을 의미하며, 2019년 강수채취율은 안면도 96.1%, 고산 98.2%, 울릉도 95.5%로, 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 강수화학 분야에서 강수채취율의 품질목표인 70%보다 높았다(WMO, 2004). 그림 9.2.1은 지역별, 연도별 총강수량이다. 연도별 강수량은 지역에 따라 증가와 감소를 반복하는 등 서로 다른 양상을 보인다. 이 중 안면도, 고산지역은 강수량이 감소하다 다시 2018년도에 다시 증가하고, 2019년도에는 다시 감소하는 경향을 보였다. 또한, 울릉도 지역은 연도별 강수량이 증가와 감소를 반복하는 경향을 나타냈다.

그림 9.2.2는 강수화학의 품질관리를 통과한 전체 강수량을 지역별로 최근 10년(2009~2018년)과 2019년의 단순 평균강수량 그래프이다. 2009년부터 2018년까지의 최근 10년간의 평균강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 846.3, 1167.3, 1343.8 ㎜이며, 2019년 세 지역의 강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 656.5, 1518.6, 1163.7 ㎜로 최근 10년의 약 77.6%, 130.1%, 86.6%이며, 고산을 제외한 나머지 지역인 안면도, 울릉도는 최근 10년보다는 낮은 강수량을 보였다.

또한, 2019년 강수량과 최근 10년(2009~2018년) 강수량을 단순 평균한 값을 계절별로 비교하였다(그림 9.2.3). 고산, 울릉도 지역은 여름철에 최대 강수량을 나타냈으나, 안면도 지역은 최근 10년보다 낮은 강수량을 보였다. 안면도 지역은 가을, 겨울철에 최근 10년보다 높은 강수량을 보였으나. 봄과 여름철에는 최근 10년의 약 0.7~0.8배로 낮은 강수량을 나타내었다. 고산과 울릉도 지역은 겨울, 봄철에는 최근 10년보다 강수량이 적었으나 여름철과 가을철에는 최근 10년보다 많은 강수량을 보였다.

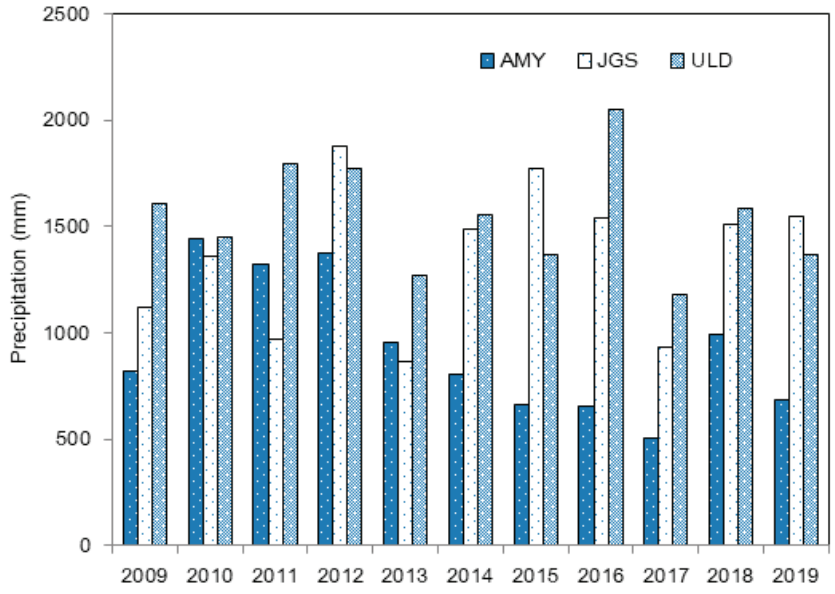


그림 9.2.1 2009~2019년 연도별 총 강수량(㎜)(안면도:AMY, 고산:JGS, 울릉도:ULD).
*고산: 2019년 5~9월 일부 고산기상대 AWS자료 사용

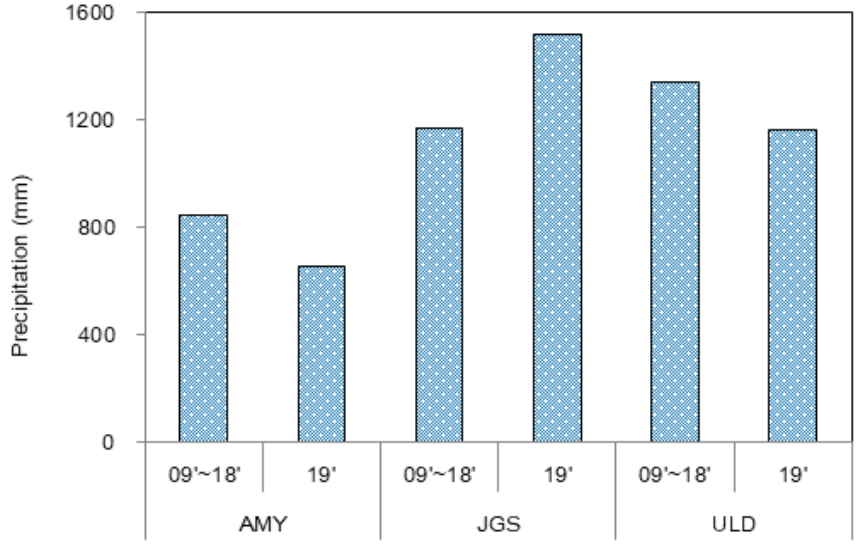


그림 9.2.2 지역별 최근 10년(2009~2018년) 평균 강수량(㎜)과 2019년 총 강수량(㎜) 비교(안면도:AMY, 고산:JGS, 울릉도:ULD).

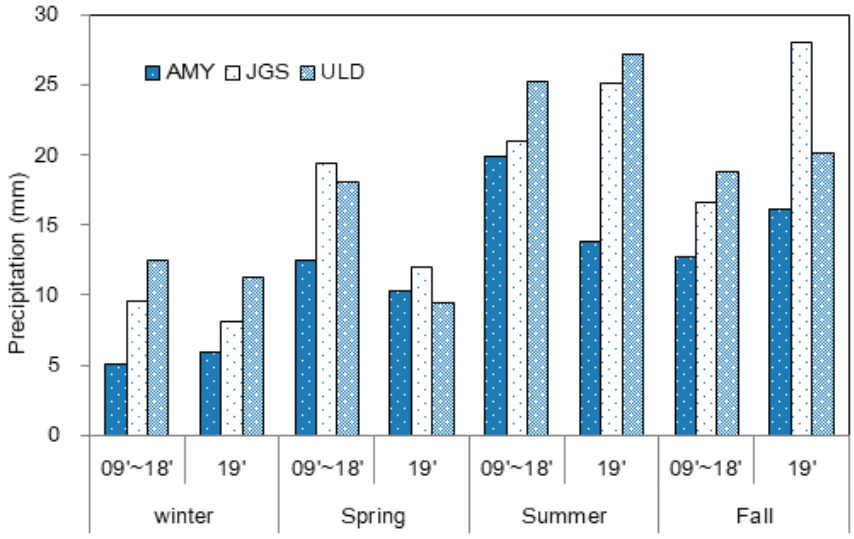


그림 9.2.3 계절별 최근 10년(2009~2018년) 평균강수량과 2019년 단순평균강수량(㎜) (안면도:AMY, 고산:JGS, 울릉도:ULD).

9.3 pH(산성도)

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 2009년부터 2018년까지 최근 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 pH와 2019년의 부피가중평균 pH를 확인해본 결과(표 9.3.1과 그림 9.3.1(a) 참고), 각각 4.71, 4.91, 4.80이며, 2019년도의 부피가중평균 pH는 안면도 5.14, 고산 5.02, 울릉도 5.10으로 나타났다. 2019년도의 pH가 최근 10년간의 부피가중평균 pH보다 약간 높은 것으로 조사되었다. 또한, 최근 10년간의 계절별 부피가중 평균의 산성도와 2019년의 계절별 pH를 비교해본 결과(그림 9.3.1(b) 참고) 안면도, 고산, 울릉도 세 지역 모두 겨울철의 pH 값이 낮은 값을 보였으며, 특히 다른 지역에 비해 안면도 지역이 4.38로 가장 낮은 값을 나타냈다. 반면에 2019년 봄철에 안면도 pH가 5.46, 가을철에 고산, 울릉도 지역이 각각 pH 5.16, 5.20으로 가장 높은 농도를 나타냈다. 관측지점별 강수에 대한 pH 구간별 발생빈도는 그림 9.3.2와 같다. 2009~2018년 분포에서 안면도, 고산에서 pH 4.5~5.0 구간에서, 울릉도는 5.0~5.5 구간에서 최대 빈도가 나타났다. 2019년에는 고산, 울릉도 지역은 최근 10년(2009~2018년)분포와 유사한 경향을 보였으나, 안면도는 5.0~5.5 구간에서 빈도가 증가하는 결과를 보였다. 일반적으로 pH가 5.0 미만인 강수 시료는 황산과 질산염에 의한 영향이라 보이며, pH 6.0 이상의 강수 시료는 알칼리물질에 의한 영향 때문이라고 알려져 있다. 따라서 안면도 지역은 평년보다 알칼리 물질인 NH_4^+, Ca^{2+} 성분 농도에 의해 pH가 높아진 것이라 판단된다.

표 9.3.1 관측지점별 부피가중평균 pH(산성도)

기간 \ 지점	안면도	고산	울릉도
2019년	5.14	5.02	5.09
최근 10년 (2009~2018년)	4.71	4.91	4.80

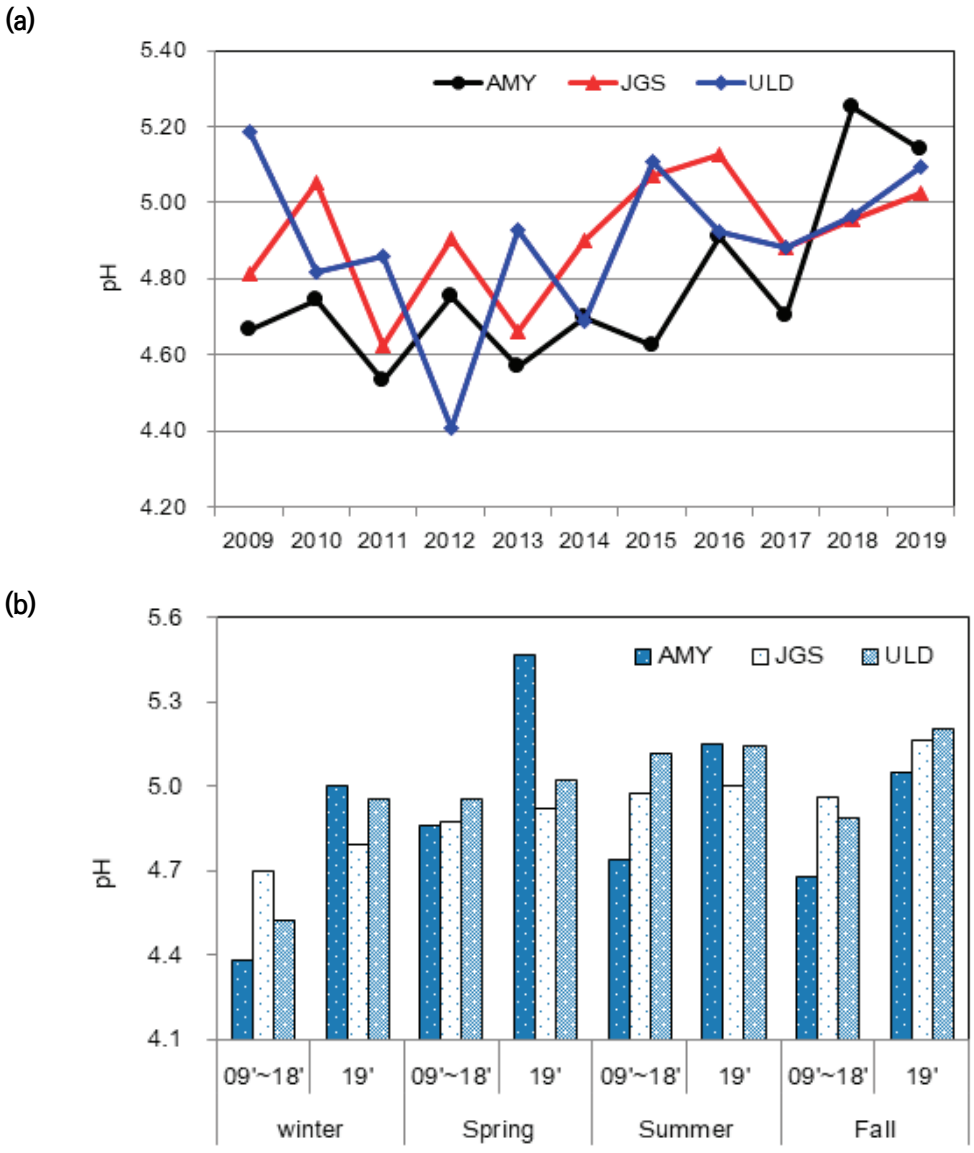


그림 9.3.1 최근 10년(2009~2019년)과 2019년의 (a) 연도별, (b) 계절별 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)지역의 부피가중평균 pH의 변화.

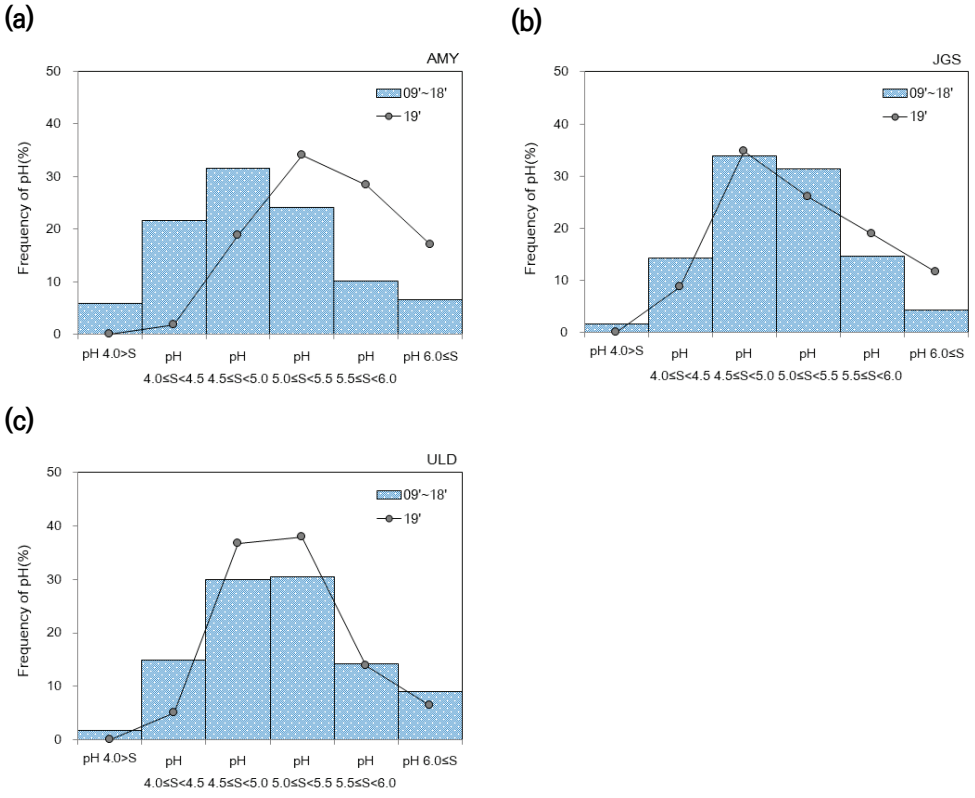


그림 9.3.2 최근 10년(2009~2019년)과 2019년 관측지점별 강수의 pH 발생 빈도((a) 안면도:AMY, (b) 고산:JGS, (c) 울릉도:ULD).

9.4 전기전도도

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 2009년부터 2018년까지 최근 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도를 확인해본 결과(표 9.4.1과 그림 9.4.2 참고), 최근 10년간의 전기전도도의 값은 각각 25.9, 23.1, 49.7 ㎲/㎝로 나타났다. 그리고 2019년도의 부피가중평균의 전기전도도는 안면도 26.0 ㎲/㎝, 고산 15.4 ㎲/㎝, 울릉도 43.8 ㎲/㎝로 고산 지역이 가장 낮았다. 2009년부터 2018년까지의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도인 경우, 겨울철에 높은 값을 보였으나, 여름철에는 낮은 값을 나타났다. 또한, 2019년도는 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도가 최근 10년과 마찬가지로 겨울에 높고, 안면도는 봄철에 낮고, 고산, 울릉도는 여름에 낮았다.

표 9.4.1 관측지점별 전기전도도(㎲/㎝)

기간 \ 지점	안면도	고산	울릉도
2019년	26.0	15.4	43.7
최근10년 (2009~2018년)	25.9	23.1	49.7

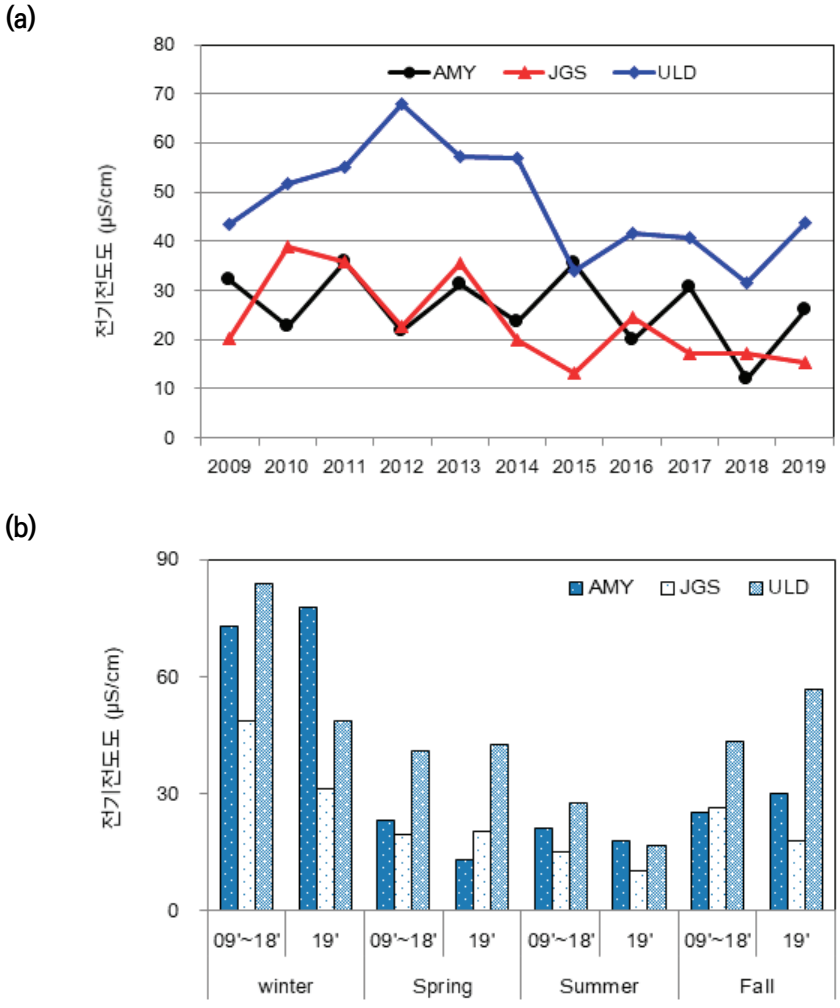


그림 9.4.1 최근 10년(2009~2019년)과 2019년 (a) 연도별, (b) 계절별 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)지역의 부피가중평균 전기전도도의 변화.

9.5 강수이온성분

9.5.1 강수성분의 일별 농도

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

그림 9.5.1~그림 9.5.3은 2019년의 안면도, 고산, 울릉도 세 지역 강수일의 자료를 그래프로 나타낸 것이다.

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

세 지역 모두 해염성분의 비중이 높은 것으로 보이며, 특히 울릉도 지역이 해염의 영향을 가장 많이 받는 것으로 분석되었다. 해염성분(Na^+, Cl^-)을 제외하고는 안면도 지역은 특히 질산염(NO_3^-)과 암모늄(NH_4^+)의 영향이 크며, 고산지역은 황산염(SO_4^{2-})과 암모늄(NH_4^+)의 영향이 큰 것으로 보인다.

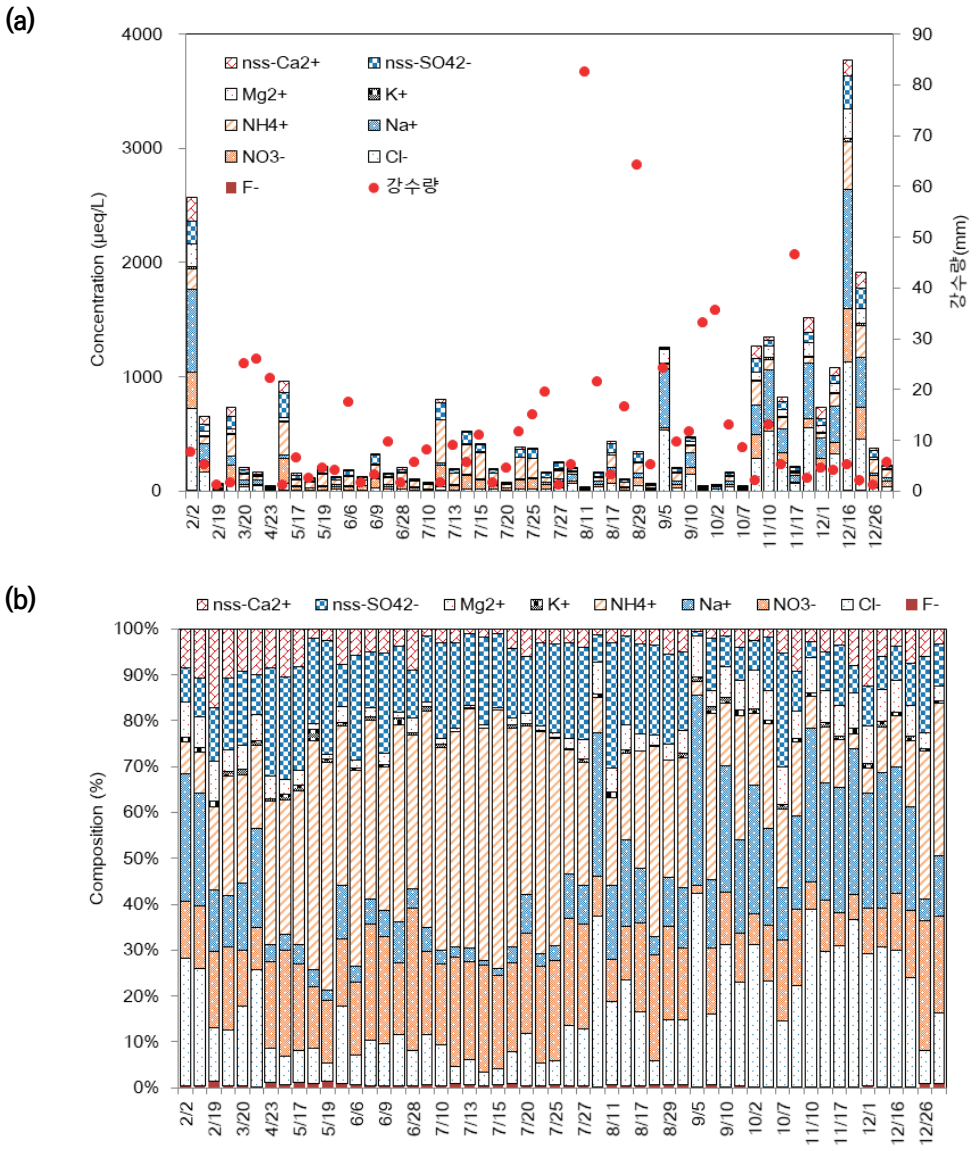
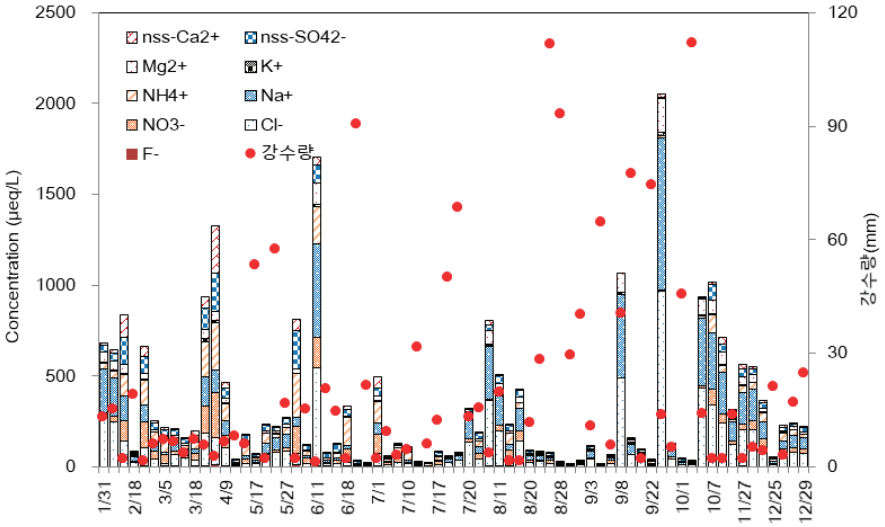


그림 9.5.1 2019년 안면도(AMY) 지역의 강수성분 (a)농도, (b)조성.

(a)



(b)

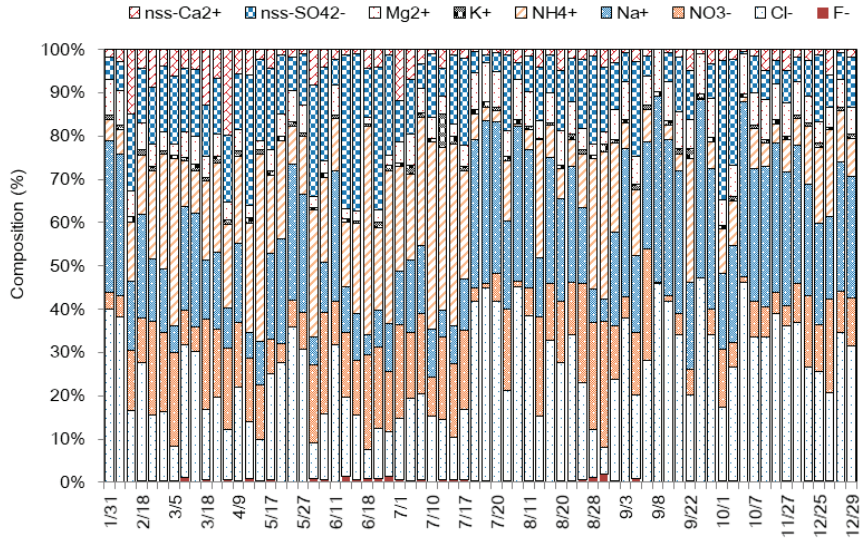


그림 9.5.2 2019년 고산(JGS) 지역의 강수성분 (a)농도, (b)조성.

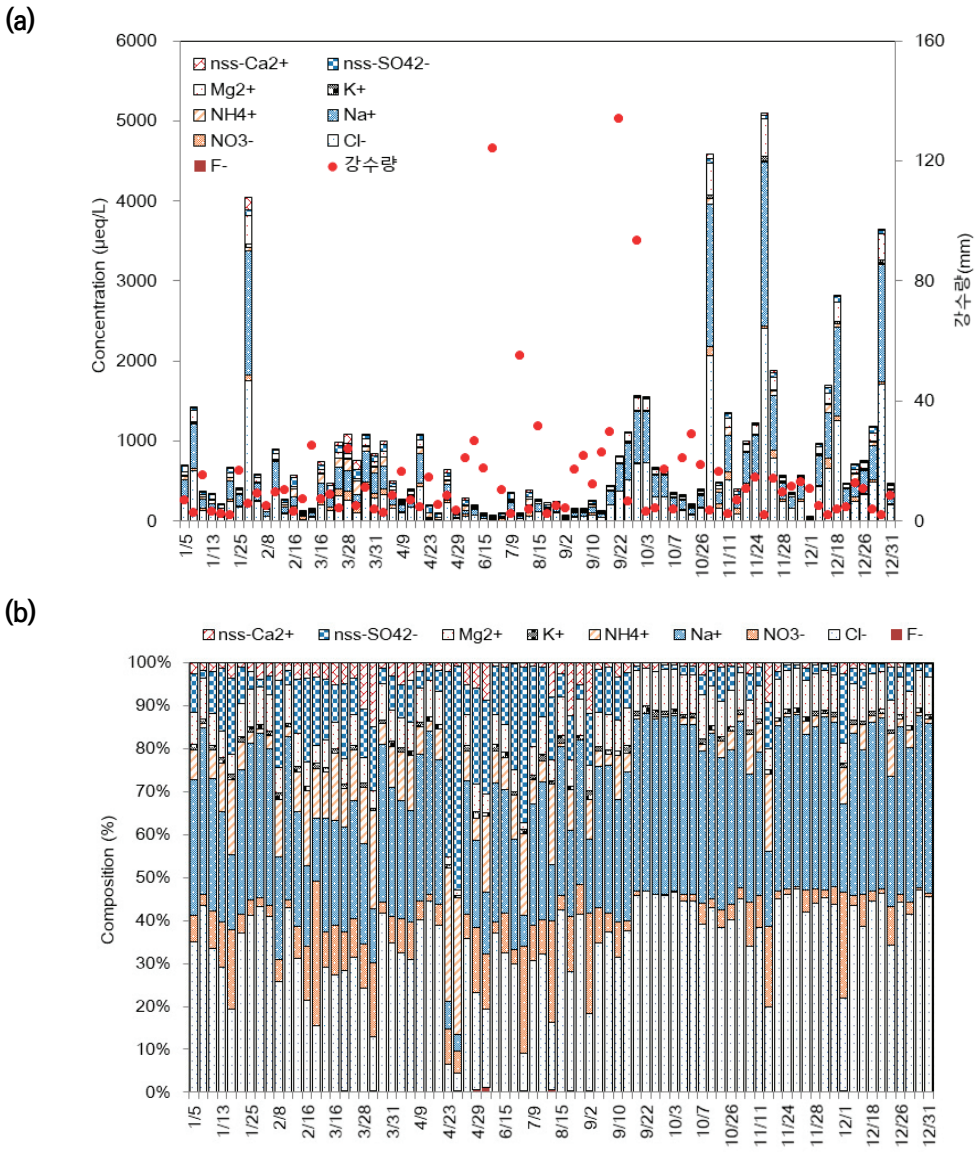


그림 9.5.3 2019년 울릉도(ULD) 지역의 강수성분 (a)농도, (b)조성.

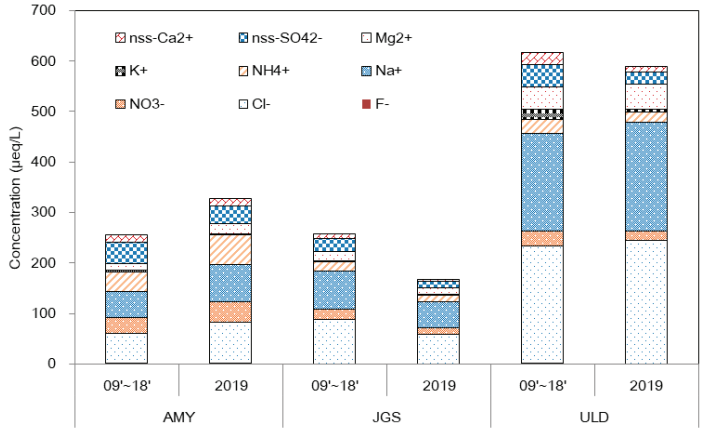
9.5.2 강수성분의 연도별 농도

표 9.5.1과 그림 9.5.4는 각각 최근 10년(2009~2018년) 평균값과 2019년의 평균값이며, 이때의 평균은 각각 채취된 강수량이 가중되어 계산되었다. 그림 3.7.7에서 보듯이 안면도, 고산, 울릉도의 모든 관측지점이 해안가에 위치하여 있으므로, 해염성분인 Na^+, Cl^-성분의 농도가 가장 높았다. 2019년도 안면도, 고산, 지역은 NH_4^+, 울릉도 지역은 Mg^{2+}성분이 해염성분인 Na^+, Cl^- 성분을 제외하고 높은 농도이다. 2019년도 안면도, 고산, 울릉도 지역 강수 nss-SO_4^{2-}성분의 부피가중평균농도는 각각 35.1, 12.8, 23.6 μeq/L이며, 이때의 조성은 각각 10.7%, 7.7%, 4.0%를 차지하였다. nss-SO_4^{2-}의 최근 10년(2009~2018년)의 안면도, 고산, 울릉도 세 관측지점의 부피가중평균농도는 각각 41.4, 24.0, 42.9 μeq/L이며, 이때의 조성은 각각 16.2%, 9.3%, 6.9%를 차지하였다. NH_4^+성분은 2019년과 최근 10년간의 부피가중평균농도는 각각 13.3~58.8, 17.5~39.9 μeq/L의 값을 보였고, 이때의 조성비 또한 각각 3.4%~18.0%, 4.3%~15.6%를 보였다. NO_3^-의 경우, 2019년과 최근 10년의 부피가중평균농도의 범위는 각각 11.3~40.0, 19.1~31.4 μeq/L의 값을 보였고, 이때의 조성비의 범위 또한 각각 3.1%~12.2%, 4.7%~12.3%를 보였다. 따라서 최근 10년의 평균농도와 비교한 결과 안면도, 고산, 울릉도지역에서 nss-SO_4^{2-} 농도가 감소하였고, 안면도 지역은 NH_4^+, NO_3^- 농도가 큰 폭으로 증가하였으나, 고산과 울릉도지역은 대체적으로 감소하는 결과를 보였다. nss-Ca^{2+}은 세 지역 모두 2019년에 최근 10년의 부피가중평균농도보다는 낮았다.

