

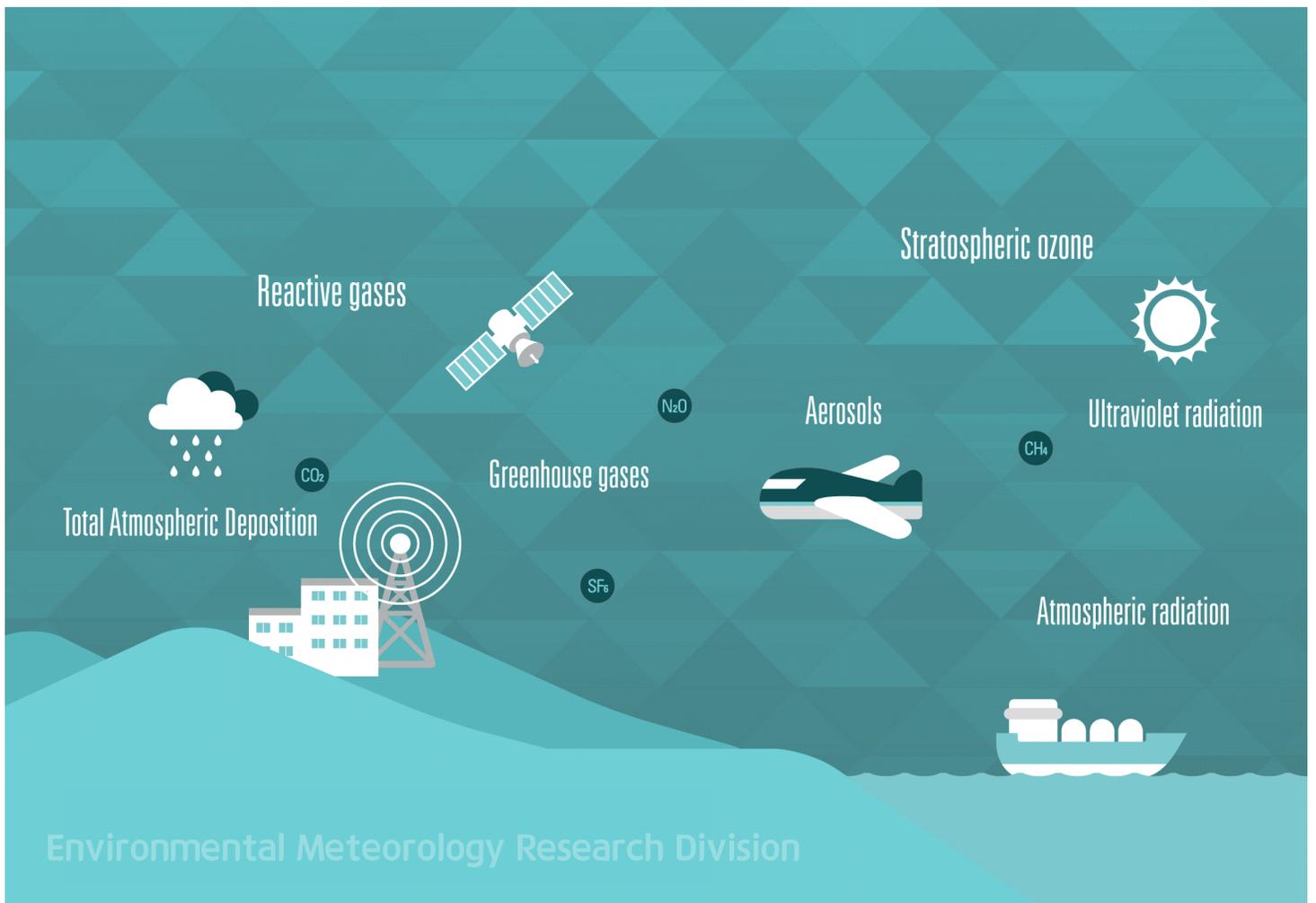
발간등록번호

11-1360000-000991-10

# 2018

## 지구대기감시 보고서

Report of Global Atmosphere Watch 2018





---

# 차 례

---

요약 .....	1
제1장 머리말 .....	5
제2장 지구대기감시 현황 .....	7
2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램 .....	7
2.2 한반도 기후변화감시소 현황 .....	9
제3장 분야별 관측·분석 결과 .....	25
3.1 온실가스 .....	25
3.1.1 이산화탄소(CO <sub>2</sub> ) .....	26
3.1.2 메탄(CH <sub>4</sub> ) .....	44
3.1.3 아산화질소(N <sub>2</sub> O) .....	46
3.1.4 육불화황(SF <sub>6</sub> ) .....	48
3.1.5 염화불화탄소류(CFCs) .....	49
3.1.6 품질관리를 위한 온실가스 관측자료 비교 .....	51
3.2 반응가스 .....	54
3.2.1 오존(O <sub>3</sub> ) .....	55
3.2.2 일산화탄소(CO) .....	59
3.2.3 질소산화물(NO <sub>x</sub> ) .....	64
3.2.4 이산화황(SO <sub>2</sub> ) .....	68
3.3 에어로졸 .....	72
3.3.1 에어로졸 물리특성 .....	73
3.3.2 에어로졸 광학특성 .....	82
3.3.3 에어로졸 화학특성 .....	111
3.4 대기복사 .....	123
3.4.1 직달일사, 산란일사 .....	124
3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사) .....	126
3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사 .....	127
3.4.4 순복사 .....	128
3.5 성층권오존 .....	129
3.5.1 오존전량 .....	129
3.5.2 오존 연직분포 .....	138

3.5.3 남극 오존홀 .....	145
<b>3.6 자외선 .....</b>	<b>148</b>
3.6.1 자외선A .....	148
3.6.2 자외선B .....	150
3.6.3 자외선 복사량 .....	151
<b>3.7 총대기침적 .....</b>	<b>155</b>
3.7.1 2018년 강수특성 .....	156
3.7.2 강수의 산성도(pH) .....	158
3.7.3 강수의 전기전도도 .....	160
3.7.4 강수 이온성분 .....	162
3.7.5 강하분진 .....	168
<b>3.8 기타 .....</b>	<b>171</b>
3.8.1 수증기 농도 연직분포 .....	171
3.8.2 라돈 농도 .....	175
<b>제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 .....</b>	<b>186</b>
4.1 온실가스 .....	186
4.2 반응가스 .....	190
4.3 에어로졸 .....	192
4.4 대기복사 .....	196
4.5 성층권오존 .....	198
4.6 자외선 .....	200
4.7 총대기침적 .....	202
<b>참고문헌 .....</b>	<b>204</b>
<b>부록 .....</b>	<b>213</b>
1. 지구대기감시 관측자료 .....	214
2. 기후변화감시 기술노트 목록 .....	259
3. 지구대기감시 매뉴얼 목록 .....	261
4. 기후변화감시 관측자료 활용논문 목록 .....	262
5. 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황 .....	267
6. 지구대기감시 보고서 작성자 .....	268

# 요약

## □ 온실가스

2018년 안면도, 고산, 울릉도에서 관측된 온실가스는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 육불화황(SF<sub>6</sub>), 염화불화탄소류(CFC-11, CFC-12, CFC-113)로 총 7종이다. CO<sub>2</sub>는 안면도 415.2 ppm, 고산 414.3 ppm, 울릉도 412.7 ppm 순으로 높았으며, 꾸준히 증가추세에 있다. 한반도에서 가장 긴 실시간 관측자료를 가진 안면도는 2017년 대비 3.0 ppm이 증가해 10년 평균 증가값인 2.4 ppm/yr보다 약간 높았다. 미국해양대기청에서 발표한 2018년 전지구 농도는 407.4 ppm으로 한반도 농도가 약 7.8 ppm 더 높다. 안면도의 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub> 또한 꾸준히 증가하고 있으며, CH<sub>4</sub>의 경우 전년도에 비해 4 ppb, N<sub>2</sub>O는 1.5 ppb, SF<sub>6</sub>는 0.2 ppt 증가하였다.

반면 몬트리얼 의정서로 인해 규제되고 있는 CFCs 계열은 점차 감소하고 있으며 전세계적으로도 감소세가 뚜렷하다.

## □ 반응가스

안면도 반응가스의 2018년 연평균은 오존(O<sub>3</sub>) 41.3 ppb, 일산화탄소(CO) 261.1 ppb, 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 5.8 ppb, 이산화황(SO<sub>2</sub>) 1.5 ppb로 최근 10년간(2008 ~ 2017년)의 연평균과 비교하였을 때 낮거나 같았다.

고산 반응가스의 2018년 연평균은 오존(O<sub>3</sub>) 41.8 ppb, 일산화탄소(CO) 198.1 ppb, 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 3.7 ppb, 이산화황(SO<sub>2</sub>) 0.8 ppb로 최근 6년간(2012 ~ 2017년) 관측자료의 평균값과 비교하였을 때 대부분 낮았고, SO<sub>2</sub>은 0.3 ppb 가량 높았다. 두 감시소는 O<sub>3</sub>과 CO의 경우 바다에 접한 북서, 서, 남서풍이 강하게 불 때 장거리 이동한 고농도의 영향을 받을 가능성이 높고, NO<sub>x</sub>와 SO<sub>2</sub>는 겨울에 북동풍과 북풍계열의 바람이 불 때 내륙의 영향을 받을 가능성이 높았다.

O<sub>3</sub>의 연중 계절 변동은 봄과 가을에 농도가 높았고, 그 외 항목은 모두 여름에 낮고, 겨울에 높았다.

2018년 월최대값은 각 감시소별 최근 관측값보다 그 수준이 낮았으며, 특히

2018년 7월에 대부분 항목의 월평균과 월최대값이 다른 해의 7월에 비해 낮았다.

## □ 에어로졸

2018년 안면도에서 부유분진측정기(베타선흡수법)로 측정한 PM10 질량농도 연평균은  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 지난 10년 평균에 비해 약 14% 낮았으며, 연평균은 대체로 감소하는 추세를 보이고 있다. 고산에서 같은 모델의 장비로 측정한 PM10 질량농도 연평균은  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 과거 3년(2015 ~ 2017년)보다 약 10% 낮아졌다.

안면도의 2018년 광산란계수 평균은  $76.2 \text{Mm}^{-1}$ 으로 관측 이래 가장 낮았고, 최근 3년간 유사한 수준을 보이고 있다. 산란 용스트롬 지수는 2016년 이후로 점차 낮아지고 있으며, 2018년에 1.34로 가장 낮았다. 2018년 광흡수계수 평균은  $5.4 \text{Mm}^{-1}$ 로 최근 10년과 비교하여 가장 낮았다.

고산에서는 정밀필터복사계(GAW-PFR)의 기기교정으로 인해 2018년 11월부터 공백이 있었으나, 그 외의 지역에서는 공백 없이 관측을 수행하였다. 다만, 고산과 울릉도의 몇몇 파장대에서는 감도가 급격히 낮아져 간접적으로 에어로졸 광학깊이와 용스트롬 지수를 산출하였다. 간접적으로 산출한 값에 의하면 대체적으로 모든 지역에서 2018년도 상반기에 에어로졸 광학깊이(AOD)가 큰 값을 보이다가 하반기로 갈수록 적은 값을 보였다. 용스트롬 지수는 안면도와 고산에서 주로 큰 입자로 구성된 황사의 영향을 받은 봄철에 적은 값을 보였고, 여름철과 가을철에 대체로 큰 값을 보였으나, 울릉도에서는 반대로 나타났다.

광주에서 관측된 AOD의 연간 변화는 과거에 비하여 질량 농도는 감소하고 있더라도 초미세먼지의 경우 2차 생성이 더욱 활발해져 입자의 크기 및 수농도는 더욱 증가되고 있는 추세가 있음을 본 보고서에서 간접적으로 확인할 수 있었다. 이러한 초미세먼지의 수농도 및 입자 크기에 대한 연구가 향후 더욱 강화되어야 할 것으로 판단된다.

PM10 에어로졸에서 이차오염물질  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  중  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 의 농도는 2018년  $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 10년간 평균( $6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 낮은 값을 보였다.  $\text{NO}_3^-$ 는 2018년도에  $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간의 평균( $8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 낮았고,  $\text{NH}_4^+$  성분은 2018년  $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간의 평균( $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 비슷한 값을 보였다. 토양성분인  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 의 2018년 평균은  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최근 10년간 평균( $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 약 30% 수준이었다.

## □ 대기복사

복사자료는 태양복사와 지구복사로 구분되며, 각각의 상향·하향복사(4성분), 태양하향복사의 두 성분인 직달일사와 산란일사, 지표면의 에너지 수지를 측정하는 순복사 등 7가지 요소가 있다. 안면도의 2018년 직달일사 월평균 최대는 9월에 218.4 W/m<sup>2</sup>, 최소는 1월에 91.2 W/m<sup>2</sup>, 산란일사 최대는 6월에 119.2 W/m<sup>2</sup>, 최소는 12월에 41.7 W/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 고산의 2018년 월평균 최대는 직달일사가 8월에 213.6 W/m<sup>2</sup>, 산란일사는 5월에 117.5 W/m<sup>2</sup>이며 최소는 직달일사가 12월에 53.5 W/m<sup>2</sup>, 산란일사는 12월에 46.8 W/m<sup>2</sup>이다.

태양복사의 월평균은 계절변동으로 봄철부터 증가하여 겨울로 갈수록 감소하나 여름철에는 구름과 강수로 인해 오히려 낮은 값을 보이기도 한다. 안면도의 2018년 월평균 태양상향복사 최대는 7월에 49.9 W/m<sup>2</sup>, 최소는 12월에 22.2 W/m<sup>2</sup>이며, 태양하향복사는 관측기기 오류 및 신규장비 교체로 인해 관측값이 없는 날이 많아 분석에서 제외하였다.

지구복사는 기온, 습도의 연직분포, 운량, 구름물리성분, 지면온도의 영향을 받아 겨울에 낮고 여름에 높은 계절변동 특성이 나타난다. 2018년 월평균 지구상향복사의 최대는 7월에 432.1 W/m<sup>2</sup>, 최소는 1월에 293.0 W/m<sup>2</sup>이며, 지구하향복사의 최대는 7월에 363.6 W/m<sup>2</sup>, 최소는 2월에 225.6 W/m<sup>2</sup>이다.

## □ 성층권오존/자외선

2018년 오존전량은 안면도 320 DU, 고산 304 DU, 서울 328 DU로 나타났다. 안면도 월평균 최댓값은 2월(382 DU), 최솟값은 8월(285 DU), 고산 최댓값은 4월(345 DU), 최솟값은 12월(257 DU)에 나타났다. 또한 최댓값과 최솟값의 차이가 안면도는 97 DU, 고산은 88 DU로 연평균 오존전량 기준으로 안면도는 30%, 고산은 28%의 변동폭을 보였다. 서울의 오존전량 월별 변동성은 2월에 10.0%의 최대 증가를 보이고, 12월에 -8.4%의 최대 감소를 보였다. 2018년의 연교차는 2월에 386 DU와 12월에 294 DU였다.

2018년 자외선A의 일누적 복사량 최댓값은 강릉 1.56 MJ/m<sup>2</sup>(5월 19일), 서울 1.55 MJ/m<sup>2</sup>(7월 7일), 울릉도 1.59 MJ/m<sup>2</sup>(6월 21일), 안면도 1.60 MJ/m<sup>2</sup>(7월 17일), 포항 1.47 MJ/m<sup>2</sup>(7월 14일), 목포 1.64 MJ/m<sup>2</sup>(7월 14일), 고산

1.71 MJ/m<sup>2</sup>(7월 13일)이었고, 주로 5 ~ 7월에 나타났다. 2018년 자외선B의 일 최대 복사량 최댓값은 강릉 0.320 W/m<sup>2</sup>(7월 3일), 서울 0.289 W/m<sup>2</sup>(7월 15일), 울릉도 0.322 W/m<sup>2</sup>(7월 4일), 안면도 0.331 W/m<sup>2</sup>(7월 11일), 포항 0.232 W/m<sup>2</sup>(5월 19일), 목포 0.313 W/m<sup>2</sup>(7월 23일), 고산 0.322 W/m<sup>2</sup>(7월 23일) 이었다. 자외선B 최댓값의 변화는 태양천정각과 일조시간, 날씨의 영향을 받아 뚜렷한 계절변화를 보이기 때문에 여름에 높고 겨울에 낮은 특징을 보인다.

## □ 총대기침적

2008년부터 2017년까지의 10년간의 평균강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 929.5, 1288.0, 1541.8 mm이며, 2018년 세 지역의 강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 880.0, 1368.0, 1357.1 mm로 평년의 약 94.7%, 106.2%, 88.0% 수준으로 고산을 제외한 나머지 지역에서 평년보다는 낮은 강수량을 보였다.

2008년부터 2017년까지 약 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 산성도는 각각 4.65, 4.87, 4.77이며, 2018년도의 부피가중평균 산성도는 안면도 5.25, 고산 4.95, 울릉도 4.96으로 나타났다.

안면도에서 채취한 2008 ~ 2018년 건성 및 습성 침적량은 2013년 이후 대체로 감소하는 경향을 보였으며, 2018년도의 전체 침적량은 6946 mg/m<sup>2</sup>이다. 또한 2008년부터 2018년까지 건성 침적량이 차지하는 비율은 약 25.1% ~ 45.5%를 차지하였으며, 2011년에 건성 침적량이 가장 낮은 비율을 보였고, 2014년에 가장 높은 비율을 차지하였다.

# 제1장 머리말

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC<sup>1)</sup>)가 발표한 제5차 기후변화 평가보고서(2013년)에 따르면 지구의 온도가 산업화 이전(1850~1900년) 평균기온 대비 2°C 이상 오르면 인류에 심각한 위협이 될 것이라고 경고하고 있다. 해수면 상승에 따른 주거지역 감소, 폭염·가뭄·집중호우와 같은 이상기후 발생과 식량 생산량 감소 등 이미 지구 온난화로 인해 많은 인명과 재산 피해가 발생하고 있으며, 전 지구적인 기후변화 해결을 위해 모든 국가 공동의 노력이 절실히 요구되고 있다.

1992년 유엔 기후변화협약(UNFCCC<sup>2)</sup>), 1997년 교토의정서(Kyoto Protocol), 2015년 파리협정(Paris Agreement)으로 이어지는 기후변화 협약은 이러한 국제 사회 노력의 일환으로 진행되어 왔다. 특히 2015년 12월 12일 파리에서 열린 제21차 유엔기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 교토의정서가 만료되는 2020년 이후의 새 기후변화 체제를 위해 채택한 파리협정은 195개 당사국의 참여를 이끌어 낸 것과 규제 목표를 강화하였다는 점에서 의미가 크다.

파리협정의 장기목표는 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 '2°C보다 상당히 낮은 수준으로 유지'하고, '1.5°C 이하로 제한하기 위한 노력'을 추구하는 것으로 IPCC 평가보고서의 내용을 기반으로 하였다. 국제협약의 현실적이고 객관적인 규제 목표 설정과 같이 미래 기후변화를 정확하게 예측하고 체계적으로 대응해 나가기 위해서는 지구대기 조성에 관한 과학적 근거자료 확보가 매우 중요하다.

1989년 국제연합(UN)의 특별기구인 세계기상기구(WMO)에서 기후변화의 원인이 되는 지구대기 화학·물리적 조성에 대한 과학적 관측자료와 자연·인위적 대기조성 변화정보를 제공하기 위해 지구대기감시 프로그램(Global atmosphere watch, GAW)을 시작한 것도 이러한 이유에서다. 이 프로그램은 기후변화 원인 물질의 대기 중 농도 변화를 기록할 뿐만 아니라 이들 물질의 전체 순환을 밝히기 위한 기초자료를 생산하는데, 이는 IPCC, 유엔 기후변화협약(UNFCCC), 그 밖의 국제기구, 정부기관, 과학자 등에 제공되어 현재와 미래 기후시스템 변화를 분석·

1) IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

2) UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

예측하여 기후변화 대응을 위한 정책 수립에 활용되고 있다.

현재, WMO 회원국 100개 이상의 국가에서 800개가 넘는 관측소를 GAW 관측시스템에 등록하여 운영하고 있으며, 우리나라 기상청은 1992년부터 GAW 프로그램에 참여하고 있다. 기상청에서 운영하는 안면도, 고산, 울릉도독도, 포항 4개의 기후변화감시소와 대학, 유관기관에서 운영하는 7개의 위탁관측소가 한반도 지구대기감시 관측망으로 운영되고 있으며, 이 중 안면도와 고산은 GAW 지역급 관측소로 지정되어 있다.

한반도 지구대기감시 관측망에서는 GAW에서 권고하는 온실가스, 반응가스, 에어로졸, 대기복사, 성층권오존/자외선, 총대기침적 분야 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 보고서로 발간하고 있다. 이 보고서에는 지구대기감시 관측망의 운영현황과 요소별 분석 결과, 관측 이래 각 요소별 통계자료를 제공하고 있다.

2012년에는 대표적 온실가스 중 하나로 대기 중 극히 미량으로 존재하는 육불화황(SF<sub>6</sub>)의 관측기술을 인정받아 WMO로부터 육불화황 세계표준센터(World Calibration Centre, WCC)로 지정되었으며, 2015년에는 강수화학 국제비교실험과 온실가스 관측기술 적합성 평가 등에서 세계 최고 수준의 기술을 보유한 것으로 평가 받았다. 2016년에는 신뢰도 높은 자료 생산과 더불어 다양한 정보를 제공하기 위해 온실가스의 품질관리 기법을 개선하고 한미기상협력의 일환으로 수행된 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 온실가스 플라스크 관측·분석결과를 추가하였으며, 연직오존자료의 고도별 분석 자료를 새롭게 제시하였다. 2017년은 안면도와 고산에서 온실가스 및 반응가스의 관측기술 적합성 평가에서 좋은 결과를 얻었으며, 에어로졸은 각 관측 장비들 간에 등가성평가를 실시하여 자료의 생산과 품질처리에 신뢰도를 향상시켰다.

2018년에는 기후변화감시소 에어로졸 관측자료 품질관리의 일환으로 3월에 WMO GAW 에어로졸 세계표준센터(World Calibration Centre for Aerosol Physics, WCCAP)로부터 관측환경 전반에 대한 적합성 평가를 받았다. 또한, 9월과 10월에는 WCCAP에서 수행하는 국제 비교실험(응결핵계수기, 전자기유도입자계수기, 광흡수계수측정기)에 참여하여 관측자료 신뢰도를 확보하였다.

# 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 전지구 오존관측망(GO3OS)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, 지구급 관측소(global station) 28개소, 지역급 관측소(regional station) 213개소, 그리고 협력 관측소(contributing station) 134개소가 운영되고 있다.

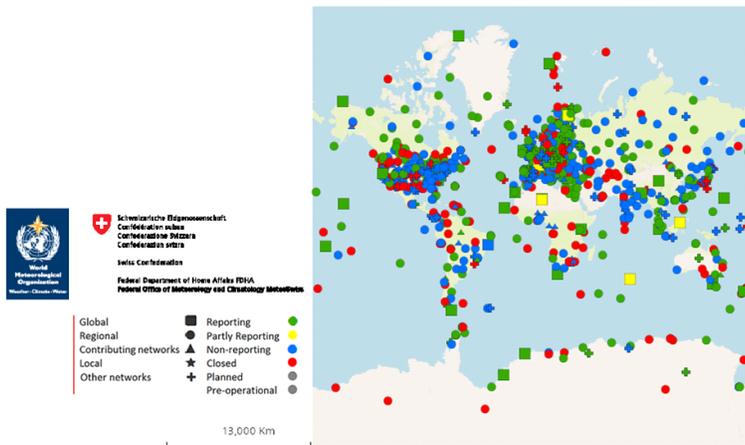


그림 2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 관측소 현황.

지구대기감시 프로그램은 중앙기구를 두어 관측자료의 품질보증기술을 지원하고 있다. 중앙기구는 그림 2.2와 같이 품질보증 과학자문위원회(QA/SAC), 세계표준센터(WCC), 지역교정센터(Regional Calibration Centre, RCC), 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory, CCL), 세계자료센터(World Data Centre, WDC), GAW관측소정보센터(GAWSIS)로 구성되어 있다. 과학자문위원회(SAG)는 프로그램의 과학적 정책 방향을 결정하고 지구대기감시 프로그램 사무국은 중앙기구와 지구대기감시관측소 간의 협력과 운영을 돕는다.

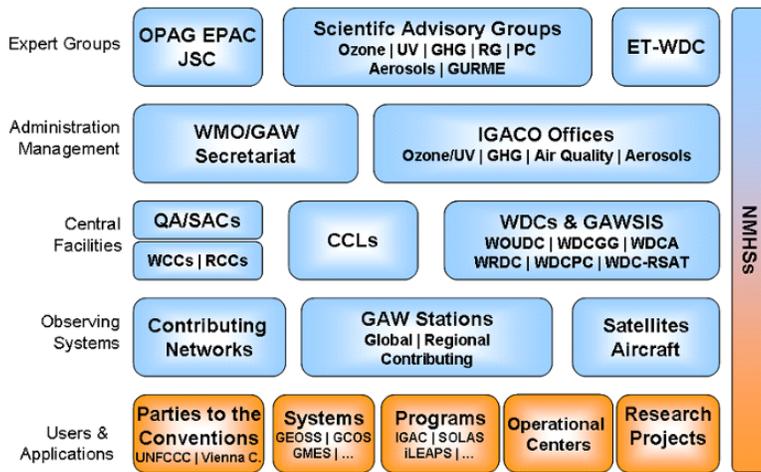


그림 2.2 세계기상기구 지구대기감시(GAW) 프로그램의 운영 구조.