표 9.5.1 2019년 관측지점별 부피가중평균 이온농도(μeq/L)

요소 / 지점	F^-	Cl^-	NO_3^-	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	nss-SO_4^{2-}	nss-Ca^{2+}
안면도	1.1	82.1	40.0	74.1	58.8	2.5	19.0	35.1	14.4
고산	0.3	59.1	11.3	52.1	13.3	1.6	12.7	12.8	3.6
울릉도	0.4	243.5	18.3	215.9	19.9	6.6	50.0	23.6	11.4

(a)



(b)

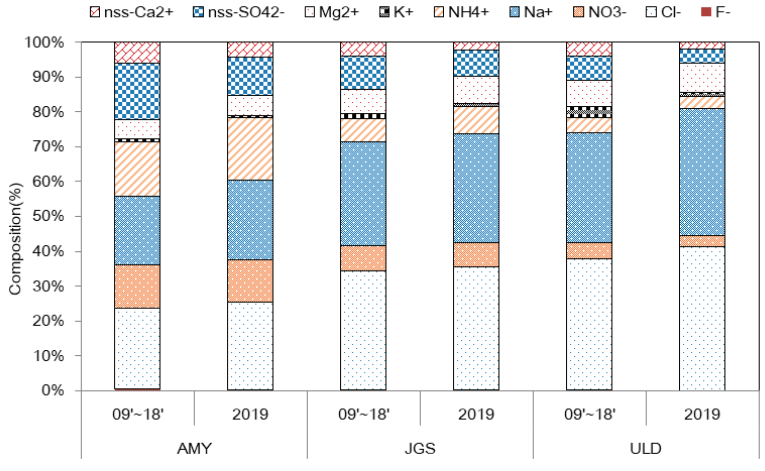


그림 9.5.4 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 지역의 강수성분 연도별 부피가중평균 (a)농도, (b) 조성.

9.5.3 강수성분의 계절별 농도

안면도, 고산, 울릉도에서 채취한 강수의 이온성분에 대한 계절별 평균농도는 그림 9.5.5~9.5.7과 같다. 여기서 강수이온성분의 계절별 평균농도는 최근 10년(2009~2018년) 평균한 값이다. 단 겨울철의 경우 지난해 12월과 당해년도 1, 2월의 자료를 평균하고, 당해년도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

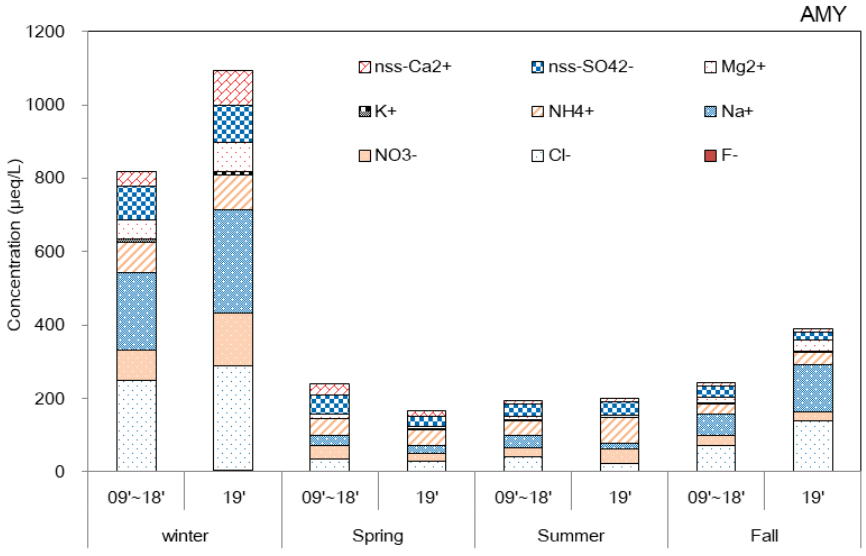
안면도 강수에서 최근 10년(2009~2018년)과 2019년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+ 성분 농도범위는 각각 20.0~100.6, 22.2~143.7, 25.6~94.8 μeq/L로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+ 성분들의 조성비는 최근 10년간 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 47.4%, 48.2%, 48.6%, 48.9%로, 여름, 가을철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타냈다. 그러나 반대로 2019년은 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 48.1%, 42.3%, 46.9%, 44.4%로 겨울철에 가장 높고, 봄철에 가장 낮은 경향을 보였다. 해염성분 Na^+, Cl^-, Mg^{2+}인 경우 부피가중평균농도합의 범위는 56.9~644.2 μeq/L이며, 이들의 조성비는 31.5%~46.0%의 범위를 보였다. 또한, nss-Ca^{2+}성분의 조성은 2.4%~13.1%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였고, 특히, 이는 황사의 영향으로 판단된다.

고산지역 강수 중 이차오염물질의 최근 10년(2009~2018년)과 2019년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+ 성분 농도범위는 각각 7.5~41.7, 4.8~34.0, 6.5~38.8 μeq/L로 분석되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 46.3%, 47.8%, 46.7%, 45.3%이며, 2019년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 46.4%, 46.0%, 49.3%, 43.8%로 최근 10년간의 자료는 봄철에 높고, 2019년은 여름철에 높게 나타났다. 해염성분 Na^+, Cl^-, Mg^{2+}인 경우 조성비는 41.1%~51.4%의 범위를 보였다. nss-Ca^{2+}성분의 조성은 0.9%~6.8%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였고, 특히, 이는 황사의 영향으로 판단된다.

마지막으로 울릉도지역 강수 중 이차오염물질의 최근 10년(2009~2018년)과 2019년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의 nss-SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+ 성분 농도범위는 각각 12.7~68.2, 9.1~50.7, 9.9~41.1 μeq/L로 분석되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 최근 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 44.9%, 42.8%, 40.0%, 42.1%이며, 2019년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 44.5%, 45.1%, 49.2%, 42.8%로 울릉도 지역의 최근 10년은 겨울철이 높고 반면에 2019년도는 여름철이 높은 조성비를 보였다. 반대로 최근 10년간은 여름철이 낮고, 2019년도 강수는 가을

철에 낮은 조성비를 나타낸 것으로 확인되었다. 해염성분 Na^{+}, Cl^{-}, Mg^{2+}인 경우 조성비는 44.4%~53.4%의 범위를 보였다. 또한, nss-Ca^{2+}성분의 조성은 1.0%~7.3%의 범위로 봄철에 높은 조성비를 보였고, 특히, 이는 황사의 영향으로 판단된다.

(a)



(b)

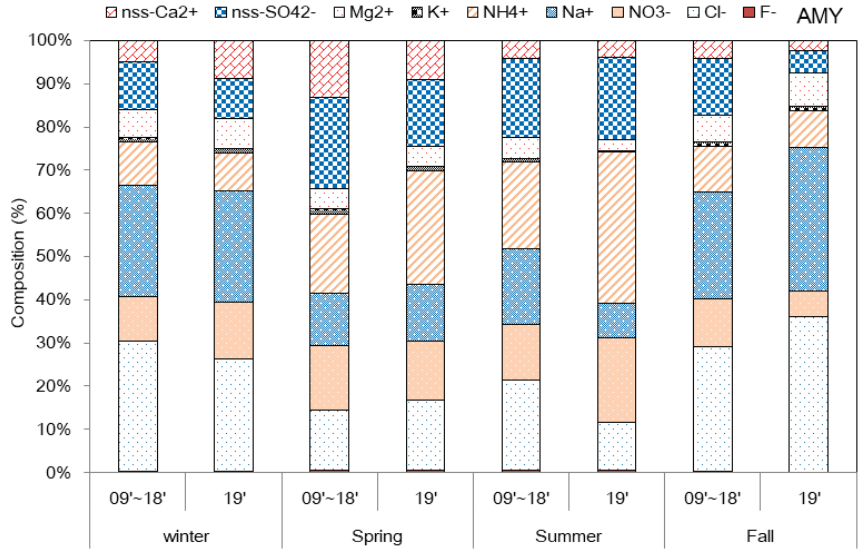
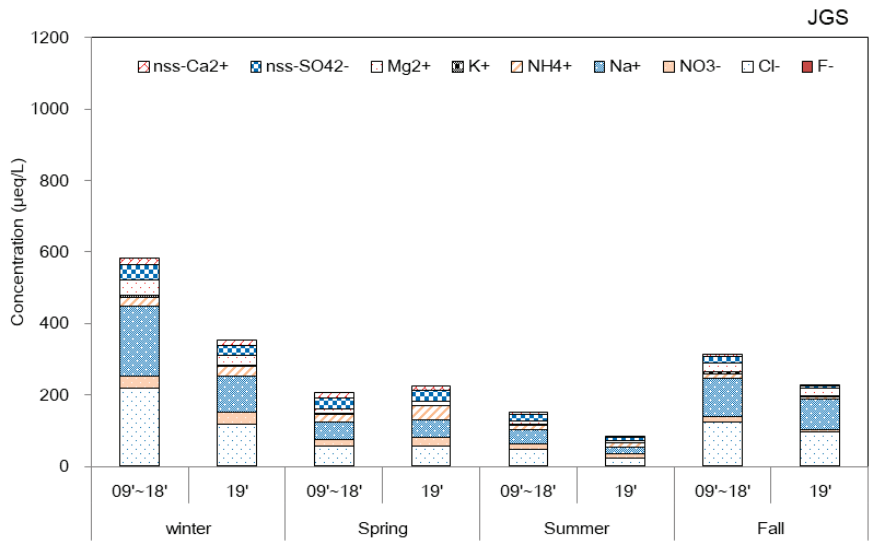


그림 9.5.5 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 안면도(AMY) 지역의 강수성분 계절별 부피가중평균 (a)농도, (b)조성.

(a)



(b)

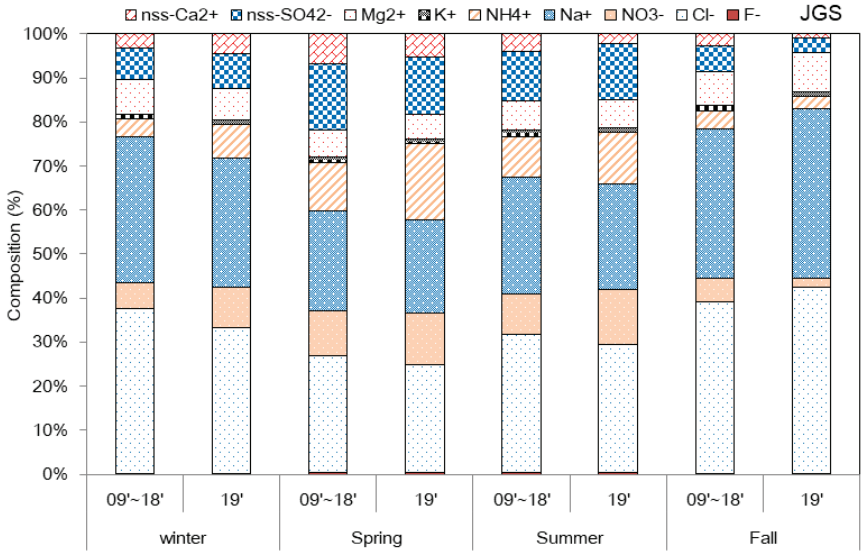


그림 9.5.6 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 고산(JGS) 지역의 강수성분 계절별 부피가중평균 (a)농도, (b)조성.

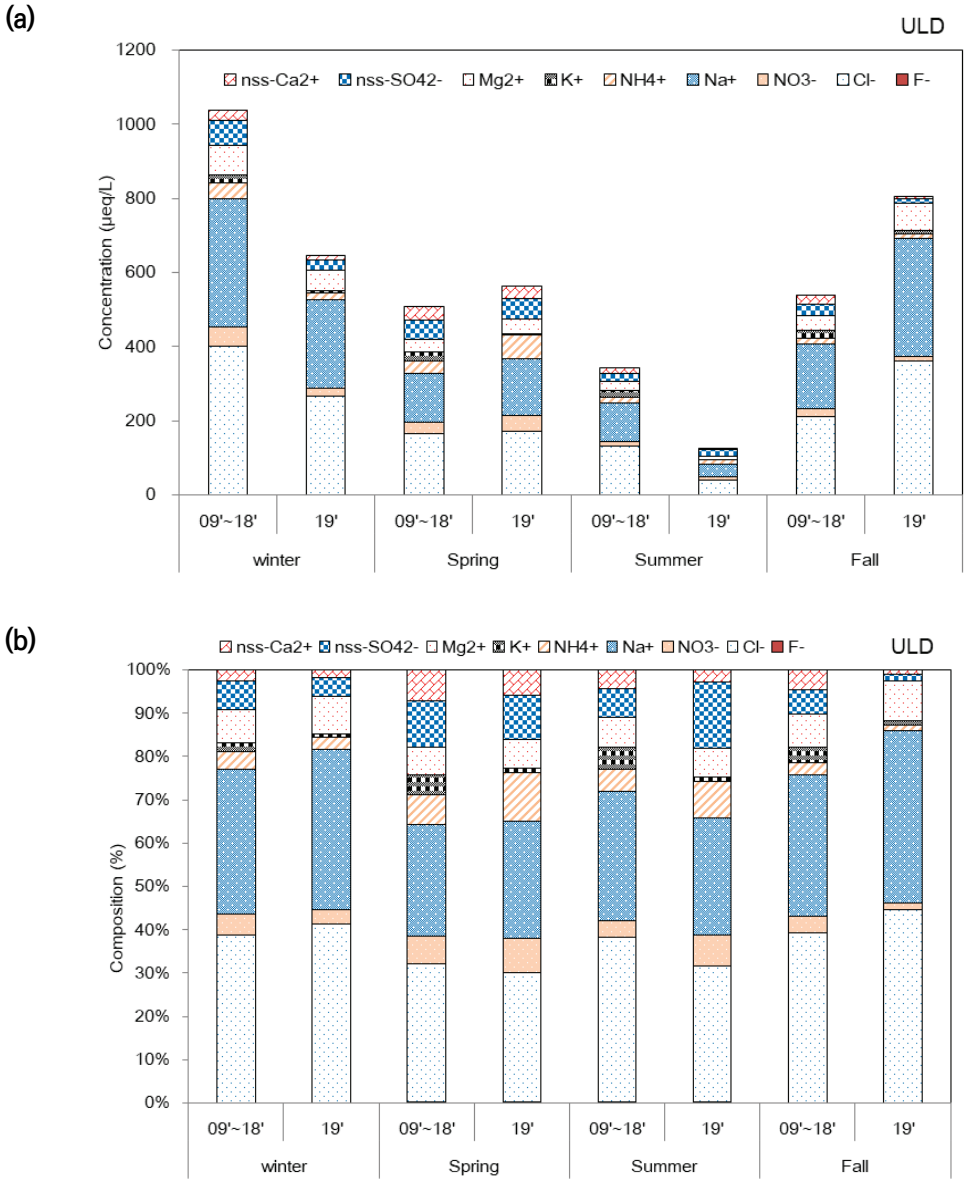


그림 9.5.7 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 울릉도(ULD) 지역의 강수성분 계절별 부피가중평균 (a)농도, (b)조성.

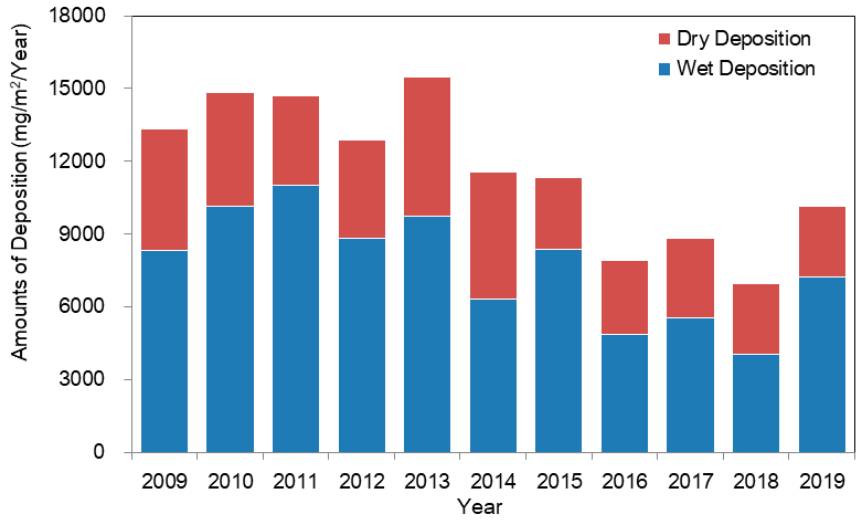
9.6 총대기침적

안면도에서 채취한 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 건성 및 습성침적량을 보면(그림 9.6.1), 2013년 이후 대체로 감소하나, 2019년도에 다시 소폭 증가하는 경향을 보였다. 2019년도의 전체 침적량은 10139.8 ㎎/㎡이며, 2018년보다 약 1.5배 정도 많은 침적량을 보였고, 이는 건성침적량은 크게 변화가 없으나 습성침적량에서의 차이 때문으로 판단된다. 또한, 2009년부터 2019년까지 건성침적량이 차지하는 비율은 약 25.1%~45.5%를 차지하였으며, 2011년이 건성침적량이 가장 적은 비율을 보였고, 2014년이 가장 높은 비율을 차지하였다. 또한, 습성침적량은 대부분 50% 이상의 비율을 차지하였다.

안면도에서 채취한 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 건성 및 습성의 계절별 침적량은 그림 9.6.2와 같다. 여기서 건성 및 습성의 계절별 평균농도는 최근 10년(2009~2018) 평균한 값이며, 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해년도 1, 2월의 데이터를 평균하였고, 당해년도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

최근 10년간 자료와 2019년 침적량 자료는 NO_3^-와 SO_4^{2-}, NH_4^+ 성분별 농도는 대체적으로 건성침적량보다 습성침적량이 더 높은 농도를 보였다. 그러나 Ca^{2+}인 경우 여름철을 제외하고는 습성보다는 건성침적량이 많은 결과를 보였고, 나머지 계절에는 비슷하거나 습성침적량이 많게 나타났다. 특히, 2019년 습성침적은 3, 5월의 적은 강수량(3.1.2 봄철 기상특성 참고)에 의해 봄철 침적량이 크게 줄었으며, 건성침적은 황사와 이동성고기압의 영향으로 봄철 토양성분인 Ca^{2+}와 NO_3^-, SO_4^{2-}성분의 조성비가 평년보다 증가하였다.

(a)



(b)

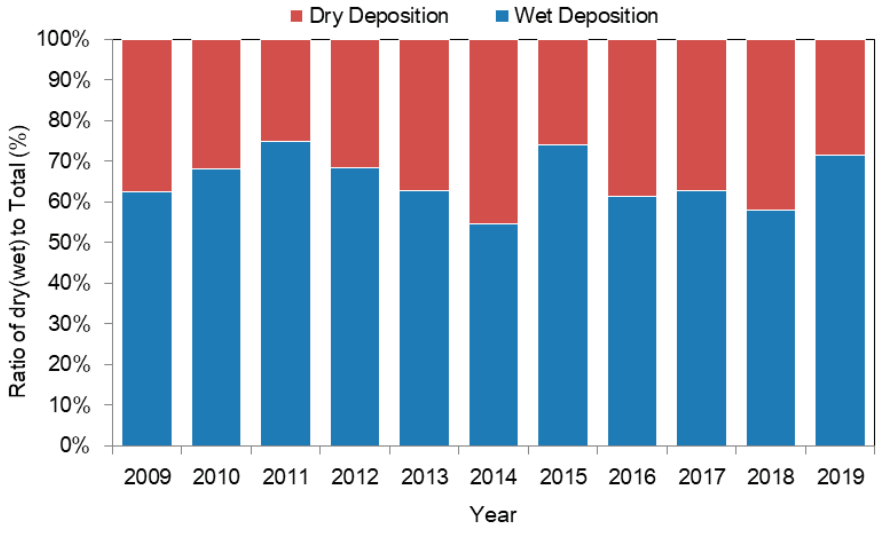
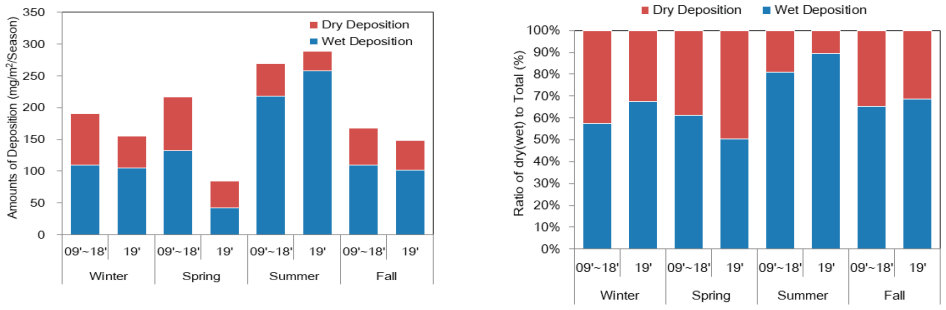
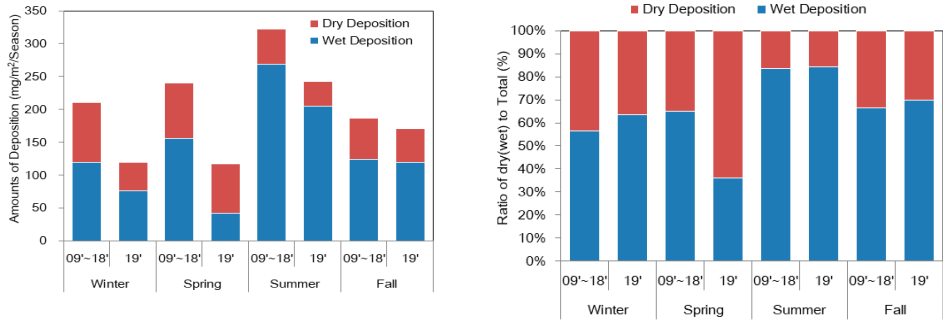


그림 9.6.1 안면도지역의 연도별 건성 및 습성 (a)침적량과 (b)침적량비율.

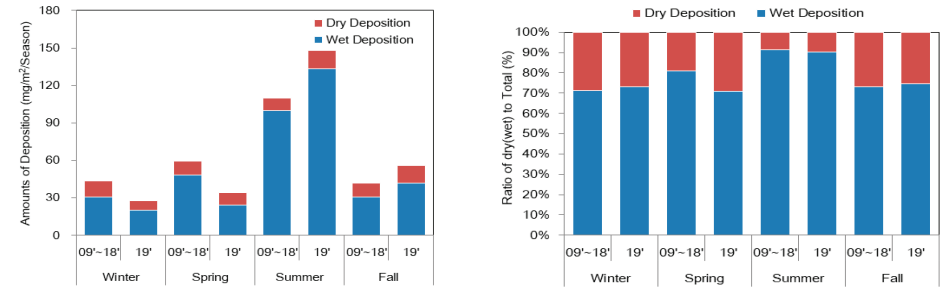
(a) NO_3^- (b) NO_3^-



(a) SO_4^{2-} (b) SO_4^{2-}



(a) NH_4^+ (b) NH_4^+



(a) Ca^{2+} (b) Ca^{2+}

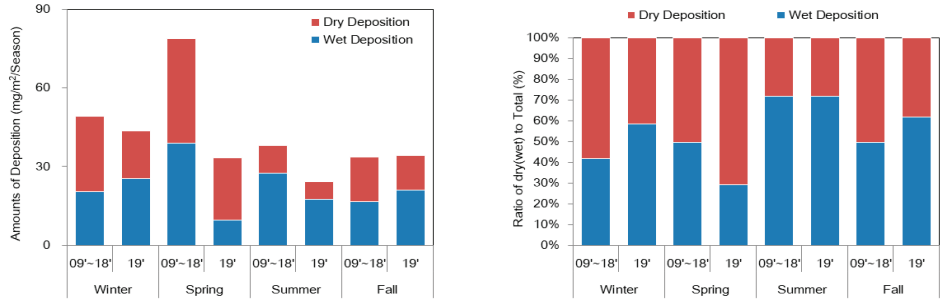


그림 9.6.2 안면도(AMY)지역의 계절별, 이온성분별 건성·습성 (a)침적량과 (b) 침적량비율.

9.7 2019년 강수성분의 발생원 분석

안면도, 고산, 울릉도 세 지역의 강수성분의 발생기원을 살펴보기 위하여 수용성 성분을 이용하여 주성분 분석(PCA, Principal component analysis)을 실시하였다. 주성분 분석은 통계프로그램(SPSS 18.0)을 이용하여 최적인자의 수를 고유값 1 이상으로 정의하였고, 베리맥스(Varimax) 회전법으로 산출하였다.

강수성분의 최근 10년(2009~2018년)과 2019년 자료를 가지고 지역별 주성분 분석을 하였고, 그림 9.7.1에 나타내었다. 안면도, 고산 최근 10년(2009~2018년)의 가장 영향을 많이 받는 발생원으로는 해염 및 생체연소가 약 42%이며, 그 다음으로 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 〉 생체연소 순으로 나타났다. 울릉도 최근 10년인 경우 발생원의 혼재된 영향이 없는 것으로 보인다.

2019년 안면도, 고산, 울릉도 지역의 강수성분의 발생원 분석 결과, 세 지역 모두 오염원의 혼재된 결과를 보였다. 특히 안면도 지역은 약 47.2% 정도가 자연적인 발생원과 인위적 발생원이 혼재되어 영향을 받은 것으로 분석되었다. 그다음으로는 황산암모늄과 질산암모늄, 토양 순으로 나타났다. 고산과 울릉도 지역은 황산암모늄과 질산암모늄과 토양성분이 혼재되거나 해염과 생체연소가 혼재되는 경향을 보였다. 그러나 고산과 울릉도 지역 발생원 차이는 토양성분에 대한 영향이 울릉도가 약 16.9%로 고산에 비해 약 3배 정도 높게 나온 것으로 확인되었다.

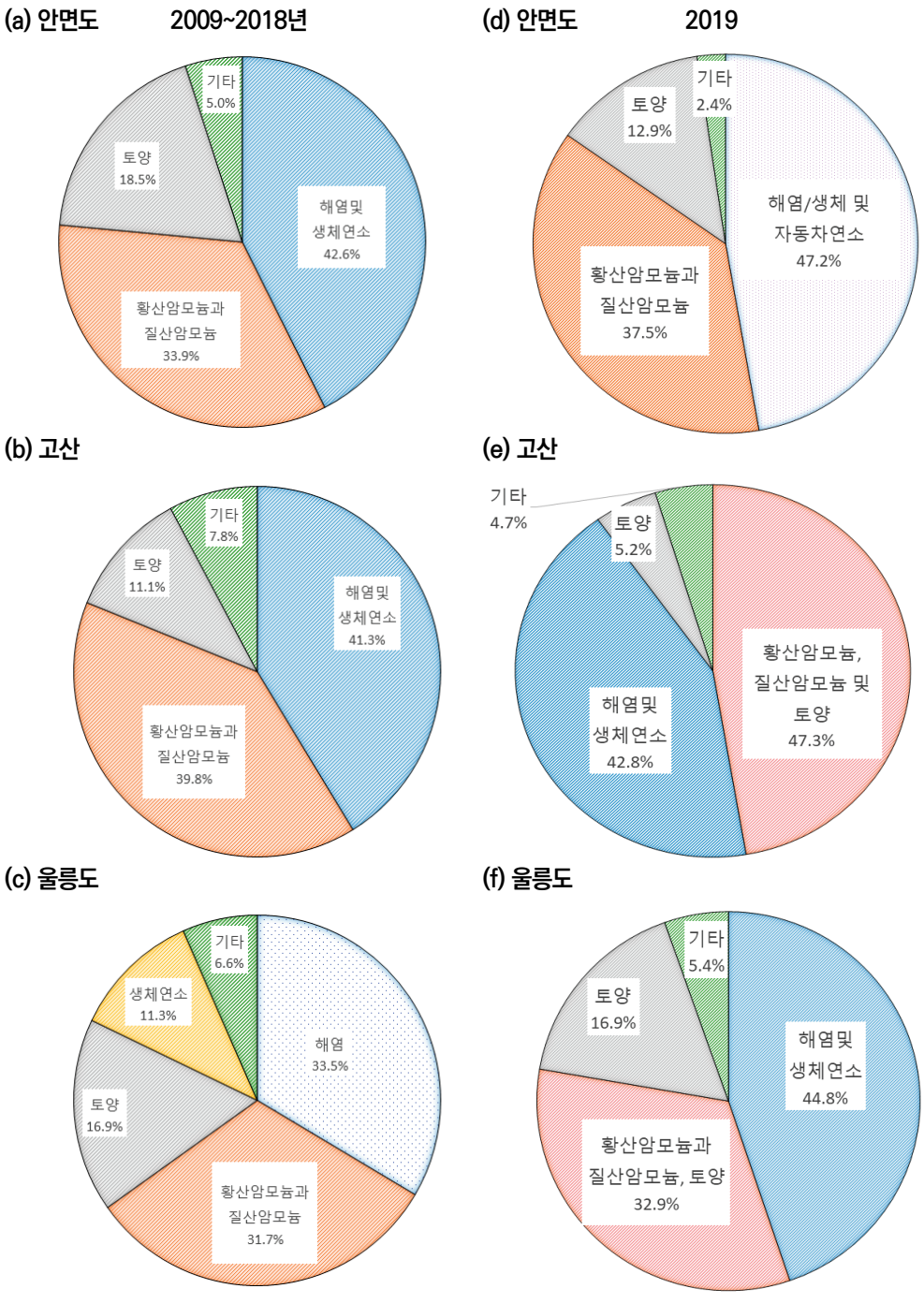


그림 9.7.1 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD)지역 (a~c)최근 10년(2009~2018년), (d~f) 2019년 강수성분의 발생원 분석 결과.

제1장 머리말

제2장 지구대기감시 현황

제3장 기상특성

제4장 온실가스 및 반응가스

제5장 에어로졸

제6장 대기복사

제7장 성층권 오존

제8장 자외선

제9장 총대기침적

제10장 기타



제10장

기 타



제10장 기타

10.1 수증기 농도 연직분포 및 특성 분석

수증기는 지표면에서 증발하여 대기로 유입되는 양이 크기 때문에 대류권에 가장 많은 양이 분포하고 있으며, 변동성이 매우 크고 기상현상과 밀접하게 연관되어 있다. 특히 적도 부근 열대지방의 수증기는 상승 기단을 타고 성층권으로 유입되는데, 대류권계면에서의 낮은 온도로 인해 수증기가 응축되어 결빙되기 때문에 성층권 이상의 고도에서는 대류권에 비해 극히 낮은 농도를 보이게 된다. 이렇게 낮은 농도를 보이는 수증기는 수증기만의 특성으로 인해 기후변화의 중요한 관측 자료로 활용할 수 있는데, 그 이유는 다음과 같다.

수증기는 성층권에서 수 개월간 머무를 수 있는 긴 잔류시간을 갖고 있다. 이 특성은 대기의 순환을 추적할 수 있는 추적 표지로 사용할 수 있음을 의미한다. 예를 들어 적도 지역 대류권에서 유입된 성층권의 수증기는 대류권계면 온도에 의해 유입량이 결정되며, 유입된 수증기의 이동은 상승기단의 운동 특성을 보여준다. 수증기의 이동을 추적하여 기단의 상승 속도 및 기단의 이동 방향을 추적할 수 있다. 또한, 적도지역에서 중·고위도 지역으로 공기가 이동하는 브루어-돕슨(Brewer-Dobson) 순환과 중간권에서 여름철 극지방에서 겨울철 극지방으로 기단이 이동하는 자오면순환도 수증기의 농도 관측을 통해 추적할 수 있다.

수증기는 대기의 역학적 운동뿐만 아니라 화학적으로도 기후변화와 밀접한 연관을 갖고 있다. 성층권 이상 영역에서의 수증기 농도는 성층권계면에서 최댓값을 보이는데 메탄의 산화 반응으로 인해 발생한 수증기의 영향이며, 그 이상의 고도에서는 광분해반응으로 다시 감소하는 추세를 보인다. 즉, 이산화탄소보다 강한 온실효과를 갖는 메탄의 화학 반응의 직접적인 생성물로서 대기의 혼합이 어려운 중층대기에서 메탄의 양을 가늠할 수 있는 요소로 활용할 수 있다. 또한 오존층 감소에 직접적인 영향을 주는 OH 라디칼을 생성하는 화학반응의 생성물로서 역할을 담당하며, 극성층권구름(Polar Stratospheric clouds) 또한 수증기가 주요 생성 원인이기 때문에 오존의 농도 증감과 연관되어 있다.

또한, 지구 온난화와 관련해서 대류권의 수증기는 적외선을 흡수하여 기온을 상승시키는 역할을 하는 반면, 성층권의 수증기는 원적외선, 중적외선을 방출하여 기온을 하강시키는 역할을 한다. 이렇게 기단의 운동과 화학반응, 대기 복사와 관련된 중층대기 수증기 관측 자료는 대규모 대기

순환에 대한 정보를 제공하고, 기후모델 정확성 향상을 기대할 수 있다. 또한, 우리나라에서의 수증기 연직분포 관측 자료는 성층권 이상 중층대기 운동을 입체적으로 보여주기 때문에 이상한파 전/후의 기단 이동을 고도별로 추적할 수 있으며, 농도 증감을 통해 우리나라 상공 대기의 화학적 특성 변화와 기온 변화를 추적할 수 있는 정보를 제공한다.