표 2.1 세계기상기구 지구대기감시 세계자료센터 현황

세계자료센터이름	운영 국가	주소
World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)	일본	<a href="http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg">http://ds.data.jma.go.jp/gmd/wdcgg</a>
World Data Centre for Reactive Gases (WDCRG)	노르웨이	<a href="http://www.gaw-wdcr.org">http://www.gaw-wdcr.org</a>
World Data Centre for Aerosols (WDCA)	노르웨이	<a href="http://www.gaw-wdca.org">http://www.gaw-wdca.org</a>
World Radiation Data Centre (WRDC)	러시아	<a href="http://wrdc.mgo.rssi.ru">http://wrdc.mgo.rssi.ru</a>
World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC)	캐나다	<a href="http://www.woudc.org">http://www.woudc.org</a>
World Data Centre for Precipitation Chemistry (WDCPC)	미국	<a href="http://wdcpc.org">http://wdcpc.org</a>
World Data Centre for Remote Sensing of the Atmosphere (WDC-RSAT)	독일	<a href="http://wdc.dlr.de">http://wdc.dlr.de</a>

## 2.2 한반도 기후변화감시소 현황

한반도에서 지구대기감시는 1987년 1월에 충북 단양군 단양읍에 위치한 소백산 기상관측소에서 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 배경대기 감시를 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 고산 기후변화감시소(이하 고산, JGS)를 설립하였다. 유출 지역을 감시하기 위하여 2011년 한반도의 최동단인 독도에서 온실가스 관측을 시작하였으며, 2013년 울릉도에 울릉도독도 기후변화감시소(이하 울릉도, ULD)를 신설하였다. 이로써 기후변화감시소는 한반도를 삼각형으로 감시하는 관측망으로 구축되었다(그림 2.3). 이 중 고산은 안면도와 마찬가지로 2013년 GAW에 지역급 관측소로 등록되었다.

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

표 2.2 한반도 기후변화감시 관측망(감시소) 정보

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

표 2.3 위탁관측소 운영 현황

위탁기관명(관측지점명)	위·경도	관측요소	위탁지정일
연세대학교(서울)	37.57°N 126.95°E	성층권오존, 자외선	2004. 11. 6.
광주과학기술원(광주)	35.22°N 126.83°E	에어로졸 연직분포	2007. 1. 1.
서울대학교(광릉)	37.75°N 127.15°E	산림 이산화탄소	2008. 11. 5.
극지연구소 남극세종기지(남극)	62.22°S 58.78°W	이산화탄소	2010. 10. 26.
극지연구소 장보고기지(남극)	74.62°S 164.23°E	이산화탄소, 성층권오존	2017. 10. 1.
제주대학교(제주)	33.29°N 126.16°E	라돈	2012. 4. 1.
숙명여자대학교(서울)	37.54°N 126.97°E	중층대기 수증기, 성층권오존	2015. 4. 1.

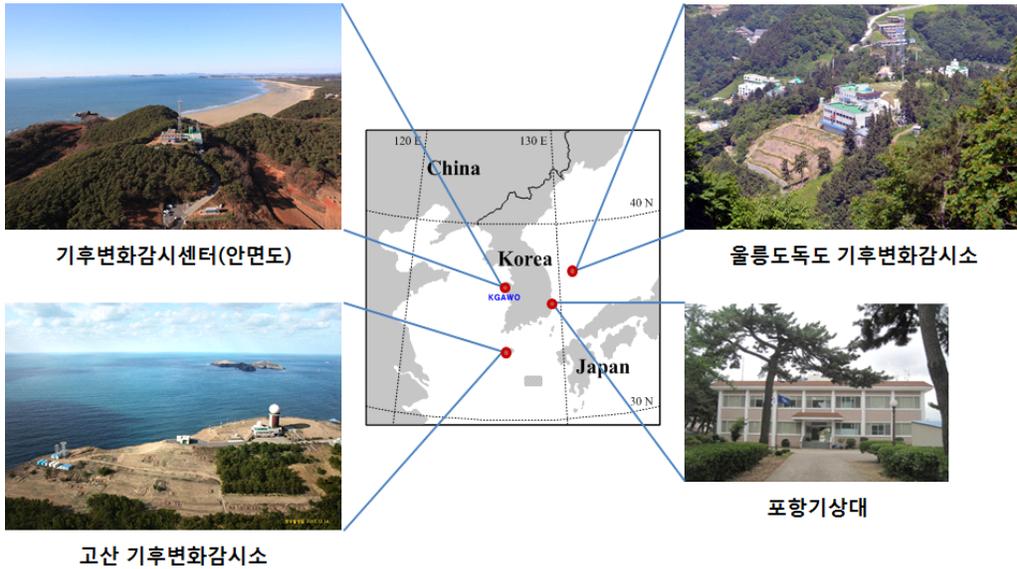


그림 2.3 한반도 기후변화감시망의 구성.

## 2.2.1 기후변화감시소 기상특성

각 감시소에서는 자동기상관측 장비(Automatic Weather System, AWS)로 기상요소를 관측하고 있다. 2018년의 풍향, 풍속, 기온을 지난 10년(2008 ~ 2017년)의 풍속, 기온과 함께 분석하였다.

### 가. 풍향

각 감시소의 2018년 계절별 풍향과 풍속을 바람장미로 그림 2.4에 나타내었다. 바람장미는 방위별 풍향의 출현빈도와 풍향별 풍속계급 빈도를 나타낸다.

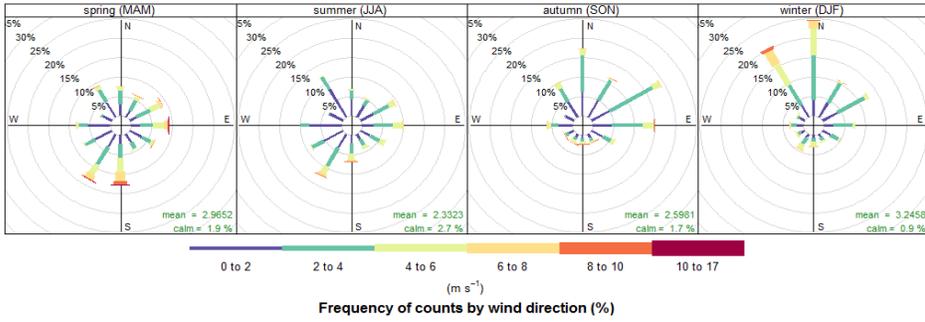
안면도에서는 봄에 북서계열과 남서-남풍 계열의 바람이 주로 불었고, 여름에는 다른 방향에 비해 남서계열과 북서계열이 우세하였다. 가을에는 북동-북풍이 주로 불었고, 겨울에는 북서-북풍 바람이 우세하였다.

고산에서는 봄에 주로 북서-북풍이 불었고 남동계열의 바람도 잦았다. 여름에 남동-남풍계열의 바람이 주로 불었으며, 가을에는 북동-동풍이 많이 불었고 겨울에는 주로 북서-북풍이 강하게 불었고, 북동풍도 잦았다.

울릉도에서는 모든 계절에서 북동풍과 남서풍이 우세하였으나, 바람세기는 계절별로 차이가 있었다.

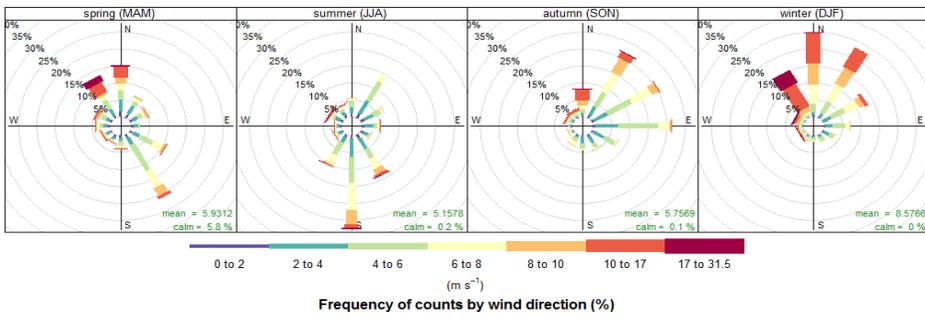
(a)

AMY(2018)



(b)

JGS(2018)



(c)

ULD(2018)

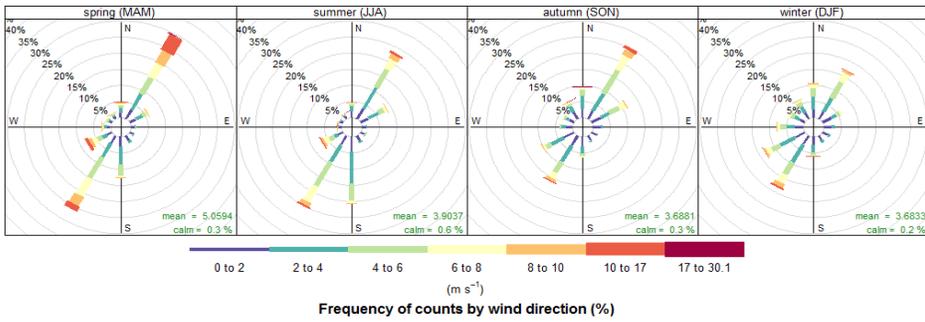


그림 2.4 (a)안면도(AMY), (b)고산(JGS), (c)울릉도(ULD)의 2018년 계절별 풍향.

## 나. 풍속

각 감시소의 2018년 평균 풍속과 계절별 풍속의 일변화를 2008 ~ 2017년 평균값과 비교하였고 2008년부터 2018년까지의 연변화와 함께 그림 2.5 ~ 2.7에 나타내었다. 일변화에는 시간평균값을 사용하였고, 연변화에는 일평균값을 사용하였다.

안면도 풍속의 2018년 평균 일변화를 보면 주로 아침 8시부터 증가하였다가 정오에 최고로 세게 불며 18시까지 감소하였다. 2018년은 지난 10년에 비해 전체적으로 풍속이 낮았다. 계절별로 풍속을 살펴보면 봄과 여름에 낮 동안 풍속이 세게 나타나는 일변화가 뚜렷하였고 가을과 겨울에는 일변화가 두드러지지 않았다. 여름철 풍속은 다른 계절에 비해 낮시간을 제외한 새벽과 저녁에 가장 바람이 약했고, 겨울철에 가장 바람이 강했다. 2018년이 지난 10년보다 풍속이 봄과 여름에 낮았고, 가을과 겨울에는 높았다. 2008 ~ 2018년 동안의 연변화를 보면 다른 해에 비해 2010년에 풍속이 낮았고 2012년 이후 지금까지 풍속은 평균, 최소, 최대값에서 모두 비슷한 수준으로 나타났다.

고산 풍속의 2018년 평균 일변화는 주로 아침 9시부터 18시까지의 낮 동안 조금 증가하였고, 2018년은 지난 10년에 비해 전체적으로 풍속이 조금 낮았다. 계절별로 풍속을 살펴보면 2018년의 겨울철 풍속이 9 ~ 10 m/s로 가장 높고, 봄과 가을에 5 ~ 7 m/s였고, 여름에 4 ~ 5 m/s로 가장 낮았다. 2018년 봄의 풍속이 지난 10년에 비해 모든 시간대에서 약 0.5 m/s 가량 낮았다. 2008 ~ 2018년 동안의 연변화를 보면 풍속은 평균, 최소, 최대값에서 모두 비슷한 수준으로 나타났다.

울릉도에서 2018년 풍속 평균 일변화는 대체로 4 m/s로 고르게 나타났고, 다른 지점과는 달리 9시부터 18시까지의 낮 동안의 풍속이 약했으며, 2018년은 지난 10년에 비해 전체적으로 풍속이 조금 높았다. 봄철이 다른 계절에 비해 풍속이 강하였고, 여름은 다른 계절에 비해 새벽과 저녁에 풍속이 가장 강하였다. 안면도, 고산의 경우 겨울철 풍속이 다른 계절에 비하여 가장 강하였으나, 울릉도는 봄을 제외한 계절의 풍속이 유사하였다. 2018년 봄과 여름에는 풍속이 지난 10년보다 높았고, 가을과 겨울에는 낮았다. 2008 ~ 2018년 동안의 연변화를 보면 풍속은 평균, 최소, 최대값에서 모두 비슷한 수준으로 나타났다.

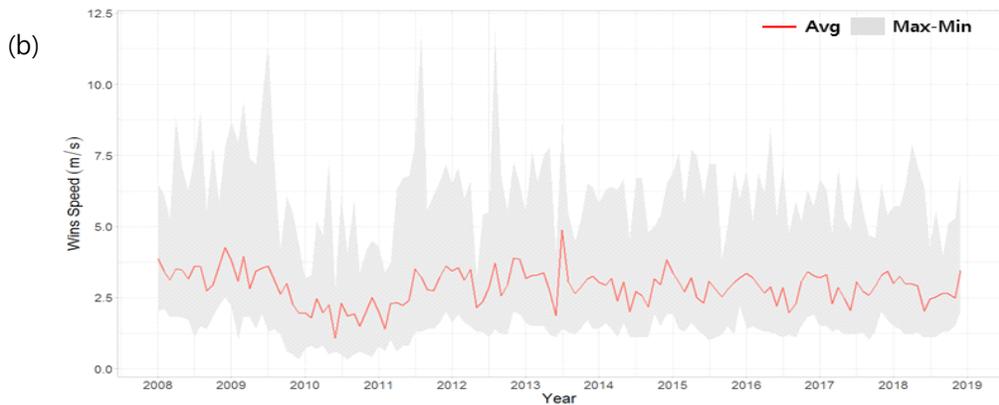
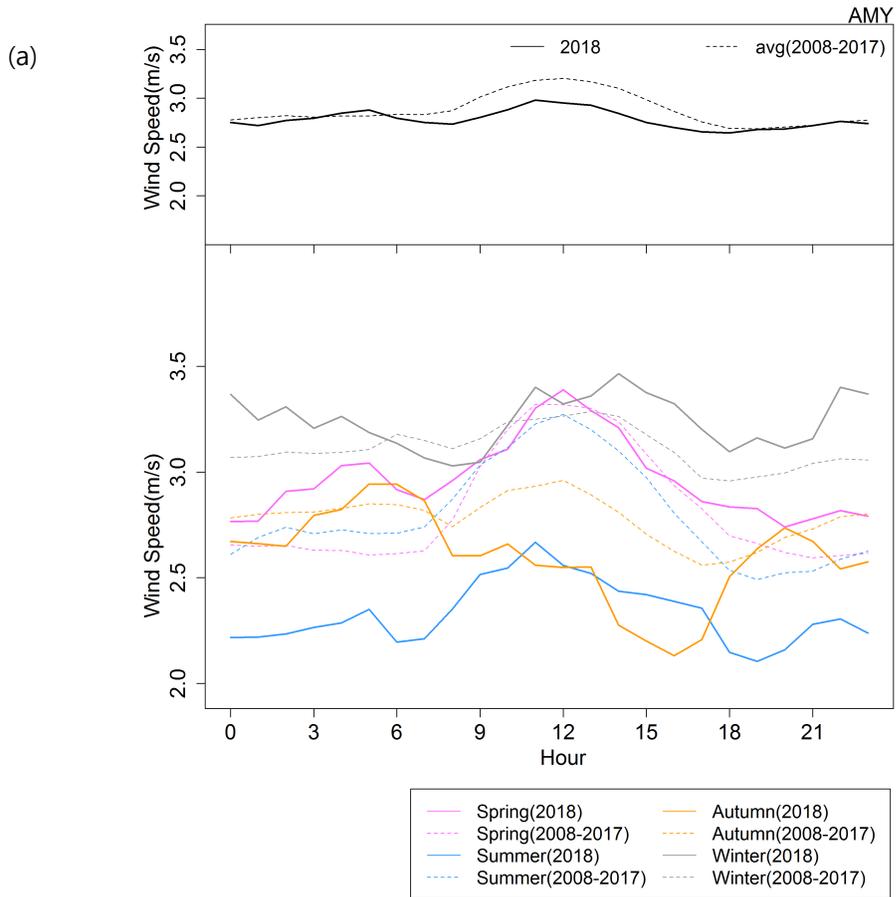


그림 2.5 안면도에서 관측한 풍속의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

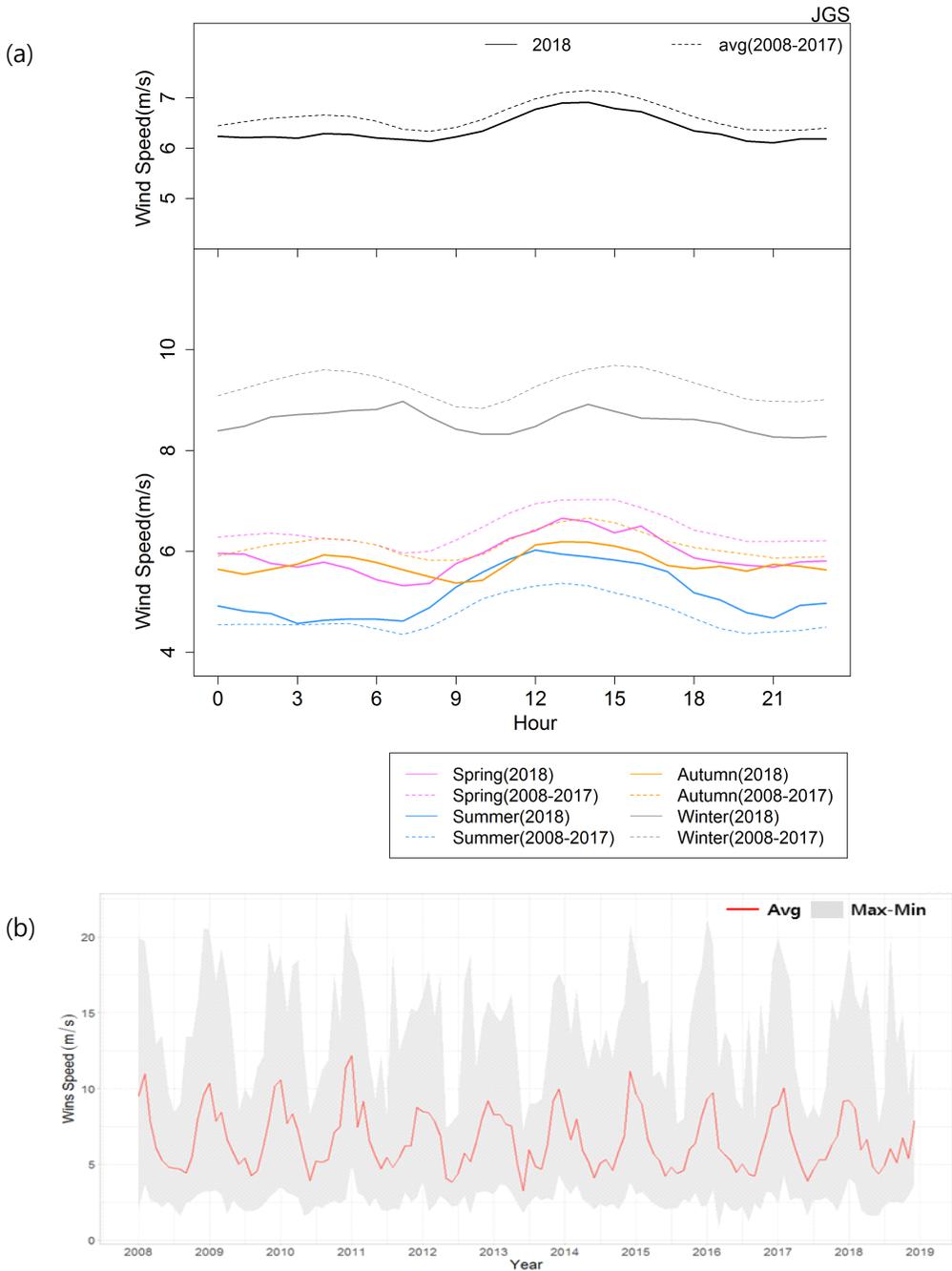


그림 2.6 고산에서 관측한 풍속의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

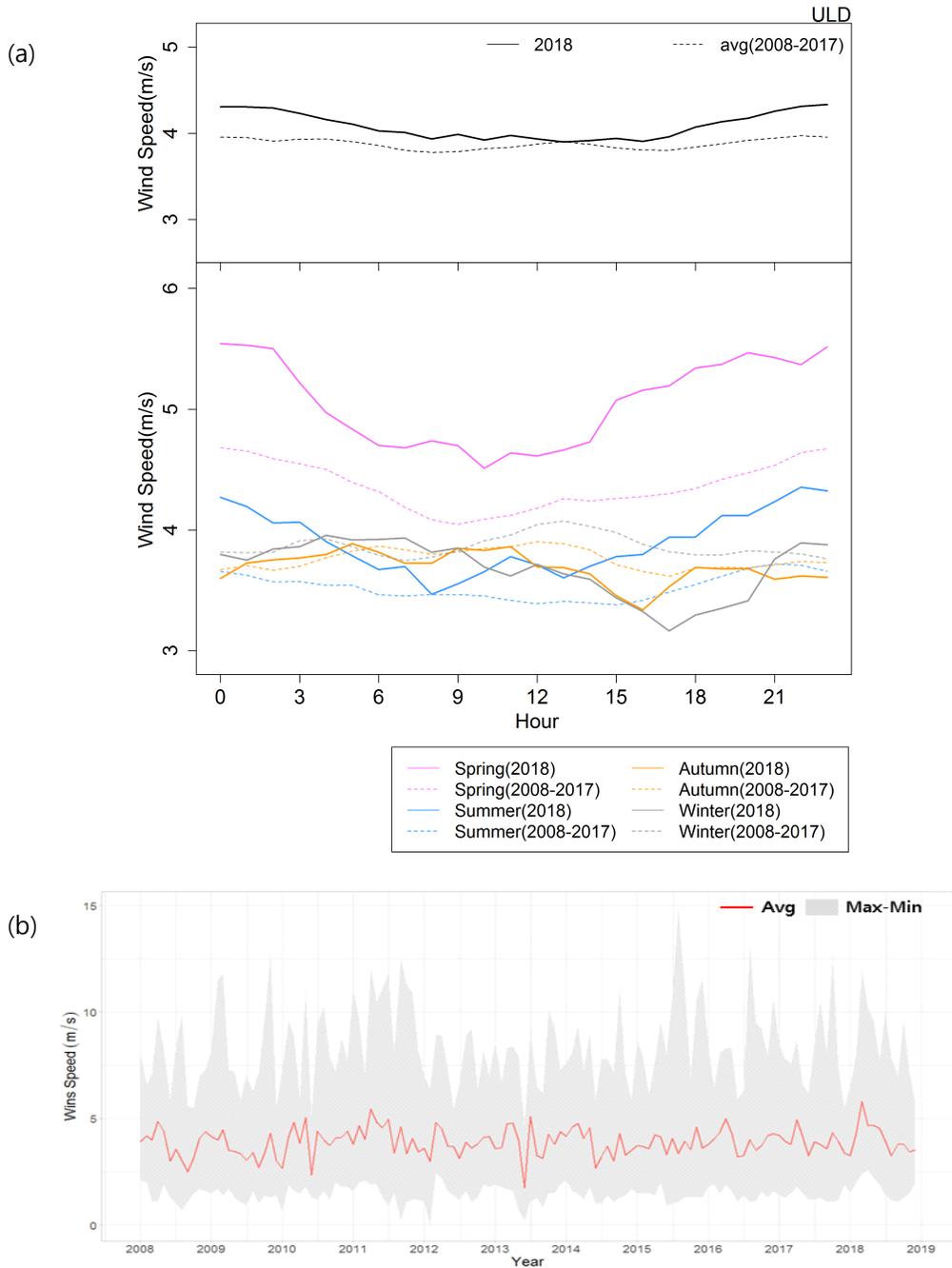


그림 2.7 울릉도에서 관측한 풍속의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

## 다. 기온

각 감시소의 2018년 평균 기온과 계절별 기온의 일변화를 2008 ~ 2017년 평균값과 비교하였고 2008년부터 2018년까지의 연변화와 함께 그림 2.8 ~ 2.10에 나타내었다. 일변화에는 시간평균값을 사용하였고, 연변화에는 일평균값을 사용하였다.

2018년 기온의 평균 일변화는 안면도, 고산과 울릉도에서 모두 새벽 5 ~ 6시경에 가장 낮았고 낮 동안 기온이 높아졌다가 다시 오후 6시까지 급격히 낮아진 이후 새벽 5시까지 서서히 낮아졌다. 세 감시소의 2018년 평균 일변화는 지난 10년 평균 일변화보다 모든 시간대에서 0.5 ~ 1℃ 이내로 높았다.

2018년 기온의 계절별 평균값은 모든 감시소에서 여름 > 가을 > 봄 > 겨울의 순서로 높았고, 여름과 가을에는 지난 10년의 평균 일변화보다 높았으나, 봄과 겨울은 약간 낮았다.

안면도와 울릉도는 비슷한 위도대에 위치하여 연평균 기온이 비슷하고 연변화 경향 또한 2008년부터 2012년까지 점차 낮아졌다가 2015 ~ 2016년까지 높아진 후 2017년은 전년도에 비해 낮은 경향을 보이고 2018년은 다시 높아졌다. 고산은 두 감시소에 비해 더 남쪽에 위치하여 두 감시소보다 연평균 기온이 높았으나 변화 경향은 유사하였다.

표 2.5 안면도, 고산, 울릉도 기후변화감시소의 연평균 기온(2008 ~ 2018년)

연도	[단위:℃]		
	안면도	고산	울릉도
2008	13.0	15.9	13.1
2009	12.9	15.7	12.6
2010	12.4	15.7	12.6
2011	11.2	15.4	12.1
2012	11.1	15.6	11.9
2013	11.5	15.5	12.8
2014	12.2	15.6	12.8
2015	12.6	15.7	13.2
2016	13.0	16.2	13.2
2017	12.9	16.1	13.1
2018	12.7	16.1	13.0

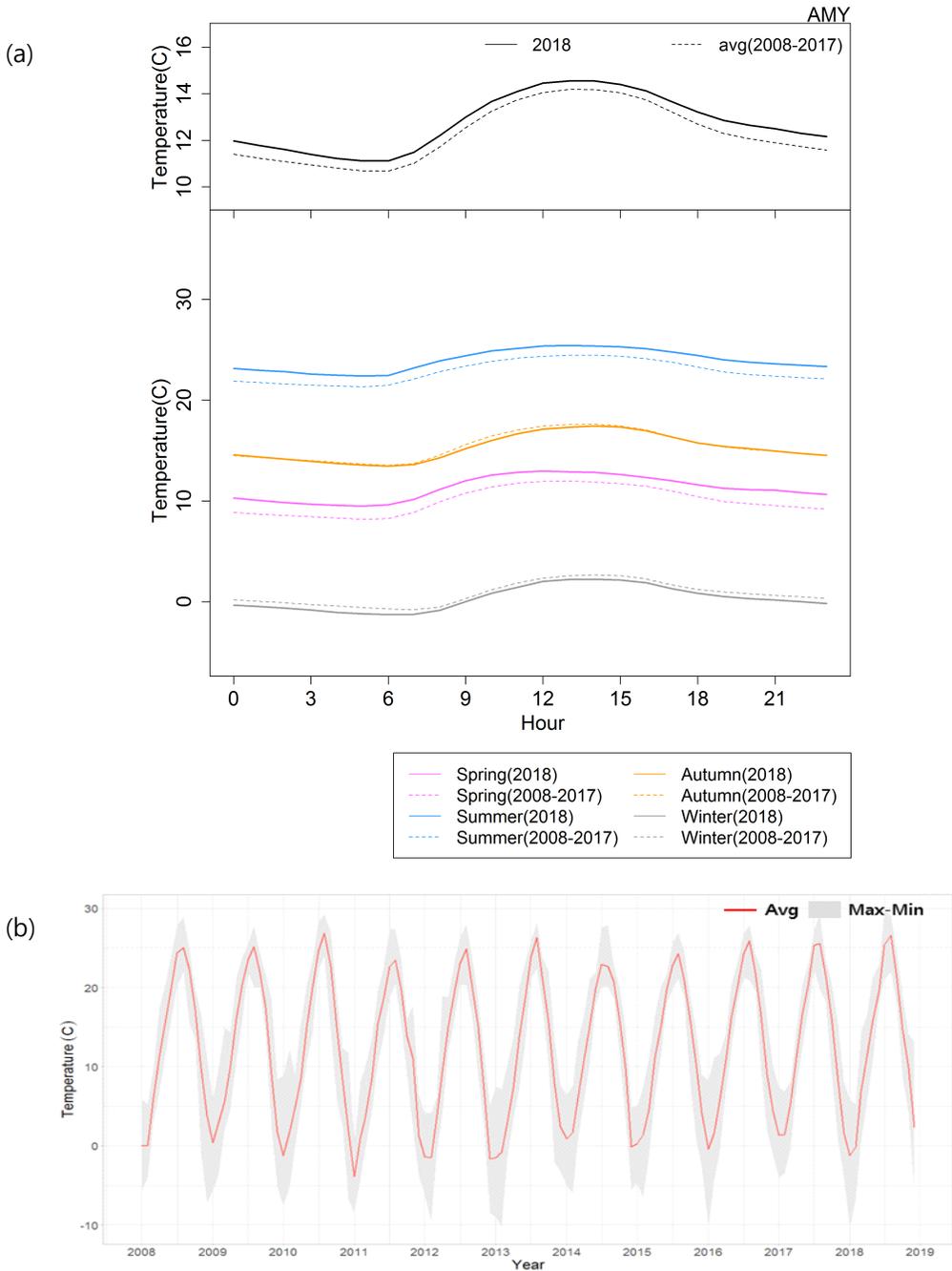


그림 2.8 안면도에서 관측한 기온의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

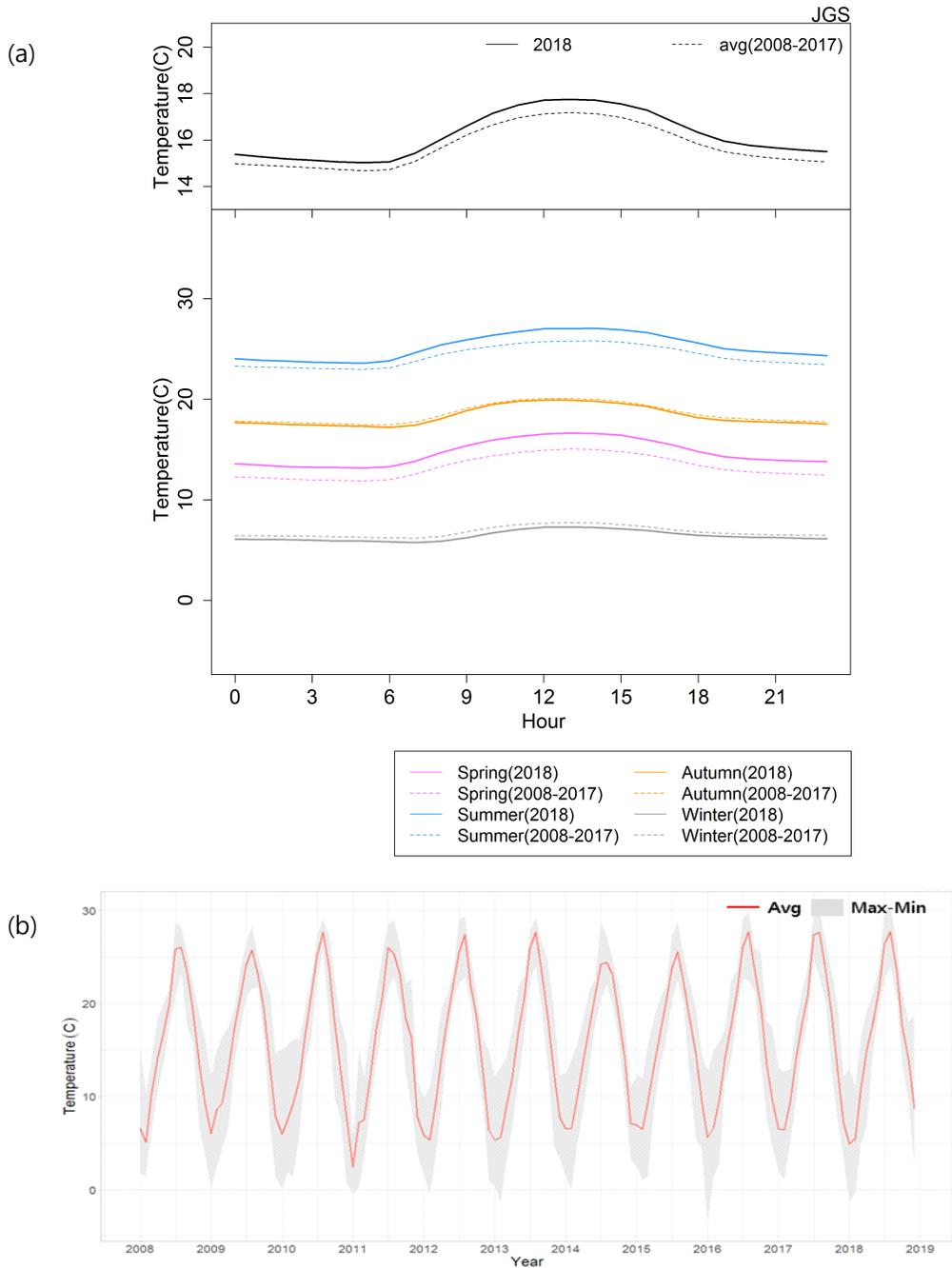


그림 2.9 고산에서 관측한 기온의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

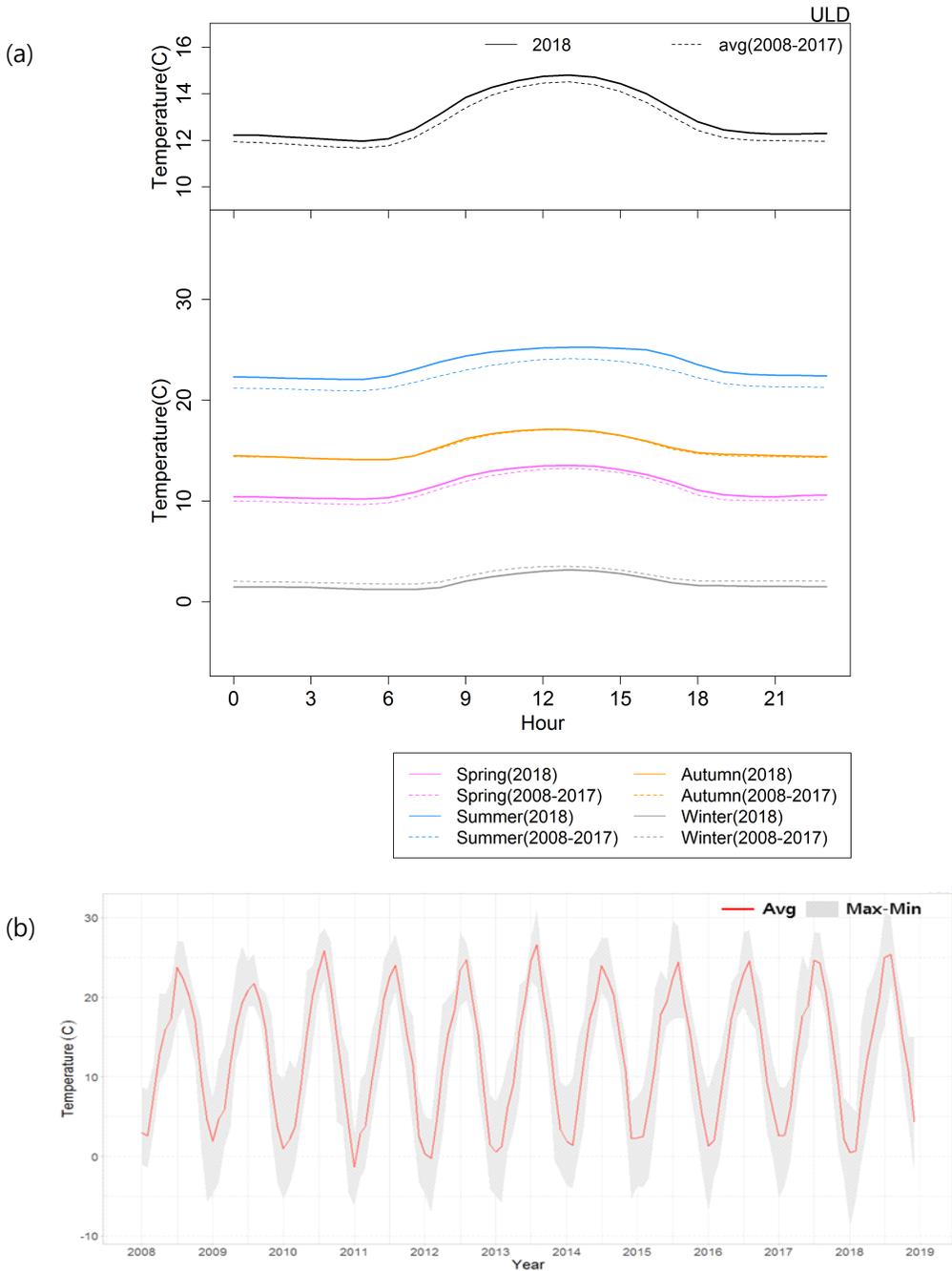


그림 2.10 울릉도에서 관측한 기온의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

## 라. 습도

각 감시소의 2018년 평균 습도와 계절별 습도의 일변화를 2008 ~ 2017년 평균값과 비교하였고 2008년부터 2018년까지의 연변화와 함께 그림 2.11 ~ 2.13에 나타내었다. 일변화에는 시간평균값을 사용하였고, 연변화에는 월평균값을 사용하였다.

2018년 습도의 연평균 일변화는 안면도, 고산과 울릉도에서 모두 낮 12 ~ 13시에 가장 낮았고 아침 6 ~ 8시에 가장 높았으며 낮 동안 습도가 낮아졌다가 다시 오후 6시까지 급격히 높아진 이후 아침 6시까지 서서히 높아졌다. 안면도와 울릉도의 2018년 평균 일변화값은 지난 10년 평균 일변화값보다 모든 시간대에서 낮았고, 고산의 경우는 2018년이 지난 10년보다 약간 낮았다.

2018년 습도의 계절별 평균값은 안면도와 고산에서는 여름 > 봄 > 가을 > 겨울의 순서로 높았고, 울릉도에서는 여름이 월등히 높았으나 나머지 계절은 유사하게 나타났다.

연변화 경향을 보면 안면도에서 습도가 2008년 연평균 74.6%에서 2014년 80.9%로 증가한 이후 2018년 74.4%로 다시 감소하였다. 고산에서는 2008년부터 습도가 대체로 증가하였으며 2018년 연평균은 79.2%로 전년도 77%에 보다 감소하였고, 울릉도는 2008년 연평균 72.3%에서 증가와 감소를 반복하다가 2018년 평균은 67.1%로 감소하였다.

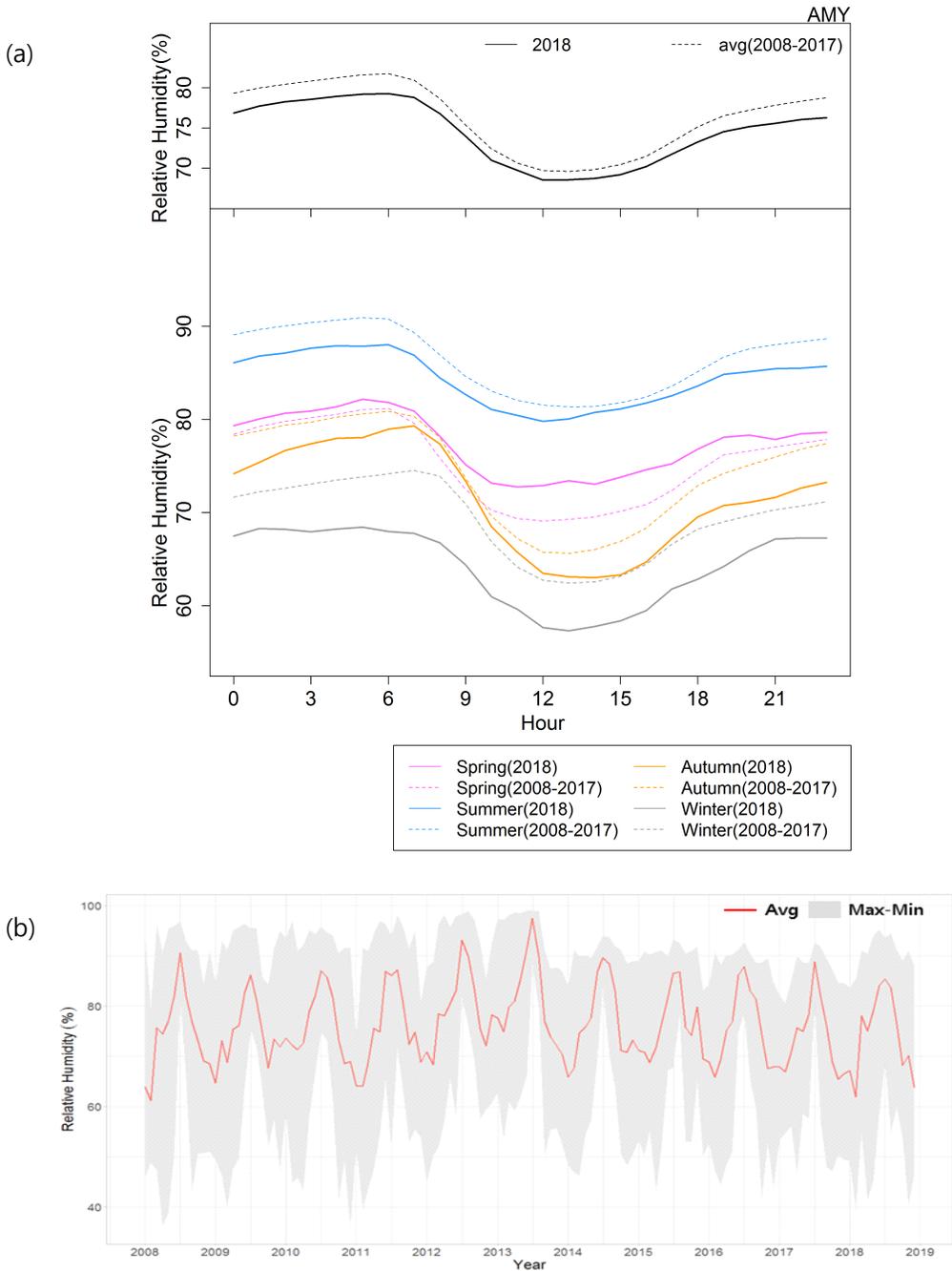


그림 2.11 안면도에서 관측한 습도의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

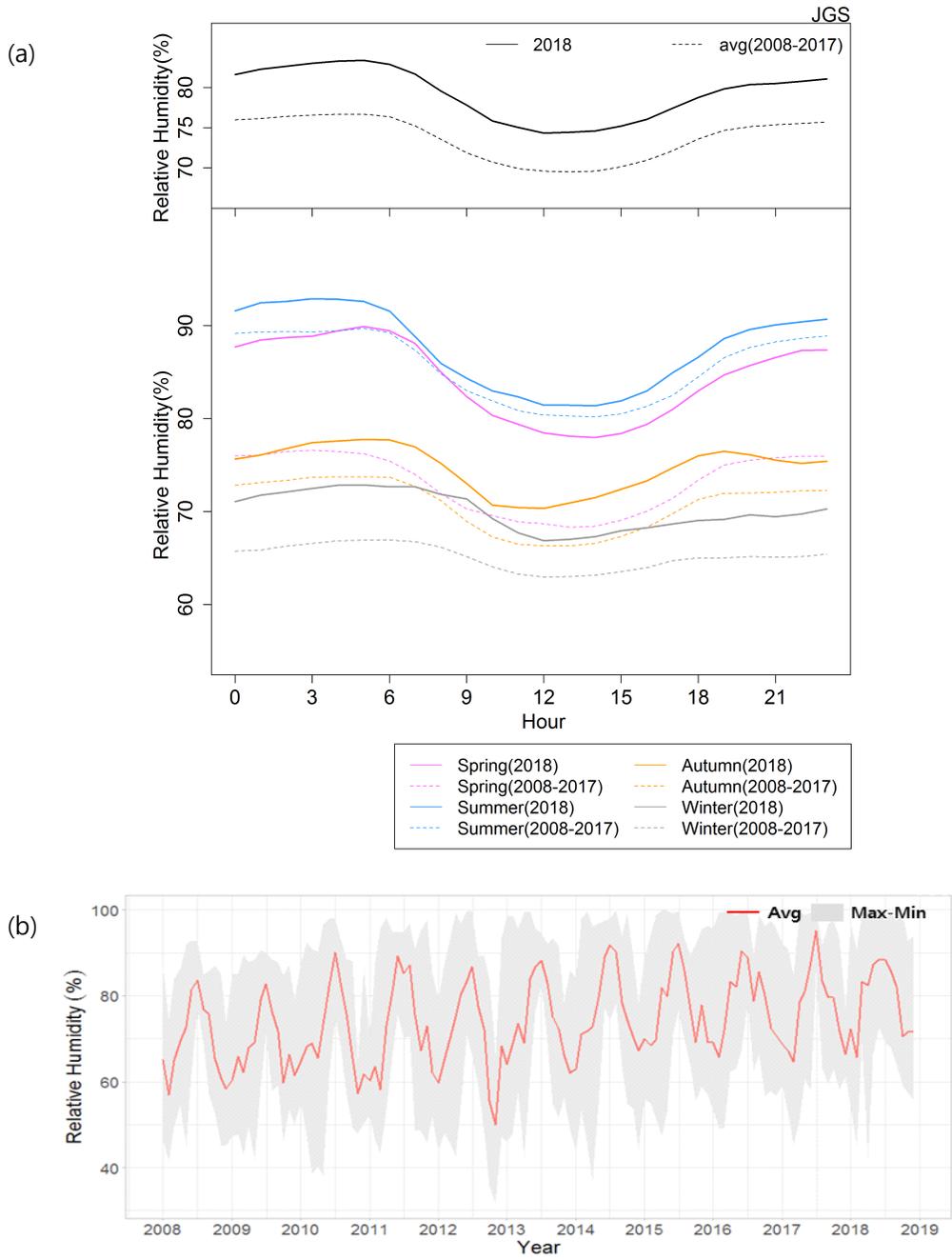


그림 2.12 고산에서 관측한 습도의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

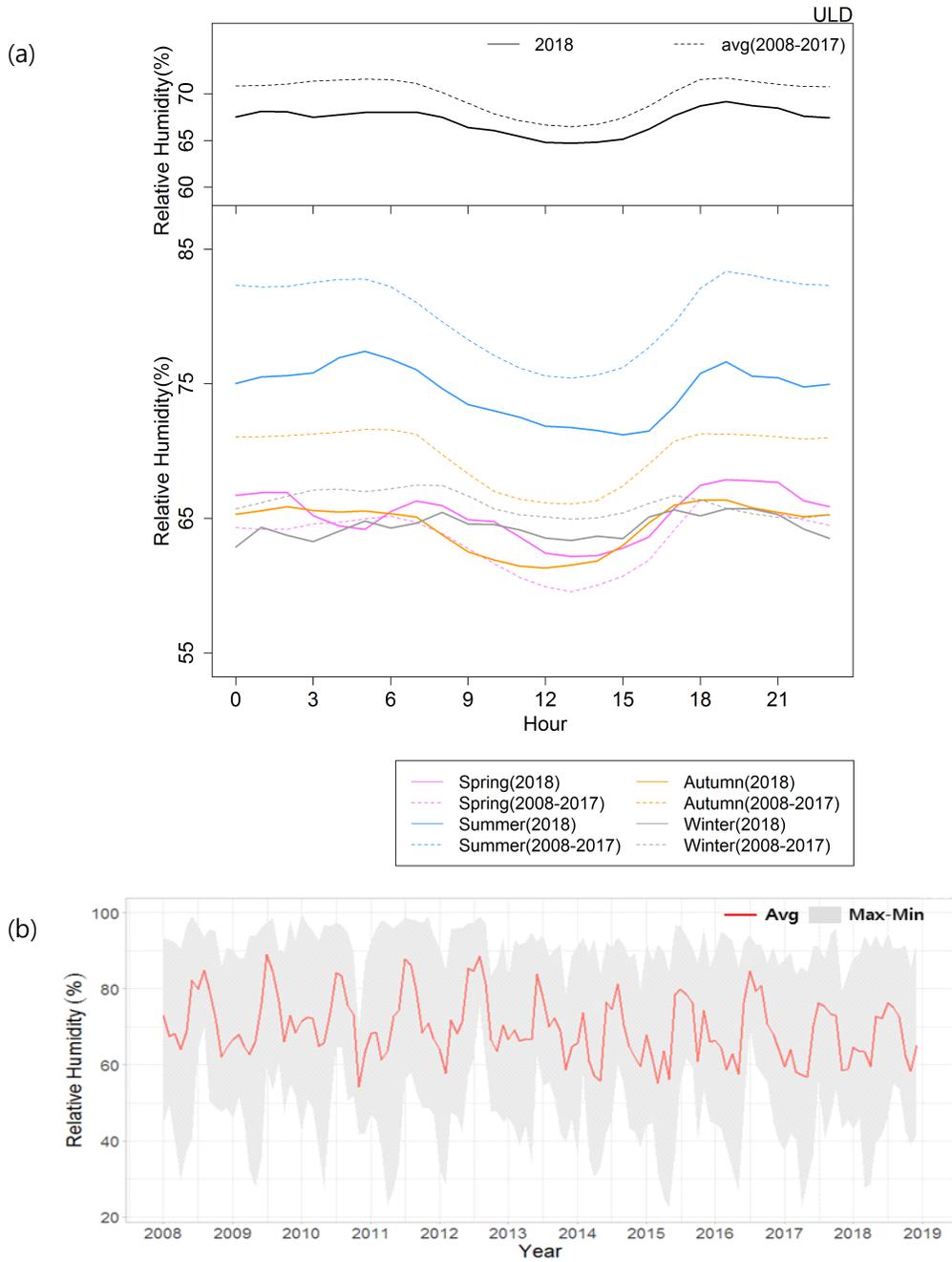


그림 2.13 울릉도에서 관측한 습도의 (a)연간 일변화와 계절별 일변화, (b)연변화 (2008 ~ 2018년).