숙명여자대학교 지구환경연구소에서는 서울 상공의 성층권에서 중간권 영역의 수증기 농도 연직분포를 24시간 연속 관측하고 있다(그림 10.1.1). 22 GHz 마이크로파 수신기인 SWARA (Seoul WAter vapor RAdiometer)를 통해 관측한 수증기 농도는 일평균 스펙트럼으로부터 관측되었으며 월별 자료 표출 일수는 표 10.1.1과 같다.



그림 10.1.1 숙명여대 수증기 연직분포 관측용 마이크로파 수신기.

표 10.1.1. 2019년 수증기 농도 월별 자료 표출일 수

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
표출일 수	29	28	30	30	29	30	28	22	23	30	29	30

2019년 8~9월은 잦은 강수의 영향으로 스펙트럼의 잡음 비율이 증가하여 자료의 표출 일수가 작으며 다른 달의 경우 28일 이상의 월 자료 표출일 수를 보이고 있다. 그림 10.1.2에서는 2019년 수증기 연직분포와 2006년부터 2019년까지의 연직분포를 나타내었으며, 계절에 따른 수증기의 농도 변화를 볼 수 있다.

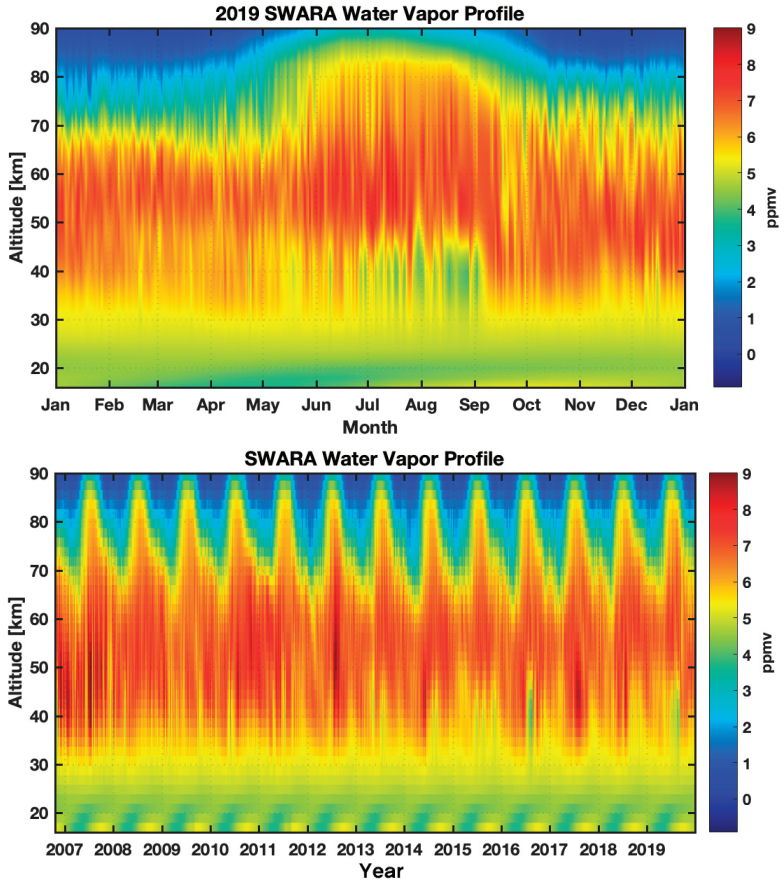


그림 10.1.2 2019년 수증기 연직분포 관측값(위)과 2006~2019년 수증기 연직분포 관측값(아래). 관측지: 숙명여자대학교

우리나라 상공의 중층대기 중 수증기 농도는 ppmv (10^{-6} 수준의 부피비) 수준으로 존재하며, 지표 부근에 비해서는 매우 건조한 수준이라 할 수 있다. 그러나 성층권 오존층의 고도별 농도가 10 ppmv 이하로 존재하는 것과 비교하면 수증기의 존재량 또한 기후 관점에서 중요하게 다뤄져야 한다. 우리나라 수증기의 연중 분포 변화를 보면, 여름철인 6월과 9월 사이에 70 km 이상의 중간권 영역에서 급격히 증가한 것을 볼 수 있다. 이 영역에서의 수증기 농도 증가는 지구 대기 순환 중 중간권 영역에서 발생하는 자오면순환의 영향을 보여준다. 6월부터 9월이 여름철에 해당하는 북극 지역의 중간권에서는 기단이 상승한 후 남극지역으로 이동하여 하강하는 운동을 보이는데, 북반구 중위도에 해당하는 우리나라는 이 대기순환의 영향으로 수증기가 중간권까지 상승하는 결과를 보여준다. 이 순환은 계절적 영향이 크기 때문에 수증기 관측 이래 매년 같은 증가 경향을 보여주고 있다. 그러나 성층권 영역인 40 km 이하에서는 2019년에서는 여름철에 농도가

감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 다른 해의 변동 현황과 비교하면 변동 시기의 차이가 있어 이 영역에 대해서 계절적 특성을 뚜렷하게 정의하기는 어렵다. 25 km 이하의 영역에서는 성층권으로 유입된 기단의 상승운동을 확인할 수 있다.

2015년부터 2019년까지의 수증기 농도 변동을 20~80 km까지 고도별로 살펴보면 20~30 km 구간과 60~70 km, 70~80 km 구간은 뚜렷한 계절적 특성을 보이나, 중간 영역인 30~60 km 구간은 하층과 상층의 변동성이 혼재되어 있는 양상으로 변하여 연도별로 다른 변동성을 보이고 있다(그림 10.1.3).

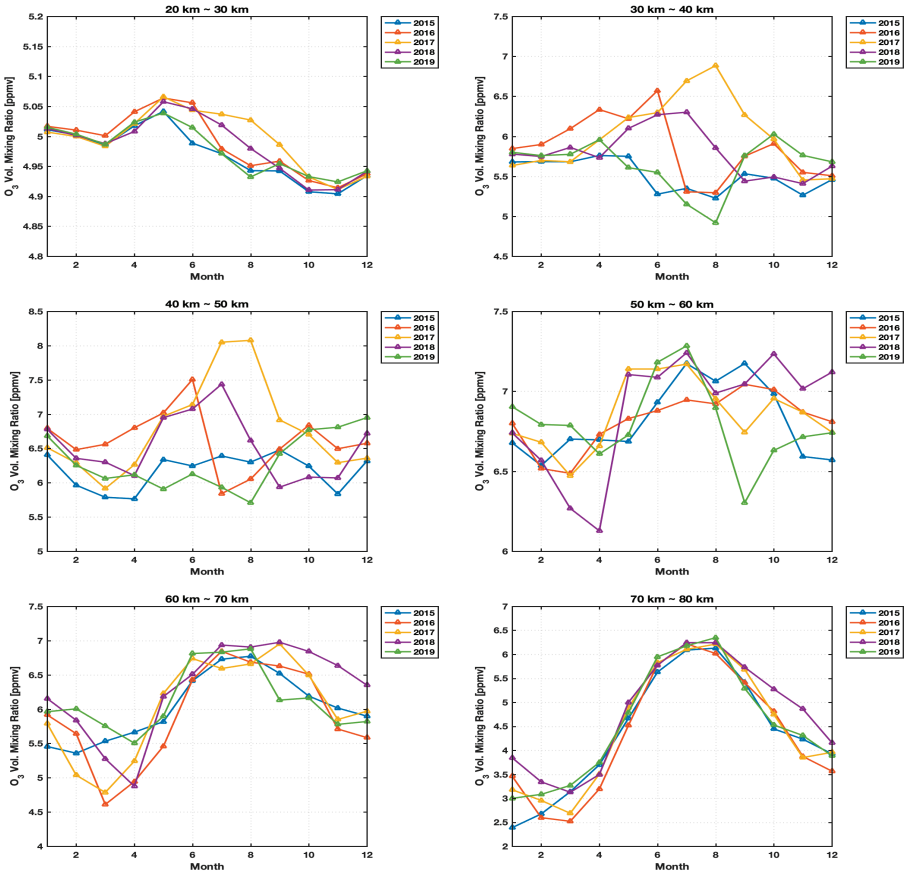


그림 10.1.3 2015~2019년 서울 상공 수증기의 20~80 km 까지의 고도별 월별 변동.

성층권~중간권 영역의 분자에서 발산된 마이크로파 영역의 전파는 지표면까지 전달되는 과정에서 대류권의 높은 습도와 기온으로 인해 전파 크기가 상쇄되는 영향을 받는다. 이 상쇄되는 비율을 보정하기 위해 광학깊이라는 변수 항을 20분마다 측정하는데, 이 항의 측정을 통해 대류권

으로 인한 가리움의 크기를 보정할 수 있다. 광학깊이 τ는 8월에 연중 최곳값이 관측되며, 광학깊이가 0.5인 경우 대류권의 가리움 영향으로 60%의 신호만 지상으로 전달되는 것을 의미한다(그림 10.1.4). 반면 겨울철의 경우 광학깊이가 0.02까지 낮아져 98%의 높은 투과율을 보여 최적화된 관측 환경을 보이며, 대류권의 총 습도량과 기온 분포에 대한 통합적 정보를 파악할 수 있다.

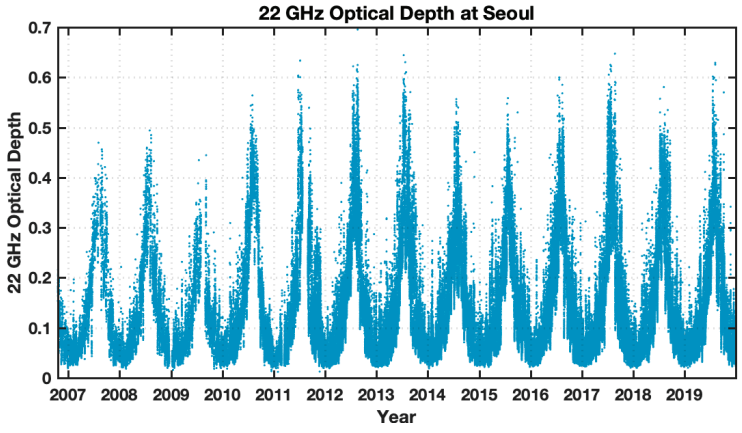


그림 10.1.4 2006~2019년 22 GHz 대류권 광학깊이 관측값.

앞서 언급했다시피 수증기의 농도는 대기의 순환의 영향을 추적할 수 있는 수단임과 동시에 오존층과 메탄의 화학반응, 그리고 온실효과와 관련 있는 복사 물질로서 역할을 담당한다. 기후변화로 인해 지구의 기온이 변동되고 대기 중의 물질 존재량이 변화하는 현 시점에서 수증기의 장기 관측 자료를 축적하여 대기 변동을 빠르고 정확하게 탐지할 수 있는 기반으로 활용 가능하다.

10.2 라돈 농도 및 특성 분석

대기 중에 존재하는 방사성 물질로는 ^{222}Rn, ^{85}Kr, ^{210}Pb, ^{7}Be 등이 주요 관심 대상이며, WMO/GAW에서는 이 4 가지 성분들은 관측요소에 포함시켜 관리하도록 권장하고 있다(WMO/GAW, 2001). 이 중에서도 라돈(^{222}Rn)은 인체 피폭 방사선량의 50% 이상을 차지하는 대표적인 자연방사능물질이다. 라돈은 흡연 다음으로 위험한 폐암 유발 물질로 평가되고 있고, WHO에서는 폐암환자 중 3%~14%가 라돈에 기인한 것으로 추정하고 있다. 따라서 대기 중의 자연방사능 물질 관리를 위해서는 실내는 물론 실외 라돈농도를 상시 지속적으로 측정할 필요가 있다(Chambers et al., 2019).

자연계에서 가장 널리 분포하는 라돈은 자연방사성 물질로 암석이나 토양에서 방출되고 있다. 라돈은 반응성이 낮아서 화학적으로는 안정하지만 방사선을 방출하면서 붕괴되기 때문에 물리적으로는 불안정한 특성을 보인다. 라돈의 주요 동위원소는 라돈(^{222}Rn), 토론(^{220}Rn), 악티논(^{219}Rn) 등이 있으며 이 중 ^{222}Rn에 의한 피해가 가장 크게 나타나고 있다. 라돈은 우라늄(^{238}U)의 붕괴 과정에서 생겨난 라듐(^{226}Ra)의 α-붕괴로 생성되며 상대적으로 긴 반감기(3.82일)를 갖는다(Whittlestone and Zahorowski, 1998). 그리고 다른 동위원소들에 비해 가장 널리 분포하는 대표적인 자연방사능 물질로 4번의 α-붕괴와 4번의 β-붕괴를 거쳐 최종적으로 ^{206}Pb으로 안정화된다(Moon et al., 2009; WMO/GAW, 2004). 라돈에 의한 피폭은 자체보다는 주로 이들 라돈 자핵종인 ^{218}Po, ^{214}Po의 α-붕괴에 의해 발생하며, 방사선에 장기간 노출 시 폐 조직이 손상되어 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다.

대기 중의 라돈농도 수준을 파악하기 위해서는 청정지역에서 라돈의 배경농도를 관측하는 것이 바람직하다. 특히 아시아대륙의 편서풍 풍하 측에 위치한 한반도의 경우 대륙에서 발생하여 기류를 타고 장거리 이동하는 여러 대기오염물질과 함께 대기 라돈농도 변화 역시 지속적으로 감시할 필요가 있다. 또 ^{222}Rn은 반감기는 몇몇 주요 대기오염물질(NO_x, SO_2, CO, O_3 등)과 비슷한 수명을 나타내며, 습도, 온도, 일사량에 무관하게 안정한 성질을 보인다. 그리고 화학적으로 불활성이고 물에 용해되지 않는 성질 때문에 에어로졸이나 가스상 오염물질의 장거리 수송 특성을 파악하기 위한 지표물질로 이용되고 있다.

호주핵과학기술기구(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)에서는 오래전부터 세계 30여 지점의 주요 WMO/GAW 관측소를 중심으로 라돈검출기를 설치하여 대기 라돈농도 분포를 지속적으로 모니터링하고 있다. 그리고 이를 대기 라돈농도 변화는 물론 이를 주요 온실가스 수송을 관측하기 위한 추적자(tracer)로 활용하기 위한 연구를

수행하고 있다. 제주도 고산관측소에서는 ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 고감도 라돈 검출기(High Sensitivity Radon Detector)를 설치하여 2001년 초부터 현재까지 대기 라돈 농도를 관측해오고 있으며 2019년말 현재 총 19년간의 연속 측정자료를 확보하고 있다.

10.2.1 라돈 모니터링

제주도 고산관측소(33.17°N, 126.10°E) 현장에 고감도 라돈검출기를 설치하여 대기 중의 라돈농도를 2019년 1월부터 12월까지 30분 간격으로 실시간 측정하였다. 라돈검출기는 배경농도 측정을 위한 목적으로 호주 ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 High Sensitivity Radon Detector (모델 D1500) 시스템이다(그림 10.2.1). 이 검출기는 필터를 거친 후 자연확산 또는 동력펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈과 셀 내부에서 생성된 라돈자손으로부터 방출된 알파입자를 측정하는 방식이다. 알파입자는 ZnS(Ag)와 반응하여 섬광을 발생하며 이를 광전증배관으로 검출, 계수하였다. 라돈 모니터링을 위해 사용한 라돈검출기의 감도는 0.28~0.29 counts·sec^{-1}/Bq/m^3이며, 검출한계(low limit of detection)는 25 mBq/m^3이다. 대기 농도 측정을 위한 공기 유입관은 50 mm HDPE 파이프를 사용하여 지상 10 m 높이로 설치하였다. 공기의 유속은 대략 ~60 L/min이 되도록 유지하였다. 라돈 농도 데이터는 Radon Detector System에 내장된 Campbell Scientific사의 모델 CR800 data logger를 사용하여 30분 간격으로 저장하였다. 그리고 data logger에 저장한 데이터를 컴퓨터로 전송하여 연속적으로 저장하였다.

라돈 관측 데이터를 보정하기 위한 검출기의 기기 검정(calibration)은 월 1회 주기로 매회 5시간 동안 실시하였다. 검정용 ^{222}Rn standard source는 18.5±4% kBq의 ^{226}Ra source (Pylon Electronic Inc., 모델 RN-2000A, Canada)를 사용하였다. 또한 검출기의 배경(background) 값은 대략 3개월 주기로 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기의 지시수치를 24시간 동안 측정하였다. 이 때 배경값은 검출기의 2차 필터에 포집된 ^{210}Pb(반감기 22.3년)의 양에 따라 시간이 경과할수록 서서히 상승하는 경향을 보였다. 그러나 2019년의 경우, 12월 10일에 ANSTO에서 엔지니어가 현장을 방문하여 detector head를 교체하였고 이후 배경값이 전년도에 비해 크게 감소하였다.

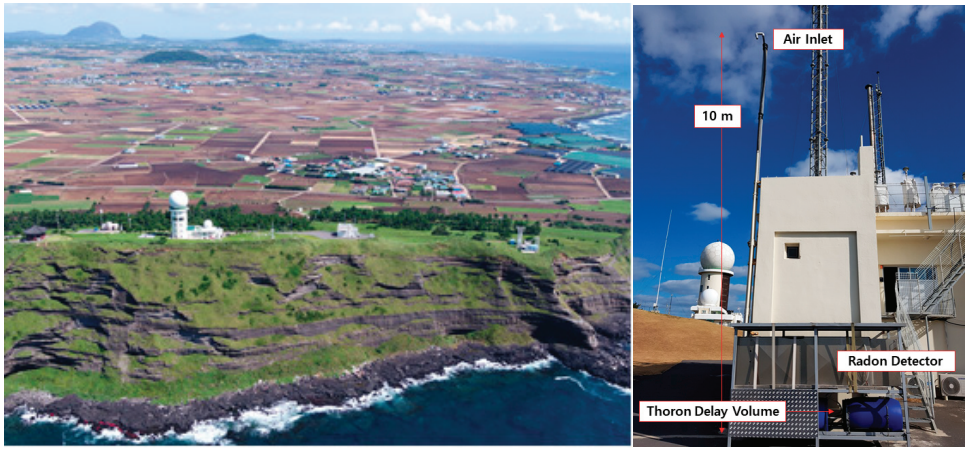


그림 10.2.1 제주도 고산관측소 라돈검출기(ANSTO, model D1500).

10.2.2 라돈 배경농도 모니터링 결과

국내 대표 배경지역인 제주도 고산관측소에 고감도 라돈검출기를 설치하여 라돈 농도를 실시간으로 모니터링하였다. 그림 10.2.2은 2019년의 라돈농도의 시계열변화를 나타낸 것으로 라돈의 시간별 농도변화를 나타낸 결과이다. 2019년 측정 결과 중 2월 25일~4월 8일(43일), 9월 19일~11월 21일(64일)의 데이터는 누락되었다. 이 시기에 Data Logger 고장이 발생하였고, 이를 호주 ANSTO에서 수리하는 과정에서 장기간 결측이 발생하였다. 이러한 장기 결측 결과로 2019년의 경우 2001~2018년 결과와는 다소 다른 농도를 나타내었다. 2019년 고산관측소의 라돈농도는 시간평균 2580±1402 mBq/m^3로 이를 일평균농도로 환산한 결과는 2592±1092 mBq/m^3이었다. 이 결과는 2001~2018년의 평균농도 2655±1104 mBq/m^3에 비해 다소 낮은 결과이다. 그러나 이 차이는 장기간의 데이터 결측에 기인한 것으로 추정된다.

라돈의 계절별 농도는 겨울(3246 mBq/m^3) 〉 가을(2839 mBq/m^3) 〉 여름 (2218 mBq/m^3) 〉 봄(2209 mBq/m^3) 순으로 높았다. 일반적으로 북서계열 풍향에 의해 기류가 대륙에서 유입되는 겨울, 가을에 라돈 농도가 높고, 반대로 기류가 남동풍에 의해 해양으로부터 유입되는 여름철에 농도가 가장 낮은 경향을 보인다. 그러나 2019년에는 이러한 일반적인 추세와 달리 봄과 여름에 비슷한 농도를 보였다. 이는 3월 한달 동안 데이터가 결측되어 봄철 데이터의 대표성리 결여된 원인으로 추정된다. 월별로는 11월 〉 12월 〉 2월 〉 1월 〉 4월 〉 8월 〉 6월 〉 9월 〉 5월 〉 7월 순으로 농도가 가장 높은 11월(3807 mBq/m^3)과 낮은 7월(1804 mBq/m^3)에 약 2배 정도의 편차를 보였다.

일간 농도변화를 비교해 본 결과, 대체적으로 하루 중에는 야간이 낮 시간에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그리고 오전 5시 전후에 2930 mBq/m^3로 가장 높고, 오후 2시 경에 2092 mBq/m^3로 낮은 농도를 보였다. 이를 계절별로 비교해 본 결과, 봄, 여름, 가을철에는 오전 7~8시 경에 높은 농도를 보이나 겨울철은 자정 전후에 높은 농도를 보여 겨울철에 다소 다른 시계열 변동 특성을 나타내었다.

이러한 국내 배경지역의 농도를 외국의 타 배경지역과 비교해 보면, 홍콩의 Hok Tsui와 이탈리아의 L'Aquila지역 보다는 훨씬 낮으나 하와이 Mauna Loa보다는 대략 24배 정도 더 높고, 일본의 Sado Island와는 서로 비슷한 수준을 보인 것으로 확인되었다(Chambers et al., 2013, 2009; Zahorowski et al., 2005, Pitari et al., 2014).

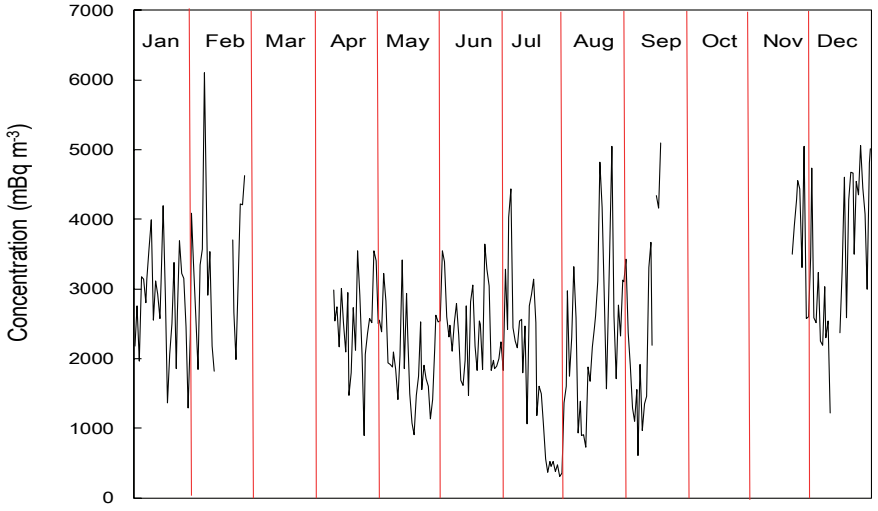


그림 10.2.2 2019년 고산관측소의 라돈농도 시계열 변화.

또한 고산관측소의 2019년 라돈농도를 계절별로 구분하여 그림 10.2.3에 비교하였다. 그림에서 막대그래프는 시간별 라돈농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 중앙값(median)과 90 분위수(90th percentile), 10 분위수(10th percentile) 농도를 나타낸 것이다. 그림 3.3의 결과를 보면 계절별 평균농도는 봄에 2209 mBq/m^3, 여름 2218 mBq/m^3, 가을 2839 mBq/m^3, 겨울 3246 mBq/m^3로 4계절 중에서는 겨을철에 가장 높고, 다음으로 가을, 여름, 봄 순으로 높은 경향을 보였다. 이때 여름철과 봄철의 라돈 농도가 비슷한 값을 나타낸 것은 예년과는 아주 다른 현상이며, Data Logger 고장으로 3월을 중심으로 봄철에 43일 동안 데이터가 누락되었기 때문에 이에 기인하는 것으로 보인다.

농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수를 각 계절별로 분류하여 비교해 본 결과, 90 분위수와 10 분위수에서 모두 겨울철 높은 농도 값으로 평균농도와 동일한 경향을 보였다. 이처럼 계절별 비교에서 겨울, 가을에 라돈농도가 높은 것은 이 시기에 북서계열 풍향이 주류를 이루고 있고, 이때 대륙으로부터 대기가 유입되었기 때문으로 추정된다. 반면에 여름에 훨씬 낮은 농도를 나타내는 것은 이 시기에 주로 남동 계절풍의 영향을 받아 해양으로부터 공기가 유입되었기 때문인 것으로 추정된다.

대기 혼합고의 높이(mixing depth)는 대기오염물질의 누적, 확산, 희석에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1985). 이러한 대기 혼합고를 계절별로 비교해 보면, 대체적으로 가을과 겨울에는 기온이 낮아서 혼합고 높이가 낮아지는 반면, 봄과 여름에는 대기 혼합고의 높이가 상대적으로 높은 경향을 보이고 있다. 대기 라돈농도 역시 계절별로 이러한 혼합고의 영향을 받고 있는 것으로 보이며, 혼합고 높이에 반비례하여 겨울과 가을에는 높은 농도를 유지하고, 봄과 여름에는 상대적으로 더 낮은 농도를 유지하는 것으로 판단된다(Kim et al., 2007).

2019년의 라돈농도를 월별로 비교하였고 그 결과를 그림 10.2.4에 나타내었다. 그림에서 막대그래프로 나타낸 농도는 시간별 농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 각각 중앙값, 90 분위수, 10 분위수 농도를 나타낸 것이다. 이러한 월별 비교에서 라돈농도는 11월 〉 12월 〉 2월 〉 1월 〉 4월 〉 8월 〉 6월 〉 9월 〉 5월 〉 7월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 11월에 3807 mBq/m^3, 가장 낮은 7월에 1804 mBq/m^3로 월별로는 거의 2배 정도의 편차를 보이는 것으로 확인되었다. 또 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수 농도를 월별로 비교해 본 결과, 결측된 3월과 10월을 제외한 나머지 월에서는 중앙값과 90 분위수, 10 분위수 농도가 월평균 농도와 비슷한 변화추세를 보였다.

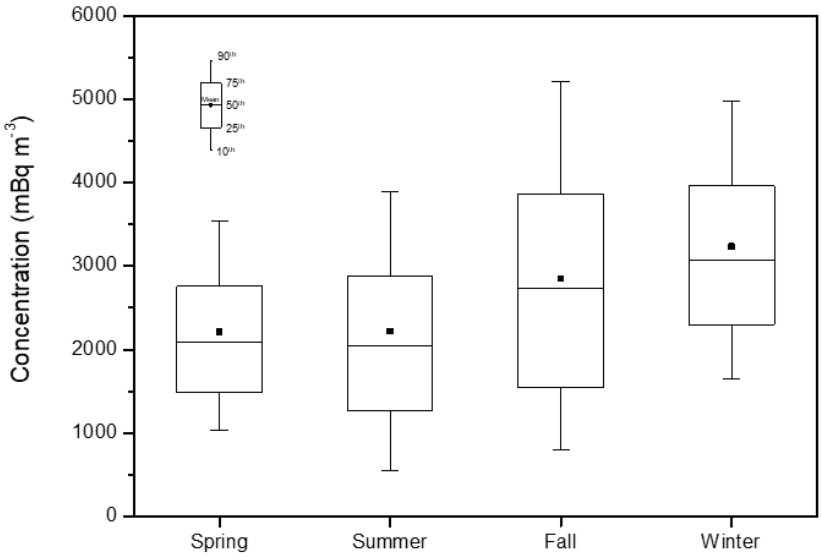


그림 10.2.3 고산관측소의 계절별 라돈농도 비교.

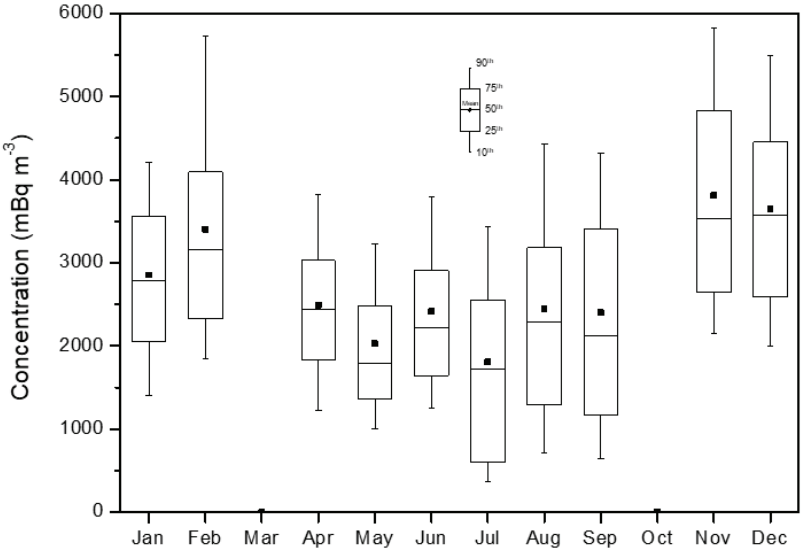


그림 10.2.4 고산관측소의 월별 라돈농도 비교.

라돈농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 비교하였고 그 결과를 그림 10.2.5에 나타내었다. 일간 변화를 비교한 결과에서 라돈농도는 오전 5시에 2930 mBq/m^3로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 2시경에 2092 mBq/m^3로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 대체적으로 야간에 더 높고 주간에 낮은 경향을 보였으며, 일간 변화는 아침부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하고 다시 저녁시간에 상승하여 밤에는 점차로 상승하는 추세를 보였다 (Omori et al., 2009). 이러한 경향은 대기의 혼합고의 변화에 따라 영향을 받기 때문인 것으로 추정된다. 혼합고 높이는 날씨가 맑을 때에는 늦은 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 가까이에 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. 이처럼 라돈의 일간 농도는 월별, 계절별 농도와 마찬가지로 혼합고의 확장, 축소에 따라 라돈의 확산과 농집에 영향을 미치고 이로 인해 농도가 변화하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

계절별로는 겨울철에 라돈의 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않지만 여름에는 겨울에 비해 훨씬 더 큰 차이를 보이고 있다(그림 10.2.6). 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 보임을 알 수 있다(Chambers et al., 2016).

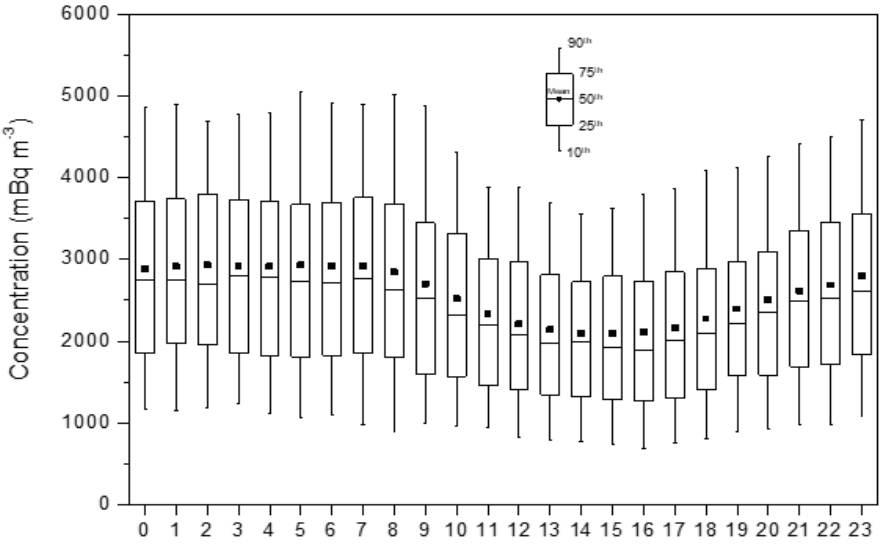


그림 10.2.5 고산관측소의 시간별 라돈농도 비교.

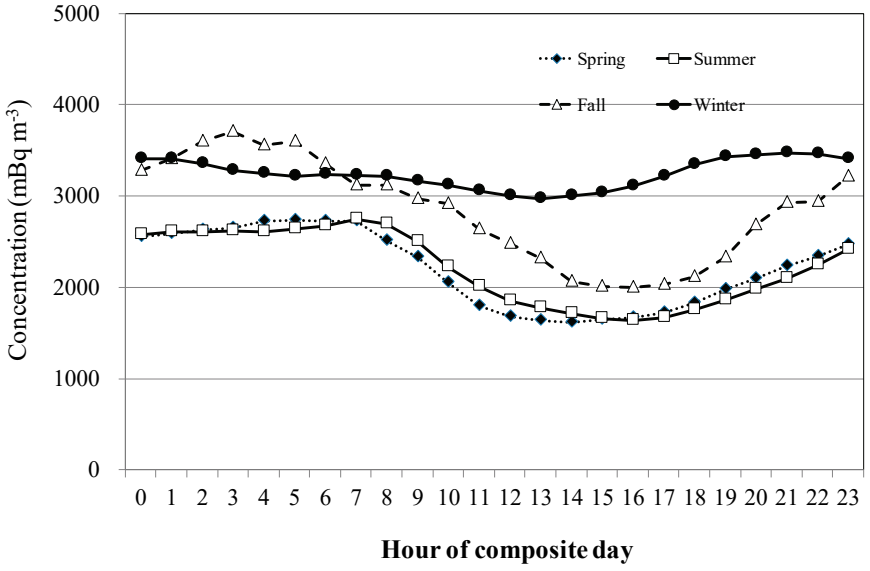


그림 10.2.6 고산관측소의 계절별 라돈의 일변화.