## 제3장 분야별 관측·분석 결과

### 3.1 온실가스

온실가스는 지표면이 반사하는 태양복사의 장파복사를 흡수 또는 반사하여 지구표면의 온도를 상승시키는 역할을 하는 가스종을 말한다. 이들은 대기 중에 긴 체류시간을 갖고 있어 한 번 배출되면 대기에 지속적으로 누적되어 지구온난화를 가속한다. 대기 중 온실가스 농도는 지구온난화를 야기하는 온실가스의 직접적 영향을 추산할 수 있을 뿐 아니라, 배출원과 소멸원의 변화를 유추할 수 있는 좋은 근거자료로 유엔 기후변화협약의 제3차 당사국총회(일본 교토, 1997)에서는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 염화불화탄소류(CFCs), 수소불화탄소류(HFCs), 과불화탄소류(PFCs), 육불화황(SF<sub>6</sub>)을 규제대상 온실가스로 규정하였고, 제17차 당사국총회(남아프리카공화국 더반, 2011)에서 삼불화질소(NF<sub>3</sub>)를 추가하였다.

2018년 10월 WMO는 2016년의 전지구 평균 온실가스 농도를 발표하였으며, 이 때 CO<sub>2</sub> 405.5±0.1 ppm, CH<sub>4</sub> 1859±2 ppb, N<sub>2</sub>O 329.9±0.1 ppb로 나타났다. 이들 온실가스는 산업화 이전(1970년대 이전)보다 146%, 257% 그리고 122% 높다. 특히 온실가스 중 하나인 CFC-11의 경우 몬트리얼 의정서로 감소세가 지속되고 있으나, 2002년부터 2012년까지 그 감소세가 둔화되고 있어 재배출의 가능성이 있음을 시사하였다(WMO, 2018).

기상청은 안면도(1999~), 고산(2012~), 울릉도(2014~)에서 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>, CFC-11, CFC-12, CFC-113 등 7종을 관측하고 있으며, 위탁관측소로 지정된 남극 세종 및 장보고과학기지에서도 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도를, 광릉수목원에서 산림 CO<sub>2</sub> 플럭스를 관측하고 있다. 기상청은 안면도의 관측을 기준으로 1999년부터 현재까지 총 20년간의 온실가스 배경대기농도 관측자료를 확보하고 있다.

기상청이 관측에 사용하는 온실가스의 척도는 CO<sub>2</sub> WMO-X2007, CH<sub>4</sub> WMO-X2004, N<sub>2</sub>O WMO-X2006A, SF<sub>6</sub>는 WMO-X2014를 사용하고 있다.

이 척도는 1957년 킬링 박사가 하와이 마우나로아(Mauna Loa, 19.54°N, 155.58°W)에서 최초로 관측을 시작했을 때의 척도와 이어져 있다. 이 최초척도(Primary scale)는 현재 NOAA로 이관되어 유지되고 있으며, 전세계로 보급

하고 있다. 현재 기상청은 본 척도를 기준하여 바탕대기가 자연대기인 표준가스를 제조하여 사용한다. CFCs의 경우 한국표준과학연구원의 척도를 이용하며, 중량법으로 제조된 가스를 직접 주입하여 자료값 확정에 활용한다. 따라서 CFCs의 경우 표준가스의 서로 다른 척도로 인해 타 관측소와 비교 시 값의 차이가 있을 수 있다. 본 보고서의 그림 3.1.24에 제시된 마우나로아와 전지구 값의 경우 모두 NOAA에서 만들어진 척도를 사용하고 있다. 비교실험 보고서에 의하면, NOAA의 척도에 비해 한국표준과학연구원의 척도가 CFC-11은 1.91 ppt, CFC-12는 1.06 ppt, CFC-113은 0.3 ppt가 낮다(Rhoderick et al., 2013).

본 보고서의 온실가스 자료처리에 관한 정보는 4장에 제시하였으며, 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 온실가스의 경우 온도, 압력, 부피가 지속적으로 변하는 자연대기 상태에서 수분을 제거하여 관측하기 때문에 몰농도를 기준한다(Schwartz and Warneck, 1995). 따라서 본 보고서의 단위를 SI 단위로 표현할 경우 ppm은  $\mu\text{mol/mol}$ , ppb는  $\text{nmol/mol}$ , ppt는  $\text{pmol/mol}$ 로 대신하여 사용하는 것이 타당하다.

### 3.1.1 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)

#### 가. 한반도 기후변화감시소

CO<sub>2</sub>는 지구온난화를 유발하는 주요 원인물질로 인간의 화석연료 소비증가로 배출되는 대표적인 온실가스이다. CO<sub>2</sub>의 전지구 평균 농도는 꾸준히 증가하고 있다. 일반적으로 화석연료 등으로 CO<sub>2</sub>가 배출되면 생태와 해양에서 약 60%가 흡수되고, 이 중 30%는 해양으로 흡수되는데, 이로 인해 해양의 산성화가 초래되는 것으로 알려져 있다. 흡수되지 못한 CO<sub>2</sub>는 대기에 누적되며, 이들이 대기 중에 머무르는 체류 기간이 100 ~ 300년 정도 된다(IPCC, 2013).

모든 온실가스의 전지구 복사강제력은 산업화 이전 시기(1750년 이전)와 비교하여 2.83 W/m<sup>2</sup>에 이르며 이 중 CO<sub>2</sub>가 차지하는 전지구 복사강제력은 1.83 W/m<sup>2</sup>

(64.3%)에 이르는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2013).

2018년 안면도에서 관측된 CO<sub>2</sub> 연평균 배경대기 농도는 415.2 ppm이다. 안면도에서 처음 CO<sub>2</sub> 농도를 관측한 1999년 연평균 농도 371.2 ppm과 비교하여 19년간 44 ppm 증가하였으며 1999년 농도 대비 12% 증가하였다. 산업화 이전인 1750년 CO<sub>2</sub> 전지구 평균농도 278.0 ppm와 비교하면 49% 증가한 값이다.

안면도 CO<sub>2</sub>는 전년도에 비해 3.0 ppm 증가하였으며, 지난 10년간 안면도에서 관측된 CO<sub>2</sub> 연간 증가값의 평균인 2.4 ppm 보다 높다. NOAA에서 발표한 2018년 전지구 CO<sub>2</sub> 농도는 407.4 ppm으로 전년도에 비해 2.4 ppm 증가했으며, 지난 10년간의 연간 증가값의 평균인 2.3 ppm/yr과 비슷하다. 고산은 414.3 ppm으로 전년도 보다 2.5 ppm 증가하였다. 울릉도는 412.7 ppm으로 전년도 보다 3 ppm 증가하였다. 안면도, 고산, 울릉도의 2018년 연평균 농도는 전지구 평균보다 약 7.8 ppm, 6.9 ppm, 5.3 ppm 높다.

독도는 2017년 4월부터 측정장치의 문제 등으로 인하여 관측이 중단되어 공식기록을 제시할 수 없었으며, 유효한 자료가 2018년 10월에 다시 관측되기 시작하였다. 따라서 본 보고서에는 그 값을 제시하지 않았고, 향후 2019년 자료와 함께 품질관리가 완료된 독도자료를 포함할 예정이다.

안면도와 지구상에서 가장 오래된 관측기록을 가진 미국 하와이 마우나로아, 그리고 NOAA에서 관측한 전지구 평균 CO<sub>2</sub> 농도의 시계열을 그림 3.1.1에 제시하였다.

북반구에 위치한 안면도와 마우나로아 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 안면도와 마우나로아 모두 관측 이래 지금까지 꾸준히 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하고 있으며, 그 증가 기울기가 유사하다.

표 3.1.1 2018년 안면도, 고산, 울릉도, 마우나로아, 전지구의 CO<sub>2</sub> 농도(ppm)

	안면도	고산	울릉도	마우나로아 <sup>1</sup>	전지구 <sup>1</sup>
2018년 평균값	415.2	414.3	412.7	408.5	407.4
2017년 대비 절대 증가값 <sup>2</sup>	3.0	2.5	3.0	2.0	2.4
지난 10년간 절대 증가값 평균 (2009년 ~ 2018년)	2.4 ppm/yr	-	-	2.3 ppm/yr	2.3 ppm/yr

<sup>1</sup> 본 보고서에 명시된 전지구와 마우나로아 농도는 NOAA의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

<sup>2</sup> 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

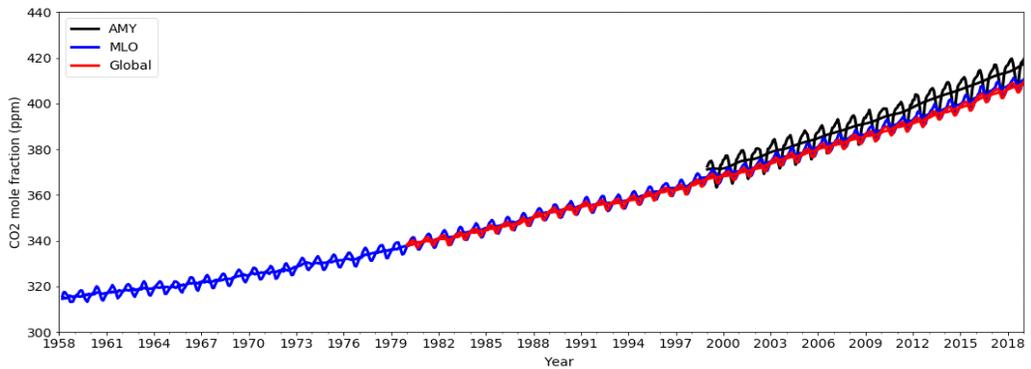


그림 3.1.1 안면도(검은색), 마우나로아(파란색), 전지구(빨간색)의 CO<sub>2</sub> 농도.

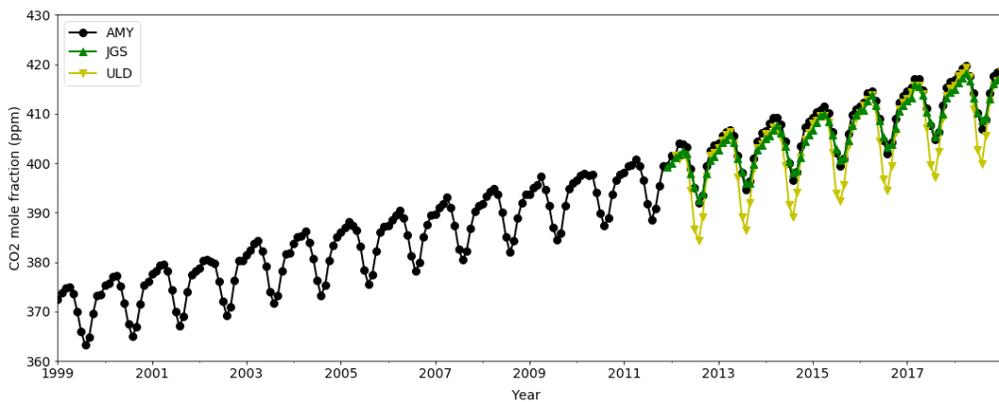


그림 3.1.2 1999 ~ 2018년 안면도(검은색, 동그라미), 2012 ~ 2017년 고산(초록색, 삼각형), 2014 ~ 2017년 울릉도(노란색, 역삼각형)의 CO<sub>2</sub> 배경대기 농도.

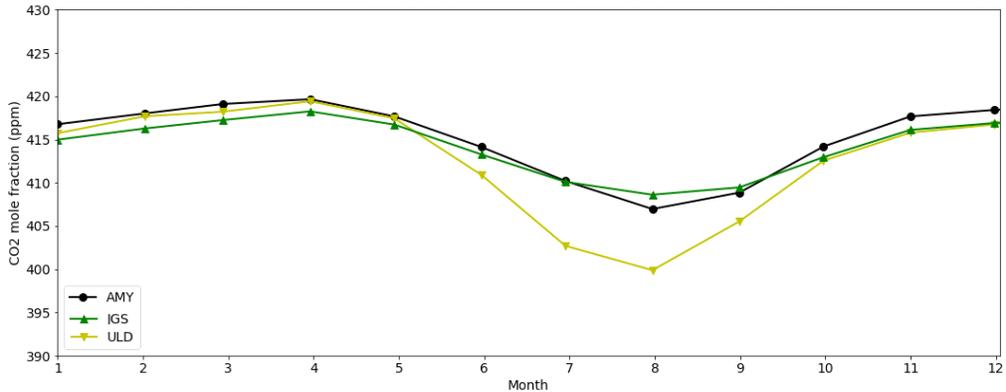


그림 3.1.3 2018년 안면도(검은색, 동그라미), 고산(초록색, 삼각형), 울릉도(노란색, 역삼각형)의 CO<sub>2</sub> 계절변동.

그림 3.1.2는 1999년부터 2018년까지 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 CO<sub>2</sub> 배경대기 농도 시계열이다. 안면도의 CO<sub>2</sub> 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 고산에서도 동일한 결과로 나타났다. 반면 현재까지 울릉도는 8월 여름철에 399 ppm 대의 농도를 보여 한반도 서쪽에 비해 농도가 낮다. 다만, 이러한 CO<sub>2</sub>의 증가율이라면 2019년의 울릉도 또한 모든 계절에 400 ppm을 넘을 수 있다.

2018년 안면도, 고산, 울릉도의 CO<sub>2</sub>의 최댓값은 4월, 최솟값은 8월에 관측되어 전년도와 비슷한 경향성을 나타냈다. 이러한 계절변동은 CO<sub>2</sub>의 발생원과 흡수원, 주풍에 따른 이동에 의한 영향을 알 수 있는 지표가 된다. 안면도, 고산, 울릉도의 최댓값과 최솟값의 차이가 각각 12.7 ppm, 9.7 ppm, 19.5 ppm을 나타냈다. 이들 값은 바다 한가운데 있는 마우나로아 관측소의 최댓값과 최솟값의 차이값인 약 5.7 ppm에 비해 두배 가까이 크다. 최댓값과 최솟값의 차이는 CO<sub>2</sub>의 발생원과 흡수원(식생 등)이 분포하고 있는 내륙에 가까울수록 큰 것으로 알려져 있다. 최댓값은 안면도 > 울릉도 > 고산 순으로 관측되었으며, 최솟값은 울릉도 > 안면도 > 고산 순으로 낮았다. 또한 최댓값들을 비교하였을 때 이들 관측소간의 차이가 미미하지만(약 1.4 ppm), 이들 관측소간 최솟값은 8.7 ppm의 차이를 보여 계절 변동폭이 흡수원에 의해 크게 변할 수 있음을 나타냈다(그림 3.1.3).

## 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<sub>2</sub> 농도 관측이 시작되었다(기상청, 2010). 그리고 2010년 10월 26일에 CO<sub>2</sub> 농도를 포함하여 성층권 오존 농도 등의 관측요소에 대해 WMO GAW의 지역급 기후변화감시소로 등재되었다.

세종기지에서의 CO<sub>2</sub> 농도 관측은 WS-CRDS 방식의 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 분석기(G1200, Picarro, Inc., USA, 이하 간단히 CRDS)와 제습 장치, 그리고 유량 조절 및 교정 장치로 구성되어 있다. 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<sub>2</sub> 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 3.1.4). 두 개의 냉동챔버로 구성된 제습장치에서 수증기가 제거되고, 가스유량제어시스템인 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 관측되고 이 값은 CRDS에 저장된다. 보다 자세한 사항은 기상청(2010)에 나와 있다.

CRDS의 내부 문제로 2017년 1월 제조사로 반출하였고, 반입되는 2018년 1월까지 장기간 결측이 발생하였다. 운영 재개는 1월 30일부터 시작하였다. 기존에 사용하던 화학적 제습장치를 냉동제습장치로 교체하여 운영을 시작하였으나, 하계기간 수분의 과다 유입으로 인한 냉동제습장치 문제가 발생하여 제습을 실시하지 못하였다. 이 때문에 분석기에서 제공하는 건조공기 대비 CO<sub>2</sub> 분석값을 사용하여 2018년 관측자료 분석을 실시하였다. 설치 후 7월 16일에 표준가스 주입을 처음 실시하였으며, 이후 15 ~ 20일 간격으로 표준가스를 주입하여 농도를 관측하였다. 표준가스 관측값으로부터 도출된 교정식을 원자료에 적용하여 최종 농도값을 산출하였다.

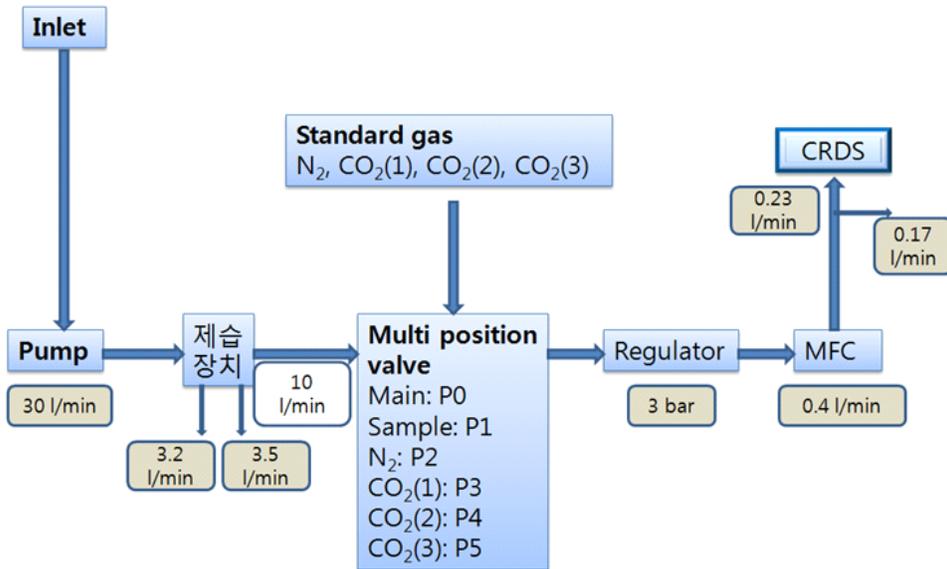


그림 3.1.4 세종기지의 CRDS 관측 모식도.

그림 3.1.5는 2018년 세종기지에서 관측된 월평균 풍속과 기온의 변동이다. 풍속은 하계기간보다 동계기간이 강하게 나타났고, 순간 최대풍속에서 그 특징이 두드러지게 나타났다. 1월의 평균 풍속이 5.7 m/s로 가장 약하였고, 8월이 8.9 m/s로 가장 강하였다. 순간 최대풍속은 11월에 기록된 37.3 m/s이었다. 풍향은 북북서풍(315 ~ 337.5°)이 차지한 비율이 약 18%로 가장 우세하였고, CO<sub>2</sub> 농도 관측에 영향을 주는 발전동 방향(355 ~ 45°)의 바람은 약 9%를 차지하였다(그림 3.1.6). 연평균 풍속은 7.8 m/s로 예년의 8.0 m/s보다 다소 약했다. 기온은 뚜렷한 계절변동을 보였으며 2월이 1.8℃로 가장 높았고, 6월에 -4.9℃로 가장 낮았다. 연평균 기온은 -1.8℃로 예년과 동일하게 나타났다. 연평균 기압은 988 hPa로 예년 988.8 hPa보다 0.8 hPa 낮은 값을 기록하였다.

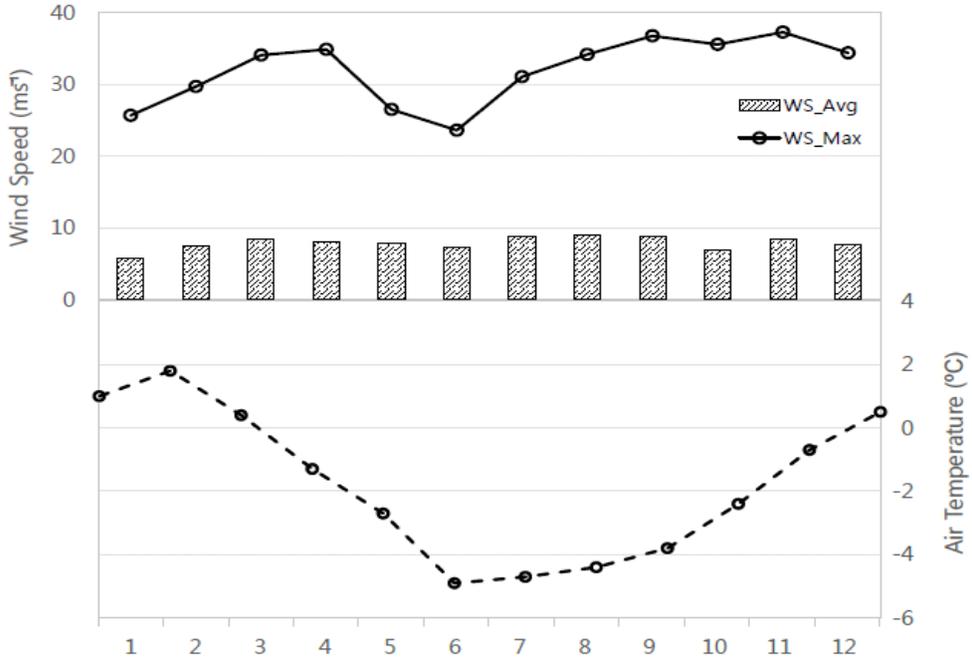


그림 3.1.5 2018년 세종기지의 월평균 풍속, 최대 풍속 및 기온의 변화.

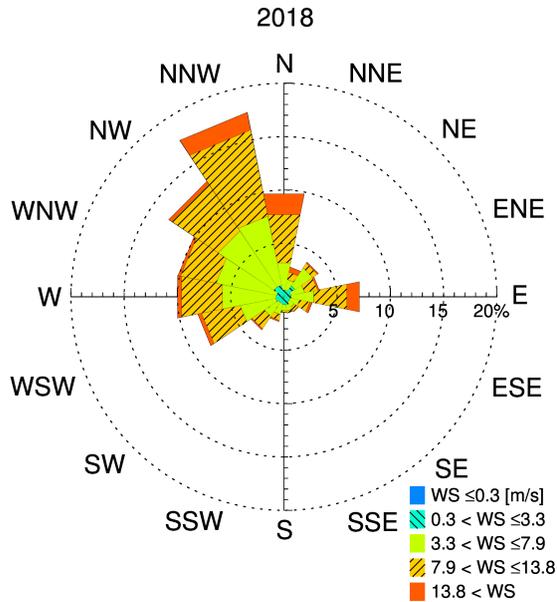


그림 3.1.6 2018년 세종기지의 풍향 분포.

관측한 CO<sub>2</sub> 자료는 다음의 절차에 따라 최종 자료가 산출되었다. 우선, 30초 동안 관측한 자료로부터 평균과 표준편차를 산출된다. 평균으로부터 표준편차 이상의 편차를 보이는 자료는 제거된 후 중앙값(median)을 30초 대푯값으로 정해진다. 그런 후 20개의 30초 대푯값으로부터 10분 평균이 산출된다. 10분 평균 자료에 대해 다음과 같은 조건에 해당되면 그 값은 제거되었다. 1) 장비의 정상 작동 범위(cavity 내부의 온도가 44 ~ 46℃, 압력은 139 ~ 141 torr)를 벗어난 경우, 2) 10분 동안 관측된 원자료의 개수가 200개 이하인 경우, 3) 풍향이 45° 이하 혹은 355° 이상(발전동의 풍하측에 해당), 4) 블랙카본(Black Carbon, BC) 농도가 100 ng/m<sup>3</sup> 이상인 경우, 5) 평균 산출에 사용된 30초 대푯값의 갯수가 10개 미만인 경우, 6) 10분 동안 표준편차가 0.25 ppm 이상인 경우, 10분 평균 자료는 제거되었다. 2018년의 관측자료의 경우, 서술한 절차를 통해 약 21%의 자료가 제거되었다. 10분 평균을 이용하여 시간 평균, 일평균, 월평균을 산출하였고, 상위 시간 평균 산출을 위해 필요한 하위 시간 평균값의 수가 50% 이상 가용한 경우에만 상위 시간 평균을 산출을 하였다.

그림 3.1.7은 2018년 세종기지에서 관측한 CO<sub>2</sub> 일평균의 연변동이다. 관측을 재개한 1월 30일 일평균 402.4 ppm으로 시작하여 2월 중순경까지 감소 추세를 보인 후, 11월 초까지 지속적인 증가 추세였다, 10월 28일 연중 일평균 최댓값인 405.4 ppm이 관측되었고, 11월, 12월이 되면서 다시 감소하는 추세였다. 2018년 1월 30일 이후 일평균 최솟값은 2월 18일에 관측된 402.3 ppm이었다. 2010 ~ 2016년 관측자료를 감안했을 때, 2월 18일 일평균값이 연중 일평균 최솟값일 가능성이 높으나, 1월 관측자료가 부족하여 확정할 수 없었다.