10.2.3 라돈 장거리 이동 수송경로

기류 유입경로별로 라돈의 농도변화를 비교하였다. 이를 위해 2019년에 측정한 라돈의 일평균 농도를 기준으로 이 시기의 기류 이동궤적을 역궤적 군집분석법으로 조사하였다. 그리고 그림 3.7과 같이 기류의 유입경로를 제주도를 중심으로 중국북부(Cluster 1), 중국중부 및 황해(Cluster 2), 북태평양(Cluster 3), 한반도(Cluster 4)의 4개 구간으로 나누고, 역궤적 군집분석 결과를 기초로 제주도로 유입된 기단의 이동경로를 조사하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT 4.0) 모델을 이용하였다. 또한 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의 북반구 Global Data Assimilation System (GDAS)를 이용하였다. 또 중국대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 2~5일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사시간은 48시간으로 설정하였고, 측정지점 좌표는 고산(33.17°N, 126.10°E)을 기점으로 선정하였다. 또 출발점 고도는 72 m, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC (KST 09:00)를 기준으로 설정하였다.

역궤적 군집분석을 실시하여 4개 군집별로 일평균 라돈농도를 비교하였다. 측정기간의 기류 이동은 Cluster 1~Cluster 4에서 각각 18, 39, 23, 20%의 빈도를 나타내었고, 북서 기류를 타고 중국대륙으로부터 제주로 이동한 경우가 더 많은 것으로 확인되었다. 그리고 이 시기에 각 기류 유입경로별 라돈농도를 비교한 결과, Cluster 1~Cluster 4에서 각각 2701, 2372, 2693, 1595 mBq/m^3를 나타내었다. 이처럼 라돈 농도는 기류가 중국대륙에서 제주도로 이동했을 때 대체적으로 더 높은 경향을 보였다. 반면에 기류가 북태평양에서 제주지역으로 유입되었을 때에는 중국에서 유입되었을 때에 비해 1.7배 정도 더 낮은 농도를 나타내었다. 이처럼 대기 라돈 농도는 대체적으로 아시아대륙 또는 한반도에서 기류가 이동(continental fetch)했을 때가 높고, 북태평양에서 이동한 해양기류가 유입되었을 때에 상대적으로 더 낮은 경향을 보였다.

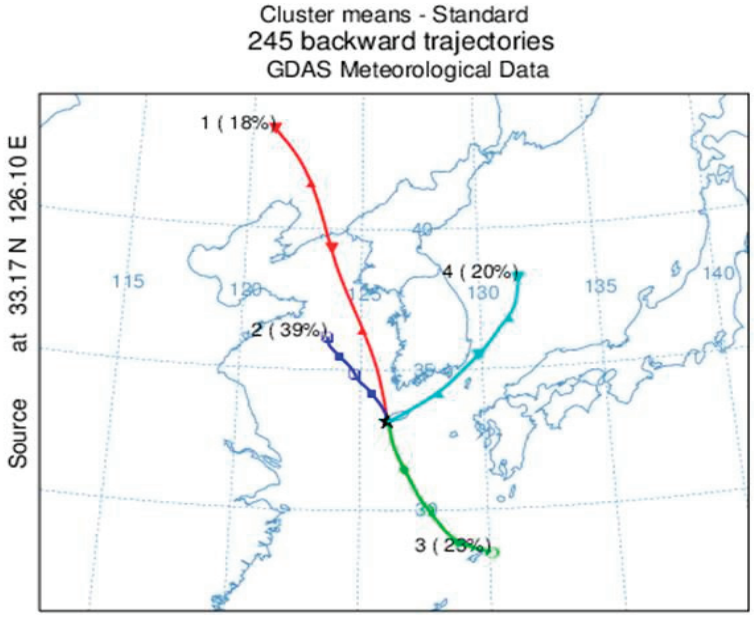


그림 10.2.7 2019년 제주도 고산에 도달한 후방역궤적의 군집 분석 결과.



부 록

1. 관측자료품질보증체계
2. 지구대기감시 관측자료
3. 기후변화감시 기술노트 목록
4. 지구대기감시 매뉴얼 목록
5. 기후변화감시 관측자료 활용논문 목록
6. 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황
7. 지구대기감시 보고서 작성자

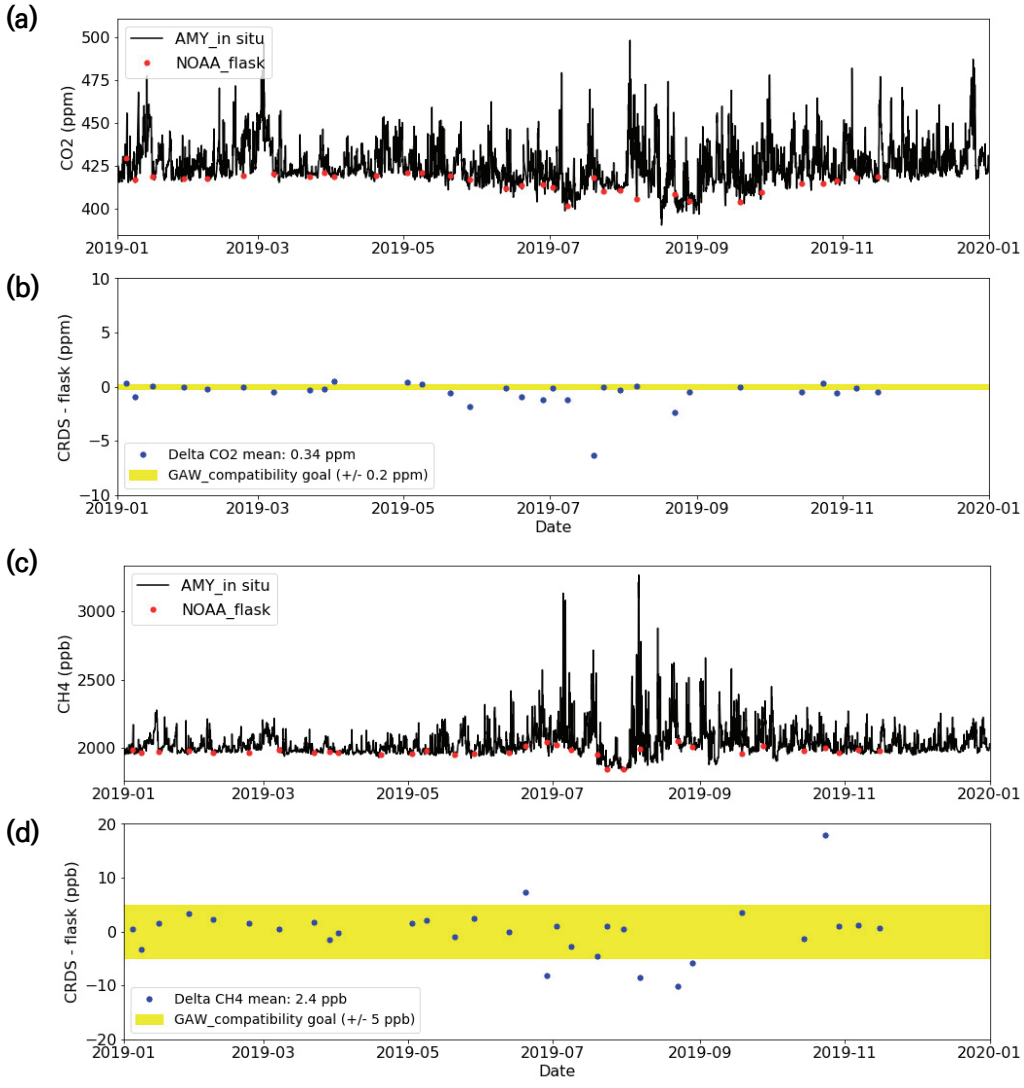
[부록 1] 관측자료품질보증체계

1.1 온실가스

1.1.1 품질관리를 위한 온실가스 관측자료 비교

WMO GAW에서는 온실가스 관측의 자료 품질관리와 관측의 불확도 산정을 돕기 위해 플라스크 샘플링과 실시간 관측자료를 같은 관측소에서 이행하여 상호 비교하도록 권고하고 있다(WMO, 2016). 안면도는 한반도에서 가장 오래된 온실가스 실시간 관측 역사를 가지고 있으며, 2014년부터 플라스크 샘플링 자료와 비교를 진행하고 있다. 플라스크 샘플링의 분석은 WMO GAW의 주요 시설 중 하나인 중앙교정실험실(CCL, Central Calibration Laboratory)이 진행하였으며, 이 시설은 미국해양대기청에서 운영하고 있다. 플라스크 샘플링은 안면도에서 주1회 실시간 장비의 인렛과 동일한 높이에서 포집하고, 중앙교정실험실로 보내지며 분석 후 안면도의 1시간 평균자료와 비교한다. 현재 COVID-19의 영향으로 국제 운송이 지연되어 지난 12월부터 현재까지의 시료가 교환되지 못하였다. 따라서 비교기간은 2019년 1월부터 11월까지이며, 총 33개의 시료에 대해서 비교하였다. 같은 관측소에서 같은 항목을 다른 장비로 측정하는 경우 GAW에서 제시하는 호환성 범위는 CO_2 ±0.2 ppm, CH_4 ±5 ppb로 알려져 있다(WMO, 2016).

2019년의 CO_2는 실시간 자료와 플라스크 샘플링 자료에서 평균 0.34 ± 3.82 ppm의 차이를 보이면서 호환성범위인 ±0.2 ppm 보다 약간 높은 값을 나타냈으며, CH_4은 평균 차이값이 2.4±11 ppb로 호환성 범위인 ±5 ppb 안에 있다(부록그림 1).



부록그림 1. 안면도의 공동감쇠분광기(CRDS)과 주1회 NOAA 플라스크로 분석한 (a) CO_2 시간에 따른 경향성 비교 (b) CO_2 시간에 따른 차이값 비교 (c) CH_4 시간에 따른 경향성 비교 (d) CH_4 시간에 따른 차이값 비교.

1.1.2 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	가스크로마토그래프-불꽃이온화검출기 (GC-FID)	Agilent	1일	1999~2015년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2016년~현재
N_2O	가스크로마토그래프-전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1일	1999년~현재
SF_6				2007년~현재
CFC-11				1999년~현재
CFC-12				1999년~현재
CFC-113				2007년~현재

○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측시작연도
CO_2,	비분산적외선분석기 (NDIR)	Siemense	1시간	2009년 ~ 2013년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2014년 ~ 현재
CH_4	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2015년 ~ 현재
N_2O	가스크로마토그래프-전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1일	2010년 ~ 현재
SF_6				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_2O SF_6	가스크로마토그래프-전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1일	2012년 ~ 현재 2015년 ~ 현재

○ 독도

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측시작연도
CO_2	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년 ~ 현재

1.1.3 자료선별법 및 배경대기 산출법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
이산화탄소 (CO_2)	5초	〈입력자료 선정〉 ① 검교정하여 농도 재산정 * 안면도: 1999-2011 NDIR, 3시간마다 3점교정, 2012-현재 CRDS 2주마다 4점교정 * 고 산: 2009-2013 NDIR, 3시간마다 3점교정, 2014-현재 CRDS 2주마다 4점교정 * 울릉도: 2012-2019.11. CRDS 2주마다 4점교정 2019-현재. CRDS 5일마다 4점교정 ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거, 표준가스 교정기간 제거 〈시간평균〉 ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균을 구한뒤 ④ 시간평균의 표준편차가 A보다 크고 연속된 앞 뒤 시간평균값의 차이가 B이상 차이가 나면, 시간 자료 기각 * 안면도: (A) 1.8 ppm, (B) 1.8 ppm 고 산: (A) 1 ppm, (B) 1 ppm 울릉도: (A) 0.8 ppm, (B) 0.8 ppm 독 도: (A) 0.4 ppm, (B) 0.6 ppm * 자료의 약 30~32% 기각됨 〈일평균, 월평균〉 ⑤ ④의 시간평균 자료가 n개 이상일 때 1차 일평균 산정 * 안면도: (n) 15개, 나머지 관측소: (n) 10개

부록

관측요소	관측주기	자료통계 방법
		⑥ ⑤의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅 ⑦ 관측값 – 커브피팅 = 잔차(a) 산정 ⑧ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/year)한 잔차(b) 생성 ⑨ 잔차(a) 〈 잔차(b)의 3σ안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택 ⑩ ⑥ ~ ⑨ 번 5번 반복 ⑪ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정 * 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/year 반영 (Thoning et al., 1989)
메탄(CH_4)	5초	〈입력자료 선정〉 ① 검교정하여 농도 재산정 * 안면도: 1999-2016 GC-FID, 6시간마다 1점교정, 2017-현재 CRDS 2주마다 4점교정 * 고 산: 2014-현재 CRDS 2주마다 4점교정 * 울릉도: 2018-2019.11. CRDS 2주마다 4점교정 2019.12.-현재. CRDS 5일마다 4점교정 ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거, 표준가스 교정기간 제거 〈시간평균〉 ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균을 구한뒤 ④ 시간평균의 표준편차가 A보다 크고 연속된 앞 뒤 시간평균값의 차이가 B이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 9 ppb, (B) 16 ppb * 고 산: (A) 4.5 ppb, (B) 8.5 ppb * 울릉도: (A) 4 ppb, (B) 5.5 ppb * 자료의 약 30%기각 ⑤ 풍향풍속을 고려하여 기각 * 안면도, 고산: 풍속 2 m/s 이하인 자료 기각 * 울릉도 : 풍향이 180°-270°이거나, 풍속 1 m/s 이하인 자료 기각 〈일평균〉 ⑥ ⑤의 시간평균 자료가 6개 이상일 때 1차 일평균 산정 〈월평균〉 * 안면도: 1999-2018 ⑦ ⑥의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅 ⑧ 관측값 – 커브피팅 = 잔차(a) 산정 ⑨ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/year)한 잔차(b) 생성 ⑩ 잔차(a) 〈 잔차(b)의 3σ안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택 ⑪ ⑥ ~ ⑨ 번 5번 반복 후 ⑫ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정 (Thoning et al., 1989, 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/year 반영)
아산화질소 (N_2O)	1시간	〈입력자료 선정〉 ① 아산화질소 표준가스를 이용하여 농도 재산정(표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거 〈시간자료 선택〉 ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 시간자료의 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 0.9 ppb, * 고 산: (A) 0.86 ppb * 자료의 약 30~32% 기각됨

관측요소	관측주기	자료통계 방법
		⑤ 풍향풍속을 고려하여 기각 * 안면도: 풍속 2 m/s 이하인 자료 기각 * 고 산: 풍향이 45°–225°이고, 풍속 2 m/s 이하인 자료 기각 〈일평균, 월평균〉 ⑥ ⑤의 시간평균 자료가 6개 이상일 때 1차 일평균산정 ⑦ ⑥의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅 ⑧ 관측값 – 커브피팅 = 잔차(a) 산정 ⑨ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/year)한 잔차(b) 생성 ⑩ 잔차(a) 〈 잔차(b)의 3σ안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택 ⑪ ⑦ ~ ⑧번 5번 반복 후 ⑪ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정 * 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/year 반영 (Thoning et al., 1989)
염화불화탄소류(CFCs)	1시간	〈입력자료 선정〉 ① 염화불화탄소류의 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거 〈시간자료 선택〉 ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * CFC-11: (A) ±4 ppt, CFC-12: (A) ±5 ppt CFC-113 (A) ±1.5 ppt * 전체자료의 연속값의 차이값 분포를 통해 상위 90%, 하위 10% 값을 기준함 〈일평균, 월평균〉 ※ *O'Doherty* et al., *2001* ⑤ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting함 ⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출 ⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출 ⑧ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별 ⑨ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 **일평균 산정** ⑩ ⑨를 이용하여 **월평균 산정**
육불화황 (SF_6)	1시간	〈입력자료 선정〉 ① 육불화황 표준가스를 이용하여 농도 재산정(표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거 〈시간자료 선택〉 ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 1 ppt * 전체자료의 연속값의 차이값 분포를 통해 상위 90%, 하위 10% 값을 기준함 〈일평균, 월평균〉 ※ *O'Doherty* et al., *2001* ⑤ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting함 ⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출 ⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출 ⑧ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별 ⑨ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 **일평균 산정** ⑩ ⑨를 이용하여 **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~현 재
CO	일산화탄소분석기	ECOTECH	ML9830	1시간	1998~2005년
		THERMO	48i	1시간	2005~2007년
				1시간	2007년~현 재
NO_X	질소산화물분석기	ECOTECH	ML9841A	1시간	1998~2005년
		THERMO	42i	1시간	2005~2007년
				1시간	2007년~현 재
SO_2	이산화황분석기	ECOTECH	ML9850	1시간	1998~2005년
		THERMO	43i	1시간	2005~2007년
				1시간	2007년~현 재

○ 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
		Los Gatos	EP30	1시간	2019년~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	관측주기	자료통계 방법
오존(O_3) 일산화탄소(CO) 질소산화물(NOx) 이산화황(SO_2)	1시간	○ 통계 최소자릿수: 0.1 ○ 생산자료 → 시간통계 → 일통계 → 월통계 → 연통계 〈 시간 통계 〉 ○ 자료기간 : 생산자료를 이용하여 해당 시간의 00분 이후부터 59분까지의 1시간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 시간평균자료 ○ 산출방법 - 제거 후 생산자료가 시간당 66% 이상일 때 산출(1분자료 40개 이상) - 소수 두 번째 자리까지 계산하여 반올림 - 산출식 $\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \ldots + X_{n-1} + X_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$ ○ Thermo 49i CO는 주기적으로 분석하는 zero값으로 표류오차값을 보정함. 예) 04시 zero = 5 ppb, 06시 zero = 10 ppb라면 2시간동안 5ppb가 선형적으로 증가하였다고 가정하여 관측값에서 빼 줌. ○ LGR EP30 CO는 교정, 점검 및 장애 시간을 제외한 관측값으로 시간 통계 산출함 ○ NOx자료 중 NO는 전일 밤 10시~당일 새벽 2시의 NO 평균을 zero값으로 산출하여 연속된 날의 zero값과 zero값 사이를 선형내삽한 후 관측값에서 빼 줌. 이 때 O_3 〈20 ppb인 경우 NO 고농도사례로 보고 zero값 산출하지 않음 〈 일통계 〉 ○ 자료기간 : 시간평균자료가 하루 75% 이상일 때 산출(시간자료 18개 이상) ○ 자료종류 : 일평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음 〈 월통계 〉 ○ 자료기간 : 일자료가 50% 이상일 때 산출 ○ 자료종류 : 월평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음 〈 연통계 〉 ○ 자료기간 : 해당 연의 1월부터 12월까지의 1년간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 연평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음

1.2.3 질소산화물(NOx) 세계표준센터 국제비교실험

GAW에서는 정확한 자료의 공유 및 공동 연구를 위해 NO_x의 관측법을 권장하고(GAW report No. 195, ACTRIS WP40NA4) NO_2의 정확한 측정과 NO_2 표준가스의 품질 확인을 위하여 독일 율리히 연구소에 위치한 NO_x 세계표준센터에서 2019년 9월 29일부터 10월 20일까지 METNO2 project 캠페인을 통해 유럽 6개기관과 국립기상과학원의 총 13개 장비들을 비교실험 하였다. 모든 장비들을 공동인렛에 연결하고, 매일 NO표준가스와 NO_2 표준가스를 분석한 후 율리히 연구소에서 자체 제작한 SAPHIR 챔버의 합성공기와 일반대기를 번갈아 장비에 주입하며 그 결과를 비교하였다(부록그림 2). MetNO2 project 캠페인에 참여한 대부분의 장비는 BLC (Blue light converter)로 NO_2를 측정하였고, 국립기상과학원은 몰리브덴 컨버터 방식 1대와 BLC 방식 1대로 실험에 참가하였다.

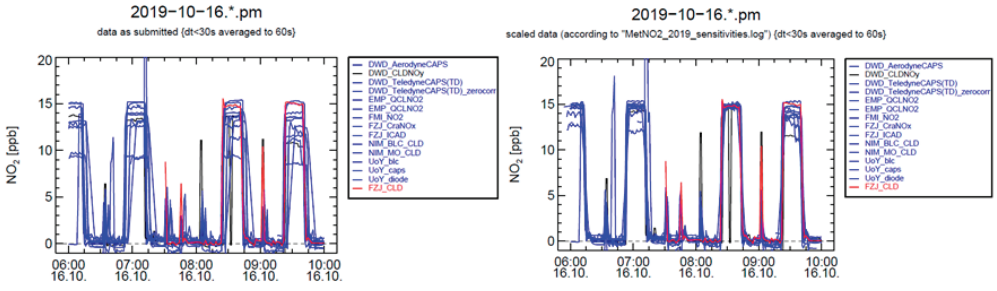
※ NO_2를 NO로 환원하는 컨버터의 특성 비교

기법	몰리브덴 컨버터	청색광 컨버터
방식	열분해(325~350℃)	광분해 @385 nm
장점	반영구 사용, 분해효율 좋음	NO_2만 광분해하여 정확도↑
단점	NO_2, NOz(NO_3, N_2O_5, HNO_3, PAN, organic nitrates 등)이 NO로 환원되어 NO_2 과대 측정	BLC 가동에 전기소모 많음



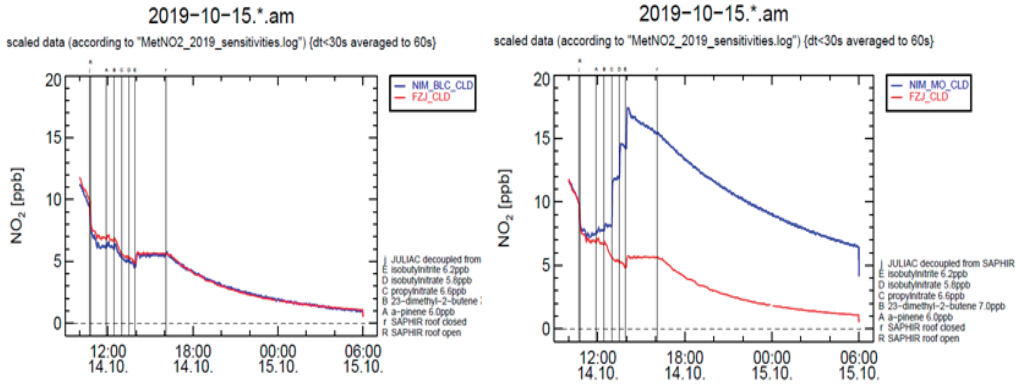
부록그림 2. SAPHIR, JULIAC 인렛, 관측컨테이너 내부 및 관측장비.

9월 30일부터 캠페인 참가 장비들을 설치하여 교정하였고, 10월 7일부터 비교실험을 시작하였다. 모든 장비의 관측시간은 UTC로 변경하여 동기화하였고, 실험기간 동안 매일 07~09 UTC에 건조/습윤(1% H_2O)상태에서 표준가스를 분석하여 장비의 선형성을 확인하고 건조 표준가스 분석값을 기준으로 장비들을 교정한 후, 09~14 UTC와 14~17 UTC에 합성 공기, 인위적인 물질을 SAPHIR에 첨가하여 측정하였다(부록그림 3).



부록그림 3. NO_2 보정 전(좌)과 보정 후(우).

Daily meeting에서 확인한 자료의 일부를 소개하면 아래와 같다(부록그림 4). 매일 오전 10시 반과 오후 2시 반에 연구소 도서관에서 회의를 하며 회의직전까지의 관측자료를 비교하여 장비별 특성을 분석하였고 SAPHIR에 주입할 인위적 물질 선정하였다. SAPHIR 챔버에 여러 종류의 휘발성 유기화합물(VOCs)을 첨가하였을 때, BLC_CLD는 NO_2를 정확하게 측정하였고, MO_CLD는 NO_2이외의 질소화합물도 NO_2로 측정하였다.



부록그림 4. VOCs 농도 첨가에 따라 차이를 보이는 BLC_CLD(좌)와 MO_CLD(우).

METNO2 project 캠페인의 비교실험결과는 향후 METNO2 웹페이지에 보고서로 게시될 예정이다.

1.3 에어로졸

1.3.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측 주기	관측기간
PM10 질량농도	부유분진측정기 (β-ray PM_{10})	Thermo	FH62C14	1시간	2003년~현재 (안면도)
					2009년~현재 (고 산)
크기별 수농도 (0.5~20 μm)	공기역학입자 계수기 (APS)	TSI	3321	1시간	2006년~현재 (안면도)
					2009년~현재 (고 산)
미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5 μm)	전자기유도 입자계수기 (SMPS)	TSI	3034	1시간	2005~2016년 (안면도)
		GRIMM	5.416	1시간	2017년~현재 (안면도)
응결핵 수농도 (0.01~3 μm)	응결핵계수기 (CPC)	TSI	3772	1시간	2010년~현재 (고 산)
연직분포	에어로졸 라이다	EN3엔지니어링	MPoLAR 2020	15분	2010년~현재 (안면도)
광산란계수	광산란계수측정기 (Nephelometer)	TSI	3563	1시간	2003년~현재 (안면도)
광흡수계수	광흡수계수측정기 (Aethalometer)	Magee Scientific	AE16	1시간	2001~2010년 (안면도)
			AE31	1시간	2011년~현재 (안면도)
광학깊이	정밀필터복사계 (PFR)	PMOD, Switzerland	GAW-PFR	수시	2010년~현재 (안면도)
					2011년~현재 (고 산)
					2011년~현재 (울릉도)
	태양광도계 (Sun-Photometer)	Cimel	CE-318N	수시	안면도 2013년~현재 (안면도)
PM10, PM2.5 이온/원소	저용량미세먼지 채취기 (Low-vol air sampler)	APM 엔지니어링	2000A	24 시간	PM10/PM2.5 이온: 2008~2017년 3월 (안면도)
			PMS-104	24 시간	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)	〈자료 품질 보증〉 ○ 국가기준측정시스템(NRM)과 비교평가를 통과한 기준채취기(Class I)를 이용하여 현장에서 등가성평가 수행(부록 1.3.2 참조) 〈자료품질관리(자동)〉 ○ 기기상태 검사: 6자리 상태 코드가 '000000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심'으로 분류 ○ 계측한계 검사: 1~5,000 ㎍/㎥를 벗어나면 '의심'으로 분류 ○ 시간연속성 검사 현재(t)와 직전(t-1) 또는 직후(t+1)에 관측된 PM10 질량농도의 변동량이 '50+0.15×PM10'를 초과할 경우 '의심'으로 분류 $$\triangle PM10 = \min[PM10(t) - PM10(t \pm 1)] \quad (1)$$ ○ 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. $$d = [PM10(t) - PM10(t-1)] - [PM10(t+1) - PM10(t)] \quad (2)$$ $$d \geq Md - z \times MAD \text{ or } d \leq Md + z \times MAD \quad (3)$$ $$MAD = median(|d - Md|) \quad (4)$$ 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 〈자료품질관리(수동)〉 ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리 〈통계방법〉 ○ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 75% 이상일 때 시간평균값 산출 ○ 유효 시간평균 자료가 일, 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 산출 [참고] WMO GAW 권고에 따라 부유분진측정기는 표준대기상태(0℃, 1기압) 자료가 생산됨.
응결핵 수농도 (0.01~3 ㎛, 총수농도)	〈자료 품질 보증〉 ○ WMO 에어로졸 세계표준센터에서 수행하는 국제비교실험 참여(부록 1.3.3 참조) http://actris-ecac.eu/files.ECAC-report-CPC-2018-6-5.pdf (2018) http://actris-ecac.eu/files.ECAC-report-CPC-2019-5-5.pdf (2019)

관측요소	자료통계 방법
	〈자료품질관리(자동)〉 ㅇ 기기상태 검사: 기기 에러가 기록된 자료는 '의심'으로 분류 ㅇ 계측한계 검사: 1~10,000개/㎤를 벗어나면 '의심'으로 분류 ㅇ 지속성 검사: 과거 20분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 ㅇ 튀는 값 제거: PM10과 동일 〈자료품질관리(수동)〉 ㅇ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ㅇ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리 〈통계방법〉 ㅇ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출 ㅇ 유효 시간평균 자료가 일, 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 산출
크기별 수농도 (0.5~20 ㎛)	〈자료 품질 보증〉 ㅇ 연1회 이상 표준입자(0.8, 1.0, 2.8 ㎛,)를 이용한 자체 점검 ㅇ 매2년마다 제작사 교정 수행 ㅇ APS와 중복 입경 구간(0.532~1.0 ㎛) 수농도 비교 평가 〈자료품질관리(자동)〉 ㅇ 기기상태 검사 ① 상태 코드가 '0000 0000 0000 0000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심' ② event 4〉0 : '의심' ③ dead time = 0 : '의심' ④ 내부 diode 온도 ≤ 18℃ : '의심' ㅇ 계측한계 검사: 구간별 수농도가 1,000 개/㎤ 이상일 때 '의심', 10,000 개/㎤ 일 때 '오류'로 분류 ㅇ 지속성 검사: 과거 60분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 ㅇ 정합성 검사: 인근 동일 요소 산출물(부유분진측정기, APS, OPC의 PM10 질량농도) 비교하여 차이가 50% 초과할 경우 '의심'으로 분류 〈자료품질관리(수동)〉 ㅇ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ㅇ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리 〈통계방법〉 ㅇ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출 ㅇ 유효 시간평균 자료가 일, 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 산출 [참고] WMO GAW 권고에 따라 측정 온도와 기압 자료를 이용해 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환

관측요소	자료통계 방법
미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5 ㎛)	〈자료 품질 보증〉 ○ 연1회 이상 표준입자(203nm)를 이용한 자체 점검 ○ APS와 중복 입경 구간(0.532~1.0 ㎛) 수농도 비교 평가 ○ WMO 에어로졸 세계표준센터에서 수행하는 국제비교실험 참여 http://actris-ecac.eu/files.ECAC-report-MPSS-2018-6-6.pdf (2018) * 2018년 국제비교실험 결과에 따라 SMPS의 에어로졸 중화기 방사선원을 기존 아메리슘(Am-241)에서 크립톤(Kr-85)으로 교체(2019.12.) 〈자료품질관리(자동)〉 ○ 기기상태 검사: warning=0, error=0인 경우만 '정상', 나머지는 '의심' ○ 계측한계 검사: 총수농도가 10^7 개/㎤(매뉴얼 확인필요) 이상일 때 '의심' ○ 지속성 검사: 과거 20분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 〈자료품질관리(수동)〉 ○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ○ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리 〈통계방법〉 ○ 위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출 ○ 유효 시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출 [참고] WMO GAW 권고에 따라 측정 온도와 기압 자료를 이용해 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환
광산란계수	〈자료 품질 보증〉 ○ 매2개월마다 스팬가스 확인(span check) - 입자가 제거된 순수 공기와 광산란계수를 알고 있는 스팬(span) 가스인 이산화탄소(CO_2)의 광자수를 측정하여 교정계수를 확인 〈자료품질관리(자동)〉 ○ 장비 내부 측정 온도와 기압 자료를 이용해 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환 (Anderson and Ogren, 1998). $$\sigma(T,P)=\sigma(STP)\frac{273.15}{T}\frac{P}{1013.25} \quad (5)$$ 여기서 σ는 광산란계수, T, P는 온도와 압력, STP는 표준대기 상태 ○ 광산란계수측정기 각도 보정(Angular Correction Factor): Anderson and Ogren (1998) 참고 ○ 기기상태 검사: 기기에러=0000 아닌 경우 '의심' ○ 계측한계 검사 : 5〈BNC voltage〈7 범위를 벗어나면 '의심' (샘플 온도 검사) 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 산란옹스트롬 지수가 -2보다 작으면 '의심'

관측요소	자료통계 방법
	ㅇ 단계검사: 변동량이 2σ(과거 12개 자료의 표준편차x2) 초과할 경우 '의심'으로 분류 ㅇ 지속성 검사: 과거 10분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 ㅇ 배경농도 검사: 제로잉 수행(ZBXX mode) 시 광산란계수(450 nm, 표준대기 보정 후)가 40 Mm^{-1}를 초과하는 자료는 다음 제로잉 수행 이전 자료까지 '의심'으로 분류 ㅇ 상대습도가 40%를 초과하는 자료는 '의심'으로 분류 〈자료품질관리(수동)〉 ㅇ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ㅇ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리
광흡수계수	〈자료 품질 보증〉 ㅇ 연1회 이상 제로잉 ㅇ WMO 에어로졸 세계표준센터에서 수행하는 국제비교실험 참여 http://actris-ecac.eu/files.ECAC-report-AP-2018-3-4.pdf (2018) 〈자료품질관리(자동)〉 ㅇ 광흡수계수기가 20℃, 1기압 상태로 설정되어 있으므로, GAW에서 권고하는 표준대기상태(0℃, 1기압)로 변환(식(5) 참고) ㅇ 관측장비에서 산출된 감쇄계수를 광흡수계수로 변환하기 위해 GAW 보고서(Report No. 227) 권고에 따름. $\sigma_{ap} = b_{ATN} / C_0$ 여기서, C_0는 보정상수로 3.5를 적용하였으며, 약 25% 불확실도를 보임(WMO, 2016). ㅇ 단계검사: 변동량이 2σ(과거 12개 자료의 표준편차x2) 초과할 경우 '의심'으로 분류 ㅇ 지속성 검사: 과거 10분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류 〈자료품질관리(수동)〉 ㅇ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리 ㅇ 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료, 장비 장애 시의 자료 무효처리