그림 3.1.8은 2010년부터 2018년까지 관측된 월평균 CO<sub>2</sub>의 연변동이다. 월평균은 월별 일수의 1/2이상 일평균이 가용한 경우에만 산출되었다. 2018년 1월 말부터 관측을 재개하여 2018년 1월 CO<sub>2</sub> 월평균값은 산출할 수 없었다. 2010년부터 세종기지에서 관측된 CO<sub>2</sub>의 농도는 꾸준히 증가하고 있다. 월평균 CO<sub>2</sub>의 농도의 연변동은 2.4 ~ 3.9 ppm (11개월 이상의 자료가 가용하지 않은 2014년과 2015년은 제외)으로 2018년도 이와 비슷한 2.8 ppm이었다. 2018년의 2월 이후, 월평균 농도가 가장 컸던 달은 10월(405.2 ppm)이었으며, 가장 작았던 달은 2월(402.4 ppm)이었다. 2010 ~ 2016년 관측 결과, 연중 CO<sub>2</sub> 월평균 농도의 최솟값은 1 ~ 3월 중, 최댓값은 9 ~ 10월에 나타나는데 2018년의 경우도 이와 잘 일치한다. 일평균으로부터 산출한 2018년 2 ~ 12월의 평균 CO<sub>2</sub> 농도는 404.2 ppm이었다. 1월중 대부분의 기간에 결측이 발생하여, 연평균 CO<sub>2</sub> 농도는 산출할 수 없었으나, 2018년 연평균 농도가 404 ppm 수준일 것으로 예상된다.

장기 추세 및 계절 변동을 감안한 다항식(WMO, 2009)을 이용하여 산출한 2018년 연증가율은 1.7 ppm/yr으로 2010년부터 2018년까지 CO<sub>2</sub> 농도의 평균 연증가율, 2.3 ppm/yr보다 낮은 증가율을 보였다.

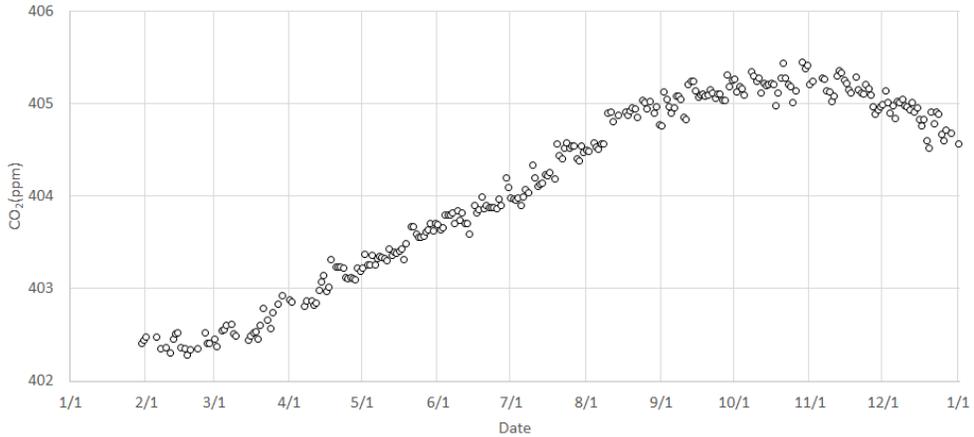


그림 3.1.7 세종기지에서 관측된 2018년 일평균 CO<sub>2</sub> 농도의 변동.

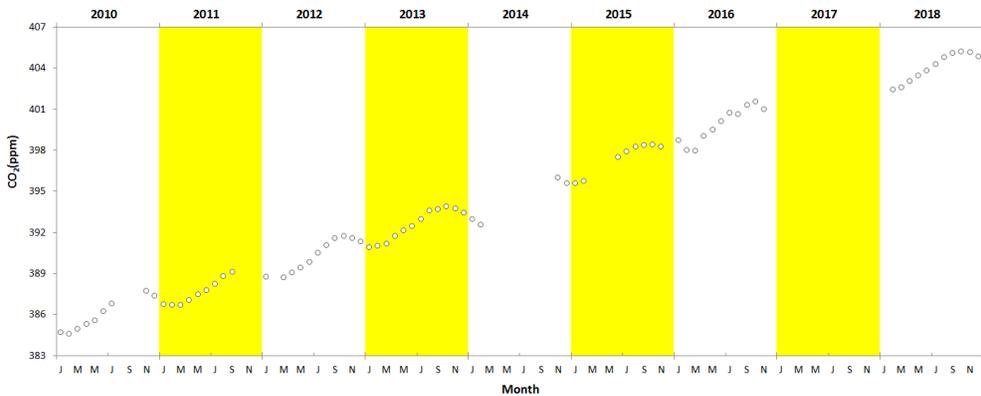


그림 3.1.8 세종기지에서 관측된 2010 ~ 2018년 월평균 CO<sub>2</sub> 농도의 변동.

#### 다. 남극 장보고기지(위탁관측소)

남극 장보고과학기지(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 준공되었다. 장보고 기지는 정규 기상 관측(WMO Index no.), 라디오존데 및 오존존데를 이용한 고층 관측, 온실가스 농도 및 대기복사 관측 등 대기물리, 화학, 복사 등의 대기 과학 전 분야에 걸친 연구 장비를 갖춘 과학기지이다.

2015년부터 시작된 장보고기지에서의 CO<sub>2</sub> 관측은 본관동으로부터 북서쪽으로 약 1 km 떨어진 대기구성물질관측동(Air Chemistry Observatory)에서 이루어지고 있다. 기지는 연중 서풍이 우세한 지역에 위치하고 있고, 관측동은 기지의 풍상측에 위치하는 경우가 많아, 상대적으로 기지 활동의 영향이 적어 많은 관측자료 확보가 가능하다. CO<sub>2</sub> 농도 관측을 위하여 CRDS 분석기(G2301, Picarro, Inc., CA, USA)가 이용되며, 부속 장치로는 분석 시료로부터 수분을 제거하는 냉동 제습장치, 주기적인 교정 및 가스의 흐름을 조절하는 유량 조절 및 교정 장치가 설치되어 있다(그림 3.1.9). 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 낮추어 분석용 시료에 포함된 수분의 양을 0.001%이하로 낮춘다. 유량 조절 및 교정 장치는 CRDS로 주입하는 유량을 일정하게 유지하며, 멀티포지션 밸브(Multi-position valve, MPV)를 통해 주기적으로 표준가스를 주입한다. 2018년 장보고기지에서도 정기적으로 주입한 표준가스는 국립기상과학원에서 WMO-X2007 척도를 기준하여 인증한 것으로 10월까지 3일 간격으로 주입하였으나, 11월부터 5일 간격으로 주입하여 가스분석기의 성능을 주기적으로 점검하였다.

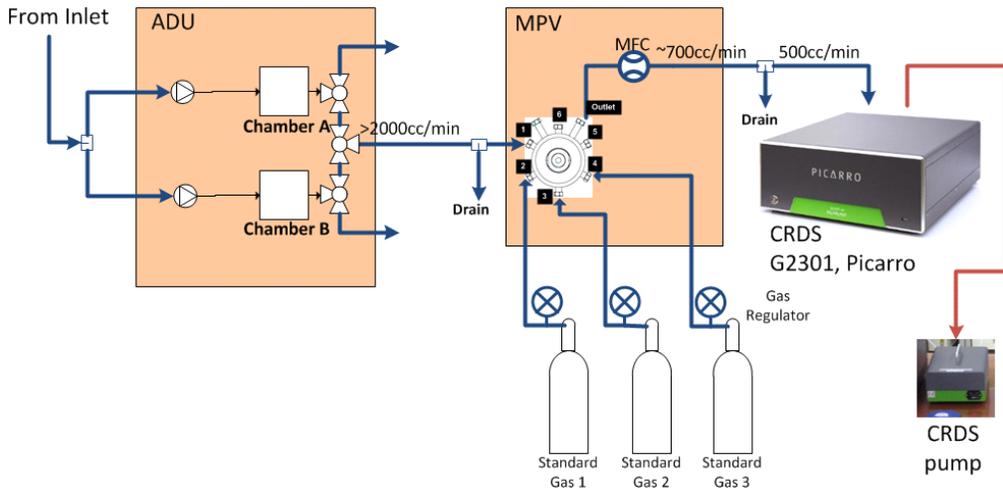


그림 3.1.9 장보고기지의 CRDS 분석 장비 개요도(ADU: 냉동제습장치, MPV: 교정 장치).

그림 3.1.10은 2018년 장보고기지에서 관측된 월평균 풍속과 기온의 변동이다. 연중 월평균 풍속의 변동이 커서 계절별 특징이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 8월의 평균 풍속이 2.8 m/s로 가장 약하였고, 7월이 6.7 m/s로 가장 강하였다. 순간 최대풍속은 7월에 기록된 39.5 m/s이었다. 풍향은 서풍과 서남서풍이 각각 약 17%의 비율을 차지하며 가장 우세하였고, 기지 주변의 주요염배출원인 발전동이 위치한 165 ~ 185°의 풍향이 차지하는 비율은 3%미만이였다(그림 3.1.11). 연평균 풍속은 4.9 m/s로 예년의 4.5 m/s보다 다소 강했다. 기온은 풍속과 비교하여 뚜렷한 계절변동을 보였으며 12월이 -1.8℃로 가장 높았고, 8월에 -24.5℃로 가장 낮아, 연중 영하의 월평균 기온을 유지하였다. 연평균 기온은 -14.9℃로 2014년 기상 관측을 시작한 이후 가장 높은 연평균 온도를 기록하였다. 연평균 기압은 984.8 hPa로 예년 982.2 hPa보다 2.6 hPa 높은 값을 기록하였다.

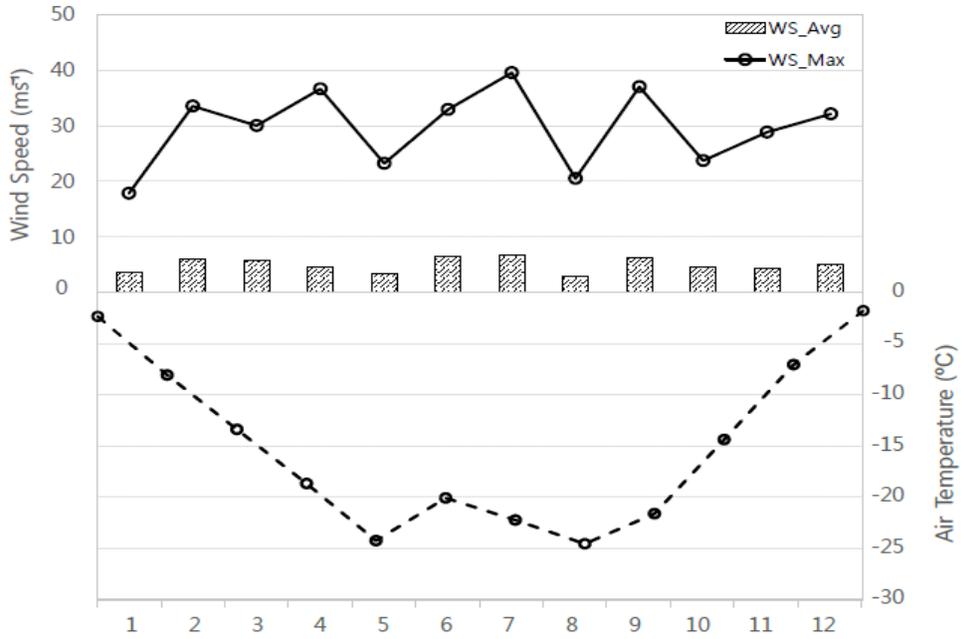


그림 3.1.10 2018년 장보고기지의 월평균 풍속, 최대 풍속 및 기온의 변화.

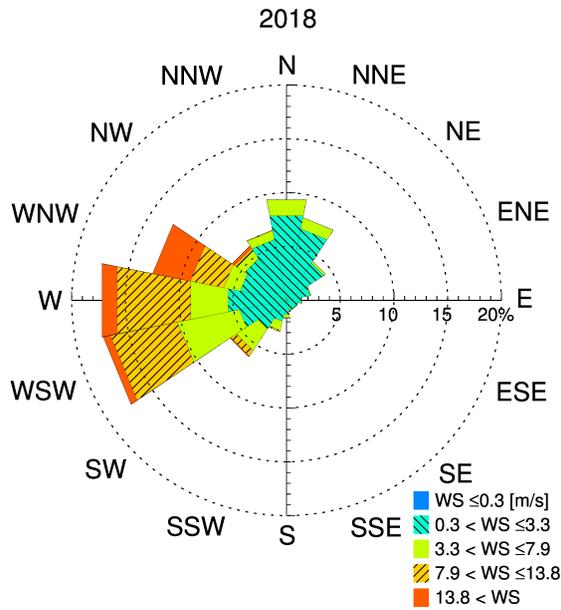


그림 3.1.11 2018년 장보고기지의 풍향 분포.

CO<sub>2</sub> 관측은 매 2 ~ 3초마다 이루어지며, 10분간 관측자료는 약 200 ~ 210개 샘플로부터 결정된다. 자료처리는 세종기지 CO<sub>2</sub> 자료 처리 절차와 동일하다.

기지의 풍향에 따른 블랙카본 농도의 분포에 근거하여, 풍향이 발전시설이 위치한 165 ~ 185°일 때 관측된 자료는 분석에서 우선 제외를 하였다. 그리고 기지에서 관측된 블랙카본의 농도를 기준으로 100 ng/m<sup>3</sup> 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. 시간 평균으로부터 일평균을 산출 후, 장기 추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 추세를 산출하였다. 이후 절차는 기상청의 온실가스 농도 자료 처리 방법(기상청, 2016)에 따랐다.

그림 3.1.12는 2018년에 장보고기지에서 관측된 일평균 CO<sub>2</sub> 농도의 변동을 나타냈다. 2018년 일평균 CO<sub>2</sub> 농도는 403.4 ppm (2월 6일)에서 406.4 ppm (10월 22일)의 범위를 보였다. 해양에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수가 우세한 여름철(1 ~ 2월) 낮은 농도를 보이다가 겨울철로 가면서 높아지고, 여름이 도래하면서 다시 낮아지는 패턴을 보였다. 2018년 연평균 CO<sub>2</sub> 농도는 404.8 ppm이었으며, 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식(WMO, 2009)으로 산정한 연증가율은 2.4 ppm/yr이었다(자료 품질관리에 따라 변동 가능함). 이는 2018년 전지구 평균 CO<sub>2</sub> 농도 증가율, 2.5 ppm/yr보다 유사 수준 이었다<sup>3)</sup>. 장보고기지에서 2015년 2월 CO<sub>2</sub> 관측(396.1 ppm)을 시작한 이후로 지속적인 증가추세를 보였고(그림 3.1.13), 매년 2.3 ~ 2.5 ppm/yr의 연간증가율을 보였다. 2015년부터 2018년까지 평균 연증가율은 2.5 ppm/yr이었다.

---

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

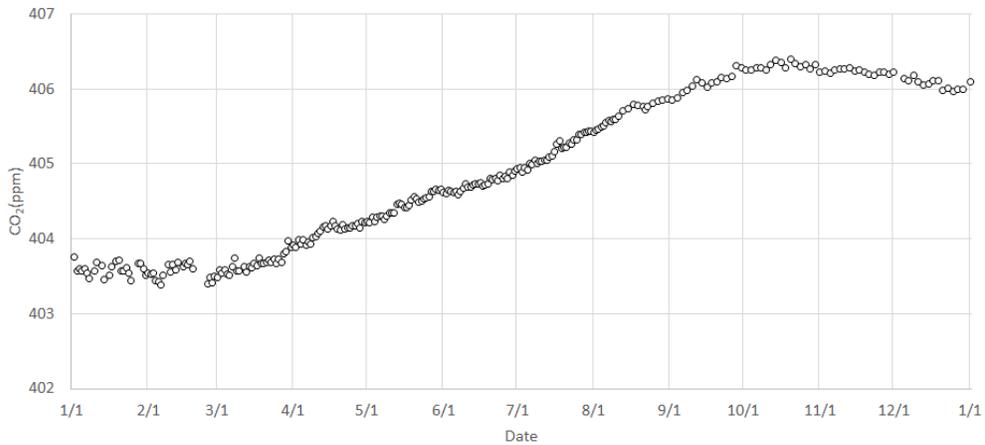


그림 3.1.12 장보고기지에서 관측된 2018년 일평균 CO<sub>2</sub> 농도의 변동

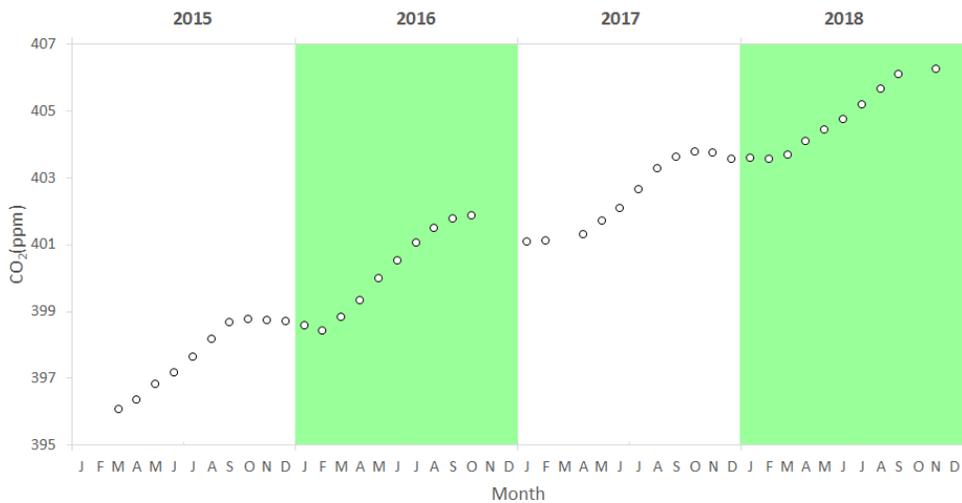


그림 3.1.13 장보고기지의 2015 - 2018년 월평균 CO<sub>2</sub> 농도의 변동.

## 라. 산림생태계 광릉(위탁관측소)

광릉 관측지는 KoFlux (Korean Flux Monitoring Network; <http://ncam.kr/page/koflux/database/index.php>)의 주요 관측지로 경기도 포천시 소재 국립수목원내 활엽수림 지역(37.75°N, 127.15°E, 252 m a.s.l.)에 위치한다. 광릉산림은 500년간 훼손되지 않은 숲으로 국내에서 가장 잘 보존된 자연림으로

뽑힌다. 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 엽면적지수(leaf area index)는 약 6으로 여름에 나타난다. 토양은 사양토(75%), 사질식양토(13%), 사토(12%)를 함유하고 있다.

CO<sub>2</sub> 플럭스 관측을 위한 에디 공분산 시스템은 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(footprint), 접근성 등을 고려하여 플럭스 타워의 40 m 높이에 설치되어 있다(그림 3.1.14). 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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 LI-840, LI-COR Inc., USA)를 통해 CO<sub>2</sub> 농도분석이 초당 2회씩 이뤄지고, 전체높이 분석시간은 120초/회이며, 30분 평균자료를 집록기(모델 CR1000, Campbell Scientific Inc.)에 저장하고 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 가스흡입구 청소와 필터 교체 등을 비롯한 기기 유지보수와 함께 수동 보정을 수행한다. 에디 공분산 시스템의 경우 CO<sub>2</sub> 농도의 ‘분산’을, 프로파일 시스템의 경우 CO<sub>2</sub> 농도의 ‘평균’을 정확히 관측하는 것을 목적으로 하기에, 본 보고서에는 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO<sub>2</sub> 플럭스와 프로파일 시스템에서 관측된 CO<sub>2</sub> 농도를 보고하였다. 2018년도 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO<sub>2</sub> 플럭스의 품질관리 후 자료 수득률은 38%, 프로파일 시스템에서 관측된 CO<sub>2</sub> 농도의 품질관리 후 자료 수득률은 95%로 작년과 비슷하거나 조금 낮은 수준이었다.

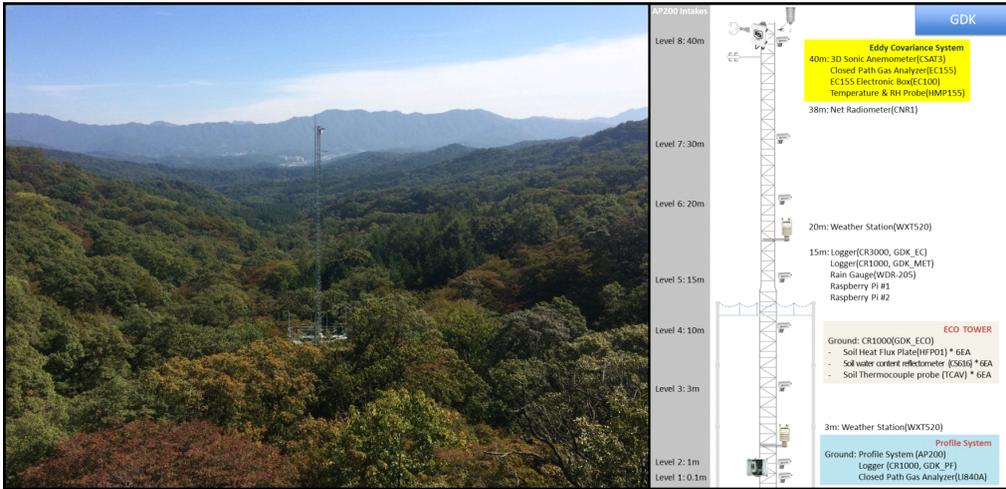


그림 3.1.14 광릉 활엽수림 타워의 모습(왼쪽)과 관측장비 모식도(오른쪽).

그림 3.1.15는 에디 공분산 시스템에서 관측된 CO<sub>2</sub> 플럭스의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 CO<sub>2</sub> 플럭스는 40 m 높이에서 에디 공분산 시스템이 관측하는 발자국 영역(예를 들면 200 ~ 1000 m) 내를 대표하는 값이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5 ~ 9월) 동안 CO<sub>2</sub> 플럭스는 밤에는 양의 값(CO<sub>2</sub> 방출)을 갖고, 낮에는 음의 값(CO<sub>2</sub> 흡수)을 갖는 뚜렷한 일 변동을 보였다.

그림 3.1.16은 프로파일 시스템으로 관측된 CO<sub>2</sub> 농도의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 농도이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5 ~ 9월) 동안 CO<sub>2</sub> 농도는 밤에는 증가하고, 낮에 감소하는 뚜렷한 일 변동을 보였다. 이는 앞에서 확인한 밤에 식생 및 토양의 호흡으로 농도가 증가하고 낮에 광합성 작용으로 농도가 감소한 것에 기인한다.

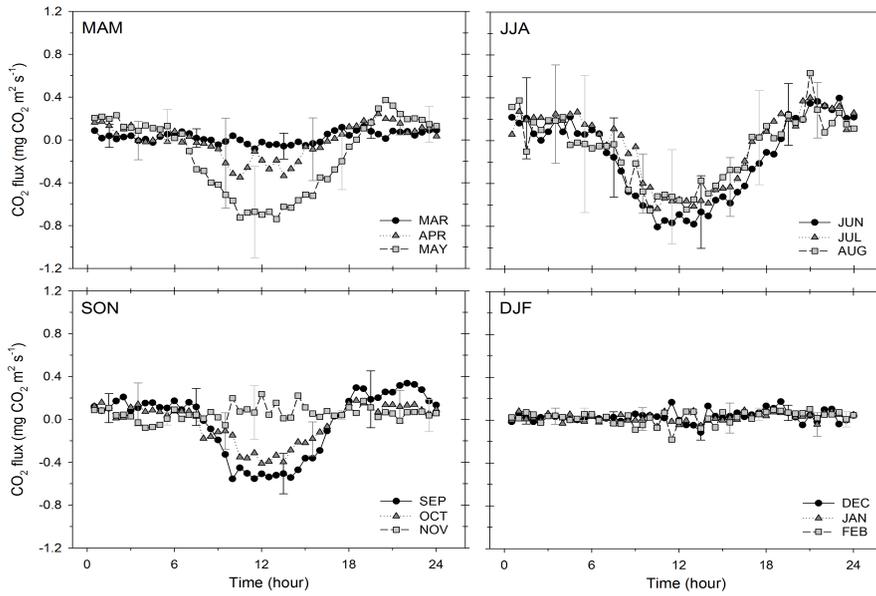


그림 3.15 광릉 활엽수림의 월별 CO<sub>2</sub> 플럭스의 평균 일 변동.

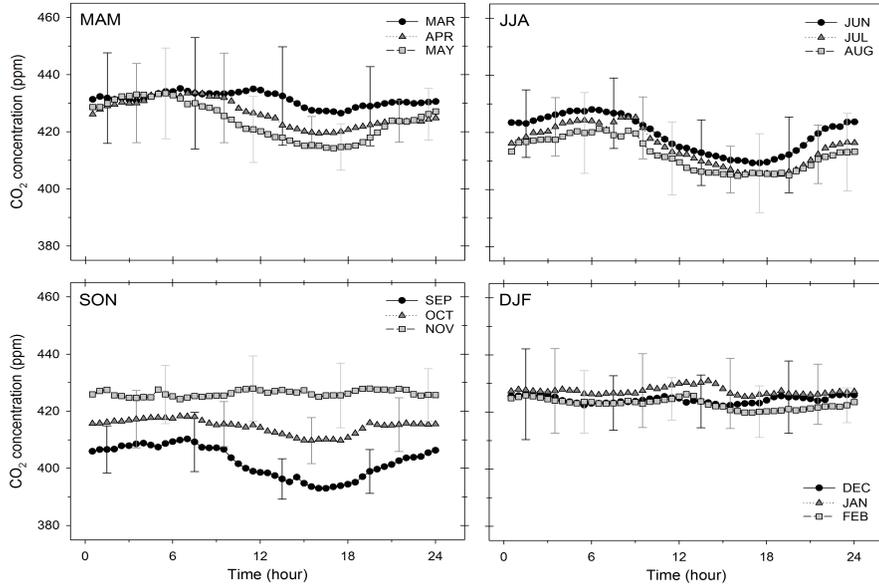


그림 3.16 광릉 활엽수림의 월별 CO<sub>2</sub> 농도의 평균 일 변동.

일적산 CO<sub>2</sub> 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료)는 -6 ~ 6 gC/m<sup>2</sup>/day 의 변동 범위를 보였다. 개엽 후인 4월 중순부터 CO<sub>2</sub> 흡수원으로 나타나다가 장마기간 CO<sub>2</sub> 중립 또는 발생원으로 변했다. 이후 다시 CO<sub>2</sub> 흡수원으로 나타나다가 낙엽이 지기 시작하면서 다시 탄소 발생원으로 바뀌었다(그림 3.1.17).

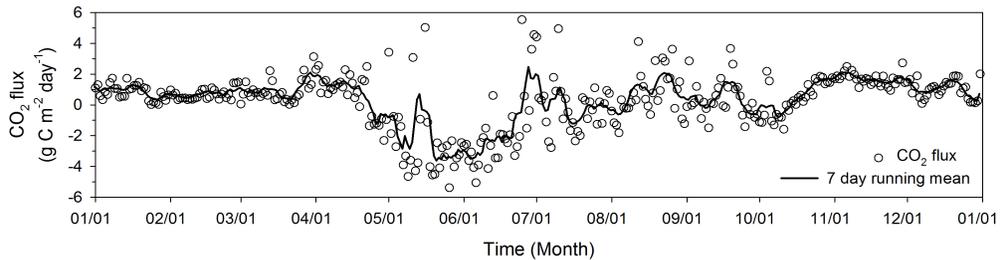


그림 3.1.17 광릉 활엽수림의 일적산 CO<sub>2</sub> 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료).

일평균 CO<sub>2</sub> 농도는 390 ~ 460 ppm의 변동 범위를 보였으며, 개엽(4월 중순)의 시작과 함께 꾸준히 감소하여, 식생의 활동이 최대인 8월 말에 최솟값을 보였다(그림 3.1.18). 이러한 CO<sub>2</sub> 플럭스 및 농도의 계절 변동은 식생 변화와 관계가 깊은데, 식생 계절 변화를 감시하기 위해 낮 동안 한 시간 간격으로 카메라를 이용한 이미지 촬영이 이뤄졌다. 관측 타워의 15 m 높이에 카메라가 설치되어 아래 방향으로 관측지(에디 공분산 시스템과 프로파일 시스템의 주간 발자국 영역)의 경관을 촬영하였다(그림 3.1.19). 2018년에는 개엽이 4월 중순부터 시작하여 예년과 비슷했거나 조금 빨랐다.

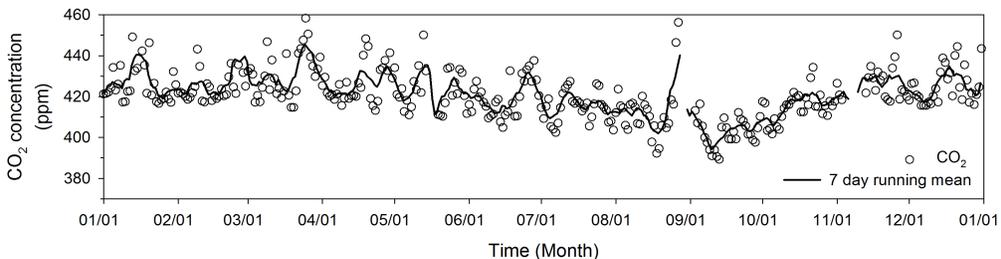


그림 3.1.18 광릉 활엽수림의 일평균 CO<sub>2</sub> 농도.



그림 3.1.19 활엽수림 타워에서 촬영한 타워 주변 경관(사진 좌측상단에 촬영 날짜 표기).

### 3.1.2 메탄(CH<sub>4</sub>)

CH<sub>4</sub>은 CO<sub>2</sub> 다음으로 중요한 온실가스 중 하나로 ppb(10억 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 복사강제력은 0.48 W/m<sup>2</sup>으로 전지구 온실가스 복사강제력 대비 17.0% 기여하고 있다(IPCC, 2013). 남극과 북극에 아이스크어를 분석한 결과 현재 관측되고 있는 CH<sub>4</sub>의 농도는 지난 650,000년 동안 최고의 농도로 나타났다(IPCC, 2013). 과거 1000 A.D.와 1800 A.D. 사이에 북반구와 남반구의 CH<sub>4</sub> 농도 차이는 약 24 ~ 58 ppb로 나타났으나, 1984년부터 2012년까지의 자료를 비교하였을 때 그 차이값이 135 ppb에 이르렀다. 이는 명백하게 북반구의 인위적인 혹은 자연적인 배출량이 증가했기 때문이다(Etheridge et al., 1998). CH<sub>4</sub>의 배출원은 습지, 바다, 대지의 사용, 쌀농사, 발효, 화석연료 등 다양한 인위적·자연적 요소가 다양하게 존재하는 반면, 소멸원은 주로 OH라디칼로 알려져 있다. CH<sub>4</sub>은 한번 배출되면 약 9년 정도 대기 중에 체류하고, 다른 온실가스 중에 비해 체류시간이 짧기 때문에 정책적으로 배출량을 줄이면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다.

표 3.1.2 2018년 안면도, 마우나로아, 전지구의 CH<sub>4</sub> 농도(ppb)

	안면도	마우나로아 <sup>1</sup>	전지구 <sup>1</sup>
2018년 평균값	1974	1874	1858
2017년 대비 절대 증가값 <sup>2</sup>	4	5	8
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2009년 ~ 2018년)	8 ppb/yr	7 ppb/yr	7 ppb/yr
과거 절대 증가값 평균 (2000년 ~ 2006년)	1 ppb/yr	0 ppb/yr	0 ppb/yr

<sup>1</sup> 본 보고서에 명시된 마우나로아와 전지구 농도는 NOAA의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

<sup>2</sup> 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

전세계적으로 CH<sub>4</sub>의 농도는 1999년부터 2006년까지 증가가 둔화되었다가 다시 2007년부터 꾸준히 증가하는 것으로 나타난다. 안면도도 결측된 기간이 많지만 이러한 경향성을 잘 반영한다(그림 3.1.20). 안면도는 1999년부터 2006년까지 평균 절대 증가값이 약 1 ppb/yr로 관측되었으나, 최근 10년 동안은 8 ppb/yr로 증가하였으며, 2017년과 2018년 사이의 증가값 4 ppb/yr은 과거 10년보다 낮다. 전지구와 마우나로아 또한 1999년부터 2006년까지 거의 증가하지 않다가, 지난 10년간 7 ppb/yr의 수준으로 증가하였으며, 2017년도에 비해 2018년도는 전지구는 8 ppb, 마우나로아는 5 ppb 증가한 것으로 나타났다.

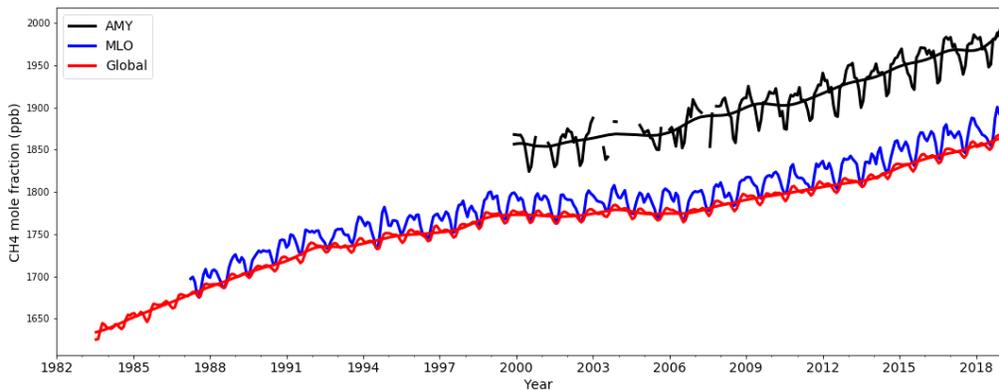


그림 3.1.20 안면도(검은색), 마우나로아(파란색), 전지구(빨간색)의 CH<sub>4</sub> 농도.

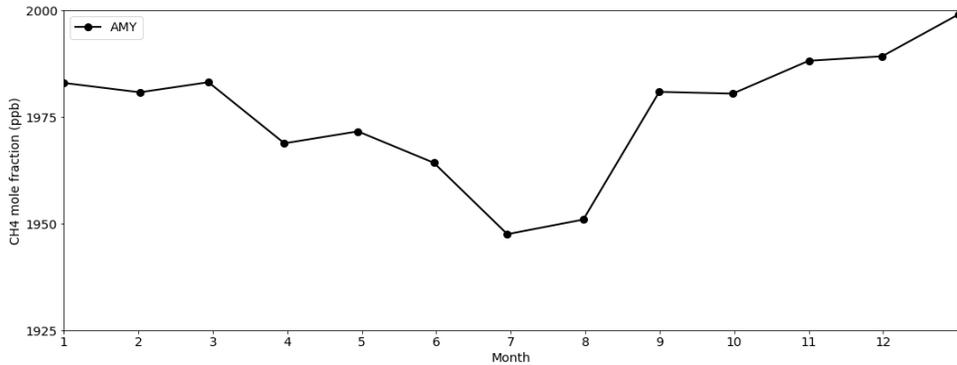


그림 3.1.21 안면도에서 관측한 CH<sub>4</sub>의 계절변동.

안면도의 2018년 연평균 농도는 1974 ppb로 전지구 평균인 1858 ppb 보다 116 ppb 높고, 북반구 마우나로아의 평균인 1874 ppb보다 100 ppb 높다. 2018년 안면도의 CH<sub>4</sub> 농도는 최초 관측을 시작했던 1999년에 비해 113 ppb 증가하였으며, 산업화이전의 농도를 700 ppb로 간주할 때 이 농도는 282% 높다.

CH<sub>4</sub>의 계절변동은 여러 배출원과 소멸원인 OH라디칼과 계절풍 등에 의해 일어난다. 특히 북반구에서 계절변동의 변동폭이 크며, 여름철 OH라디칼의 농도가 높아지면서 CH<sub>4</sub>과 반응하여 CH<sub>4</sub>의 농도는 낮아진다. 2018년 안면도는 7월에 가장 낮고 12월에 가장 높은 값을 보였다. 낮은 농도가 여름철에 나타나는 것은 거의 일정하지만, 높은 농도가 나타나는 것은 CH<sub>4</sub>의 기원인 습지나 생태소각 등과도 관련이 높아 대기의 흐름에 따라 약간의 변동이 있을 수도 있다. 그러나 기본적으로 북반구의 전형적인 계절변동 특성은 여름철에 낮고 겨울철에 높은 값을 나타내며, 안면도도 이를 잘 반영한다(그림 3.1.21).

### 3.1.3 아산화질소(N<sub>2</sub>O)

N<sub>2</sub>O는 대기중 체류시간이 약 121년정도 되는 온실가스로 1750년부터 2012년 사이 복사강제력이 전체 온실가스 중 6%를 차지하였다(IPCC, 2013). N<sub>2</sub>O는 인위적 온실가스 중 세 번째 높은 것으로 알려져 있으며, 산업화 이전에는 270 ppb 수준으로 존재하였다. N<sub>2</sub>O의 자연기원은 해양, 토양 등이 있으며, 화석 연료, 생태소각, 농업비료의 사용, 여러 산업공정에서 배출되는 인위적기원 등이 있다. 인위적 배출원과 자연적 배출원의 비율은 거의 같다. N<sub>2</sub>O는 광분해에

의해 성층권에서 소멸되며 때론 오존층파괴 과정에서 트리거로 사용되기도 한다. 그러나 아직도 N<sub>2</sub>O의 전체 순환에 대해서는 정확히 규명되지 않고 있다.

표 3.1.3 2018년 안면도, 고산, 마우나로아, 전지구의 N<sub>2</sub>O 농도(ppb)

	안면도	고산	마우나로아 <sup>1</sup>	전지구 <sup>1</sup>
2018년 평균값	332.9	332.3	331.4	330.9
2017년 대비 절대 증가값 <sup>2</sup>	1.5	1.3	1.0	1.1
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2009년 ~ 2018년)	1 ppb/yr	-	0.9 ppb/yr	0.9 ppb/yr

<sup>1</sup> 본 보고서에 명시된 마우나로아와 전지구 농도는 NOAA의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

<sup>2</sup> 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값

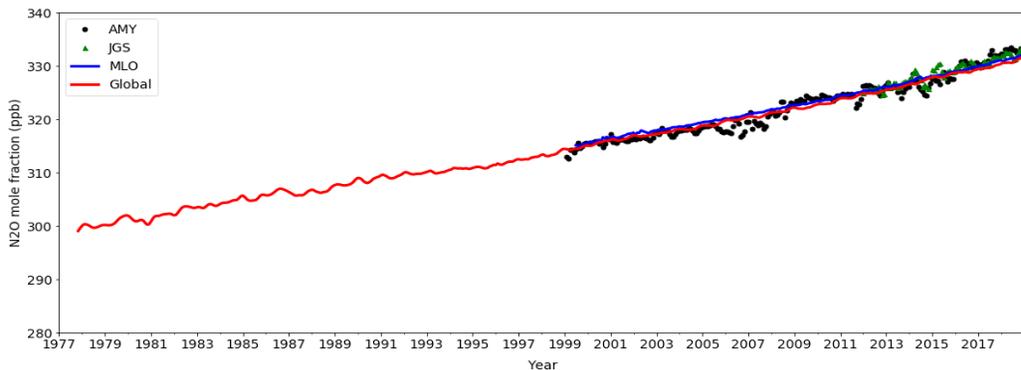


그림 3.1.22 안면도(검정색), 고산(녹색), 마우나로아(파란색), 전지구(붉은색)의 N<sub>2</sub>O 농도.

2018년 N<sub>2</sub>O의 농도는 안면도에서 332.9 ppb, 고산에서 332.3 ppb로 전년도에 비해 각각 1.5 ppb과 1.3 ppb 증가하였다. 지난 해 전지구 평균은 330.9 ppb, 마우나로아는 331.4 ppb로 안면도와 고산보다 낮은 수준이나, 그 농도차이가 CO<sub>2</sub>나 CH<sub>4</sub>에 비해 크지 않다(표 3.1.1, 표 3.1.2, 표 3.1.3). 전지구 평균값과 마우나로아 모두 전년도보다 1.0 ~ 1.1 ppb 증가했으며, 지난 10년간 평균 절대 증가값인 0.9 ppb/yr와 비슷한 수준이다. 안면도 또한 지난 10년간 1 ppb/yr 씩 증가한 것으로 관측되었다. 산업화 이전 N<sub>2</sub>O의 농도는 270 ppb 수준이었으며, 안면도는 산업화이전대비 23% 증가하였다.

1999년부터 2017년까지 안면도의 N<sub>2</sub>O의 농도를 마우나로아, 전지구와 비교했을 때 그 기울기가 유사하게 나타났으나 변동폭이 컸다(그림 3.1.22). 증가율은 남반구(0.2 ppb/yr)에 비해 북반구가 높게 나타나며 그 이유는 북반구의 인구 밀도가 높고 그로 인한 농업 등의 발달이 N<sub>2</sub>O의 증가율을 높인 것으로 알려졌다. 안면도와 고산 또한 주변 지역의 농업활동 등의 영향으로 마우나로아보다 변동폭이 높게 나타났을 가능성이 있을 것으로 추측된다.

### 3.1.4 육불화황(SF<sub>6</sub>)

SF<sub>6</sub>는 ppt(1조 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 100년을 기준으로 지구온난화지수가 CO<sub>2</sub>보다 22800배가 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 SF<sub>6</sub>의 체류시간은 약 3200년으로 길며, 한번 대기로 배출되면 거의 선형으로 누적되어 빠르게 증가한다. SF<sub>6</sub>는 2007년 안면도를 시작으로 2016년 고산과 울릉도에 관측기기를 추가로 설치하여 2017년부터 공식적으로 관측을 시작하였다.

2018년 한반도의 SF<sub>6</sub> 농도는 안면도 9.8 ppt, 고산 9.9 ppt, 울릉도 9.8 ppt로 나타났으며, 관측소간 차이가 거의 없다(그림 3.1.23). 한반도의 값과 북반구의 대표농도인 마우나로아(2018년 9.7 ppt)와는 0.1 ~ 0.2 ppt, 전지구 평균(2018년 9.6 ppt)과는 0.2 ~ 0.3 ppt 차이가 난다(그림 3.1.23). 북반구에 비해 활발하지 않은 산업활동으로 남반구에서의 SF<sub>6</sub> 배출농도가 낮기 때문에 전지구의 평균값이 북반부 관측소인 우리나라나 마우나로아보다는 낮다. 안면도를 비롯하여 전세계적으로 지난 10년간 0.3 ppt/yr 씩 증가했으며, 2017년과 2018년 사이 우리나라의 관측소는 모두 0.2 ppt, 마우나로아와 전 지구는 0.3 ppt 씩 증가하였다.

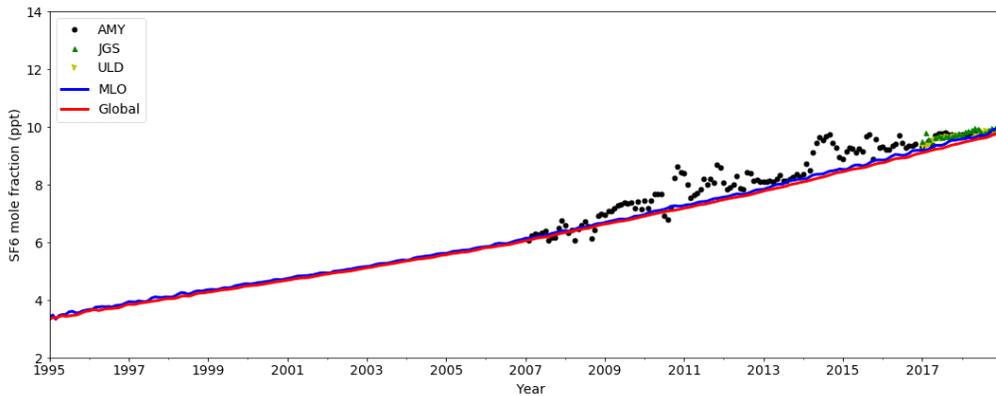


그림 3.1.23 안면도(검은색), 고산(초녹색), 울릉도(노란색), 마우나로아(파란색), 전지구(빨간색)의 SF<sub>6</sub> 월평균 농도.

울릉도의 경우 제습장치 이상, 농축기 이상 등의 문제로 1월부터 4월까지 통계적으로 유의한 자료를 얻지 못했다. 그러나 이를 고려하고도 연평균은 9.8 ppt로 다른 관측소와 유사하였다. 5월부터 12월까지의 월평균 자료를 부록에 제시하였다.

### 3.1.5 염화불화탄소류(CFCs)

CFCs는 주로 성층권에서 자외선에 의해 분해되며 대기 중 체류시간이 CFC-11은 50년, CFC-12는 110년으로, CFC-113은 85년으로 나타난다. CFCs는 냉매제로 주로 사용되며, 성층권의 오존층을 파괴하는 염소와 브로민이 포함되어있어, 1990년대 몬트리얼 의정서를 채택하여 규제를 시작하였으며, 북반구의 관측소에서는 CFC-11은 1992년에 최솟값을 보였다가 감소추세를 나타내며, CFC-12는 2005년에 최솟값을 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 CFCs는 감소하고 있다. CFC-11은 점차 감소해 관측을 시작한 1999년에 비해 약 39.5 ppt 감소하여 2018년 그 농도가 228.3 ppt이다. 2018년 마우나로아는 229.7, 전지구 평균은 228.8 ppt 로 나타나, 한반도의 농도는 전지구 평균보다는 0.5 ppt 낮다(그림 3.1.24, (a)).

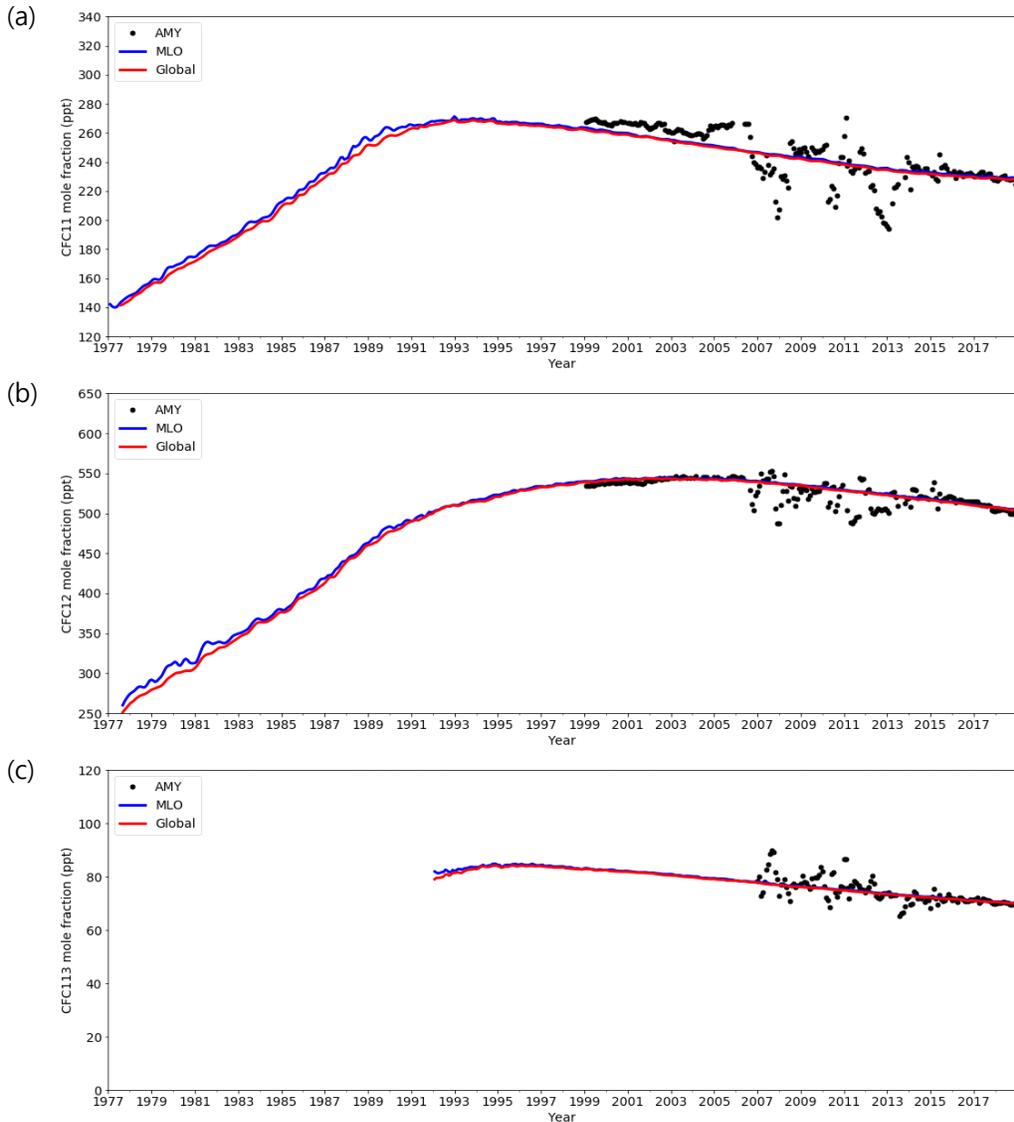


그림 3.1.24 안면도(검정색)과 마우나로아(파란색), 전지구(붉은색)의 (a) CFC-11, (b) CFC-12, (c) CFC-113의 월평균 농도.

Montzka et al., (2018)에 의하면 마우나로아 등 깨끗한 시료를 중심으로 분석하였을 때, 2012년 이후로 CFCs 감소세가 50% 둔화되었다. 그 이유는 2008 ~ 2012년에 비해 2014 ~ 2017년 중국의 동부 지역에서  $7.0 \pm 3.0$  Gg/yr의 배출량이 더 증가했기 때문으로 추정된다(Rigby et al., 2019). 안면도에서도

전세계 경향성과 유사 수준을 보이고 있어, 고농도 관측사례에 대한 추가 연구도 필요하다.

CFC-12는 전세계 추세와 마찬가지로, 한반도 또한 2002 ~ 2005년에 최솟값을 보였으며, 그 때보다 약 40.3 ppt 감소하여 2018년 502.7 ppt를 나타냈다. 같은 해 마우나로아는 506.2 ppt, 전지구는 505.6 ppt로 관측되어 한반도는 이들보다 낮다(그림 3.1.24, (b)).

CFC-113은 2007년부터 관측하였으며, 2018년 70.1 ppt로 관측초기와 비교하면 약 11.3 ppt 감소했다. 마우나로아는 70.4 ppt, 전지구 평균값은 70.3 ppt를 나타내 안면도보다는 높고 그 차이가 0.2 ~ 0.3 ppt를 나타낸다.

서두에서 언급했듯이 마우나로아와 전지구 평균은 NOAA의 척도를 사용하였고, 한반도의 경우 한국표준과학연구원의 척도를 사용하여 척도에 의한 값의 차이가 있을 수 있다.