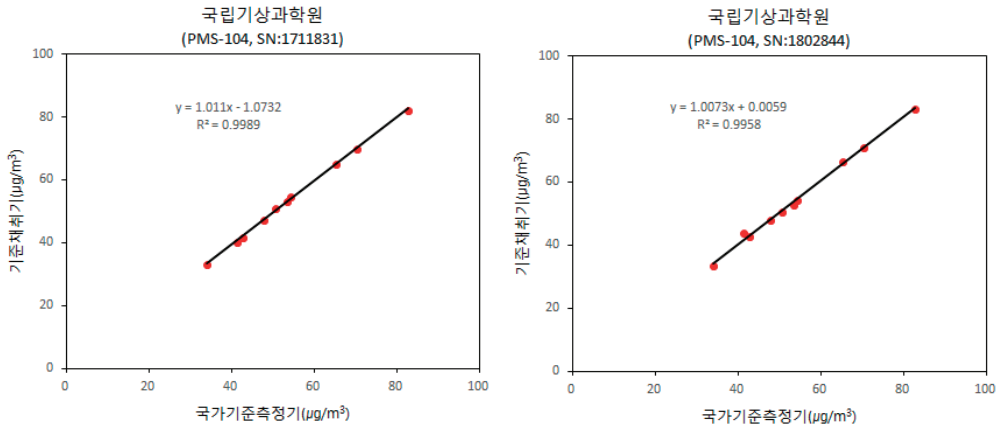
1.3.3 에어로졸 화학

관측요소	관측 주기	자료통계 방법
PM10 질량농도	6일마다	– 채취시간이 24시간 이상된 자료제거 또는 채취시간이 10시간 미만인 자료 제거 – PM10 무게 측정 질량농도($\mu g/m^3$) 〈 PM2.5 무게 측정 질량농도($\mu g/m^3$) 일 때, 자료 제거
PM2.5 질량농도	6일마다	
PM10 이온성분	6일마다	– Filter 무게 측정 질량농도($\mu g/m^3$) 〈 화학성분 총 질량농도($\mu g/m^3$) 일 때, 자료 제거 – 양이온 당량농도 합($\Sigma[\mathrm{Cation}]_{eq}$), 음이온 당량농도 합($\Sigma[\mathrm{Anion}]_{eq}$)을 의미하며, 아래의 식으로 계산 $0.7 < \frac{\Sigma[\mathrm{Cation}]_{eq}}{\Sigma[\mathrm{Anions}]_{eq}} < 1.3$ – 양이온과 음이온 당량 농도합의 비가 30% 이상 차이 나는 자료는 최종 결과에서 제외 – PM10 각각의 화학성분($\mu g/m^3$) 〈 PM2.5 각각의 화학성분($\mu g/m^3$) 일 때, Filter의 상태 및 기기의 상태 확인 후 자료 제거
PM2.5 이온성분	6일마다	
PM10 원소성분	6일마다	– 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	6일마다	

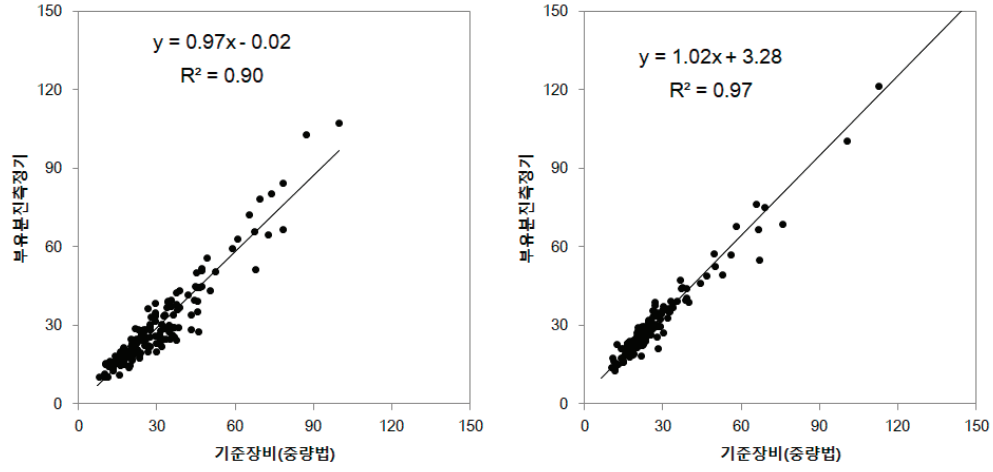
1.3.4 부유분진측정기 등가성평가

안면도와 고산에서 운영 중인 부유분진측정기는 「환경측정기기 형식승인·정도검사 등에 관한 고시[8]」에 따라 2018년부터 등가성평가를 수행하고 있다. 정도검사 기준에 따르면 기준채취기와 평가대상 부유분진측정기 간 선형회귀식의 기울기(0.9~1.1)와 절편(-5.0~5.0 ㎍/㎥)을 만족하는 연속된 날의 유효시료가 10개 이상인 때 등가성이 인정되어 정도검사를 받을 수 있다. 또한, 기상청 기후변화감시소는 2018년 3월 GAW 에어로졸 세계표준센터로부터 받은 적합성 평가 시 권고에 따라 를 받았는데 부유분진측정기에 대해 기준채취기와의 등가성을 연중 확인하고 있다. 부유분진측정기 등가성평가를 위한 기준채취기는 국립환경과학원의 국가기준측정시스템과 비교 측정하여 성능을 검증받은 중량농도법 측정기이다. 2019년에 국가기준측정시스템과 기후변화 감시소(NRM)의 기준채취기(Class I) 2대의 성능검증 결과를 부록그림 5에 보였다. 국가기준 측정시스템과 기준채취기(Class I)의 선형회귀식 기울기는 두 장비 모두 1.01이며, 절편은 각각 -1.07과 0.01로 중량법 기준채취기 등가성평가 기준을 만족하였다. 성능이 검증된 이 기준채취기 (Class I)들은 각각 안면도와 고산 기후변화감시소로 이동하여 현지에서 부유분진측정기의 등가성 평가를 위해 운영되었다. PM10 화학성분의 품질관리 절차(지구대기감시 업무 매뉴얼(II), 2017)를 거쳐 최종 확정된 2019년 기준채취기의 PM10 질량농도 시료 수(중량법)는 안면도, 고산 각각 158, 148개이다. 기준채취기와의 등가성 확인 결과 안면도는 기울기 0.97, 절편 -0.02, 고산은 기울기 1.02, 절편 3.28로 자동측정기(부유분진측정기) 등가성평가 기준(기울기 0.9~1.1, 절편 -5.0~5.0)을 모두 만족하였다(부록그림 6).

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



부록그림 5. 국가기준측정시스템과 국립기상과학원 기준채취기(Class I)의 비교평가.



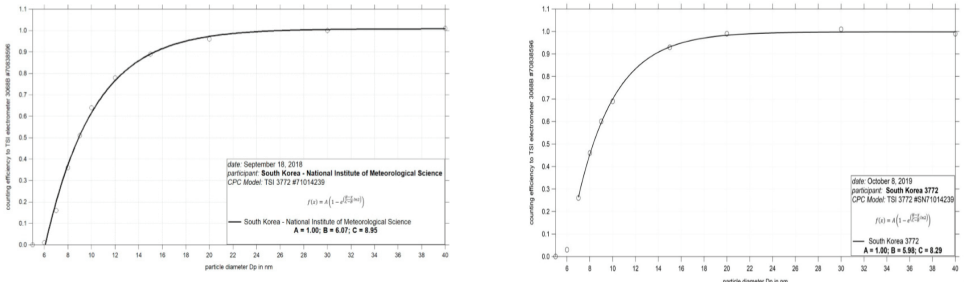
부록그림 6. 2019년 (좌)안면도(N=158)와 (우)고산(N=148)에서 측정한 부유분진측정기 등가성평가 결과.

1.3.5 에어로졸 세계표준센터 국제비교실험

에어로졸 세계표준센터(World Calibration Centre for aerosol physics, WCCAP)에서는 입자계수기와 광산란계수측정기, 광흡수계수측정기에 대해 WCCAP가 보유한 표준 장비와의 비교실험을 수행하고 있다.

응결핵계수기 국제비교실험에서는(2018년, 2019년) 5 nm 부터 40 nm 사이의 입자를 흡입시켜 계수 효율(counting efficiency)을 측정하는데, 비교 실험 결과 40 nm에서 100%의 입자 계수 효율을 보였으며, 50% 포집효율을 가지는 입자 크기는 2018년에 8.95 nm (부록그림 7a), 2019년에는 8.29 nm로 GAW 기준에 적합한 것으로 평가되었다(부록그림 7b).

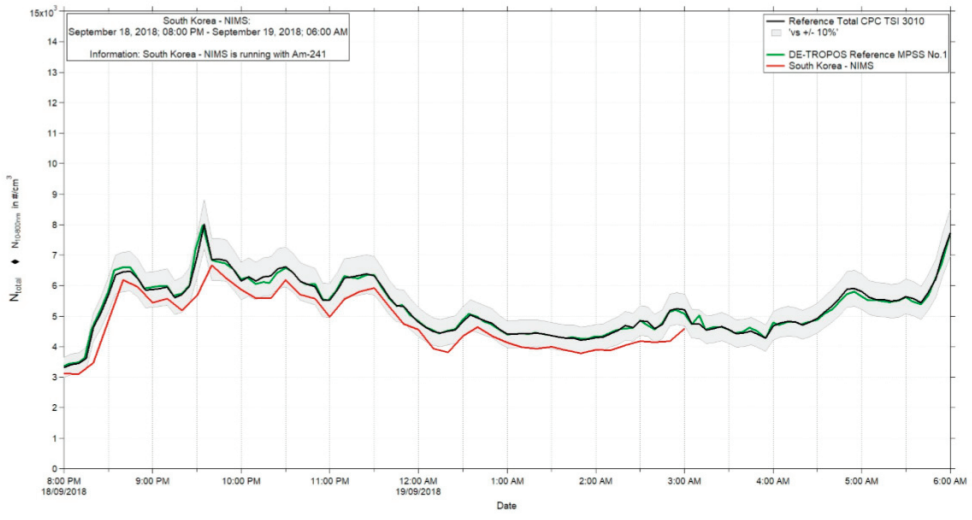
(a) 2018년 (b) 2019년



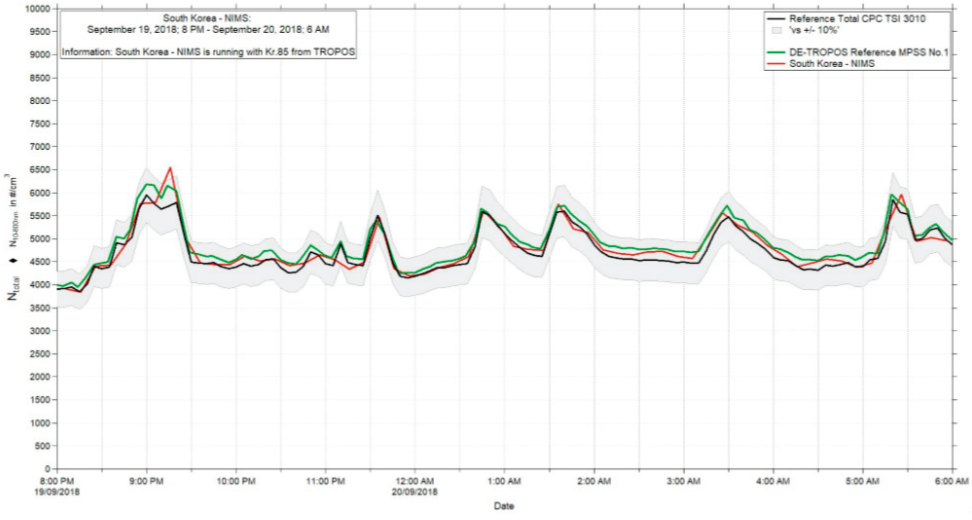
부록그림 7. WCCAP 국제비교실험 시 입자 크기에 따른 CPC 효율 곡선 (http://www.actris-ecac.eu/files/ECAC-report-CPC-2018-6-5.pdf).

전자기유도입자계수기 비교실험(2019년)에서는 유량확인, 표준입자(203 nm) 점검 및 기준장비와의 크기 분포 비교를 수행하였다. 유량은 정상 유량(0.3 L/min)으로 측정되고 있었으며, 표준입자 주입 시 206.67 nm로 측정하였다. 기준장비와의 크기 분포 비교에서는 입자 수농도가 평균 10% 정도 낮게 측정되었는데(부록그림 8a), 이는 입자 중화기에 사용되는 방사선원인 Am-241(아메리슘)의 방사선량이 입자를 모두 중화시키기에 충분히 높지 않아서인 것으로 추정하였다. 그래서 Kr-85(크립톤)를 사용하여 비교 실험을 수행한 결과 기준 장비와 단 2%의 오차를 보였다(부록그림 8b). 이 실험 결과에 따라 WCCAP에서는 보다 높은 방사선량을 가진 방사선원으로 교체하도록 권고하였고, 2019년 12월에 방사선원을 Kr-85로 교체하여 전자기유도입자계수기를 운영 중이다.

(a)



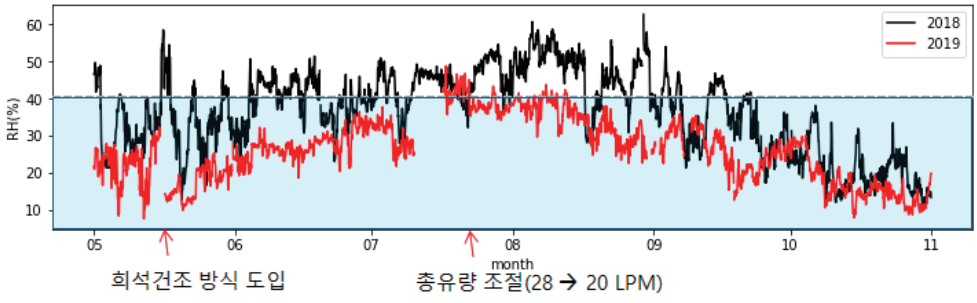
(b)



부록그림 8. 기준장비(초록, 검정)와 안면도 기후변화감시소(빨강)의 전자기유도입자계수기 수농도 비교. 방사선원으로 (a) Am-241, (b) Kr-85 사용. (http://actris-ecac.eu/files.ECAC-report-MPSS-2018-6-6.pdf)

1.3.6 2019년 에어로졸 관측환경 개선

WMO/GAW에서 우선 권고하는 유입공기 건조 방식은 확산건조기, 멤브레인 건조기(나피온 등), 희석건조이다. 가열 건조 방식을 사용할 경우에는 가열관의 온도를 40℃ 이하로 운영하도록 권고하고 있다. 그러나 안면도 기후변화감시소의 상대습도는 여름철의 경우 90%를 넘는 사례가 많아 40℃로 가열 건조할 경우에 권고 상대습도인 40% 이하가 되기 어렵고, 최대 60%를 초과하기도 하였다. 광산란계수측정기는 20 LPM 이상의 유량으로 공기를 흡입하여 측정하므로 적은 유량을 사용하는 장비에 비해 가열 건조기 사용이 더욱 비효율적이고, 확산건조기나 멤브레인 건조기도 적합하지 않아 입자가 제거된 건조 공기를 희석 주입하는 방식을 도입하였다(2019년 5월 16일). 희석건조 방식을 도입한 직후인 5월 하순의 장비 내부 상대습도는 25%를 유지하여 2018년의 20%~45%보다 낮게 운영되었다. 부록그림 9를 보면 2018년 여름철 대부분의 기간에 장비 내부의 상대습도가 40%를 초과하였으나 2019년에는 대부분 40% 미만을 유지하였고, 40% 이상으로 유지되던 7월 중순에는 총유량을 28 LPM에서 20 LPM으로 감소시켜 더욱 효율적으로 상대습도가 조절되었다. 다만, 건조공기 희석 방식을 사용할 때는 희석유량과 장비에 유입되는 유량을 정확히 측정하는 것이 선행되어야 하므로, 희석된 공기에 대한 적절한 농도 보정도 수행하였다.



부록그림 9. 희석건조 방식 도입(2019. 5. 16.)에 따른 광산란계수측정기 내부 상대습도 변화 (검정:2018, 빨강: 2019).

1.4 대기복사

1.4.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
직달일사	직달일사계 (Pyrheliometer)	EKO, Japan	MS-54	1시간	1999년~현재 (안면도)
			MS-54	1시간	2008년~현재 (고 산)
산란일사	전천일사계 (Pyranometer)	EKO, Japan	MS-802F	1시간	1999년~현재 (안면도)
			MS-802	1시간	2008년~현재 (고 산)
태양복사	전천일사계 (Pyranometer)	EKO, Japan	MS-802F	1시간	1999년~현재 (안면도)
			MS-802	1시간	2008년~현재 (고 산)
지구복사	지구복사계 (Pyrgeometer)	EKO, Japan	MS-202F	1시간	1999년~현재 (안면도)
순복사	순복사계 (Net-Pyrradiometer)	EKO, Japan	MF-11	1시간	1999년~현재 (안면도)

1.4.2 대기복사 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
직달일사 / 산란일사	1시간	- BSRN에서 권고하는 QC 3단계 적용 [시간평균] - 태양·지구복사: QC를 거친 1분 관측 데이터가 한 시간에 80% 이상 존재할 경우 시간평균값 계산. [일평균] - 태양복사: 태양천정각(Solar Zenith Angle) < 90°인 시간 중 시간평균 데이가 80% 이상 존재한 날의 24시간 평균값. - 지구복사: 24시간 중 시간평균 데이터 가 80% 이상 존재한 날의 24시간 평균값 [월평균] - 일평균이 전체 날수의 50% 이상 존재한 달의 일평균에 대한 평균값 [연평균] - 월평균이 10개월 이상 존재할 경우의 월평균에 대한 평균값
태양복사	1시간	
지구복사	1시간	
순복사	1시간	

○ Quality Check 방법(BSRN 기준)

1단계 QC (Physically Possible Limits)	
- Global Radiation	Min : -4 W/㎡ Max : Sa X 1.5 X $\mu_0^{1.2}$+ 100 W/㎡
- Reflected Solar Radiation	Min : -4 W/㎡ Max : Sa X 1.2 X $\mu_0^{1.2}$ + 50 W/㎡
- Direct Solar Irradiance	Min : -4 W/㎡ Max : Sa
- Diffuse Solar Radiation	Min : -4 W/㎡ Max : Sa X 0.95 X $\mu_0^{1.2}$ + 50 W/㎡
- Downwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/㎡ Max : 700 W/㎡
- Upwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/㎡ Max : 900 W/㎡
2단계 QC (Comparisons)	
- Ratio of Global Radiation over SUM	Global / SUM -〉 within +/- 8% of 1.0 (for SZA 〈 75°, SUM 〉 50 W/㎡) Global / SUM -〉 within +/- 15% of 1.0 (for 75° 〈 SZA 〈 93°, SUM 〉 50 W/㎡)
- Ratio of Diffuse over Global Radiation	SWDIFF / Global 〈 1.05 (for SZA 〈 75°, Global 〉 50 W/㎡) SWDIFF / Global 〈1.10 (for 75° 〈 SZA 〈 93°, Global 〉 50 W/㎡)
- Reflected Solar Radiation comparison	SWUP 〈 SUM (SUM 〉 50 W/㎡)
- Air Temperature comparison (Infrared Radiation)	σ(Ta-15K)^4 〈 LWUP 〈 σ(Ta+25K)^4 0.4XσTa^4 〈 LWDOWN 〈 σTa^4+25
- Infrared Radiation comparison	LWDOWN 〈 LWUP + 25 W/㎡ LWDOWN 〉 LWUP - 300 W/㎡
3단계 QC (NET Comparison)	
- NET & Cal. NET	| NET | 〈 50 W/㎡ -〉 | NET - Cal. NET | 〈 25 W/㎡ | NET | ≥ 50 W/㎡ -〉 | (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_o / AU^2 (S_o : Solar constant at mean Earth-Sun distance
  AU : Earth - Sun distance in Astronomical Units)
* σ : 5.67 × 10^{-8}
* Ta : air temperatuer in Kelvin (170K 〈 Ta 〈 350K)

1.5 성층권오존

1.5.1 관측장비

○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	Kipp & Zonen	MKⅢ	1일	2013년~현재

○ 고 산

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	Kipp & Zonen	MKⅢ	1일	2011년~현재

○ 포 항

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	SCI-TEC	MKⅡ	1일	1994~2017년
오존연직분포	오존존데	Vaisala	ECC	주 1회	1995년~현재

○ 서 울(위탁관측소)

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	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)
오존연직분포	110 GHz 마이크로파 수신기	자체개발	SORAS	15분	2008년~현재 (숙명여자대학교)

1.5.2 성층권 오존 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
오존전량	1일	〈 오존분광도계 〉 - 태양광 중 6개 파장에 대한 광도를 참조 값과 비교하여 오존전량 산출 - 일평균 • 2018년 이전(고산은 2019년 이전) : 일평균 오존전량(OZAVG 파일 일 평균값) 중 편차가 50 [DU] 이하이고, 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 - 년평균 : 월평균이 6개월 이상 존재할 경우의 월평균에 대한 평균값
오존연직분포	주 1회	〈 ECC 오존존데 〉 - 관측일 중 30 km 까지 정상적으로 관측을 성공한 자료를 사용하여 분석

1.5.3 오존전량 관측값 보정

성층권오존은 매년 세계자료센터 (WOUDC, World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre)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 기기상수값의 불확실성으로 인해 O3Brewer 자료처리 소프트웨어를 사용한 관측값 보정을 적용하지 않았지만, 2019년부터는(안면도의 경우 2018년부터) 장비 검교정 전문가가 직접 설정한 기기상수값을 사용하여 안면도와 고산 모두 O3Brewer 자료처리 소프트웨어를 통한 관측값 보정을 적용하고 있다.

1.6 자외선

1.6.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	관측주기	관측기간
자외선A	UVA-Detector	Solarlight	#501	10분	2012년~현재 (울릉도) 2007년~현재 (안면도) 2009년~현재 (포 항) 2012년~현재 (고 산)
자외선B	UV-Biometer	Solarlight	#501	10분	2012년~현재 (울릉도) 1999년~현재 (안면도) 1999년~현재 (포 항) 2011년~현재 (고 산)
총자외선	Brewer 분광광도계	SCI-TEC	MK-IV	상시	2004년~현재 (서울, 연세대학교)

1.6.2 자외선 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
지외선A	10분	- 매일 10분 간격으로 144개 원시 파일 생산 자외선A: 10분 누적값 (단위: J/㎠) 자외선B: 10분 누적값 (단위: MED) - 원시자료 품질관리 수행 • 관측오류 결측 처리 • 계측 하한, 계측 상한 값을 벗어날 경우 오류처리 • 기기상태 오류 - 관측센서온도가 24℃ ~ 26℃를 벗어날 경우 오류 처리 • Tropospheric Ultraviolet-Visible (TUV) radiation model (V. 5.3) 값 보다 클 경우 오류 값 처리(75° 이하)
자외선B		- 품질관리를 통과한 원시자료가 80% 이상일 때 자외선A, 자외선B 시간 누적값, 시간 최댓값 산출 1시간 누적값 : 자외선A (단위: MJ/㎡), 자외선B (단위: kJ/㎡) 1시간 최댓값 : 자외선A, 자외선B (W/㎡) - 시간자료 중 80% 이상 존재할 때 자외선A, 자외선B 일누적값, 일 최댓값 산출 일누적값: 자외선A (단위: MJ/㎡), 자외선B (단위: kJ/㎡) 일 최댓값: 자외선A, 자외선B (W/㎡) - 매월 80% 이상의 일 자료가 있을 경우 일누적값의 월 평균값, 일 최댓값의 월평균 산출 - 매년 80% 이상의 월 자료가 있을 경우 연 평균값 산출

1.7 총대기침적

1.7.1 관측장비

관측요소	장비명	제작사	모델명	관측기간
건성침적, 습성침적	강수자동측정시스템	Eigenbrodt	NMO 191/ KSDSC	2012년~현재 (안면도)
		KNR	APK9900	2014년~현재 (고 산)
		KNR	APK9900	2014년~현재 (울릉도)
		KNR	Aqua, JP/RM8300	2007~2016년 (울 진)
산성도	산성도측정기	Thermo	Orion 3-Star	2009년~현재 (안면도)
				2009년~현재 (고 산)
				2009년~현재 (울릉도)
				2009~2016년 (울 진)
전기전도도	전기전도도 측정기	Thermo	Orion 3-Star	2009년~현재 (안면도)
				2009년~현재 (고 산)
				2009년~현재 (울릉도)
				2009~2016년 (울 진)
강수 이온성분 (9종: F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+})	이온크로마토 그래프(IC)	Dionex	ICS-2000	2005년~현재 (안면도)

1.7.2 총대기침적 자료통계방법

<table>
<tr><th>관측요소</th><th>관측주기</th><th>자료통계 방법</th></tr>
<tr><td>산성도</td><td>강수 시</td><td rowspan="3">- 당일 9시부터 익일 9시까지 강수량이 0.5 mm 이하 시료 제외
- 24시간 이상채취된 자료 제외
- 아래 이온밸런스법과 전기전도도 균형을 동시에 만족하는 경우에 이용

〈 이온 차의 허용범위 검사 〉
- 총 이온농도 (CE+AE) 크기에 따른 이온 차의 허용 범위(Acceptable Ion Difference, AID)를 기준으로 자료의 타당성 판단
$Ion\,Difference\,(\%) = \frac{(CE - AE)}{(CE + AE)} \times 100$

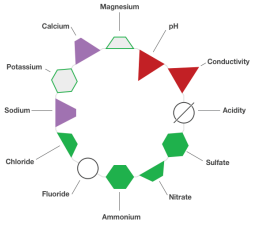
표 1. 총 이온 농도(CE+AE)에 따른 이온 차의 허용범위(AID) (WMO GAW Report No. 160)
<table><tr><th>CE+AE (μeq/L)</th><th>Acceptable Ion Difference (AID, %)</th></tr><tr><td>[CE+AE] ≤ 50</td><td>AID ≤ ±60</td></tr><tr><td>50 〈 [CE+AE] ≤ 100</td><td>AID ≤ ±30</td></tr><tr><td>100 〈 [CE+AE] ≤ 500</td><td>AID ≤ ±15</td></tr><tr><td>500 〈 [CE+AE]</td><td>AID ≤ ±10</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>전기전도도</td><td>강수 시</td></tr>
<tr><td>강수이온성분</td><td>강수 시</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td>〈 전기전도도 차 허용범위 검사 〉
- 직접 측정한 전기전도도(EC_{mea})와 이론적으로 계산한 전기전도도(EC_{cal}) 비교
- 전기전도도 차의 허용범위(Acceptable Conductivity Difference, ACD)를 기준으로 타당성 판단
$Conductivity Differene\,(\%) = \frac{EC_{cal} - EC_{mea}}{EC_{mea}} \times 100$

표 2. 측정된 전기전도도에 따른 전기전도도 차의 허용범위(ACD) (WMO GAW Report No. 160)
<table><tr><th>EC_{mea} (μS/㎝)</th><th>Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)</th></tr><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></table>
〈 이온 당량농도비 검사 〉
- 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.
$70 < Ion\,Ratio\,(\%) = \frac{CE}{AE} \times 100 < 130$</td></tr>
</table>

1.7.3 강수 국제 비교실험

WMO/지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 산하 세계 강수화학센터(World Data Centre for Precipitation Chemistry, WDCPC)는 QA/SAC (Quality Assurance/Science Activity Center)를 통하여 세계 산성비 관측소의 산성강하물 분석 능력을 평가하고 있다. 평가방법은 제조한 미지시료(Sample) 3개를 GAW 사업에 참여하는 실험실에 운송한다. 각국의 실험실에서는 지정된 마감 시일 내에 pH, 전기전도도, F^-, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}, Na^+, NH_4^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} 등 11개 요소의 분석결과를 제출한다. 이 결과는 GAW 지침서의 DQOs (Data Quality Objective) 방법에 의해 자료를 검증하게 되며, 4분위수 통계방법에 의한 상대평가로 각국 실험실을 평가하게 된다.

각국 실험실의 평가결과는 QA/SAC 홈페이지 http://www.qasac-americas.org/를 통해 게재되며, WDCPC 보고서로 발간된다. 부록그림 10은 강수화학 국제비교실험에서 분석결과를 링-다이어그램으로 나타낸 예시자료이다. 분석값 중 초록색은 참여 실험실이 제출한 중앙값에 근접한 신뢰성 있는 값이다. 부록그림 11은 2019년에 실시된 제60차 국제비교실험 참여하여 미지시료 분석한 결과를 평가하여 나타내었고, 강수분석 결과는 국제비교실험 값의 중앙값 근처에 분포하여 신뢰성 있는 결과를 보여주었다.



① Good(Green Hexagon) : IQR(Interquartile Range, 25th~75th) 범주내의 값. (SO_4^{2-} , NH_4^+)

② Satisfactory(Green Trapezoid) : 중앙값±IQR/1.349 범주내의 값. (Cl^- , NO_3^-)

③ Marginal(Purple Trapezoid) : 중앙값±2(IQR/1.349) 범주내의 값. (Na^+, Ca^{2+})

④ Biased(Red Triangle) : 중앙값±2(IQR/1.349) 범주외의 값. (pH , Conductivity)

⑤ Detection Limit(Open Circle) : 실험실 분석 한계치를 벗어난 값. (F^{--})

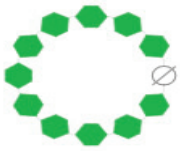
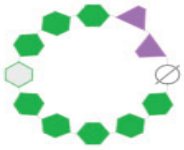
⑥ No Measurement(circle with slash) : (Acidity)

⑦ DQO(Data Quality Objectives)를 충족하지 못함. (K^+ , Mg^{2+})

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	± 7%	± 7%
acidity	± 25%	± 25%
sulfate	± 7%	**± 5%**
nitrate	± 7%	**± 5%**
ammonium	± 7%	± 7%
fluoride	none	**± 20%**
chloride	± 10%	± 10%
sodium	± 10%	± 10%
potassium	± 20%	± 20%
calcium	± 15%	± 15%
magnesium	± 10%	± 10%

부록그림 10. 강수화학 국제비교실험 분석결과 링-다이어그램 예시자료 및 변경된 DQO(Data Quality Objectives) 자료.

미지시료 1	미지시료 2	미지시료 3
		
분석요소 Good	SO_4^{2-} Satisfactory 그 외 분석요소 Good	pH , Conductivity Marginal Na^+ Good 이나 DQO를 충족하지 못함 그 외 분석요소 Good

부록그림 11. 제60차 강수화학 국제비교실험 참여 결과.

[부록 2] 지구대기감시 관측자료

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 또는 자료 품질처리로 인한 무효 처리된 자료임.

2.1 온실가스

□ 이산화탄소(CO_2) [단위: ppm]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**연평균**
1999	373.1	374.0	374.9	375.1	374.0	370.8	366.6	363.8	365.3	370.0	372.8	373.8	**371.2**
2000	375.3	376.3	377.1	377.6	375.8	372.1	368.1	365.7	367.5	372.0	375.2	376.7	**373.3**
2001	377.8	378.8	379.5	379.8	378.8	375.2	370.2	367.8	369.7	374.2	377.6	378.3	**375.6**
2002	379.4	380.5	380.6	381.0	380.3	376.9	372.7	369.9	371.8	376.9	380.0	380.9	**377.6**
2003	381.9	382.9	384.1	384.7	383.2	379.4	374.7	372.1	374.0	378.6	381.4	382.3	**379.9**
2004	384.1	385.6	385.9	386.2	384.9	381.4	376.9	374.1	376.1	380.8	383.7	385.4	**382.1**
2005	386.6	387.5	388.2	387.9	387.0	384.0	378.9	376.3	378.3	382.7	386.3	387.5	**384.3**
2006	388.3	389.1	390.0	391.0	389.9	386.4	381.8	378.6	380.6	385.2	387.9	389.5	**386.5**
2007	390.5	391.0	392.2	393.0	391.7	388.1	383.3	381.0	383.0	387.1	390.2	391.6	**388.6**
2008	392.5	393.5	394.6	395.2	393.9	390.5	385.7	382.8	384.8	389.2	392.3	393.7	**390.7**
2009	394.4	395.2	396.4	397.0	395.4	391.6	387.3	384.9	386.8	391.6	394.9	396.0	**392.6**
2010	397.1	397.9	398.0	398.3	397.8	394.8	390.3	387.8	389.5	393.6	396.6	397.6	**394.9**
2011	398.6	399.4	399.8	400.5	400.0	396.9	392.1	388.8	390.9	395.9	398.6	399.9	**396.8**
2012	401.3	402.2	403.4	404.3	403.2	399.6	394.9	392.2	393.9	398.9	402.3	403.1	**399.9**
2013	404.2	405.3	406.0	406.8	405.5	401.9	397.9	394.8	396.3	400.8	403.9	405.6	**402.4**
2014	406.6	407.7	409.2	409.1	407.5	404.3	399.3	396.9	398.9	402.6	405.8	407.8	**404.6**
2015	409.2	410.2	410.6	411.1	410.0	406.3	402.0	399.2	400.8	405.5	409.0	410.4	**407.0**
2016	411.4	412.4	413.7	414.2	412.8	409.1	404.5	402.1	404.3	408.8	411.8	413.2	**409.9**
2017	413.5	414.5	415.8	416.3	415.2	412.1	408.0	405.1	406.1	410.3	414.1	415.7	**412.2**
2018	416.8	418.0	419.1	419.7	417.7	414.1	410.2	407.0	408.9	414.2	417.7	418.4	**415.2**
2019	419.0	420.0	421.1	422.0	420.5	416.8	413.6	411.8	412.8	416.2	419.3	421.2	**417.9**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	400.3	401.4	401.9	403.4	402.9	399.4	395.7	392.7	393.3	398.0	401.0	401.4	**399.3**
2013	402.9	404.4	405.1	405.9	405.0	402.0	398.1	394.7	395.5	400.0	402.7	403.3	**401.6**
2014	404.4	405.5	406.5	407.4	406.8	404.3	400.5	397.2	397.5	401.5	404.9	405.8	**403.5**
2015	406.9	408.5	409.6	410.3	409.6	406.9	403.2	399.8	400.4	405.0	408.3	409.5	**406.5**
2016	410.9	411.2	412.8	413.8	412.1	409.4	406.0	403.6	404.1	407.4	411.0	412.2	**409.5**
2017	412.6	413.2	416.1	415.7	413.9	411.0	408.4	405.5	406.6	409.9	413.4	414.7	**411.8**
2018	415.0	416.3	417.2	418.3	416.7	413.3	410.1	408.6	409.5	413.0	416.1	416.9	**414.3**
2019	417.7	419.2	420.1	420.7	418.8	416.4	413.3	411.7	412.0	415.6	417.9	419.5	**416.9**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2014	405.1	406.0	407.2	407.7	405.9	400.5	392.8	389.8	394.4	401.1	405.0	406.6	**401.8**
2015	407.7	408.8	409.6	410.3	409.2	402.9	395.2	392.2	395.4	402.9	407.5	409.0	**404.2**
2016	410.6	411.6	413.0	414.1	411.0	-	(397.0)	(394.7)	(400.1)	(406.8)	411.4	412.5	**407.5**
2017	413.2	414.7	415.6	415.8	413.9	406.6	399.2	396.9	402.3	409.0	413.6	415.2	**409.7**
2018	415.7	417.7	418.2	419.4	417.4	410.9	402.7	399.9	405.5	412.6	415.8	416.7	**412.7**
2019	418.1	419.8	420.9	420.2	419.2	411.8	404.6	402.2	406.9	413.7	417.6	419.5	**414.5**

* "( )"는 보정 자료, 2018 지구대기감시 보고서 참조 (2019)

○ 독도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2014	404.0	405.3	406.4	406.9	406.0	402.1	396.0	391.7	393.5	399.4	404.0	405.6	**401.7**
2015	406.4	407.5	408.8	409.5	408.5	404.8	398.6	394.3	396.2	402.0	406.5	408.1	**404.3**
2016	409.2	411.0	411.6	412.0	410.8	406.8	401.1	397.8	400.0	404.6	408.6	410.2	**407.0**
2017	410.8	412.2	413.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	410.3	413.5	414.3	**-**
2019	416.6	417.7	418.8	419.4	418.5	414.6	409.1	406.1	407.7	412.2	416.1	417.9	**414.6**

□ 메탄(CH_4) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**연평균**
1999	–	–	–	1869	1863	1851	1844	1837	1865	1888	1864	1868	**1861**
2000	1864	1878	1888	1875	1859	1840	1827	1819	1859	1868	–	–	**1858**
2001	–	–	–	–	1841	1850	1809	1838	1874	1874	1861	1864	**1851**
2002	1877	1875	1868	1864	1863	1858	1825	1826	1869	1871	1870	1876	**1862**
2003	1895	–	–	–	–	1865	1869	1831	–	–	1888	1898	**1874**
2004	–	–	–	–	–	–	–	–	1870	–	1873	1873	**1872**
2005	1871	1866	1874	1865	1860	1859	1812	1823	1862	–	–	–	**1855**
2006	1857	1862	1857	1848	1870	1881	1832	1813	1881	1901	1890	1901	**1866**
2007	1905	1901	1892	1892	–	–	–	1831	1900	–	1900	1897	**1890**
2008	1900	1909	1913	1901	1893	1896	1840	1844	1856	1901	1910	1910	**1889**
2009	1906	1916	1910	1906	1895	1881	1869	1879	1908	1909	1905	1915	**1900**
2010	1918	1913	1920	1907	1884	1902	1851	1863	1918	1913	1912	1917	**1901**
2011	1911	1922	1907	1906	1903	1895	1877	1870	1925	1919	1920	1925	**1907**
2012	1929	1931	1932	1918	1927	1906	1878	1881	1927	1929	1933	1943	**1919**
2013	1948	1953	1948	1932	1932	1931	1892	1885	1931	1940	1937	1942	**1931**
2014	1944	1953	1943	1938	1941	1939	1885	1910	1962	1952	1964	1962	**1941**
2015	1970	1961	1954	1952	1937	1942	1925	1906	1972	1956	1979	1970	**1952**
2016	1967	1964	1968	1965	1966	1960	1929	1920	1984	1991	1991	1980	**1965**
2017	1984	1972	1975	1966	1962	1955	1951	1958	1979	1977	1977	1987	**1970**
2018	1983	1981	1983	1969	1972	1964	1948	1951	1981	1981	1988	1989	**1974**
2019	1998	2002	1989	1970	1984	1993	1958	1979	2011	1998	1998	2013	**1991**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**연평균**
2014	1934	1941	1932	1923	1935	1932	1895	1915	1955	1932	1919	1932	**1929**
2015	1939	1945	1947	1934	1933	1934	1886	1887	1945	1950	1951	1963	**1934**
2016	1955	1946	1952	1953	1946	1905	1874	1924	1946	1940	1953	1959	**1938**
2017	1957	1955	1958	1954	1954	1917	1886	1934	1968	1959	1957	1964	**1947**
2018	1965	1971	1966	1953	1957	1927	1875	1891	1944	1968	1970	1975	**1947**
2019	1979	1984	1985	1968	1966	1978	1932	1912	1960	1979	1978	1985	**1967**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**연평균**
2018	1953	1959	1961	1953	1947	1921	1895	1911	1946	1958	1958	1958	**1943**
2019	1967	1978	1972	1957	1958	1956	1936	1934	1951	1958	1968	1980	**1960**

□ 아산화질소(N_2O) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	315.2	314.6	314.2	314.6	315.6	316.3	316.4	314.0	312.1	313.7	313.8	**314.6**
2000	312.6	313.4	313.6	314.1	315.4	315.4	315.0	314.5	314.9	316.3	316.5	316.5	**314.9**
2001	315.8	314.3	314.3	315.3	316.0	317.0	317.3	316.6	315.7	315.7	316.7	317.6	**316.0**
2002	317.8	317.7	317.7	318.3	318.8	319.0	318.9	318.2	318.0	318.0	318.3	319.0	**318.3**
2003	318.5	318.7	320.2	320.2	-	-	-	-	-	-	-	-	**319.4**
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2006	-	-	-	-	-	-	-	321.1	321.8	321.7	321.7	322.0	**321.7**
2007	322.9	323.5	322.4	321.3	321.0	320.7	321.9	322.4	321.0	321.4	321.9	321.8	**321.9**
2008	322.3	321.9	321.3	320.9	321.6	324.1	323.7	321.6	323.8	325.3	323.3	322.7	**322.7**
2009	323.3	323.3	323.6	323.8	323.4	323.6	324.5	324.4	323.9	324.2	324.1	323.8	**323.8**
2010	323.2	323.3	324.4	324.4	324.3	325.3	325.4	325.7	326.4	326.6	325.8	324.3	**324.9**
2011	324.5	325.3	324.5	324.5	324.9	324.8	325.5	324.5	322.6	322.8	322.9	324.1	**324.2**
2012	326.6	326.7	326.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**326.5**
2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	325.5	326.6	**326.1**
2014	-	-	-	-	-	-	-	326.0	325.7	325.8	326.3	325.5	**325.8**
2015	328.1	329.5	328.8	328.4	328.2	329.1	328.2	329.0	328.8	329.6	329.9	330.0	**329.0**
2016	329.2	329.5	330.0	330.2	330.3	330.3	330.3	330.4	330.6	330.1	329.7	329.5	**330.0**
2017	330.5	329.7	330.4	330.7	330.6	331.0	332.5	333.0	332.0	332.1	331.8	332.0	**331.4**
2018	332.3	332.1	333.2	333.2	333.1	333.4	333.1	333.0	332.6	332.7	333.3	333.0	**332.9**
2019	332.5	333.2	333.3	333.5	334.3	334.8	334.5	334.2	334.4	334.3	333.8	333.9	**333.9**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	322.5	324.8	325.4	325.9	326.1	326.3	326.5	325.8	327.0	325.9	325.1	325.2	**325.5**
2013	326.4	327.0	324.5	324.3	325.2	325.2	324.1	326.0	326.5	326.9	327.1	327.3	**325.9**
2014	327.5	327.9	329.0	329.1	329.0	328.3	327.5	326.3	326.6	325.6	325.7	326.5	**327.4**
2015	329.0	329.3	329.4	330.1	329.3	329.1	328.7	328.9	329.1	329.3	329.6	329.9	**329.3**
2016	330.0	329.6	329.8	329.9	329.9	-	-	330.1	330.8	330.6	330.6	330.1	**330.1**
2017	329.9	329.9	330.3	331.0	330.5	330.9	330.3	331.6	332.0	331.8	331.9	331.5	**331.0**
2018	332.0	332.1	332.6	332.4	332.4	332.1	331.3	331.3	332.2	332.8	333.3	332.9	**332.3**
2019	332.7	333.2	333.4	333.3	333.6	333.7	333.6	333.9	333.6	333.4	333.6	333.8	**333.5**

□ 육불화황(SF_6) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2007	-	-	6.2	6.4	6.3	6.5	6.6	6.1	6.0	6.0	6.4	6.8	**6.3**
2008	6.6	6.4	6.5	6.0	6.6	6.9	6.8	6.7	6.2	6.4	7.0	7.1	**6.6**
2009	7.0	7.2	7.1	7.3	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.2	7.4	7.2	**7.3**
2010	7.5	7.1	7.5	7.8	7.8	7.9	7.0	6.8	7.2	8.4	8.6	8.4	**7.7**
2011	8.3	8.0	7.7	7.6	7.7	7.8	8.2	7.9	8.3	8.2	8.7	8.7	**8.1**
2012	8.1	7.9	8.0	8.0	8.3	7.9	7.8	8.4	8.4	8.2	8.2	8.1	**8.1**
2013	8.1	8.1	8.2	8.2	8.2	8.4	8.2	8.2	8.2	8.4	8.4	8.3	**8.2**
2014	8.4	8.7	8.5	9.1	9.4	9.6	9.5	9.7	9.7	9.5	9.3	8.9	**9.2**
2015	8.9	9.2	9.3	9.2	9.1	9.2	9.1	9.8	9.5	8.9	9.8	9.4	**9.3**
2016	9.4	9.3	9.3	9.6	9.6	9.8	9.5	9.2	9.3	-	9.4	9.5	**9.5**
2017	9.1	9.4	9.6	9.3	9.7	9.8	9.8	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8	**9.6**
2018	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8	9.9	9.7	9.8	9.8	9.8	9.9	9.9	**9.8**
2019	10.1	10.1	10.1	10.2	10.4	10.5	10.3	10.3	10.3	10.4	10.3	10.4	**10.3**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2017	9.4	9.8	9.7	9.5	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8	**9.7**
2018	9.7	9.8	9.9	9.9	10.0	9.9	9.8	9.8	9.9	10.0	10.0	10.0	**9.9**
2019	10.1	10.1	10.1	10.2	10.3	10.5	10.0	10.0	10.2	10.3	10.3	10.3	**10.2**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2017	9.3	9.3	9.4	9.5	9.5	9.7	10.0	9.6	9.7	9.7	9.7	9.7	**9.6**
2018	-	-	-	-	9.7	9.9	9.8	9.9	9.8	9.8	9.9	9.9	**(9.8)**
2019	10.0	10.0	10.1	10.1	10.1	10.4	10.7	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	**10.3**

□ 염화불화탄소-113(CFC-113) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2007	-	75.7	82.3	73.9	73.9	79.7	76.7	91.4	90.2	88.5	82.8	80.4	**81.4**
2008	75.6	76.9	76.7	79.0	76.8	74.2	70.3	76.5	77.8	76.4	79.3	82.3	**76.8**
2009	70.8	80.0	78.3	76.2	76.7	75.9	79.9	76.7	80.0	80.0	80.7	83.6	**78.2**
2010	81.4	77.5	72.2	63.8	62.7	75.3	79.3	74.0	72.4	73.7	75.2	75.2	**73.6**
2011	81.0	80.5	74.1	72.0	75.3	75.6	76.3	76.1	75.6	76.3	75.8	75.1	**76.1**
2012	74.2	75.3	76.2	78.3	80.3	77.6	72.9	72.1	71.9	72.5	73.8	73.4	**74.9**
2013	73.8	74.0	72.9	73.0	73.2	73.8	74.6	71.8	70.4	70.3	70.5	73.1	**72.6**
2014	73.6	72.6	67.8	74.4	74.8	72.0	72.7	72.2	-	71.3	72.6	72.5	**72.4**
2015	69.1	72.7	75.2	71.6	69.4	72.7	71.9	70.8	71.1	71.8	73.3	71.9	**71.8**
2016	71.9	-	69.6	-	71.9	72.7	73.2	73.5	72.3	72.9	74.2	73.6	**72.6**
2017	71.7	71.8	72.1	70.4	70.8	71.8	71.6	71.2	71.3	70.9	70.2	70.0	**71.2**
2018	70.0	70.1	70.3	70.4	70.5	70.5	70.2	70.2	69.7	69.7	69.9	69.5	**70.1**
2019	71.0	70.9	70.9	70.7	69.5	69.2	68.8	68.8	69.4	69.3	68.3	68.2	**69.6**

□ 염화불화탄소-11(CFC-11) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	266.9	267.5	266.7	268.6	269.1	268.6	267.9	267.4	269.8	267.6	265.8	**267.8**
2000	266.5	265.8	264.3	265.5	266.9	267.4	270.3	270.7	267.6	265.7	265.6	265.4	**266.8**
2001	266.0	266.5	265.3	266.2	265.8	263.9	264.2	267.4	264.9	263.7	262.5	262.8	**264.9**
2002	262.6	262.7	263.6	264.5	265.7	266.1	267.0	265.7	266.4	261.5	260.2	261.3	**264.0**
2003	256.7	257.6	254.2	261.0	262.2	260.6	260.5	260.0	260.2	259.4	259.1	258.2	**259.1**
2004	258.0	-	-	258.2	258.9	258.6	255.5	256.3	257.6	262.0	265.0	263.1	**259.3**
2005	264.4	264.3	261.0	265.1	266.2	265.4	265.1	263.5	265.5	264.9	266.3	-	**264.7**
2006	-	-	-	-	-	-	265.9	265.4	256.6	243.9	240.9	238.4	**251.8**
2007	235.1	239.1	237.0	232.5	233.7	244.7	236.8	229.9	231.1	232.6	214.9	202.9	**230.9**
2008	208.2	230.3	228.5	231.3	228.0	223.0	253.3	254.1	249.5	246.3	246.1	249.5	**237.3**
2009	246.0	249.3	249.9	246.8	244.0	241.7	249.7	247.9	246.7	247.5	246.2	247.8	**246.9**
2010	249.5	251.5	251.8	213.0	214.7	223.2	221.3	207.8	214.2	238.6	242.2	241.4	**230.8**
2011	257.9	269.0	237.1	240.4	233.7	233.0	234.1	232.8	-	239.3	247.4	246.2	**242.8**
2012	231.9	233.1	233.0	222.5	223.4	220.7	207.2	204.4	204.8	201.9	198.1	197.7	**214.9**
2013	196.8	194.7	214.7	221.1	221.6	221.8	224.0	-	-	224.4	228.0	241.1	**218.8**
2014	244.8	219.1	230.3	237.1	239.9	239.8	240.2	237.2	-	234.7	235.6	232.2	**235.5**
2015	231.7	230.1	232.1	227.3	227.2	244.1	235.9	236.3	237.2	235.3	232.7	232.7	**233.6**
2016	239.6	238.4	-	232.3	235.8	237.1	237.7	239.9	236.8	243.0	249.1	243.3	**239.4**
2017	230.4	230.0	230.7	231.8	232.9	232.9	230.4	230.9	232.2	232.0	228.6	227.8	**230.9**
2018	227.5	227.4	228.1	229.5	230.4	230.7	228.3	228.1	228.0	228.4	228.2	224.6	**228.3**
2019	231.3	231.8	231.8	232.2	229.4	229.5	226.0	225.7	226.8	227.0	227.2	227.0	**228.8**

□ 염화불화탄소-12(CFC-12) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**연평균**
1999	-	534.1	535.1	534.7	535.1	533.7	533.7	538.6	537.1	538.2	537.9	537.4	**536.0**
2000	537.4	539.4	539.2	539.4	540.2	538.5	538.2	-	538.6	540.3	539.5	537.8	**539.0**
2001	538.9	537.7	539.4	539.1	541.9	537.7	540.4	541.9	538.8	541.8	541.4	540.0	**539.9**
2002	541.3	540.1	541.6	544.0	542.7	543.1	543.5	543.5	544.5	543.6	543.7	544.4	**543.0**
2003	541.3	540.1	540.8	540.2	-	538.4	541.8	540.9	541.1	541.6	540.0	529.0	**539.6**
2004	530.5	532.3	538.9	-	537.4	539.8	539.2	539.6	539.5	540.3	541.5	538.9	**538.0**
2005	540.5	540.1	540.8	539.8	539.8	542.1	-	542.4	539.7	541.1	538.9	541.0	**540.6**
2006	537.3	539.0	540.4	540.6	540.6	-	540.9	-	523.0	511.0	504.0	523.1	**530.0**
2007	526.1	536.9	550.6	539.0	539.5	541.7	541.6	551.6	552.6	546.1	507.6	489.2	**535.2**
2008	489.1	511.0	528.5	548.4	528.1	515.9	534.0	532.3	518.5	509.4	519.0	531.6	**522.2**
2009	527.4	530.8	530.6	529.2	518.6	522.7	531.6	526.6	527.5	527.5	527.5	532.5	**527.7**
2010	534.6	539.0	539.4	508.5	513.5	532.2	533.4	503.1	510.5	523.8	534.2	538.1	**525.9**
2011	-	-	501.8	510.4	486.1	480.1	480.4	484.2	485.3	550.5	545.6	543.5	**506.8**
2012	525.7	528.6	530.0	505.9	500.0	499.1	503.2	506.2	505.3	504.4	505.4	505.6	**509.9**
2013	503.7	500.8	524.9	525.4	526.6	520.4	509.6	-	-	-	-	518.5	**516.2**
2014	519.2	508.6	530.6	531.0	530.4	519.3	521.5	520.5	-	518.8	517.9	513.7	**521.1**
2015	-	530.4	538.6	518.3	504.9	522.9	514.7	516.1	518.5	516.4	523.7	523.1	**520.7**
2016	524.6	523.5	-	513.0	522.4	531.1	533.4	533.1	519.7	534.1	550.0	542.4	**529.8**
2017	515.2	514.8	514.8	511.6	510.5	510.5	510.0	509.6	510.5	508.9	503.8	502.4	**510.2**
2018	503.3	503.4	504.3	505.2	505.0	504.9	504.0	503.6	500.0	499.9	500.5	-	**503.1**
2019	-	-	-	-	499.1	497.6	496.3	496.1	498.6	498.3	498.4	498.7	**497.9**

※ CFC-12의 2018년 12월 장비 이상이 장기관측자료에서 발견되어 2018년 발표되었던 연평균 수정

2.2 반응가스

※ 안면도 자료 (2014. 3. ~ 2017.2.) 는 관측환경에 따른 품질처리로 무효 처리됨.
※ 안면도 기준으로 최근 10년 월평균값을 제시함.

□ 오존(O_3) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	29.5	32.1	39.5	55.5	56.0	50.9	38.4	36.8	46.1	45.0	29.9	15.7	**39.6**
2010	33.5	35.4	42.7	49.3	56.8	60.8	40.2	36.6	41.0	45.0	42.3	34.1	**43.1**
2011	36.9	40.5	47.9	54.9	58.3	53.8	37.6	38.8	44.9	42.2	34.2	28.0	**43.2**
2012	28.3	35.7	44.8	50.6	58.2	42.9	33.5	30.7	50.3	41.4	29.4	23.5	**39.1**
2013	33.5	36.6	44.2	51.5	56.8	50.4	34.3	40.5	42.0	32.6	26.9	26.2	**39.6**
2014	23.6	28.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2017	-	-	54.1	57.6	59.1	55.6	41.6	42.8	52.8	38.3	34.8	30.5	**46.7**
2018	32.2	39.9	47.1	49.6	52.7	51.5	28.1	40.1	43.1	41.8	37.9	31.0	**41.3**
2019	36.2	40.5	48.9	46.5	59.4	48.0	37.5	44.6	37.2	40.3	34.3	32.5	**42.2**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	-	44.3	36.1	28.0	52.3	49.8	36.6	37.4	**40.6**
2013	47.1	44.1	56.2	64.1	52.1	33.3	19.3	21.7	44.9	39.8	35.2	37.6	**41.3**
2014	36.9	42.0	46.8	64.6	65.8	55.8	32.9	33.3	43.3	40.5	39.3	35.3	**44.7**
2015	39.7	50.0	57.2	62.7	51.1	49.6	38.6	38.0	43.9	47.9	34.8	27.6	**45.1**
2016	30.2	47.0	50.3	52.6	55.9	40.5	21.8	28.1	34.1	39.9	36.8	34.5	**39.3**
2017	41.0	50.9	56.8	65.4	56.2	49.2	29.3	39.9	48.9	43.6	41.9	36.7	**46.7**
2018	38.3	45.5	50.6	52.8	49.8	45.7	16.7	26.9	44.6	48.3	44.2	37.8	**41.8**
2019	42.6	47.5	57.8	55.4	64.4	50.0	34.9	37.4	37.0	46.0	40.9	37.3	**45.9**

□ 일산화탄소(CO) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	243.4	351.8	255.7	301.3	216.5	198.2	181.9	267.1	238.8	219.4	213.4	290.2	**248.2**
2010	268.9	287.0	244.3	243.0	288.1	229.9	159.1	180.0	246.1	234.5	278.6	303.1	**246.9**
2011	253.7	485.6	306.6	294.3	278.8	275.4	126.2	193.0	224.3	298.8	493.5	289.3	**293.3**
2012	450.7	318.2	322.2	256.5	320.7	212.3	180.4	188.3	265.8	237.0	317.4	353.9	**285.3**
2013	473.4	367.1	322.0	363.7	314.7	269.2	215.1	228.9	247.0	243.3	299.0	344.1	**307.3**
2014	326.6	377.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2017	-	-	376.5	233.6	177.8	204.5	180.9	216.6	291.2	256.6	265.9	319.9	**252.0**
2018	369.5	322.9	314.7	245.6	219.4	226.6	123.9	175.7	202.3	236.2	365.1	331.3	**261.1**
2019	412.0	404.7	398.8	267.0	288.3	222.6	189.4	246.8	227.0	251.8	277.1	304.5	**290.8**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	-	131.0	108.6	79.9	148.1	163.6	195.9	188.4	**145.1**
2013	246.9	204.6	217.3	208.5	231.2	152.9	81.6	99.5	144.6	154.2	219.9	210.8	**181.0**
2014	241.9	254.7	209.1	206.0	263.8	199.4	143.1	145.0	189.0	175.6	218.3	211.5	**204.8**
2015	235.6	245.1	246.8	238.0	177.9	192.2	158.3	206.7	235.5	300.7	265.1	284.0	**231.6**
2016	296.0	241.8	234.2	250.1	234.0	205.0	136.2	166.4	216.1	200.0	220.9	203.5	**217.0**
2017	263.0	261.1	286.1	253.9	190.2	202.2	127.6	180.7	224.7	189.5	212.4	232.8	**218.6**
2018	213.5	262.4	240.0	209.7	181.9	156.9	93.3	117.2	196.2	212.6	235.9	257.3	**198.1**
2019	264.8	275.9	267.2	201.9	200.6	170.2	126.7	169.0	143.1	165.9	184.5	217.2	**198.5**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2015	-	-	271.5	219.6	208.4	182.9	156.0	171.7	155.9	177.7	184.3	213.8	**194.0**
2016	231.6	234.6	241.8	231.2	189.8	168.8	96.1	116.4	108.7	129.1	156.2	156.4	**171.7**
2017	210.4	239.8	248.7	218.5	205.6	153.0	152.5	102.0	159.5	153.9	189.7	198.4	**186.0**
2018	212.8	231.4	215.6	217.0	194.5	163.0	117.7	137.2	156.6	153.1	190.6	182.7	**181.0**
2019	199.9	232.8	233.5	168.9	191.0	158.1	153.5	182.3	132.3	133.1	151.1	195.5	**177.7**

□ 질소산화물(NOX) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	9.7	10.3	6.4	7.7	7.3	4.5	3.6	5.6	10.6	8.8	8.7	10.8	**7.8**
2010	8.7	11.0	7.2	9.0	8.3	5.3	2.7	4.2	5.9	8.9	9.3	11.4	**7.7**
2011	8.2	13.9	7.7	8.8	8.3	6.0	4.5	7.2	9.6	12.4	10.1	7.6	**8.7**
2012	9.2	8.2	5.8	4.5	7.5	5.2	5.1	8.4	5.0	5.5	8.3	11.1	**7.0**
2013	7.5	6.7	4.9	4.6	7.6	7.1	3.7	2.5	5.4	7.1	7.4	11.0	**6.3**
2014	7.8	12.4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	**–**
2015	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	**–**
2016	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	**–**
2017	–	–	10.3	7.4	3.8	4.1	2.4	3.5	5.3	6.7	5.8	8.0	**5.7**
2018	8.9	6.2	6.9	4.8	4.4	4.4	3.3	3.6	4.3	5.4	8.3	9.5	**5.8**
2019	7.1	7.1	8.2	7.6	5.2	3.7	2.1	3.5	4.3	–	9.5	8.0	**6.0**

※ 2019. 10. 자료는 WCC-NOx의 장비비교실험(MetNO2) 참가로 결측함.

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	–	–	–	–	–	3.5	2.6	2.6	3.2	3.5	3.7	3.5	**3.2**
2013	3.3	3.0	4.0	3.5	4.1	5.0	1.8	2.6	4.9	3.7	3.5	4.3	**3.6**
2014	3.7	4.0	3.5	3.8	3.3	2.8	2.9	2.9	3.9	4.3	3.8	3.1	**3.5**
2015	3.9	3.2	5.2	4.4	4.3	3.1	3.6	3.5	4.0	4.4	4.0	3.9	**4.0**
2016	3.9	3.4	3.7	4.5	4.4	3.3	2.9	2.6	4.2	4.6	3.8	3.7	**3.7**
2017	3.5	3.0	3.8	5.0	2.9	3.2	2.4	3.0	3.3	3.4	3.0	3.0	**3.3**
2018	3.2	3.2	4.1	3.5	3.3	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	3.9	4.9	4.9	**4.7**

□ 이산화황(SO_2) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	4.0	3.9	2.6	3.7	2.5	1.5	1.1	1.5	2.4	2.8	2.0	2.3	**2.5**
2010	4.7	2.9	2.0	2.2	2.7	1.7	1.0	0.9	1.8	2.4	3.3	4.0	**2.5**
2011	5.2	5.6	3.1	3.2	3.7	1.5	0.9	1.3	2.1	3.0	2.9	4.4	**3.1**
2012	7.7	3.7	2.0	1.4	2.0	1.4	1.3	1.3	1.2	1.6	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	2.0	3.9	**2.5**
2014	4.6	4.1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	**–**
2015	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	**–**
2016	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	**–**
2017	–	–	2.8	1.3	1.7	1.5	0.7	1.1	1.6	1.6	1.4	2.0	**1.5**
2018	2.5	2.3	1.3	1.4	1.1	1.4	1.2	1.3	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	1.4	1.2	**1.0**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	–	–	–	–	–	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.8	0.6	**0.5**
2013	1.3	0.8	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.4	1.1	**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	0.3	0.6	0.4	0.6	0.6	0.7	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	**0.5**
2017	0.4	0.4	0.4	0.8	0.8	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	**0.5**
2018	0.8	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	1.8	1.3	1.1	0.8	1.6	0.9	0.6	1.2	0.7	0.8	0.8	0.8	**1.0**

2.3 에어로졸

□ PM10 (부유분진측정기, β-선 흡수법) [단위: ㎍/㎥]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	-	-	-	46	53	47	33	24	34	39	34	54	-
2004	51	54	80	55	64	51	-	29	-	49	45	42	**49**
2005	45	39	57	75	49	39	43	-	43	58	69	40	**51**
2006	48	59	71	101	52	41	23	34	35	53	44	46	**50**
2007	49	63	53	70	72	26	34	19	25	36	49	49	**46**
2008	43	46	55	54	42	30	25	29	36	46	-	42	**41**
2009	32	55	43	51	41	35	27	26	35	41	28	43	**38**
2010	34	28	44	36	39	31	24	26	29	37	63	53	**37**
2011	33	59	56	50	78	32	24	26	29	40	37	31	**41**
2012	48	37	38	39	46	28	22	24	34	30	40	34	**35**
2013	51	38	44	47	46	33	31	34	37	31	35	40	**39**
2014	45	49	43	44	61	38	33	25	26	29	31	30	**38**
2015	37	52	50	35	33	31	27	29	26	39	26	32	**35**
2016	33	34	41	50	40	33	22	31	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**

○ 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	-	-	-	-	**31**
2017	29	28	34	42	39	29	26	25	-	29	33	26	**31**
2018	26	32	29	42	24	25	28	27	23	28	36	29	**29**
2019	35	44	49	31	44	29	26	31	-	29	42	26	**35**

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

□ 미세입자 크기별 수농도 [총수농도, 단위: 개/㎤]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2005	6116	6406	6028	5408	5570	3807	4373	4886	-	4610	5131	3848	**5078**
2006	6902	4073	4384	3914	4240	3441	3383	3181	3131	2410	4503	3528	**3970**
2007	4308	3939	3764	3653	4841	4635	3724	3478	3985	4834	6069	4459	**4233**
2008	6063	3459	3435	3591	3563	3882	2342	2315	5472	4763	4437	4283	**3973**
2009	4240	3065	3606	3564	-	2013	2041	3890	4270	3595	2718	3313	**3400**
2010	3857	4098	3704	4194	3859	3466	2722	2567	3494	3838	3234	3039	**3501**
2011	4048	4020	4646	3581	4154	2528	2975	3264	3414	3402	-	3467	**3577**
2012	-	4405	3790	4105	3511	2899	2662	4209	4306	-	5281	5255	**4124**
2013	4677	4905	4685	4788	3804	4367	2484	3260	5148	4872	4178	3646	**4242**
2014	4384	4485	3924	4940	3822	3375	3695	1649	4434	-	-	4482	**3857**
2015	4541	3926	2135	3826	4494	4984	4820	3864	4741	4786	3283	3878	**4107**
2016	5660	7238	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**-**
2017	-	-	-	-	-	-	3406	4081	4845	4764	4565	4725	**4347**
2018	4709	4848	4059	4314	-	-	5630	4456	-	-	4046	-	**4565**
2019	-	-	4513	4883	4681	3650	3514	-	-	-	5935	4097	**4342**

※ 2005~2016(0.01~0.5 μm), 2017~ (0.008~1.2 μm, 표준상태 (0°C) 변환값)

□ 응결핵 수농도(0.01 ~ 3 μm) [단위: 개/㎤]

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2010	-	-	-	-	-	-	-	6683	10881	11386	11023	7464	**9718**
2011	5281	7689	9539	7071	7907	6562	6305	9533	11812	11203	8257	5476	**8051**
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	4665	5208	4945	5497	4876	4125	3167	**4749**
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	3973	2926	**-**
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**

※ 2013년 12월부터 수월봉(슈퍼사이트)에서 관측
2017년 10월부터 수월봉(통합관측실)으로 관측위치 변경

□ 550 nm 에어로졸 광산란계수 [단위: Mm^{-1}]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**연평균**
2003	160.1	233.3	244.6	152.6	276.8	273.7	222.9	180.1	-	132.9	115.0	152.6	**192.7**
2004	149.4	118.4	126.7	114.6	169.6	164.2	84.0	110.4	-	-	-	-	**131.7**
2005	206.8	108.3	149.6	144.7	150.1	253.0	364.3	176.3	159.7	152.6	122.1	86.4	**171.5**
2006	151.4	163.9	143.9	147.6	187.5	252.2	114.6	189.5	117.0	186.9	96.9	163.2	**159.5**
2007	178.4	200.0	159.8	173.3	155.5	106.5	166.4	63.6	82.5	124.3	135.6	156.0	**144.4**
2008	104.7	91.2	156.3	192.2	103.0	118.5	103.1	99.2	-	120.1	112.0	-	**120.3**
2009	-	-	106.4	180.5	114.1	144.2	100.7	-	89.8	97.3	74.6	120.3	**114.5**
2010	104.6	88.9	91.9	95.5	82.6	152.7	70.1	70.5	71.8	104.8	171.1	117.5	**101.6**
2011	73.9	211.1	98.9	116.1	125.5	122.4	67.4	84.8	75.8	122.4	127.3	95.0	**108.9**
2012	169.1	119.0	113.5	79.4	-	109.7	-	-	-	-	68.0	109.8	**117.1**
2013	146.4	103.5	101.7	102.6	127.0	127.1	130.5	120.2	93.1	75.1	110.6	113.8	**112.8**
2014	133.3	178.8	128.3	153.0	148.6	171.9	129.1	104.5	84.3	-	-	-	**134.3**
2015	118.0	142.7	169.0	107.5	101.1	138.8	141.1	137.3	79.7	124.6	122.7	122.4	**124.3**
2016	102.8	73.9	99.2	103.2	58.2	88.6	49.6	74.3	76.0	51.9	57.5	-	**77.2**
2017	-	85.0	131.9	90.1	73.4	80.2	74.6	57.5	78.3	54.3	70.0	85.1	**80.0**
2018	115.5	83.8	108.3	71.9	74.8	106.9	54.1	55.3	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**

□ 지상 에어로졸 산란 옹스트롬 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	1.44	**1.51**
2004	1.51	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	1.70	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	1.51	1.50	1.59	1.69	1.75	1.62	1.64	1.85	-	1.89	1.88	-	**1.68**
2009	-	-	1.53	1.79	1.77	1.49	1.30	-	1.82	1.59	1.54	1.42	**1.59**
2010	1.54	1.56	1.54	1.65	1.73	1.76	1.72	1.69	1.67	1.73	1.47	1.36	**1.62**
2011	1.41	1.58	1.46	1.67	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	1.50	**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	1.60	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**

□ 550 nm 에어로졸 광흡수계수 [단위: Mm^{-1}]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.8	10.4	8.2	-
2011	5.3	11.3	5.4	7.0	7.0	8.1	5.7	6.8	8.2	12.0	10.9	8.6	**7.8**
2012	11.6	8.9	7.5	6.1	-	-	-	-	8.4	8.6	8.0	12.3	**9.4**
2013	14.0	10.2	10.4	9.9	10.4	8.8	5.4	6.8	9.2	9.6	9.3	11.3	**9.3**
2014	11.8	13.3	11.1	12.5	10.9	8.0	6.2	6.1	7.2	7.6	8.4	7.3	**9**
2015	9.8	9.7	10.1	7.3	6.7	6.6	5.9	5.6	4.7	-	11.3	11.7	**7.9**
2016	9.8	7.7	9.4	10.3	9.6	9.1	6.3	8.3	10.3	10.5	9.9	9.2	**8.2**
2017	8.4	7.3	10.0	-	4.5	4.2	2.0	-	-	6.4	5.8	6.9	**6.5**
2018	8.9	7.6	5.8	4.8	4.9	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**

[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~)

□ 에어로졸 화학

○ PM10 이온 [단위: ㎍/㎥]

연	개수	F^-	Cl^-	NO_3^-	nss-SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	nss-Ca^{2+}
2008	28	0.2	2.8	9.8	6.0	4.2	1.5	1.3	0.2	0.5
2009	23	0.1	1.6	8.8	5.9	1.8	2.8	0.5	0.2	0.8
2010	42	0.1	1.3	7.7	6.5	1.5	2.9	0.5	0.2	0.8
2011	37	0.1	0.9	8.2	6.5	1.2	3.0	0.3	0.3	1.0
2012	39	0.1	0.9	7.4	5.0	0.8	3.4	0.2	0.2	0.6
2013	43	0.1	1.3	8.6	6.1	1.3	3.9	0.2	0.3	0.7
2014	41	0.1	1.0	8.9	7.3	1.1	4.7	0.3	0.2	0.7
2015	33	0.1	1.0	7.8	6.9	1.1	3.9	0.2	0.2	0.5
2016	47	0.1	0.9	7.4	5.9	1.2	2.4	0.6	0.2	0.5
2017	37	0.0	2.0	6.6	6.4	1.7	3.1	0.4	0.2	0.5
2018	57	0.0	1.3	5.9	5.7	1.1	3.1	0.2	0.1	0.2
2019	69	0.0	1.5	5.8	5.4	1.3	2.9	0.2	0.2	0.5
연평균	**496**	**0.1**	**1.3**	**7.5**	**6.1**	**1.4**	**3.2**	**0.4**	**0.2**	**0.6**

계절	기간	개수	F^-	Cl^-	NO_3^-	nss-SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	nss-Ca^{2+}
겨울	2009~2018	88	0.1	2.0	7.9	6.6	1.7	3.6	0.5	0.2	0.6
	2019	19	0.0	2.6	7.9	5.0	1.7	3.3	0.3	0.2	0.6
봄	2009~2018	128	0.1	1.2	8.6	7.6	1.3	3.8	0.4	0.2	0.9
	2019	18	0.0	1.8	9.0	5.9	1.5	3.8	0.2	0.2	0.7
여름	2009~2018	76	0.1	0.5	7.7	5.0	0.8	3.4	0.2	0.1	0.4
	2019	19	0.0	0.5	2.1	6.2	0.7	2.4	0.1	0.1	0.1
가을	2009~2018	103	0.0	1.0	6.1	5.1	1.2	2.3	0.3	0.2	0.5
	2019	16	0.0	1.5	3.4	3.6	1.3	1.6	0.2	0.2	0.4

※ "지구대기감시 업무매뉴얼(Ⅱ)-에어로졸 및 총대기침적-, 2017, 국립기상과학원"의 QA/QC방법으로 자료 처리함.
※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함.