세 요소 모두 마우나로아, 전지구 평균이 비슷한 농도대를 보이고, 점차 감소하는 것으로 나타나 몬트리올 의정서 규제에 따른 결과가 주목된다.

### 3.1.6 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 CCL이 진행하였으며, 이 시설은 NOAA에서 운영하고 있다. 플라스크 샘플링은 안면도에서 주1회 실시간 장비의 인렛과 동일한 높이에서 포집하고, CCL로 보내지며 분석 후 안면도의 1시간 평균자료와 비교한다. 2018년엔 총 51번의 플라스크 샘플링을 진행하였다.

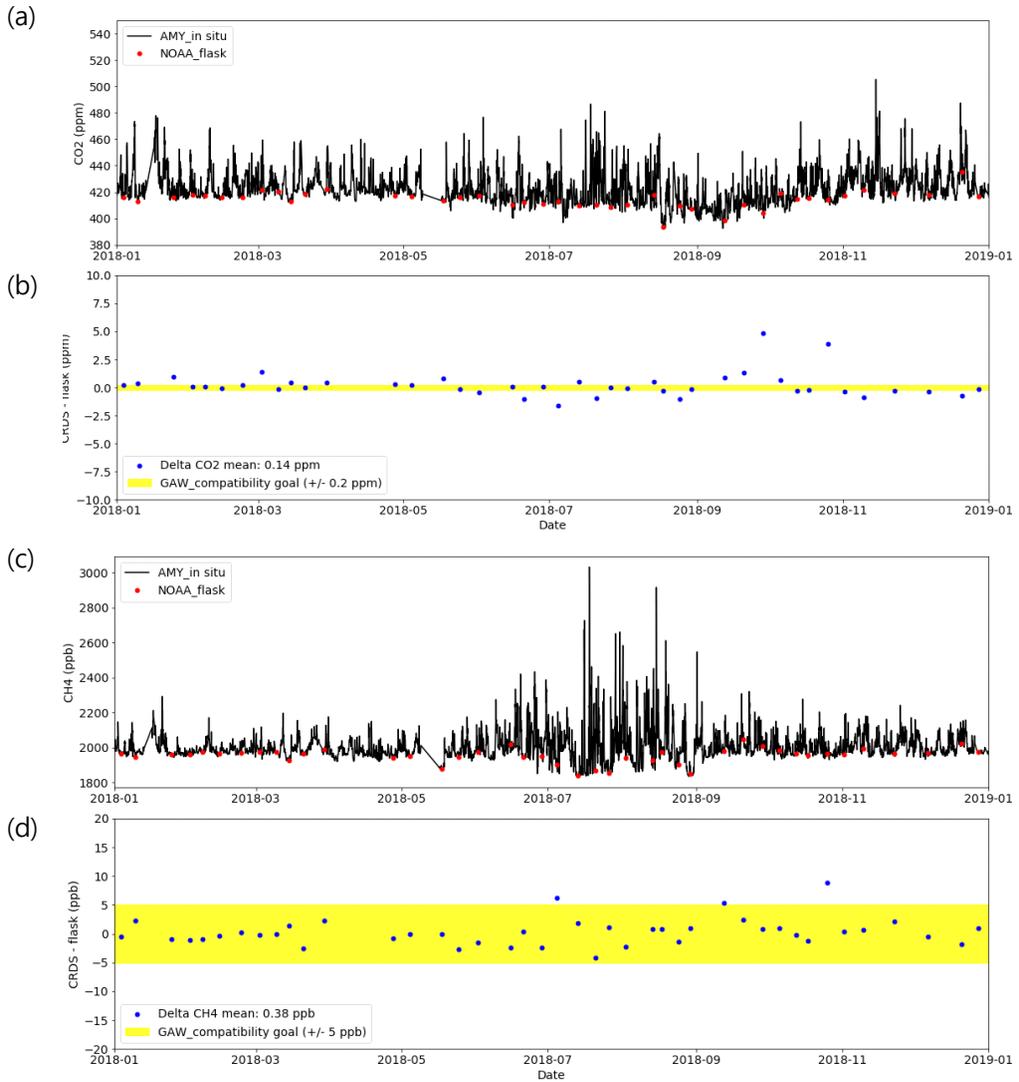


그림 3.1.25 안면도의 CRDS와 주1회 NOAA 플라스크로 분석한 (a) CO<sub>2</sub> 시간에 따른 경향성, (b) CO<sub>2</sub> 시간에 따른 차이값 비교, (c) CH<sub>4</sub> 시간에 따른 경향성, (d) CH<sub>4</sub> 시간에 따른 차이값 비교.

안면도의 실시간 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>와 CCL에서 분석한 플라스크 샘플링 자료를 비교하였다. 같은 관측소에서 같은 항목을 다른 장비로 관측하는 경우 GAW에서 제시하는 호환성범위는 CO<sub>2</sub>±0.2 ppm, CH<sub>4</sub>±5 ppb로 알려져 있다(WMO, 2016).

CO<sub>2</sub>는 실시간 자료와 플라스크 샘플링 자료에서 평균 0.14±1.04 ppm의 차이를 보이면서 호환성범위인 ±0.2 ppm 안에 있다. 일부 호환성범위를 넘어가는 사례가 있으나 일부사례에 국한되는 것으로 나타났다. CH<sub>4</sub>은 평균 차이 값이 -0.38±2.31 ppb로 3사례를 제외하고는 모두 호환성범위인 ±5 ppb 안에 있었다.

## 3.2 반응가스

반응가스에는 오존(O<sub>3</sub>), 일산화탄소(CO), 휘발성유기화합물(VOCs), 질소화합물(NO<sub>x</sub>, NO<sub>y</sub>), 그리고 이산화황(SO<sub>2</sub>) 등이 있다. 이들은 자연성분이기도 하지만 인위적으로 배출되기도 하며, 대기 내 화학반응에 관여하고 수명이 수 초 ~ 수 개월 정도이다. 따라서 전지구적으로 봤을 때 반응가스의 시간과 공간적인 분포가 고르지 않다. 반응가스는 광화학 반응에 의한 오존 생성과 에어로졸 생성에 전구체로 작용하여 대기오염뿐만 아니라 기후와의 상호관계에 깊이 관여하고 있으며, O<sub>3</sub>의 경우 직접적인 온실가스이기도 하다(IPCC, 2013).

반응가스의 배경농도 수준을 감시하면 반응가스가 장거리 수송되는 과정을 이해하는데 도움이 되며, 지역별 배출원의 변화를 감지할 수 있고, 배출원 저감 활동의 성공 여부를 파악할 수 있다. 이러한 반응가스의 역할과 영향을 이해하기 위해서는 반응가스의 전지구적 분포와 장기간 변화 경향에 대한 분석이 필요하다.

기상청은 O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 자료를 안면도에서 2004년부터, 고산에서 2012년부터 확보하고 있으며, 울릉도에서는 2015년부터 CO자료를 확보하고 있다. 2017년부터 O<sub>3</sub>과 CO는 WMO GAW에서 권고하는 관측 지침을 참고하고, NO<sub>x</sub>는 GAW와 EMEP<sup>4)</sup>에서 지원하는 ACTRIS의 관측 지침을 참고하여 (GAW report No. 192, No. 195, No. 209, WP4/D4.2(M12)(draft)) 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 통계표에 이 기간의 자료를 제시하지 않았다.

안면도, 고산과 울릉도 세 감시소에서 2018년 O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 연평균은 과거 연평균에 비해 대부분 낮았으며, 모든 항목에서 7월 평균이 가장 낮게 나타났다.

2018년도에는 NO<sub>x</sub>의 자료품질처리 방법을 새롭게 개선하여 적용하였으며 그 내용은 부록에 기술하였다.

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

### 3.2.1 오존(O<sub>3</sub>)

대류권 O<sub>3</sub>은 직접 배출원이 없고 대기 중에서 전구물질들의 광화학 반응에 의해 생성된다. 특히, 인위적인 배출로 인한 NO<sub>x</sub>와 VOC의 농도가 높고, 기온이 높고, 일사량이 클수록 많이 생성된다. O<sub>3</sub>은 강력한 산화제로 사람의 호흡기에 영향을 주고 식생의 성장과 광합성 활동을 저해하여 CO<sub>2</sub> 흡수를 방해하며, 화학 반응 과정에서 CH<sub>4</sub>와 반응하는 등 간접적으로 기후에 영향을 끼친다. 그리고 온실가스로서 직접적인 복사강제력이  $0.40 \pm 0.20 \text{ W/m}^2$  이며 이는 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub> 다음으로 큰 값이다(IPCC, 2013).

2010 ~ 2014년 동안 북반구 지상에서 관측하는 O<sub>3</sub>의 낮시간 농도는 겨울에 대부분 40 ppb 이하로 분포하지만 미국 서부, 유럽 알프스 지역, 중국 중부, 히말라야 등 고지대와 캐나다 서부, 캘리포니아 남부, 지중해 섬 및 우리나라, 일본, 홍콩 등에서 40 ppb 이상으로 관측되었다. 북반구 여름철 O<sub>3</sub>의 낮시간 평균은 미국 서부, 유럽남부, 한국, 일본 등 주로 북반구 중위도에서 50 ppb 이상의 농도로 관측되었다(Gaudel et al., 2018). 지상에서 관측한 O<sub>3</sub>의 장기 변화경향은 1950년대부터 2000년까지 평균적으로 1%/yr로 증가하였으나 2000년 이후 유럽에서는 O<sub>3</sub>의 증가율이 감소하였고(Parrish et al., 2012), 2000 ~ 2014년 관측값을 분석한 결과 유럽과 북미, 일본에서는 O<sub>3</sub> 농도가 감소하는 추세이며, 우리나라는 증가하는 추세로 나타났다(Chang et al., 2017).

안면도와 고산에서 관측한 O<sub>3</sub>은 광화학 생성이 활발한 봄과 가을에 높게 분포하였고, 여름과 겨울에 낮게 분포하는 계절 특성을 보였다.

2018년 안면도 O<sub>3</sub>의 월평균은 28 ~ 53 ppb 사이에 분포하며 5월에 농도가 가장 높았고, 7월에 가장 낮았다(그림 3.2.1). 지난 10년간(2008 ~ 2017년)의 월별 평균과 비교하였을 때, 2018년 월평균은 봄과 가을에 낮았고, 겨울에 높게 나타나 2018년 O<sub>3</sub>은 7월 평균을 제외하고 지난 10년간보다 계절 변동이 적었다.

2018년 고산 O<sub>3</sub>의 월평균은 16 ~ 53 ppb 사이에 분포하며 4월에 농도가 가장 높았고, 7월에 가장 낮았다(그림 3.2.1). 지난 6년간(2012 ~ 2017년)의 월별 평균과 비교하였을 때, 안면도 O<sub>3</sub> 분포와 같이 2018년 월평균은 봄, 가을에 낮았고, 겨울에 높게 나타나 2018년 O<sub>3</sub>은 7월 평균을 제외하고 지난 6년간보다 계절 변동이 적었다.

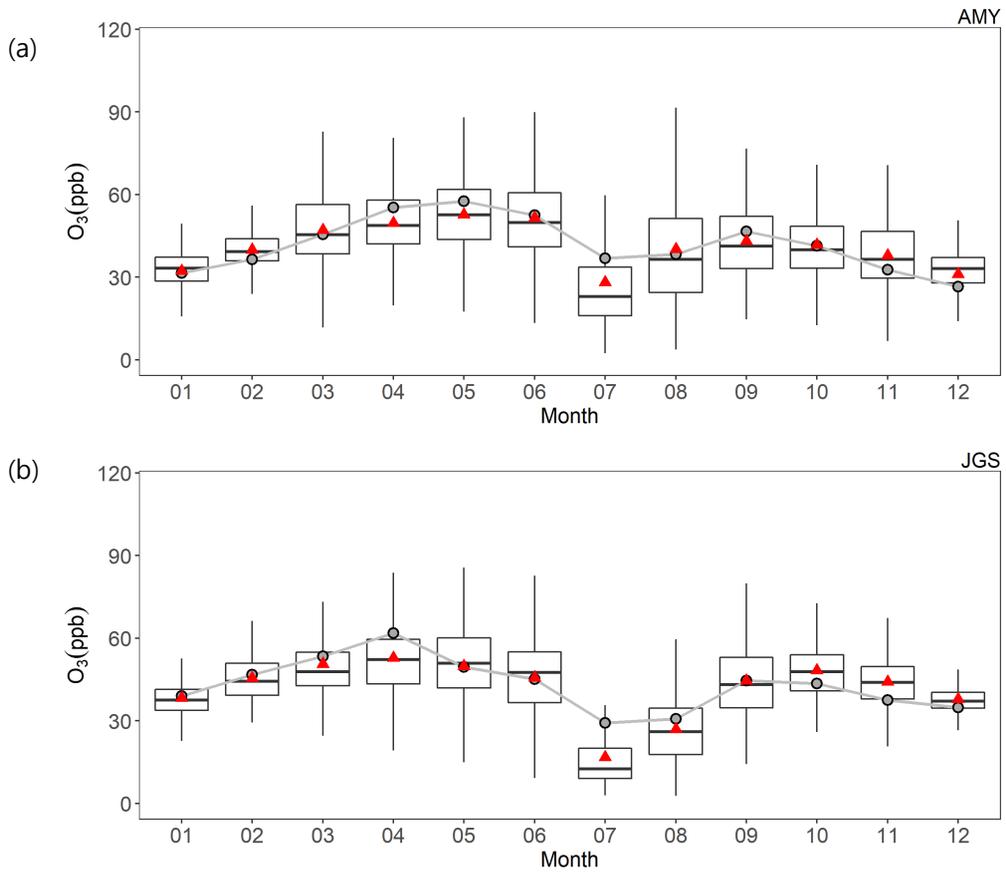


그림 3.2.1 2018년 (a)안면도와 (b)고산 O<sub>3</sub>의 월변화. 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년(안면도), 2012 ~ 2017년(고산)의 평균(점-선).

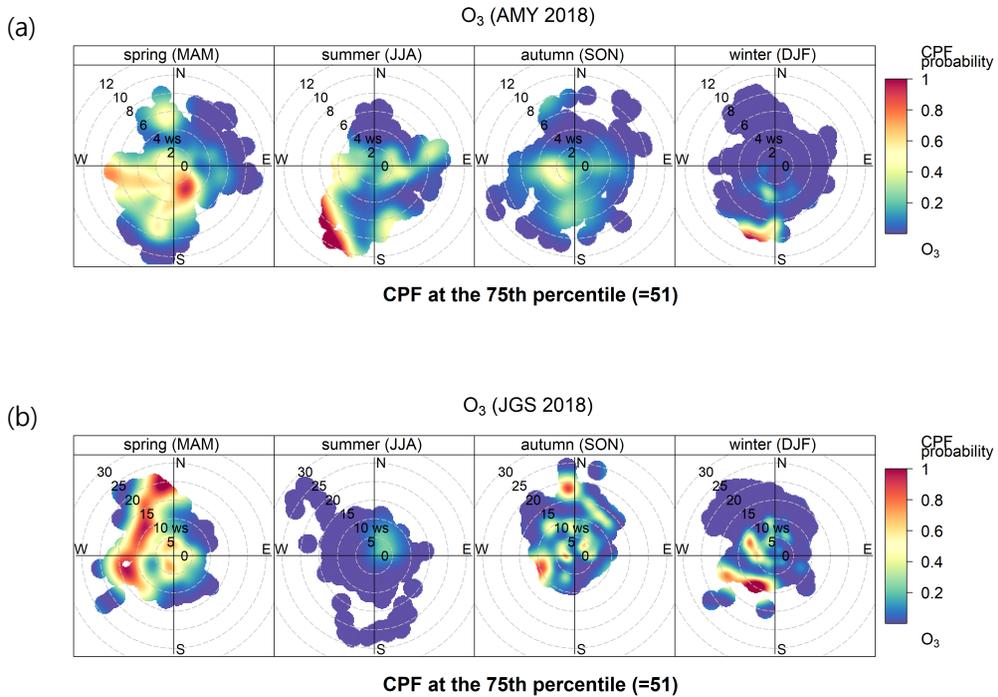


그림 3.2.2 (a)안면도와 (b)고산의 2018년 O<sub>3</sub>의 CBPF (Conditional bivariate probability function) plot.

각 감시소에서 풍향, 풍속 등의 바람조건에 따라 2018년 관측한 O<sub>3</sub>의 75% 이상의 값이 나타날 확률을 계절별로 그림 3.2.2에 나타내었다. 이 그림은 풍향 풍속별 윈드 섹터에 속한 관측값 중 75%이상인 값의 개수를 같은 윈드 섹터에 속한 전체 관측값의 개수로 나눈 값을 bivariate polarplot의 형태로 표현하여, 고농도가 관측되는 방향과 바람의 조건을 쉽게 파악할 수 있다. O<sub>3</sub>과 기상자료는 2018년의 시간평균을 사용하였고, 2018년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

안면도에서 봄에 풍속과 상관없이 바다에 접한 서-남서쪽에서 바람이 불 때 주로 고농도가 관측되었고, 여름과 겨울에는 풍속 5 m/s 이상일 때 고농도가 나타났다. 고산에서는 봄에 바다에 접한 북서-서-남서쪽에서 바람이 10 m/s 이상으로 강하게 불 때 고농도가 이동해 온 것으로 보인다. 안면도와 고산 모두 가을에는 봄에 비해 낮은 풍속일 때 고농도를 보였다.

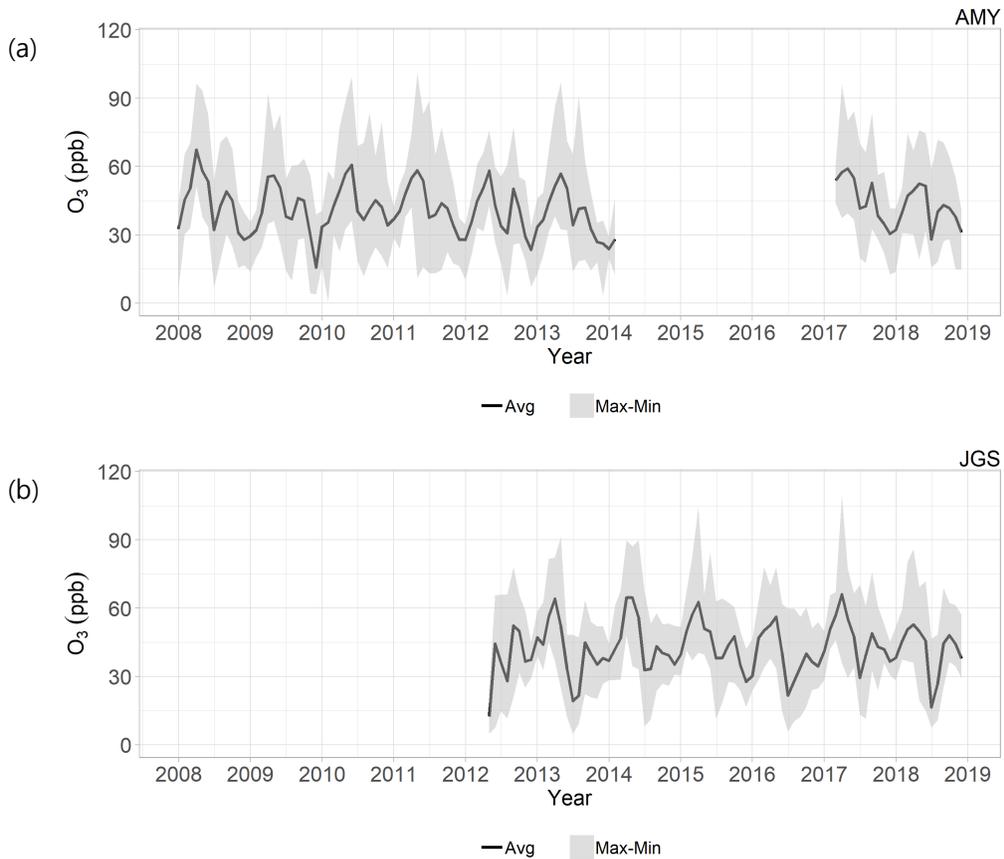


그림 3.2.3 (a)안면도(2008 ~ 2019년)와 (b)고산(2012 ~ 2019년)에서 장기간 관측한 O<sub>3</sub>의 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

일평균으로 계산한 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.3에 나타내었다. 2008년에서 2017년까지 안면도에서 O<sub>3</sub>의 월평균 최댓값은 약 60 ppb였고, 2018년에 52.7 ppb로 2008년 이후 가장 낮았다. O<sub>3</sub>의 월 최댓값은 약 80 ppb이며 2012년을 제외한 다른 해의 월 최댓값보다 10 ~ 15 ppb이상 낮은 반면 월 최솟값의 수준은 다른 해와 비슷한 수준이었다.

고산의 연도별 월평균 최댓값은 약 56 ~ 66 ppb 사이에 분포하며, 2018년 월 최댓값은 52.8 ppb로 2012년 이후 가장 낮았다. O<sub>3</sub>의 월 최댓값 또한 2018년도에 가장 낮았으며, 월 최솟값은 다른 해와 비슷한 수준이었다.

### 3.2.2 일산화탄소(CO)

CO는 OH 라디칼과의 반응으로 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> 등 온실가스 농도를 변화시켜 지구 온난화에 영향을 미친다(IPCC, 2013). 전세계 GAW 관측소에서 공유한 CO 농도로 계산한 2015년 전지구 평균은 91±2 ppb이다(WDCGG No.41). CO 농도는 북반구의 인위적인 오염원 배출로 인해 남반구에 비해 북반구에 높게 분포하며, 계절 변화의 폭도 북반구가 크고 남반구는 계절변화가 북반구와 반대이면서 그 폭이 좁은 것으로 나타났다. CO의 농도는 점차 증가하고 있으며 이는 주로 엘니뇨 동안 발생한 생체 소각(biomass burning)으로 인한 배출이 주요 원인 중 하나이다. CO는 대기 내 수명이 계절이나 지역에 따라 10일에서 일 년 이상이며 대기 이동의 좋은 지시자이며, 탄소 연료 연소의 주요 추적자, 대기의 강력한 산화제인 OH 라디칼의 흡수원이기도 하여 GAW의 핵심 항목으로 관측되어 왔다.

국립기상과학원은 CO를 안면도, 고산, 울릉도에서 관측하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다. 2018년에 각 감시소에서 관측한 CO의 월별 분포를 시간평균을 사용하여 그림 3.2.4에 나타내었다.

2018년에 세 감시소에서 관측한 CO 농도는 모두 여름(7 ~ 8월)에 낮고 겨울에 높게 분포하였다(그림 3.2.4). CO 월평균은 안면도에서 123 ~ 370 ppb였고 고산은 93 ~ 263 ppb, 울릉도는 117~ 232 ppb 로, 안면도와 고산의 CO가 울릉도에 비해 월별 농도분포 범위가 넓었다. 연평균은 안면도(261.1 ppb) > 고산(198.1 ppb) > 울릉도(181.0 ppb)의 순서로 높았다. 안면도에서 2018년 CO의 월평균은 지난 10년(2008 ~ 2017년)의 월별 평균보다 봄, 여름, 가을에 낮았고 겨울에 높았다. 고산에서 2018년 CO 월평균은 안면도와 같이 지난 6년(2012 ~ 2017년)의 월별 평균보다 봄, 여름, 가을에 낮았고 겨울에 높았다. 2018년 울릉도의 CO 월평균은 지난 3년(2015 ~ 2017)년의 월별 평균과 비슷한 수준을 보였다.