○ PM10 원소 [단위: ng/㎥]

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
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
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	

2.4 대기복사

□ 직달일사 [단위: W/㎡]

○ 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	235.5	161.9	93.1	175.7	135.2	165.5	134.6	91.7	**147.5**

※ 1999 ~ 2016년 월평균값은 계산된 직달일사값임[(전천일사-산란일사)/cos(solar zenith angle)].

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	75.8	71.4	–
2009	53.8	71.5	108.4	169.7	200.8	126.5	76.5	146.1	142.1	169.5	75.2	52.5	**116.1**
2010	61.4	87.1	94.8	132.9	136.9	90.8	65.7	132.0	143.3	126.1	111.7	65.2	**104.0**
2011	42.6	119.9	180.7	208.5	129.8	41.3	103.0	–	–	–	93.2	52.8	–
2012	49.8	67.3	122.7	167.7	149.8	97.7	119.3	188.0	161.3	177.8	92.8	54.1	**120.7**
2013	69.4	111.0	138.8	–	–	80.8	101.5	173.2	171.0	180.7	99.4	83.0	**120.9**
2014	120.7	105.7	149.2	177.0	204.0	84.8	78.0	80.8	119.7	202.9	132.7	61.3	**126.4**
2015	87.1	97.8	145.9	144.7	200.7	122.5	96.8	130.6	171.8	185.7	62.1	61.9	**125.6**
2016	31.4	89.4	116.2	141.0	181.5	94.8	129.5	135.4	88.7	67.2	89.7	76.6	**103.5**
2017	59.0	96.4	102.0	117.1	119.1	102.0	85.7	175.6	–	147.8	126.6	65.0	**108.8**
2018	65.8	102.8	146.3	153.3	98.0	153.0	187.2	213.6	116.8	185.2	154.0	53.5	**135.8**
2019	103.9	99	148.5	157.6	202.1	105.4	72.3	135.4	154.9	190.1	148.2	60.8	**131.5**

□ 산란일사 [단위: W/㎡]

○ 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	-	**60.1**
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**

○ 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	**86.7**
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	**82.4**
2019	54.1	64.8	86	100.7	108.2	129.5	119.4	105.5	86.7	68.3	55.8	49.4	**85.7**

□ 태양상향복사 [단위: W/㎡]

○ 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	**39.2**
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**

□ 태양하향복사(전천일사) [단위: W/㎡]

○ 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	**163.7**
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	**160.4**
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	**169.5**
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	183.3	201	276.2	244.7	197.9	237	170.2	152.1	107.1	65.5	**173.2**

○ 고 산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83.5	78.0	-
2009	73.0	107.3	159.2	213.9	248.1	208.8	177.0	212.0	180.8	175.8	93.9	69.0	**159.9**
2010	85.6	111.0	140.7	187.3	217.3	187.6	177.5	195.8	190.5	151.4	121.5	73.9	**153.3**
2011	71.6	136.7	198.4	242.9	213.0	154.7	197.3	-	-	-	96.5	66.8	-
2012	81.1	102.4	155.9	211.5	237.9	201.2	194.7	233.7	197.5	168.3	103.5	69.3	**163.1**
2013	83.8	119.8	186.5	-	-	188.0	206.3	228.5	188.1	174.8	108.6	83.0	**156.7**
2014	110.2	127.0	175.2	217.5	269.6	202.4	177.5	175.1	168.8	170.8	117.2	76.8	**165.7**
2015	94.0	113.0	182.2	200.3	257.3	202.6	206.4	197.8	186.2	172.5	85.0	75.6	**164.4**
2016	63.7	118.2	164.3	208.5	245.3	192.6	209.9	195.5	148.7	112.0	98.1	80.5	**153.1**
2017	86.3	121.4	155.7	180.0	205.8	204.7	199.5	225.5	-	142.2	120.0	79.1	**156.4**
2018	84.3	123.4	173.7	210.8	182.4	223.1	248.4	248.3	160.0	162.2	121.3	68.8	**167.2**
2019	99.2	117.1	177.9	207	254.1	205.5	174	201.1	182.6	169.4	122.9	74.4	**165.4**

□ 지구상향복사 [단위: W/㎡]

○ 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	**375.3**
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	433.9	425.2	420.6	388	348.7	321.5	**377.0**

□ 지구하향복사 [단위: W/㎡]

○ 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	**323.4**
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	**309.0**
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	**307.7**
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	321.8	352.7	377	350.9	362.1	323	292.1	274.6	**313.7**

□ 순복사 [단위: W/㎡]

○ 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	**63.3**
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**

2.5 성층권 오존

□ 오존 전량 [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	-	-	**329**
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**

○ 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**

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**연평균**
1994	–	335	352	334	336	325	285	282	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	324	327	320	291	275	284	285	288	297	**305**
1998	328	345	338	343	321	336	292	287	281	284	–	281	**312**
1999	296	336	297	349	358	319	300	284	281	309	315	333	**315**
2000	323	350	354	379	355	335	306	294	294	274	265	290	**318**
2001	364	342	389	365	384	354	–	305	293	284	315	306	**336**
2002	321	337	359	353	354	362	297	279	292	291	309	311	**322**
2003	345	333	344	319	320	318	–	275	271	274	253	278	**303**
2004	318	306	340	333	337	327	301	287	273	–	272	293	**308**
2005	321	331	346	369	349	333	311	294	281	282	289	318	**319**
2006	319	321	366	358	323	339	298	290	300	289	313	313	**319**
2007	332	340	359	376	359	336	313	295	291	281	281	307	**323**
2008	298	319	343	337	325	320	290	295	290	288	299	303	**309**
2009	319	304	354	356	336	330	310	283	286	289	287	323	**315**
2010	–	351	362	–	–	–	299	273	277	286	–	–	**308**
2011	324	356	369	359	327	317	291	287	290	287	289	310	**317**
2012	311	300	327	346	330	323	–	–	–	283	306	–	**316**
2013	–	318	343	349	335	324	303	298	–	273	306	328	**318**

○ 서울

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균	표준편차
1985	334	344	336	353	334	330	291	280	276	281	308	334	317	**27.8**
1986	362	386	380	358	340	330	303	292	293	298	291	300	328	**36.3**
1987	334	360	369	362	344	335	307	301	290	280	288	315	324	**31.2**
1988	330	331	347	360	320	322	285	285	287	271	301	319	313	**27.4**
1989	316	325	350	344	354	321	301	286	288	285	292	320	315	**25.0**
1990	347	337	348	351	337	319	293	279	282	298	298	334	319	**27.2**
1991	335	337	333	343	325	309	299	298	295	295	300	312	315	**18.2**
1992	333	358	345	371	360	341	314	295	286	286	292	308	324	**31.0**
1993	315	318	337	341	326	324	313	293	293	297	293	321	314	**17.5**
1994	357	350	380	339	356	337	294	290	307	292	296	299	325	**31.7**
1995	332	349	361	344	361	338	297	283	286	283	305	323	322	**30.2**
1996	342	363	-	364	363	323	306	285	298	294	294	320	323	**30.5**
1997	343	350	340	334	344	338	308	287	296	307	302	319	322	**21.7**
1998	355	363	365	357	340	359	307	305	299	290	307	302	329	**29.7**
1999	318	349	324	372	373	330	320	307	302	313	318	327	329	**23.4**
2000	320	349	366	375	363	336	303	292	304	294	283	319	325	**30.6**
2001	364	330	381	353	354	338	299	297	284	284	301	312	325	**33.0**
2002	324	331	349	333	334	339	304	299	301	297	316	328	321	**17.4**
2003	366	366	372	348	344	342	310	297	283	291	282	297	325	**34.6**
2004	332	347	361	345	350	328	288	290	291	284	294	324	320	**28.4**
2005	357	361	376	368	354	347	316	297	282	277	311	327	331	**34.1**
2006	330	336	379	373	342	352	319	292	301	292	318	325	330	**28.4**
2007	342	349	382	381	351	333	313	294	286	281	299	324	328	**32.3**
2008	314	345	365	360	346	335	309	303	293	297	313	324	325	**24.5**
2009	343	322	372	376	343	349	321	298	293	297	301	337	329	**28.8**
2010	341	372	392	396	377	372	331	298	292	294	324	323	343	**38.1**
2011	343	361	391	(378)	(342)	(351)	(327)	(304)	(305)	299	296	320	335	**31.6**
2012	336	336	337	337	338	340	339	337	338	337	336	334	337	**28.6**
2013	335	336	350	376	343	327	301	302	293	272	316	350	325	**29.3**
2014	350	358	365	356	350	345	317	301	291	288	300	346	331	**28.6**
2015	342	389	382	358	350	348	320	316	306	300	313	323	337	**29.2**
2016	356	372	355	358	332	339	308	304	292	275	293	305	324	**32.3**
2017	315	355	376	368	367	352	328	305	306	281	310	339	333	**37.1**
2018	345	386	361	371	347	343	299	295	299	301	297	294	328	**34.1**
2019	303	319	366	361	371	370	333	297	284	287	290	324	325	**34.0**
평균	**338**	**351**	**362**	**359**	**348**	**338**	**308**	**294**	**293**	**289**	**301**	**319**	**324**	
표준편차	**15.5**	**20.6**	**17.1**	**13.9**	**13.5**	**13.5**	**11.6**	**8.9**	**7.4**	**10.0**	**11.3**	**14.2**	**9.1**	

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

2.6 자외선

□ 자외선A 일누적값 [단위: MJ/㎡]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0.70	0.67	0.46	0.30	-
2008	0.38	0.60	0.76	0.89	1.02	1.04	0.92	1.14	0.88	0.64	0.43	0.32	**0.75**
2009	0.41	0.46	0.76	0.96	1.09	1.12	1.05	1.05	0.91	0.73	0.41	0.31	**0.77**
2010	0.37	0.45	0.60	0.84	0.99	1.08	1.03	0.90	0.78	0.63	0.45	0.34	**0.70**
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	**0.68**
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	0.90	0.68	0.43	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**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.30	0.39	0.56	0.79	0.96	0.88	0.87	0.87	0.74	0.62	0.37	0.24	**0.63**
2013	0.29	0.41	0.64	0.72	0.93	0.79	0.88	0.94	0.71	0.60	0.36	0.26	**0.63**
2014	0.33	0.38	0.54	0.70	0.91	0.97	0.88	0.84	0.81	0.74	0.48	0.32	**0.66**
2015	0.36	0.46	0.73	0.82	1.13	0.94	1.02	0.96	0.86	0.74	0.36	0.30	**0.72**
2016	0.28	0.46	0.73	0.86	1.00	0.90	1.02	1.09	0.73	0.56	0.43	0.34	**0.70**
2017	0.41	0.59	0.77	0.99	1.20	1.06	1.09	1.16	-	0.65	0.52	0.35	**0.80**
2018	0.38	0.54	0.78	0.99	0.92	1.13	1.32	1.29	0.82	0.75	0.53	0.31	**0.81**
2019	0.41	0.51	0.76	0.95	1.16	1.03	0.91	1.07	-	-	0.53	0.33	**0.77**

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	-	-	-	-	-	-	0.81	0.83	-	0.65	0.36	0.36	-
2010	0.40	0.45	0.51	0.76	0.95	1.08	0.99	0.90	0.73	0.57	0.46	0.35	**0.68**
2011	0.45	0.45	0.74	0.82	-	0.99	0.94	0.76	0.69	0.59	0.35	-	**0.68**
2012	0.34	0.44	0.56	0.81	0.90	0.81	0.86	0.74	0.64	0.57	0.38	0.28	**0.61**
2013	0.34	0.43	0.59	0.74	0.85	0.81	0.85	0.82	0.61	0.45	0.38	0.29	**0.60**
2014	0.33	0.31	-	0.76	1.07	0.80	0.95	0.70	0.77	0.57	0.41	0.38	**0.64**
2015	0.37	0.50	0.75	0.70	1.10	0.91	0.95	0.92	0.75	0.64	0.31	0.30	**0.68**
2016	0.36	0.52	0.64	0.81	1.05	0.93	0.94	1.05	0.56	0.48	0.39	0.35	**0.67**
2017	0.41	0.59	0.71	0.91	1.15	1.14	0.84	-	0.76	0.52	0.46	0.39	**0.72**
2018	0.41	0.54	0.66	0.93	0.94	0.98	1.04	0.91	0.64	0.63	0.45	0.34	**0.71**
2019	0.42	0.51	0.71	0.82	1.10	1.04	0.98	1.02	0.69	0.64	0.46	0.40	**0.73**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.19	0.42	0.54	-	0.95	-	-	0.75	0.68	0.51	0.29	0.18	-
2013	0.26	0.33	-	0.66	0.89	0.82	0.84	0.85	0.61	0.42	0.29	-	**0.60**
2014	-	-	0.52	0.72	0.93	0.83	0.84	0.58	0.67	0.47	0.29	0.20	**0.61**
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**

□ 자외선A 일 최댓값 [단위: W/㎡]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	37.82	34.65	25.78	19.18	-
2008	20.99	30.07	35.31	40.81	45.29	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	40.40	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	**33.81**
2015	20.39	25.55	34.31	37.72	47.04	46.98	43.30	43.49	39.70	30.26	18.30	17.79	**33.74**
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	24.24	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**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	19.50	23.24	28.01	36.29	43.39	41.92	42.18	43.60	36.71	31.26	22.05	16.75	**32.08**
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	46.85	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**

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	-	-	-	-	-	-	43.06	43.38	-	32.29	21.75	19.57	-
2010	21.94	23.89	27.49	37.17	42.81	47.05	45.80	45.60	37.21	32.48	23.76	19.05	**33.69**
2011	23.35	23.75	34.53	39.35	-	43.96	44.50	39.72	35.26	29.90	20.60	-	**33.49**
2012	18.48	23.09	27.26	36.59	40.69	38.38	40.06	38.85	33.19	29.10	20.88	16.03	**30.22**
2013	17.72	22.75	28.74	35.07	38.19	38.20	40.17	38.22	30.26	25.23	19.86	15.48	**29.16**
2014	17.74	18.74	-	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	**33.96**
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	26.65	33.63	38.62	45.37	44.76	48.22	46.02	36.06	32.61	25.81	21.44	**35.04**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	13.39	24.00	29.61	-	42.80	-	-	38.75	37.62	27.01	19.71	12.92	-
2013	16.73	20.48	-	34.87	39.03	38.74	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	**31.09**
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**

□ 자외선B (홍반자외선) 일누적값 [단위: kJ/㎡]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	1.85	2.63	3.08	3.91	3.83	3.50	2.53	1.55	0.88	0.54	**2.43**
2000	0.60	1.09	1.72	2.40	2.65	3.50	4.14	3.74	2.62	-	1.00	0.70	**2.20**
2001	0.62	1.20	1.60	2.64	3.07	-	3.53	3.79	3.27	1.70	0.89	0.63	**2.09**
2002	0.68	1.14	1.70	2.67	2.88	3.52	3.71	2.70	2.55	1.67	0.77	0.57	**2.05**
2003	0.58	0.96	1.56	-	2.96	2.62	2.77	2.71	2.42	1.78	0.89	0.60	**1.80**
2004	0.70	1.18	1.83	2.62	2.84	3.19	3.03	3.82	2.61	1.85	0.82	-	**2.23**
2005	-	1.17	1.94	2.61	3.66	3.25	3.41	3.64	3.12	1.98	1.06	0.58	**2.40**
2006	0.74	1.29	1.91	2.20	3.18	3.25	2.92	4.04	2.48	1.60	0.80	0.58	**2.08**
2007	0.64	1.12	1.34	2.13	2.89	3.18	2.97	3.26	2.03	1.73	0.95	0.47	**1.89**
2008	0.67	1.13	1.57	2.18	2.79	2.91	3.03	3.39	2.37	1.47	0.78	0.51	**1.90**
2009	0.63	0.90	1.49	2.19	2.63	2.86	2.92	3.15	2.54	1.58	0.74	0.48	**1.84**
2010	0.61	0.77	1.20	1.93	2.54	2.77	3.14	-	-	1.58	0.84	-	**-**
2011	-	-	-	2.30	2.85	3.02	2.78	3.10	3.00	1.78	1.00	0.62	**-**
2012	0.68	1.38	1.73	2.68	3.29	3.91	4.05	3.26	2.52	2.01	0.87	0.59	**2.25**
2013	0.72	1.23	2.07	2.43	3.28	3.84	2.89	3.09	2.31	1.81	0.83	0.50	**2.08**
2014	0.65	1.03	1.57	2.09	2.79	2.84	2.78	2.36	2.68	1.84	0.91	0.52	**1.84**
2015	0.69	0.92	1.86	2.33	3.56	3.57	3.33	-	2.74	1.67	0.68	0.56	**1.99**
2016	0.61	1.02	1.94	2.52	3.68	3.77	3.62	3.75	2.55	1.74	0.94	0.64	**2.23**
2017	0.74	1.17	1.92	2.66	3.41	3.60	2.53	2.96	2.80	2.62	1.37	0.83	**2.22**
2018	0.97	1.44	2.41	3.29	3.20	3.39	5.18	4.44	3.00	1.93	1.00	0.75	**2.58**
2019	0.91	1.34	1.92	2.65	3.75	3.65	3.20	3.94	2.47	1.79	0.97	0.56	**2.26**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2011	-	-	-	2.73	3.05	-	-	-	2.46	1.63	0.93	0.53	-
2012	0.80	1.19	1.79	2.52	3.24	3.29	3.64	3.80	2.83	2.27	1.10	0.65	**2.26**
2013	0.83	1.41	2.22	2.72	3.73	3.11	3.77	3.52	2.71	2.21	1.11	0.66	**2.33**
2014	0.86	1.16	1.65	2.58	3.33	3.06	3.34	2.99	2.63	2.08	1.15	0.61	**2.12**
2015	0.72	0.97	1.73	2.32	3.63	3.01	3.61	3.27	2.62	2.12	0.86	0.66	**2.13**
2016	0.57	1.01	1.93	2.58	3.28	3.03	3.72	3.72	2.45	1.66	1.05	0.78	**2.15**
2017	1.10	1.60	2.18	2.91	3.74	3.51	4.07	4.18	-	2.07	1.38	0.74	**2.50**
2018	0.85	1.25	2.11	2.91	3.08	3.67	4.75	4.36	2.91	2.60	1.60	0.87	**2.58**
2019	1.21	1.64	2.36	3.11	3.84	3.29	3.03	3.25	NaN	NaN	1.39	0.79	**2.39**

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	1.77	2.46	3.25	3.53	3.17	3.21	2.38	-	0.91	0.69	-
2000	-	-	1.88	-	2.82	3.04	3.64	3.21	2.34	1.73	1.03	0.75	-
2001	0.63	1.22	1.62	2.66	2.76	-	4.03	3.51	2.76	1.55	1.02	0.75	**2.05**
2002	0.72	1.30	1.85	-	-	3.37	3.33	2.83	2.42	1.65	1.03	0.60	**1.91**
2003	0.69	0.96	1.47	2.29	2.46	2.60	2.40	2.83	2.21	1.81	0.92	0.78	**1.78**
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	**2.14**
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	2.99	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**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**평균**
2012	0.39	1.04	1.40	2.48	-	2.77	3.02	2.86	2.37	1.56	0.64	0.32	**1.71**
2013	0.52	0.79	1.45	1.80	2.89	2.66	2.85	2.81	2.09	-	-	-	**-**
2014	-	-	1.42	2.17	3.02	2.75	3.00	2.12	2.28	1.54	0.78	0.39	**1.95**
2015	0.44	0.79	1.55	2.16	3.48	3.19	3.47	3.05	2.10	1.68	0.62	0.44	**1.91**
2016	0.47	0.77	1.76	2.57	3.56	3.70	3.38	3.42	1.94	1.26	0.61	0.46	**1.99**
2017	0.55	0.79	1.39	2.51	3.37	3.82	3.45	3.37	2.66	1.51	0.80	0.43	**2.05**
2018	0.47	0.82	1.65	2.36	3.28	3.34	4.30	3.61	2.22	2.27	1.25	0.69	**2.19**
2019	0.90	1.22	1.84	2.49	3.59	3.51	3.79	4.01	2.70	1.96	0.86	0.69	**2.30**

□ 자외선B (홍반자외선) 일 최댓값 [단위: W/㎡]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**평균**
1999	-	-	0.111	0.144	0.158	0.192	0.215	0.201	0.155	0.098	0.058	0.038	**0.137**
2000	0.041	0.067	0.101	0.130	0.149	0.189	0.228	0.210	0.158	-	0.066	0.045	**0.126**
2001	0.042	0.077	0.092	0.138	0.161	-	0.216	0.209	0.182	0.103	0.057	0.043	**0.120**
2002	0.046	0.071	0.099	0.147	0.160	0.180	0.206	0.181	0.143	0.101	0.054	0.037	**0.119**
2003	0.039	0.060	0.093	-	0.157	0.141	0.170	0.164	0.143	0.108	0.061	0.041	**0.107**
2004	0.047	0.072	0.105	0.140	0.148	0.178	0.170	0.208	0.152	0.104	0.053	-	**0.125**
2005	-	0.071	0.113	0.147	0.196	0.182	0.192	0.212	0.179	0.121	0.068	0.041	**0.138**
2006	0.049	0.081	0.109	0.127	0.171	0.180	0.190	0.215	0.143	0.096	0.056	0.040	**0.121**
2007	0.043	0.075	0.090	0.124	0.155	0.172	0.174	0.203	0.131	0.108	0.061	0.036	**0.114**
2008	0.044	0.069	0.092	0.125	0.147	0.168	0.181	0.189	0.143	0.093	0.052	0.037	**0.112**
2009	0.044	0.062	0.091	0.122	0.143	0.157	0.171	0.184	0.142	0.094	0.052	0.033	**0.108**
2010	0.041	0.051	0.076	0.119	0.141	0.149	0.182	-	-	0.099	0.054	-	**-**
2011	-	-	-	0.132	0.162	0.171	0.179	0.195	0.174	0.112	0.068	0.044	**-**
2012	0.046	0.088	0.104	0.152	0.182	0.204	0.232	0.195	0.156	0.121	0.064	0.043	**0.132**
2013	0.051	0.080	0.123	0.135	0.177	0.211	0.174	0.168	0.133	0.110	0.057	0.035	**0.121**
2014	0.042	0.064	0.091	0.117	0.144	0.148	0.157	0.153	0.154	0.111	0.063	0.037	**0.107**
2015	0.046	0.061	0.102	0.132	0.189	0.191	0.187	-	0.154	0.101	0.049	0.039	**0.114**
2016	0.041	0.062	0.111	0.141	0.198	0.194	0.200	0.199	0.150	0.108	0.061	0.043	**0.126**
2017	0.050	0.070	0.106	0.140	0.178	0.179	0.154	0.174	0.163	0.158	0.091	0.057	**0.127**
2018	0.064	0.086	0.136	0.179	0.171	0.176	0.260	0.233	0.167	0.116	0.064	0.050	**0.142**
2019	0.058	0.083	0.107	0.145	0.181	0.187	0.181	0.216	0.142	0.106	0.062	0.038	**0.126**

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2011	–	–	–	0.149	0.174	–	–	–	0.142	0.104	0.068	0.042	–
2012	0.061	0.084	0.109	0.140	0.177	0.190	0.212	0.228	0.175	0.140	0.078	0.052	**0.137**
2013	0.065	0.091	0.137	0.166	0.202	0.184	0.202	0.199	0.165	0.139	0.080	0.051	**0.140**
2014	0.061	0.074	0.102	0.150	0.180	0.184	0.195	0.194	0.162	0.129	0.079	0.050	**0.130**
2015	0.055	0.070	0.113	0.147	0.192	0.176	0.203	0.194	0.157	0.126	0.060	0.051	**0.129**
2016	0.046	0.072	0.114	0.150	0.184	0.179	0.205	0.216	0.155	0.113	0.073	0.057	**0.130**
2017	0.079	0.100	0.126	0.158	0.196	0.190	0.228	0.238	–	0.135	0.091	0.057	**0.145**
2018	0.062	0.083	0.126	0.169	0.183	0.203	0.248	0.231	0.182	0.151	0.100	0.065	**0.150**
2019	0.081	0.105	0.136	0.184	0.202	0.186	0.177	0.186	–	–	0.087	0.058	**0.140**

○ 포항

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	–	–	0.109	0.140	0.166	0.192	0.192	0.196	0.143	–	0.060	0.044	–
2000	–	–	0.114	–	0.159	0.164	0.215	0.197	0.145	0.108	0.069	0.049	–
2001	0.041	0.074	0.096	0.143	0.147	–	0.229	0.205	0.167	0.100	0.064	0.049	**0.120**
2002	0.046	0.078	0.107	–	–	0.176	0.188	0.171	0.149	0.100	0.064	0.041	**0.112**
2003	0.045	0.061	0.095	0.132	0.134	0.141	0.150	0.176	0.142	0.108	0.059	0.049	**0.108**
2004	0.050	0.080	0.111	0.150	0.155	0.177	0.199	0.178	0.138	–	–	–	–
2005	–	–	–	–	–	0.184	0.163	0.178	0.129	0.097	0.062	0.046	–
2006	0.048	0.083	0.106	0.123	0.170	0.170	0.167	0.208	0.156	0.113	0.056	0.043	**0.120**
2007	0.046	0.065	0.098	0.131	0.164	0.185	0.172	0.194	0.133	0.112	0.069	0.042	**0.118**
2008	0.050	–	0.102	0.139	0.163	0.161	0.207	0.211	0.155	0.109	0.062	0.046	**0.128**
2009	0.049	0.075	0.105	0.140	0.157	0.174	0.179	0.194	0.151	0.116	0.065	–	**0.128**
2010	0.046	0.054	0.069	0.106	0.137	0.152	0.183	0.177	0.138	0.101	0.055	0.036	**0.104**
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**

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	**평균**
2012	0.031	0.070	0.094	0.135	-	0.161	0.172	0.171	0.155	0.100	0.051	0.027	**0.106**
2013	0.040	0.056	0.093	0.116	0.151	0.154	0.167	0.153	0.128	-	-	-	**-**
2014	-	-	0.087	0.120	0.163	0.153	0.170	0.131	0.135	0.095	0.056	0.033	**0.114**
2015	0.037	0.057	0.093	0.121	0.172	0.179	0.186	0.168	0.122	0.099	0.044	0.033	**0.109**
2016	0.037	0.053	0.105	0.147	0.183	0.199	0.202	0.198	0.137	0.090	0.048	0.035	**0.119**
2017	0.042	0.060	0.092	0.141	0.177	0.200	0.193	0.204	0.150	0.102	0.056	0.033	**0.121**
2018	0.038	0.054	0.095	0.127	0.176	0.181	0.224	0.198	0.145	0.137	0.079	0.051	**0.125**
2019	0.059	0.080	0.104	0.134	0.171	0.187	0.202	0.206	0.163	0.123	0.062	0.050	**0.128**

2.7 총대기침적

□ 습성침적 관측자료

○ 안면도 부피가중평균

연	개수	강수량	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
		(mm)		(μS/cm)					(μeq/L)				
1997	21	602.2	4.76	21.6	5.2	61.1	16.8	43.2	68.7	28.0	3.8	11.0	15.7
1998	35	869.3	4.96	23.5	2.7	66.7	20.0	53.4	59.6	33.2	3.8	15.4	17.6
1999	47	1198.9	5.03	18.7	0.9	60.9	16.6	30.9	59.9	17.7	2.8	13.0	16.4
2000	18	206.8	4.56	28.4	0.5	54.7	33.7	66.1	54.4	33.9	3.8	16.0	31.1
2001	22	286.5	4.70	19.2	1.1	32.0	21.5	49.4	35.3	36.8	2.2	7.7	16.2
2002	21	369.5	4.69	18.9	0.5	25.0	26.0	38.3	32.4	32.3	1.8	6.2	12.0
2003	32	298.5	4.44	26.1	3.9	27.8	31.6	57.2	27.9	38.8	2.1	8.4	17.8
2004	56	1001.0	4.73	19.1	1.0	37.8	25.1	46.3	35.8	26.2	2.2	9.7	16.1
2005	56	956.0	4.58	32.8	2.0	70.2	44.7	52.4	62.0	33.0	4.0	16.8	24.3
2006	45	530.0	4.79	48.2	2.2	141.9	53.2	103.5	123.6	56.4	7.9	34.7	62.2
2007	74	1248.0	4.52	32.8	3.0	49.2	36.3	70.2	43.7	39.4	3.0	12.6	21.4
2008	62	687.5	4.41	40.1	1.3	74.1	40.4	66.1	65.0	38.5	3.9	17.3	22.9
2009	48	723.5	4.66	32.1	2.3	90.5	35.9	57.0	77.5	36.6	3.9	19.8	20.9
2010	77	1412.5	4.75	22.7	1.1	42.5	26.2	43.0	37.0	31.2	2.1	10.4	14.8
2011	64	928.0	4.53	36.0	1.5	59.7	46.7	73.3	51.9	63.7	3.2	16.5	30.2
2012	68	1212.5	4.75	21.9	0.6	59.5	20.4	36.3	51.6	23.7	1.5	14.0	13.6
2013	64	946.5	4.57	31.2	1.7	68.4	34.8	57.5	57.7	45.3	3.0	15.4	21.4
2014	73	787.5	4.70	23.5	1.2	45.7	31.2	44.7	38.9	44.6	2.3	11.2	15.5
2015	70	644.5	4.62	35.5	1.3	101.7	42.6	61.1	85.7	55.1	3.4	21.2	20.4
2016	56	648.5	4.91	19.9	0.9	47.3	28.5	38.1	39.3	40.8	2.4	11.4	15.5
2017	54	471.5	4.70	30.8	1.0	79.1	48.6	54.3	65.6	55.0	2.8	17.9	21.4
2018	56	880.0	5.25	12.0	0.5	32.1	16.5	20.8	28.0	23.9	1.3	6.8	7.1
2019	54	656.5	5.14	26.0	1.1	82.1	40.0	44.0	74.1	58.8	2.5	19.0	17.6
연평균		**763.7**	**4.73**	**27.0**	**1.6**	**61.3**	**32.1**	**52.5**	**55.5**	**38.8**	**3.0**	**14.5**	**20.5**

계절	기간	개수	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
				(μS/cm)	(μeq/L)								
겨울	2009~2018	121	4.38	73.0	2.2	246.4	83.6	117.2	212.3	80.8	8.6	52.7	48.6
	2019	4	5.00	78.0	4.3	284.2	143.7	134.7	281.6	94.8	10.3	78.4	108.0
봄	2009~2018	142	4.86	23.1	1.5	33.2	35.9	54.5	28.7	44.4	2.7	10.9	32.7
	2019	9	5.46	13.0	0.9	27.0	22.2	28.4	22.0	43.3	1.6	7.9	15.7
여름	2009~2018	215	4.74	21.0	1.0	40.5	24.7	39.3	34.0	38.9	1.6	9.3	9.6
	2019	23	5.15	18.1	1.2	21.9	39.1	40.1	16.0	69.5	0.6	5.0	8.2
가을	2009~2018	155	4.68	25.2	1.0	70.2	26.9	39.2	60.6	25.6	2.4	15.2	12.6
	2019	13	5.05	30.2	0.5	139.5	23.6	35.6	128.9	33.1	3.6	30.1	15.1

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

※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함.

○ 고산 부피가중평균

연	개수	강수량	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
		(mm)		(μS/cm)	(μeq/L)								
1998	6	266.3	5.47	19.8	0.4	77.3	17.0	39.6	65.8	19.0	3.4	18.2	17.7
1999	38	1079.9	5.34	33.7	0.7	164.2	17.8	40.3	178.3	12.7	6.4	33.9	24.6
2000	17	178.7	4.65	23.6	0.4	61.8	21.4	45.2	62.0	19.4	3.8	21.5	19.3
2001	21	418.7	4.84	19.3	0.3	77.4	11.4	38.3	69.6	18.4	2.9	14.5	8.3
2002	30	503.9	4.78	24.0	0.0	79.3	21.5	42.7	93.6	16.7	3.2	21.8	15.9
2003	36	524.4	4.60	31.6	2.8	104.5	25.9	61.9	101.2	32.5	4.0	27.3	18.4
2004	41	1092.3	4.81	22.5	0.6	94.9	15.2	34.5	84.2	10.7	4.0	20.6	11.9
2005	42	664.6	4.68	30.9	1.1	93.9	32.5	45.0	82.8	15.2	4.8	24.7	20.4
2006	46	1010.4	4.98	23.7	1.3	75.3	20.4	45.0	64.2	11.1	3.2	19.2	31.2
2007	50	936.7	4.75	46.7	1.4	261.1	17.1	56.0	236.4	15.2	6.7	41.2	19.2
2008	52	745.8	4.57	31.4	0.8	85.8	23.1	45.6	75.5	17.9	4.0	17.8	13.9
2009	49	1045.2	4.81	20.4	1.0	54.1	18.1	33.9	47.2	13.6	2.8	12.1	12.0
2010	57	1140.7	5.05	38.8	0.9	188.1	29.8	49.2	171.6	15.6	8.9	42.0	29.8
2011	42	700.6	4.63	35.7	0.5	134.7	28.7	42.3	116.5	17.8	7.9	28.8	21.1
2012	79	1583	4.91	22.7	0.4	93.8	13.2	28.8	80.8	12.1	2.4	19.4	12.6
2013	73	807	4.66	35.5	1.0	130.0	29.4	53.4	112.6	27.9	3.7	27.3	20.1
2014	99	1434	4.90	19.9	1.1	68.4	18.7	33.0	58.8	18.5	2.3	15.1	15.8
2015	93	1747.5	5.07	13.2	0.5	38.5	14.7	23.8	32.8	16.6	1.4	7.7	7.9
2016	99	1375.0	5.12	24.4	0.3	119.6	14.2	31.7	103.2	16.2	2.9	23.8	13.0
2017	51	893.4	4.88	17.1	0.5	39.0	22.2	31.2	34.0	24.4	1.5	8.5	7.6
2018	71	1368.0	4.95	17.1	0.5	58.5	15.3	23.8	48.7	18.5	1.7	11.1	7.0
2019	70	1518.6	5.02	15.4	0.3	59.1	11.3	19.1	52.1	13.3	1.6	12.7	5.9
연평균		**956.1**	**4.89**	**25.8**	**0.8**	**98.2**	**20.0**	**39.3**	**89.6**	**17.4**	**3.8**	**21.3**	**16.1**

계절	기간	개수	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
				(μS/cm)	(μeq/L)								
겨울	2009~2018	155	4.69	48.5	0.8	218.9	34.0	65.3	194.7	24.1	5.9	45.0	27.9
	2019	12	4.79	31.4	0.4	117.4	32.4	40.7	103.8	27.2	3.4	25.4	20.4
봄	2009~2018	180	4.87	19.7	0.8	54.7	20.5	36.3	47.0	22.1	2.8	12.8	16.1
	2019	16	4.92	20.5	0.7	55.0	26.4	34.9	47.7	38.8	2.2	12.3	14.0
여름	2009~2018	223	4.97	15.1	0.6	47.3	14.0	21.6	40.0	14.0	2.4	10.1	7.8
	2019	27	5.00	10.2	0.3	24.2	10.5	13.0	19.9	9.7	0.8	5.2	2.7
가을	2009~2018	167	4.96	26.6	0.4	122.6	16.8	31.6	107.3	13.0	3.6	24.6	12.8
	2019	19	5.16	17.8	0.1	96.5	4.8	18.0	87.2	6.5	2.2	20.5	5.8

※ 2012년 이전까지 (구)고산기상대에서, 2012년부터 환경분석센터(고산 기후변화감시소)로 이전하여 관측함

※ 2017년 7, 9월은 AWS고장으로 기상대 자료를 사용함

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

※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함

○ 울릉도 부피가중평균

연	개수	강수량	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
		(mm)		(μS/cm)					(μeq/L)				
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
연평균		**1084.3**	**4.91**	**42.9**	**0.8**	**197.7**	**26.8**	**59.6**	**168.5**	**23.1**	**17.8**	**38.8**	**32.9**

계절	기간	개수	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
				(μS/cm)	(μeq/L)								
겨울	2009~2018	288	4.52	83.8	1.2	401.2	50.7	110.2	346.6	41.1	21.9	79.6	42.2
	2019	28	4.95	48.7	0.4	266.8	20.4	57.0	238.4	18.0	6.6	54.5	22.7
봄	2009~2018	146	4.95	41.0	1.1	163.0	31.4	70.0	132.4	34.5	23.3	32.5	43.0
	2019	17	5.02	42.4	1.0	169.1	44.8	76.1	152.1	63.6	5.3	37.3	39.8
여름	2009~2018	134	5.11	27.6	0.7	130.8	13.2	34.5	102.0	17.3	17.9	24.0	19.6
	2019	11	5.10	12.8	0.4	39.7	9.1	23.3	34.1	10.7	1.5	8.4	5.2
가을	2009~2018	198	4.89	43.2	0.6	210.5	21.0	51.8	175.2	15.9	19.2	40.7	32.2
	2019	27	5.21	57.6	0.2	360.4	12.3	51.4	319.7	9.9	9.4	73.2	22.5

※ "지구대기감시 업무매뉴얼(Ⅱ)-에어로졸 및 총대기침적-, 2017, 국립기상과학원"의 QA/QC방법으로 자료 처리함.
※ 겨울: 전년도 12월과 당해년도 1월, 2월 자료를 사용함.

[부록 3] 기후변화감시 기술노트 목록

- 기술노트 2014-01 통합지구대기화학관측(IGACO)의 오존 및 자외선 이행 계획
- 기술노트 2014-02 GC-μECD를 활용한 대기 농도 수준의 SF_6 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 SF_6 Using GC-μECD (WMO/GAW Report NO. 222)
- 기술노트 2015-04 강수화학(대기 침적) 측정 및 분석 매뉴얼
- 기술노트 2015-05 WMO Guideline 2014 Atmosheric 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-μECD for Atmospheric SF_6 Measurements (WMO/GAW Report NO. 239)
- 기술노트 2017-01 WMO 육불화황 세계표준센터의 실무 매뉴얼
- 기술노트 2017-02 The report of the result on SF_6 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 활용논문 목록

○ 출판연도순으로, 동일한 출판연도인 경우에 영문판(알파벳순)과 한글판 순서(가나다순)대로 수록

신도식, 김산, 김정식, 차주완 1999: 안면도에서 1998년 봄철에 관측된 황사의 광학적 특징. 한국대기환경학회지, 15, 739-746.

전영신, 김지영, 최재천, 신도식 1999: 황사 시 서울과 안면도의 대기 중 에어로졸 수농도 특성. 한국대기환경학회지, 15, 575-586.

김만구, 강미희, 홍영민, 박기준, 이보경, 이동수, 김산 2001: 필터팩을 이용한 서울과 춘천, 안면도의 건성 강하량 측정. 한국대기환경학회지, 17, 19-29.

김정식, 최재천, 2001: 배경대기 중 CO_2 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 사례 분석, 한국기상학회지, 329-346.

박기준, 최재천, 박상순, 오성남 2002: 안면도에서 측정한 온실가스(CH_4, N_2O, CFCs)의 변동 특성 연구. 대기, 12, 502-505.

조경숙, 방소영, 최채천, 최병철, 차주완, 박기준, 최성철, 노영민, 김영준 2003: 에어러솔라이더를 이용한 안면도에서의 에어러솔 수직분포 측정. 대기, 13, 484-487.

송병현, 박기준, 유희정, 최병철 2005: 지구대기감시관측소의 온실가스 농도 관측용 공기시료 채추치구 높이 변경에 따른 CO_2 및 CH_4 관측 자료 비교 연구. 기상학회지, 41, 5, 851-859.

노영민, 김영민, 김영준, 최병철 2006: GIST / ADEMRC 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이다 비 연구. 한국대기환경학회지, 22, 1-14.

구태영, 홍기만, 김상백, 공종웅, 김명수 2008: 2006년 4월 안면도에서 발생한 황사, 안개, 청명, 구름 사례에 대한 에어러솔 특성 분석. 대기, 18, 99-111.

노영민, 이한림, Detlef Muller 2010: 다파장 라만 라이다를 이용한 발생지에 따른 안면도 지역 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성. 한국대기환경학회지, 26, 554-566.

유희정, 김정식, 이정순, 문동민, 이진복, 김종호, 김상훈, 이일용 2010: 기후변화감시센터의 대기 중 2007년 육불화황 측정 결과 및 특성, 한국대기환경학회지, 27, 1, 1 ~ 15.

강창희, 김원형, 허철구, 강동훈 2012: 제주도 고산지역의 라돈 배경농도 실시간 모니터링, 분석과학, 한국분석과학회, 25(1), 7-13.

고희정, 신승희, 허철구, 김원형, 강창희, 강동훈, Scott Chambers 2013: 제주도 고산측정소의 대기 라돈농도 시계열 변화, 한국대기환경학회지, 29(1), 86~96.

김관철, 최성철, 노영민 2016: 선포토미터 데이터를 이용한 편광소멸도 산출과 라이다 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 이온조성 및 오염특성, 한국분석학회지, 1-10.

신동호, 노영민 2016: 황사 발원지에서 선포토미터를 활용한 에어로졸의 광학적 특성 산출과 미세먼지속 황사 구분, 대한원격탐사학회지, 32, 245- 251.

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.

송정민, 김기주, 부준오, 김원형, 강창희, S. Chambers 2018: 대기 라돈 및 기체상 오염물질의 기류 이동경로별 농도변화:2010~2015년 측정, 한국대기환경학회지, 34(2), 321-330.

고희정, 정지영, 김은실, 이상삼, 류상범, 2019: 안면도와 고산 기후변화감시소에서 채취한 강수성분의 조성 및 중화특성(2008-2017년), 대기지, 403-416.

Park, S. S., J. Kim, H. K. Cho, H. Lee, Y, Lee, and co-authors 2012: Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea. Atmospheric Environment 47, 226-235.

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. Atmospheric Environment, 64, 160-168.

Matsuil, H., M. Koikel, N. Takegawa, Y. Kondol, A. Takami, T. Takamura, S.

Yoon, S. W. Kim, H. C. Lim, and J. D. Fast, 2013: Spatial and temporal variations of new particle formation in East Asia using and NPF-explicit WRF-cham model: North-south contrast in new particle formation frequency. Journal of Geophysical Research, 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. Atmospheric Environment, 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, Korea. Asian journal of Atmospheric Environment, 7-2. 85-94.

Hong, H., H. Lee, J. Kim, and Y.-G. Lee, 2014: First comparison of OMI-DOAS total ozone using ground-based observations at a megacity site in East Asia: Causes of discrepancy and improvement in OMI-DOAS total ozone during summer. Journal of Geophysical Research: Atmosphere 119, 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. Journal of Applied Meteorology and Climatology 53, 310-322.

Kim, W. H., H. J. Ko, C. G. Hu, H. Lee, C. Lee, S. Chambers, A. G. Williams, and C. H. Kang 2014: Background Level of Atmospheric Radon-222 Concentrations at Gosan Station, Jeju Island, Korea in 2011, Bulletin of the Korean Chemical Society, 35(4), 1149-1153.

Crawford, J., S. Chambers, C. H. Kang, A. Griffiths, and W. H. Kim, 2015: Analysis of a decade of Asian outflow of PM10 and TSP to Gosan, Korea; also incorporating Radon-222, Atmospheric Pollution Research, 6(3), 529-539.

Park, S. S., Lee, Y. G. and J. H. Kim, 2015: Impact of UV-A radiation on erythemal UV and UV-index estimation over Korea. Advances in Atmospheric Sciences 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, Bulletin of the Korean Chemical Society, 36(2), 603-608.

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, Bulletin of the Korean Chemical Society, 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 and Air Quality Research, 16(4): 958-976.

Kim, J., Kim, J., Cho, H.-K., Herman, J., Park, S. S. and co-authors 2016: Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI measurements over Seoul, Korea. Atmospheric Measurement Techniques, 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. Atmospheric Environment, 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. International Journal of Remote Sensing, 37. 2180-2197.

Noh, Y. M., D. Mueller, S. K. Shin, D. H. Shin, and Y. J. Kim, 2016: Vertically-resolved profiles of mass concentrations and particle backscatter coefficients of Asian dust plumes derived from lidar observations of silicon dioxide. Chemosphere, 143. 24-31.

Baek, K., J. H. Kim, J. R. Herman, D. P. Haffner and J. Kim, 2017: Validation of Brewer and Pandora measurements using OMI total ozone. Atmospheric Environment 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 CO_2 fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 122. 767-795.

Kang, M., B. Ruddell, J-H. Chun and J. Kim, 2017: Identifying CO_2 advection on a hill slope using information. Agricultural and Forest Meteorology, 232. 265-278.

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.

Lee, H., S.-O. Han, S.-B. Ryoo, J.-S. Lee, and G,-W. Lee, 2019: The measurement of atmospheric CO_2 at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites. Atmospheric Chemistry and Physics, 19, 2149-2163.

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, Analytical Science & Technology, 33(1), 33-41.

Collaud C. 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. Discuss., https://doi.org/10.5194/acp-2019-1174, accepted.

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. Discuss., https://doi.org/10.5194/amt-2019-499, under review.

[부록 6] 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황

- 제 0495483호 표준가스 중량법 제조를 위한 자동 무게 측정 장치.
  (출원일: 2003.09.09. / 등록일: 2005.06.07.)
- 제 10-0922630호 수분제거장치.
  (출원일: 2008.06.12. / 등록일: 2009.10.13.)
- 제 10-0993808호 풍향에 따른 자동 시료 포집.
  (출원일: 2008.10.02. / 등록일: 2010.11.05.)
- 제 10-1074697호 에어로졸 전처리 시스템.
  (출원일: 2009.02.09. / 등록일: 2011.10.12.)
- 제 10149967200000호 표준 에어로졸 샘플링 시스템
  (출원일 : 2014.04.29. / 등록일 : 2015.03.02.)
- 제 10160974000000 에어로졸 질량농도의 연직분포 산출방법
  (출원일 : 2015.08.24. / 등록일 : 2016.03.31.)

[부록 7] 지구대기감시 보고서 작성자

○ 작성자

	총괄	미래기반연구부	부 장 김 연 희 기 상 연 구 관 정 주 용
1장	머리말	미래기반연구부	기 상 연 구 관 박 영 산
2장	지구대기감시 현황	미래기반연구부	기 상 연 구 사 유 희 정 기 상 연 구 사 김 수 민 기 상 연 구 사 이 해 영
3장	기상특성	미래기반연구부	기 상 연 구 관 정 주 용 기 상 연 구 사 유 희 정 기 상 연 구 사 김 수 민
4장	온실가스 및 반응가스	미래기반연구부 〃 서울대학교 극지연구소	기 상 연 구 사 이 해 영 기 상 연 구 사 김 수 민 교 수 김 준 책 임 연 구 원 최 태 진
5장	에어로졸	미래기반연구부 〃 〃 〃 연세대학교	기 상 연 구 관 이 상 삼 기 상 연 구 사 김 정 은 기 상 연 구 사 고 희 정 연 구 원 오 세 호 교 수 김 준
6장	대기복사	미래기반연구부	연 구 원 신 대 근
7장	성층권오존	미래기반연구부 연세대학교 숙명여자대학교	연 구 원 신 대 근 교 수 김 준 교 수 오 정 진
8장	자외선	미래기반연구부 연세대학교	연 구 원 신 대 근 교 수 김 준
9장	총대기침적	미래기반연구부	기 상 연 구 사 고 희 정
10장	기타	숙명여자대학교 제주대학교	교 수 오 정 진 교 수 강 창 희
부록1	관측자료품질보증체계	미래기반연구부	기 상 연 구 사 김 정 은 기 상 연 구 사 이 해 영 기 상 연 구 사 고 희 정 기 상 연 구 사 김 수 민 연 구 원 신 대 근

○ 작성 지원

미래기반연구부	이선란, 심성보, 서원익, 고미영, 김은실, 문세영, 이세표, 정지영, 김정현, 최남원, 임정균, 강희윤
대구지방청 포항관측소	김영환, 홍승학

참 고 문 헌

국립기상과학원, 2017: 지구대기감시 업무매뉴얼.

기상청, 2011: 2010 지구대기감시보고서.

기상청, 2017: 2016 지구대기감시보고서.

기상청, 2020: 2019년 기후특성 보고서.

김준, 조희구, 이윤곤, 오성남, 백선균, 2005: 서울 상공의 최신 성층권 오존 변화 경향, *대기*, 15(2), 101-118.

방소영, 최재천, 박상순, 조경숙, 오성남, 2003: 한반도 배경지역 강수 중 수용성 이온성분의 화학적 특성 분석, *한국기상학회지*, 39(1), 29-41.

조희구, 백선균, 김준, 오성남, 2003: 서울 상공의 근 인위적 오존층 변화 경향, *대기*, 13(1), 144-147.

환경부, 2018: 2018년 대기환경연보, ISBN 978-89-6558-504-6 (93530).

Alexander, D. T. L., P. A. Crozier, and J. R. Anderson, 2008: Brown carbon spheres in East Asian outflow and their optical properties, *Science,* 321(5890), 833-836.

Anderson, T. L., D. S. Covert, S. F. Marshall, M. L. Laucks, R. J. Charlson, A. P. Waggoner, J. A. Ogren, R. Caldow, R. L. Holm, F. R. Quant, G. J. Sem, A. Wiedensohler, N. A. Ahlquist, and T. S. Bates, 1996: Performance Characteristics of a High-Sensitivity, Three-Wavelength, Total Scatter/Backscatter Nephelometer, *Bull. Amer. Meteor.,* 13, 967-986.

Anderson, T. L., and J. A. Ogren, 1998: Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer, *Aerosol Sci. Tech.*, 29(1), 57-69.

Argentini, S., I. Pietroni, G. Mastrantonio, A. P. Viola, G. Dargaud, and I. Petenko, 2014: Observations of near surface wind speed, temperature and radiative budget at Dome C, Antarctic Plateau during 2005. *Antarctic Sci.*, 26(1), 104-112.

Bleeker, W., W. Dansgaard, and W. Lablans, 1966: Some remarks on simultaneous measurements of particulate contaminants including radioactivity and isotopic composition of precipitation, *Tellus*, 18, 773-785.

Bromwich, D. H., J. P. Nicolas, A. J. Monaghan, M. A. Lazzara, L. M. Keller, G. A. Weidner, and A. B. Wilson, 2013: Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth. *Nat. Geosci.*, 6(2), 139-145.

Bu, J. O., J. M. Song, S. H. Chin, W. H. Kim, and C. H. Kang, 2016: Ionic composition and pollution characteristics of precipitation in Jeju Island during 2009-2014, *Anal. Sci. Technol*, 29(1), 19-28.

Bu, J. O., J. M. Song, W. H. Kim, C. H. Kang, S. K. Song, A. G. Williams, and S. D. Chambers, 2017; Temporal Variation of Atmospheric Radon-222 and Gaseous Pollutants in Background Area of Korea during 2013-2014, *Asian J. Atmos. Environ.*, 11(2), 114-121.

Butchart, N., 2014: The Brewer-Dobson circulation. *Rev. Geophys.*, 52(2), 157-184.

Carvalho, F. and Henriques, D., 2000: Use of Brewer ozone spectrophotometer for aerosol optical depth measurements on ultraviolet region, *Adv. Space Res.,* 25, 997-1006, doi:10.1016/S0273-1177(99)00463-9.

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., 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., 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., E. A. Guérette, K. Monk, A. D. Griffiths, Y. Zhang, H. Duc, M. Cope, K. M. Emmerson, L. T. Chang, J. D. Silver, S. Utembe, J. Crawford, A. G. Williams, and M. Keywood, 2019; Skill-Testing Chemical Transport Models across Contrasting Atmospheric Mixing States Using Radon-222, *Atmosphere*, 10(1), 25, doi:10.3390/atmos10010025.

Chang, K-L, I. Petropavlovskikh, O. R. Cooper, M. G. Schultz and T. Wang, 2017: Regional trend analysis of surface ozone observations from monitoring

networks in eastern North America, Europe and East Asia, *Elem Sci Anth.*, 5:50, DOI: http://doi.org/10.1525/elementa.243.

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.

Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T., Slutsker, I., and Kinne, S., 1999: Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *J. Geophys. Res.*, 104(D24), 31333-31349, doi:10.1029/1999JD900923.

Etheridge, D. M., L. P. Steele, R, J. Francey, and R. L. Langernfelds, 1998: Atmospheric methane betweeen 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability, *J. Geophys. Res.*, 103, 15979-15993.

Gaudel, A, et al. 2018: Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and global atmospheric chemistry model evaluation. *Elem Sci Anth*, 6: 39. DOI: https://www.elementascience.org/articles/10.1525/elementa.291.

Gillette, D. A., W. D. Komhyr, L. S. Waterman, L. P. Steels, and R. H. Gammon, 1987: The NOAA/GMCC Continuous CO_2 Record at the South Pole, 1975-1982. *J. Geophys. Res.*, 92(D4), 4231-4240.

Hansen, A. D. A., H. Rosen, and T. Novakov, 1984: The aethalometer - an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Sci. Total Environ.*, 36, 191-196.

Holben, B. N., T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov, 1998: AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, *Remote Sens. Environ.*, 66(1), 1-16, doi:10.1016/ S0034-4257(98)00031-5.

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.

Hwang, S. -H., J. Kim, G. -R. Cho, 2007: Observation of secondary ozone peaks near the tropopause over the Korean peninsula associated with stratosphere-troposphere exchange, *J. Geophys. Res.*, 112, D16305. doi:10.1029/2006007978.

IPCC, 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the IPCC fifth Assessment Report [Thomas Stocker, Qin Dahe, and Gian-Kasper Plattner]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I.

Japan Meteorological Agency, WMO WDCGG DATA SUMMARY WDCGG No. 41 (March 2017).

Kang, M., J. Kim, H.-S. Kim, B. M. Thakuri, and J.-H. Chun, 2014: On the Nighttime Correction of CO_2 Flux Measured by Eddy Covariance over Temperate Forests in Complex Terrain. *Korean J. Agric. and Forest Meteorol.,* 16, 233-245. *(in Korean with English abstract).*

Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen, and J. van der Plicht, 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980, *Nature*, 375, 666-670.

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, *B. Environ. Sci.,* 6(2), 129-136.

Kim, J. Y., Y. H. Youn, K. B. Song, and K. H. Kim, 2000: Characteristics of Vertical Ozone Distributions in the Pohang Area, Korea, *J. Korean Earth Science,* 21(3), 287-301.

Kim, 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. Health.,* 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

Korkiakoski, M. 2014: Water vapor correction functions for CO_2 and CH_4 in cavity ring-down spectroscopy, *master's thesis,* University of Helsinki, Finland.

Krotkov, N. A., J. Herman, P. K. Bhartia, C. Seftor, A. Arola, J. Kaurola, P. Taalas, and A. Vasilkov, 2002; OMI Surface UV Irradiance Algorithm, in OMI Algorithm Theoretical Basis Document, Volume III: Clouds, Aerosols, and Surface UV Irradiance, ATBD-OMI-03.

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 CO_2 at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 2149-2163.

Lee, H., E. J. Dlugokencky, J. C. Turnbull, S. Lee, S. J. Lehman, J. B. Miller, G. Petron, J. Lim, G-W Lee, S-S Lee, and Y-S Park, 2020: ^{14}C observations of atmospheric CO_2 at Anmyeondo GAW station, Korea: Implications for fossil fuel CO_2 and emission ratios, *Atmos. Chem. Phys.* Discussion.

Long C. N., and E. G. Dutton, 2002 : BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0.

McKinlay, A. F., and B. L. Diffey, 1987: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE j*, 6(1), 17-22.

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.

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.

NASA, 2019: https://www.nasa.gov.

NADP, 1999: National trends network site operation manual, NADP manual 1999-01, p1.

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 CO_2, *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. Lusis, 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.

Parrish, D. D., K. S. Law, J. Staehelin, R. Derwent, O. R. Cooper, H. Tanimoto, A. Volz-Thomas, S. Gilge, H.-E. Scheel, M. Steinbacher, and E. Chan, 2012: Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations at northern mid-latitudes, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 11485-11504.

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 SF_6 lifetime based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex, *J. Geophys. Res.*, 122, doi:10.1002/2016JD026198.

Rhoderick G., F.Guenther, D. Duewer, J. Lee, J.S.Kim, B.Hall, R.Weiss, C. Harth, S., Reimann, and M. vollmer, CCQM-P151 Final Report, http://www.bipm.org/utils/common/pdf/final_reports/QM/P151/CCQM_P151.pdf.

Rigby, M., S. Park, T. Saito, L. M. Western, A. L. Redington, X. Fang, S. Henne, A. J. Manning, R. G. Prinn, G. S.Dutton, P. J. Fraser, A. L. Ganesan, B. D. Hall, C. M. Harth, J. Kim, K.-R. Kim, P. B. Krummel, T. Lee, S. Li, Q. Liang, M. F. Lunt, S. A. Montzka, J. Muhle, S. O'Doherty, M.-K. Park, S. Reimann, P. K. Salameh, P. Simmonds, R. L. Tunnicliffe, R. F. Weiss, Y. Yokouchi & D. Young, 2019: Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations, *Nature,* 569, 546-550.

Schwartz, Stepehen E., and Warneck Peter, 1995: Units for use in atmospheric chemistry, Pure & Appl.Chem., Vol.67 pp. 1377-1406, 1995.

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, D. J. Ivy, D. Kinnison, M. J. Mills, R. R. Neely III, and A. Schmidt, 2016: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science,* 353(6296), 269-274, DOI: 10.1126/science.aae0061.

Song, J. M., J. O. Bu, W. H. Kim, C. H. Kang, H. J. Ko, and S. Chambers, 2017: Background Level and Time Series Variation of Atmospheric Radon Concentrations at Gosan Site in Jeju Island, Journal of Korean Society for *Atmos. Environ.*, 33(2), 174-183.

Uria-Tellaetxe, and I., D. C. Carslaw, 2014: Conditional bivariate probability function for source identification, *Environ. Model. & Softw.*, 59, 1-9

Vinther, B. M., K. K. Andersen, P. D. Jones, K. R. Briffa, and J. Cappelen, 2006: Extending Greenland temperature records into the late eighteenth century. *J. Geophys. Res.,* 111(D11).

WCC-Empa: System and performance audit of surface ozone, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and nitrous oxide at the regional GAWstation Anmyeon-do Republic of Korea Jun, 17/1, 48pp., 2017a.

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 Jun, 17/2, 42pp., 2017b.

Whittlestone, S., and W. Zahorowski, 1998: Baseline radon detectors for shipboard use: Development and deployment in the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1), *J. Geo. Res.,* 103(D13), 16,743-16,751.

Williamson, C. E., Zepp R. G., Lucas R. M, Madronich S., Austin A. T., Ballaré C. L., Norval M., Sulzberger B., Bais A. F., McKenzie R. L., Robinson S. A., Häder D.-P., Paul N. D. and Bornman J. F., Solar ultraviolet radiation in a changing climate, *Nat. Clim. Change*, 4, 434-441, 2014

WMO, 1995:, The Global Climate System Review: Climate System Monitoring, June 1991 - November, 1993, WMO No. 819, 150.

WMO, 1999: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. Rep. 44, Global Ozone Reseach and Monitoring Project, Geneva.

WMO, 2001: Global Atmosphere Watch Measurements Guide (No. 143), WMO TD No. 1073, July 2001.

WMO, 2004: 1st International Expert Meeting on Sources and Measurements of Natural Radionuclides Applied to Climate and Air Quality Studies (No. 155), WMO TD No. 1201.

WMO, 2004: Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme (Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures). WMO GAW Report No. 160.

WMO, 2009: Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases, GAW Report No. 184. 1-13.

WMO, 2010: Guidelines for the Measurement of Atmospheric Carbon Monoxide (WMO TD No. 1551), GAW report No. 192.

WMO, 2011: WP4/D4.2(M12)(draft), A WMO/GAW Expert Workshop on Global Long-term Measurements of Nitrogen Oxides and Recommendations for GAW Nitrogen Oxides Network (Hohepeissenberg, Germany, 9-0 October 2009) (WMO TD No, 1570) GAW report No. 195, 45pp, Feburary 2011.

WMO, 2013: Guidelines for Continuous Measurements of Ozone in the Troposphere (Prepared by Ian E. Gabally and Martin G. Schultz), GAW report No. 209, 80pp (WMO-No.1110, ISBN:978-92-63-11110-4).

WMO, 2016: WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, 2nd Edition (WMO No.1177), *GAW Report*, No. 227, 15-33.

WMO, 2017: WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016-2023, *GAW Report*, No. 228, 4pp.

WMO, 2019: Greenhouse Gas Bulletin, No15, ISSN2078-0796, 2019

WP4-NA4: Trace gases networing: Volatile organic carbon and nitrogen oxides Deliverable D4.10: Stnadard operating procedures (SOPs) for NOxy measurements.

Yamaji, K., T. Ohara, I. Uno , H. Tanimoto, J. Kurokawa, and H. Akomoto, 2006: Analysis of the seasonal variation of ozone in the boundary layer in East Asia using the Community Multi-scale Air Quality model: What controls surface ozone levels over Japan?, *Atmos. Environ.*, 40, 1856-1868.

Zahorowski, W., S. Chambers, T. Wang, C. H. Kang, I. Uno, S. Poon, S. N. Oh, S. Wercqynski, J. Kim, and A. Henderson-Sellers, 2005: Radon-222 in boundary layer and free tropospheric continental outflow events at three ACE-Asia sites, *Tellus*, 57(2), 124-140.

Zoran, M. A., M. R. Dida, A. T. Zoran, L. F. Zoran, and A. Dida, 2013: Outdoor ^{222}Radon concentrations monitoring in relation with particulate matter levels and possible health effects, *J. Radioanal. Nucl. Ch.*, 296(3), 1179-1192.

2019 지구대기감시 보고서

발 행 일 : 2020년 6월

발 행 처 : 국립기상과학원 미래기반연구부

63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원

홈페이지 : 기후정보포털(www.climate.go.kr)