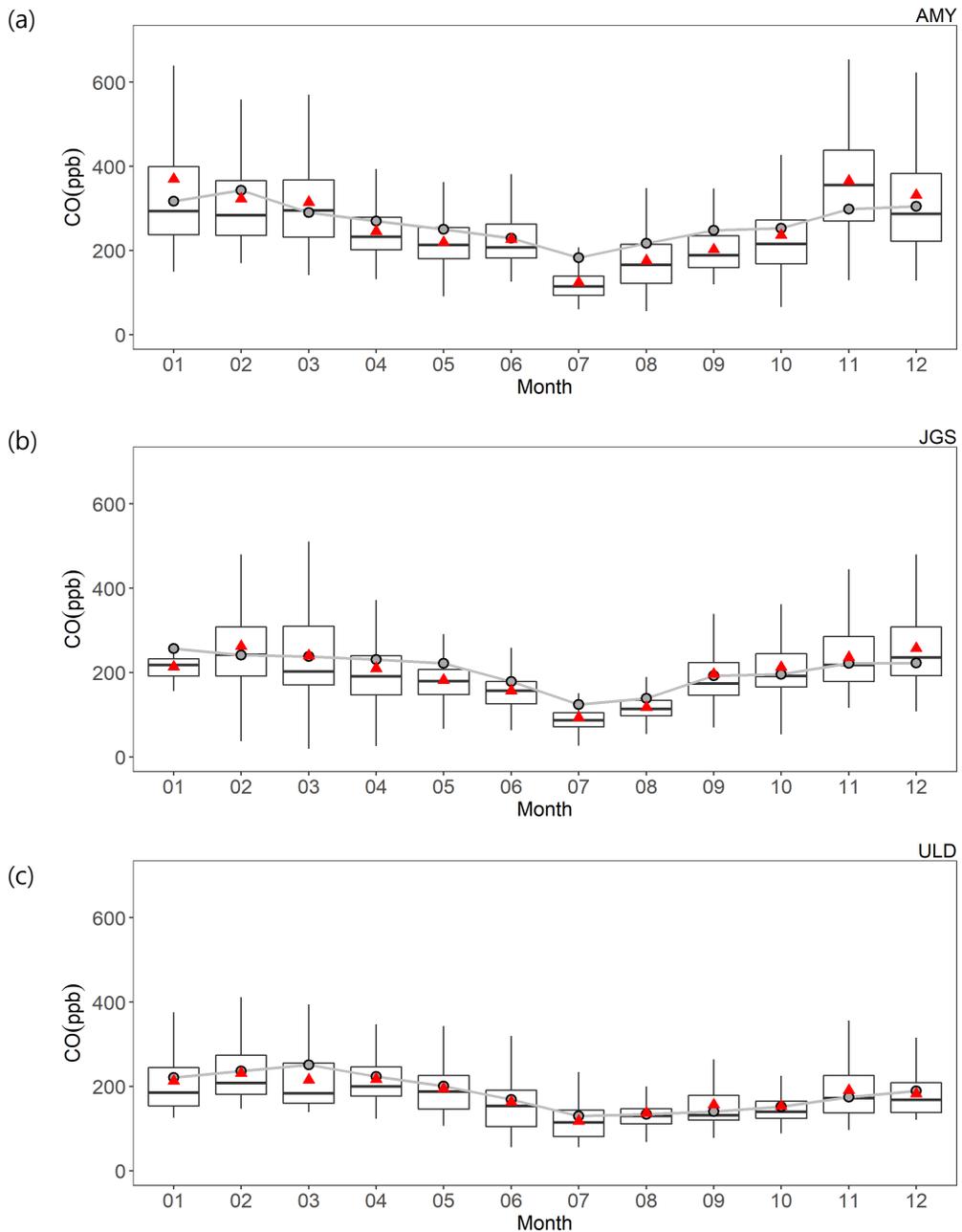


그림 3.2.4 2018년 (a)안면도, (b)고산, (c)울릉도 CO의 월변화. 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년(안면도), 2012 ~ 2017년(고산), 2015 ~ 2017년(울릉도)의 평균(점-선).

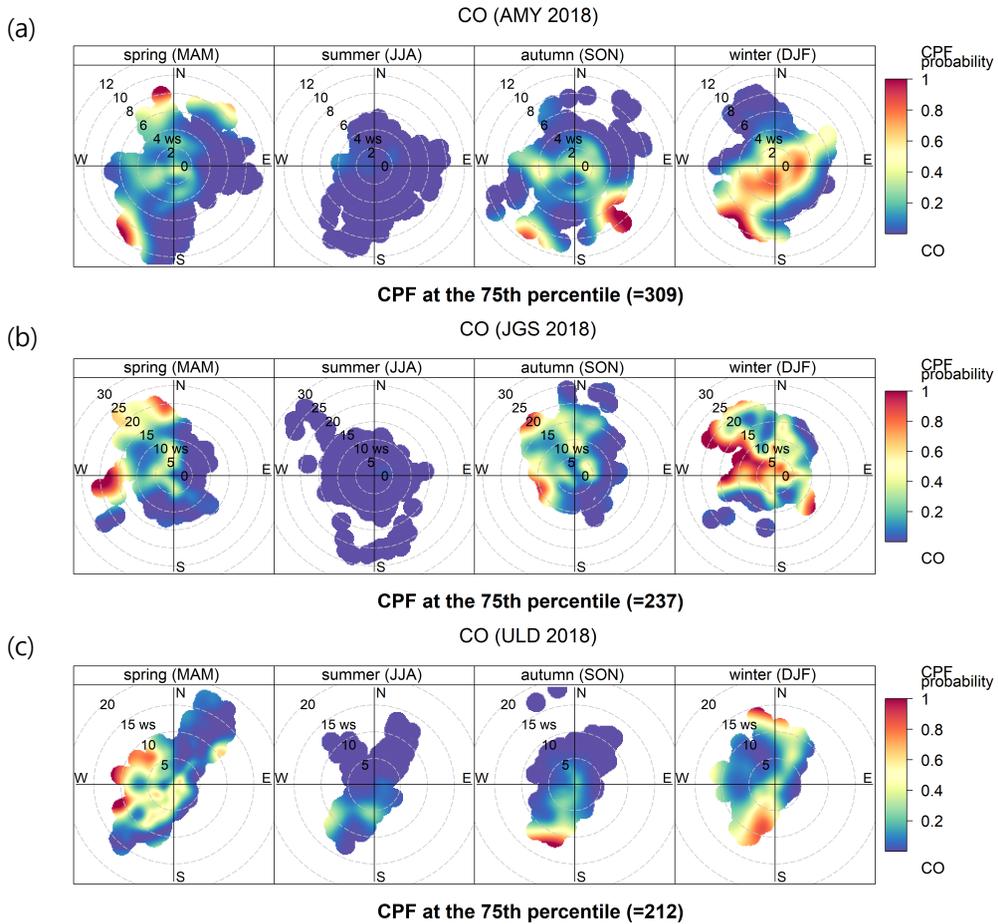


그림 3.2.5 (a)안면도, (b)고산, (c)울릉도의 2018년 CO의 CBPF plot.

각 감시소에서 풍향, 풍속 등의 바람조건에 따라 2018년 관측한 CO의 75% 이상의 값이 나타날 확률을 계절별로 그림 3.2.5에 나타내었다. CO와 기상자료는 2018년의 시간평균을 사용하였고, 2018년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

안면도에서 고농도 CO는 봄, 가을, 겨울에 주로 남서풍이 5 m/s 이상으로 강하게 불 때 보이기 쉬우며, 서쪽은 바다에 접해있어서 장거리 이동해온 고농도 CO의 영향을 받는 것으로 보인다. 겨울에는 낮은 풍속에서 풍향과 상관없이 CO 농도가 높을 수 있으며 이는 감시소 인근의 영향을 받는 것으로 볼 수 있다. 또, 봄과 가을에 북풍 혹은 남동풍이 강하게 불 때 내륙으로부터 이동한 CO의 영향을 받을 수 있다.

고산과 울릉도에서는 북서풍 혹은 남서풍이 강하게 불 때 고농도 CO가 관측될 확률이 높으며, 이는 바다를 건너 장거리 이동한 CO의 영향을 받는 것을 뜻한다.

일평균으로 계산한 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.6에 나타내었다. 안면도에서 2017 ~ 2018년의 CO 농도는 2008 ~ 2013년의 CO 농도보다 전체적으로 낮았다. 특히, 2018년 7월 평균은 지난 10년간의 월평균 중 가장 낮은 123.9 ppb였다.

고산에서 2018년 월평균은 지난 관측 기간의 수준과 비슷한 범위에 분포하였고, 2018년 7월의 월평균은 93.3 ppb 였고 최댓값과 최솟값의 차이가 전체 관측기간과 비교하였을 때 가장 적었다.

울릉도에서 2018년도 CO의 월평균, 월 최댓값, 월 최솟값의 분포는 지난 관측 기간의 수준과 비슷한 범위에 분포하였다.

안면도, 고산과 울릉도에서 CO는 겨울에 높고, 여름에 낮으며, 안면도와 고산의 월 최댓값 수준이 울릉도보다 높고 그 분포 범위가 넓었다.

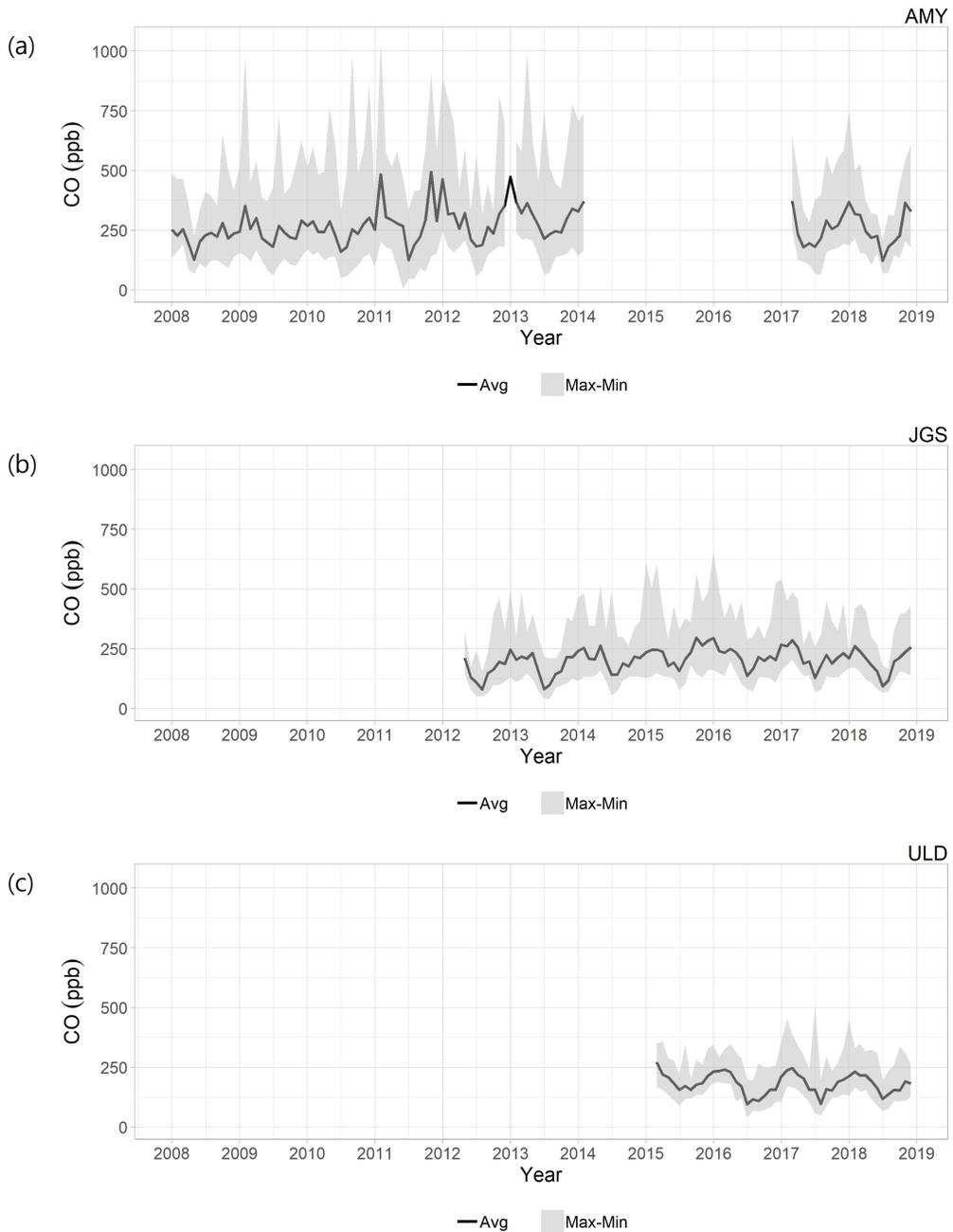


그림 3.2.6 (a)안면도(2008 ~ 2018년), (b)고산(2012 ~ 2018년)과 (c)울릉도(2015 ~ 2018년)에서 장기간 관측한 CO의 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색 음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

### 3.2.3 질소산화물(NOx)

NO<sub>x</sub>는 O<sub>3</sub>의 전구물질로 광화학반응을 포함한 대기화학 반응 과정에서 CO<sub>2</sub>의 생성에 관여하고, 질산염을 포함하는 에어로졸의 전구물질로 작용하여 간접적으로 음의 복사강제력을 발생시키고, CH<sub>4</sub>와의 반응으로 성층권 H<sub>2</sub>O에 영향을 미친다(IPCC, 2013). 그러나 NO<sub>x</sub>는 반응성이 높아 대기 내 수명이 짧고, 지역에 따라 고르지 않게 분포하며 가스상 뿐만이 아니라 에어로졸과도 상호 작용을 하므로 기후에 미치는 순 영향을 파악하기 어렵다.

NO<sub>x</sub>는 자연적으로 대류권 상층에서 번개에 의해 생성되기도 하고, 토양, 식물 등의 질산염에서 광화학 활동으로 발생되기도 한다. NO<sub>x</sub>는 인위적으로 발전소, 석유계 자동차, 선박, 항공기 등에서 화석연료를 사용한 고온 연소와 산불, 산림 벌채 등의 저온연소에서 발생한다. NO<sub>x</sub>는 낮 동안의 빠른 광화학 반응으로 O<sub>3</sub>과 OH라디칼의 농도를 조절하고 밤에 광화학 반응이 없는 야간 화학의 주요성분(예, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)을 생성하는데 관여한다. NO<sub>x</sub>는 대기 내 수명이 짧아 발생원에서 높은 농도로 분포하여 화재, 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<sub>x</sub>는 안면도와 고산에서 관측하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다. 2018년에 각 감시소에서 관측한 NO<sub>x</sub>의 월별 분포를 시간평균을 사용하여 그림 3.2.7과 같이 나타내었다.

2018년에 안면도에서 관측한 NO<sub>x</sub>는 여름에 낮고 겨울에 높게 분포하였다. 2018년 월평균은 3 ~ 10 ppb로 분포하였고 모든 계절에서 지난 10년(2008 ~ 2017년)의 월별 평균보다 낮았다.

고산에서 관측한 NO<sub>x</sub>는 여름에 낮고 가을에 높게 분포하였으나 안면도에 비해 계절 변동이 뚜렷하지 않다. 2018년 월평균은 2 ~ 6 ppb로 분포하였고 11월과 12월을 제외하고 지난 6년(2012 ~ 2017년)의 월별 평균보다 낮았다.

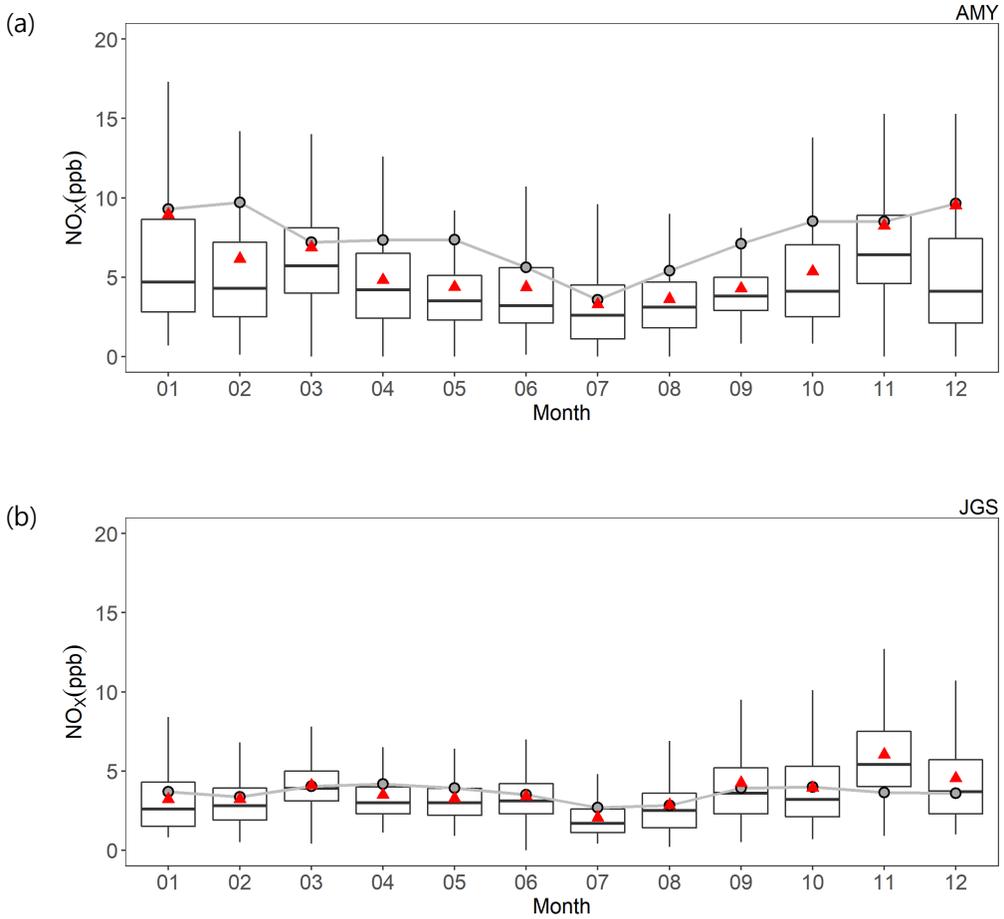


그림 3.2.7 2018년 (a)안면도와 (b)고산 NOx의 월변화. 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년(안면도), 2012 ~ 2017년(고산)의 평균(점-선).

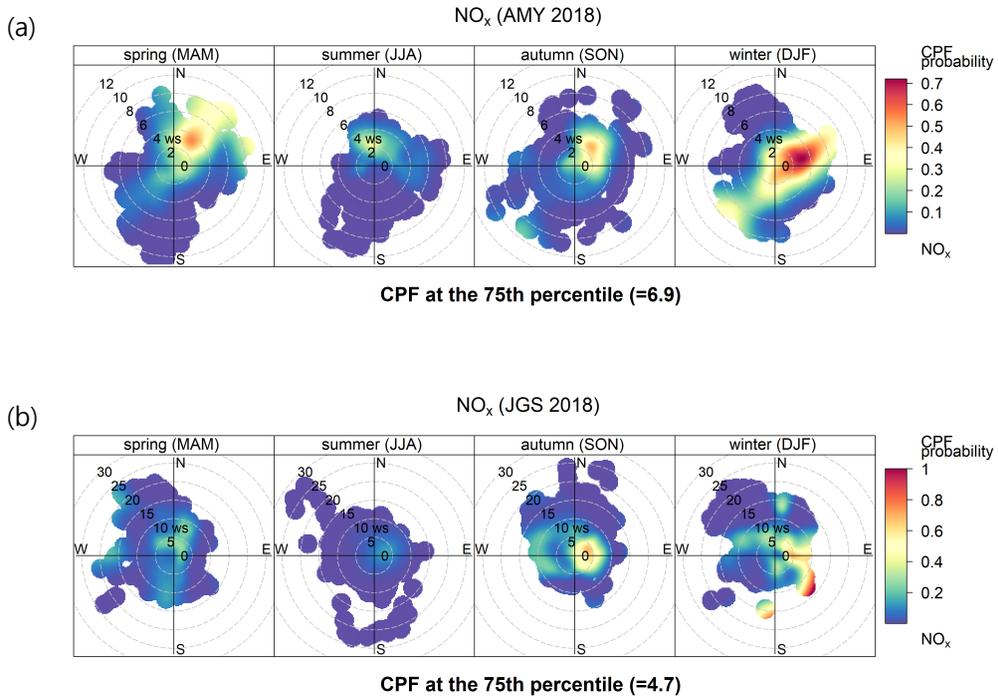


그림 3.2.8 (a)안면도와 (b)고산의 2018년 NO<sub>x</sub>의 CBPF plot.

각 감시소에서 풍향, 풍속 등의 바람조건에 따라 2018년 관측한 NO<sub>x</sub>의 75% 이상의 값이 나타날 확률을 계절별로 그림 3.2.8에 나타내었다. NO<sub>x</sub>와 기상자료는 2018년의 시간평균을 사용하였고, 2018년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

NO<sub>x</sub>는 풍속에 상관없이 안면도에서 북동풍이 불 때, 그리고 고산에서 동풍 계열 바람이 불 때 고농도로 관측될 수 있고 다른 계절에 비해 겨울에 더 자주 고농도가 관측된다. NO<sub>x</sub>의 반응속도가 빠르고 장거리 이동이 어려운 특성을 고려하면, 고농도 NO<sub>x</sub>의 경우 대부분 해상이 아닌 내륙의 영향을 받는다고 볼 수 있다.

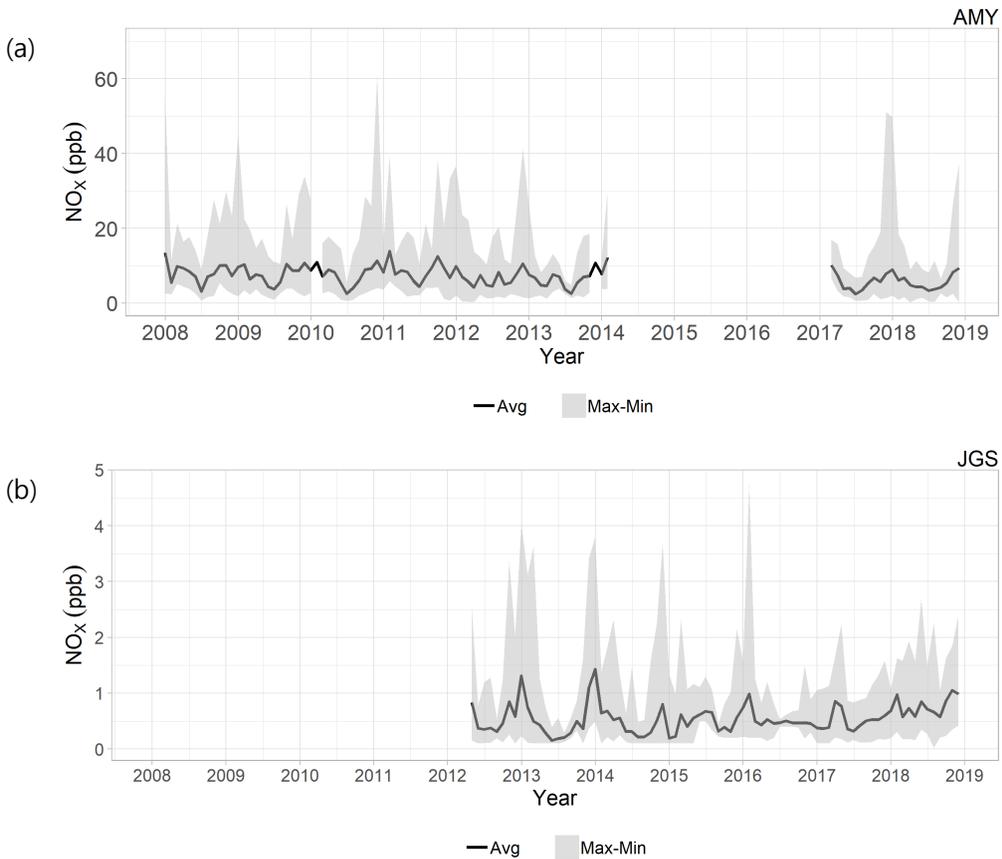


그림 3.2.9 (a)안면도(2008 ~ 2018년)와 (b)고산(2012 ~ 2018년)에서 장기간 관측한 NOx의 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

일평균으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.9에 나타내었다. 안면도에서 NOx의 월평균은 2007년에서 2017년까지 증가하거나 감소하는 경향이 뚜렷하지 않으나, 2018년 월 최댓값은 지난해에 비해 감소하였다.

고산은 2017년 이후 월 최댓값이 감소하였고, 계절 변동 또한 뚜렷하지 않게 나타났다.

### 3.2.4 이산화황(SO<sub>2</sub>)

SO<sub>2</sub>은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>의 주요 공급원이며, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>과 반응하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 생성한다. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>는 산성비를 유발하거나 새로운 입자를 형성하는데 결정적인 역할을 한다. 1980년대부터 1990년대까지 산성비 등 산성강하물이 주요 환경문제였을 때 유럽과 북아메리카의 대기오염 관측 네트워크와 배경대기 지역에서 관측되었다. 유럽, 북아메리카는 환경정책으로 SO<sub>2</sub> 배출을 규제하여 농도가 감소하였고 더 이상 산성비가 주요 이슈가 아니다. 우리나라에서도 1990년대 이후 황 저감 정책으로 SO<sub>2</sub>의 농도수준이 감소하여 2016년 전국 평균 0.004 ppm (4 ppb) 이하이다 (대기환경연보, 2017). 그러나 중국에서는 황을 포함한 석탄을 연료로 사용하고 있어 우리나라보다 SO<sub>2</sub> 농도 수준이 높으며 장거리 이동으로 우리나라에 영향을 줄 가능성이 높다. 또, SO<sub>2</sub>는 주로 산업공정, 발전소, 화산 분출 등에서 발생하며 지역 오염이나 화산 영향의 좋은 지시자이다.

SO<sub>2</sub>의 화학반응을 거쳐 생성되는 황산염 에어로졸의 복사강제력은 약  $-0.41 \text{ W/m}^2$ 이며, 태양빛을 산란시켜 지구 냉각화에 기여한다(IPCC, 2013).

SO<sub>2</sub>는 안면도와 고산에서 관측하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다.

2018년에 안면도에서 관측한 SO<sub>2</sub>는 여름에 낮고 겨울에 높게 분포하였다 (그림 3.2.10). 2018년 SO<sub>2</sub> 월평균은 0.9 ~ 2.5 ppb로 분포하였고 지난 10년 (2008 ~ 2017년)의 월별 평균보다 봄, 가을, 겨울에 1 ~ 2 ppb 이상 낮았으며 여름에는 비슷한 수준이었다.

고산에서 관측한 SO<sub>2</sub>는 낮은 농도로 분포하여 계절변동을 찾기 어렵다. 2018년 SO<sub>2</sub> 평균은 0.6 ~ 1.1 ppb로 분포하였고 지난 6년(2012 ~ 2017년)의 월별 평균과 비슷하거나 약간 높았다.

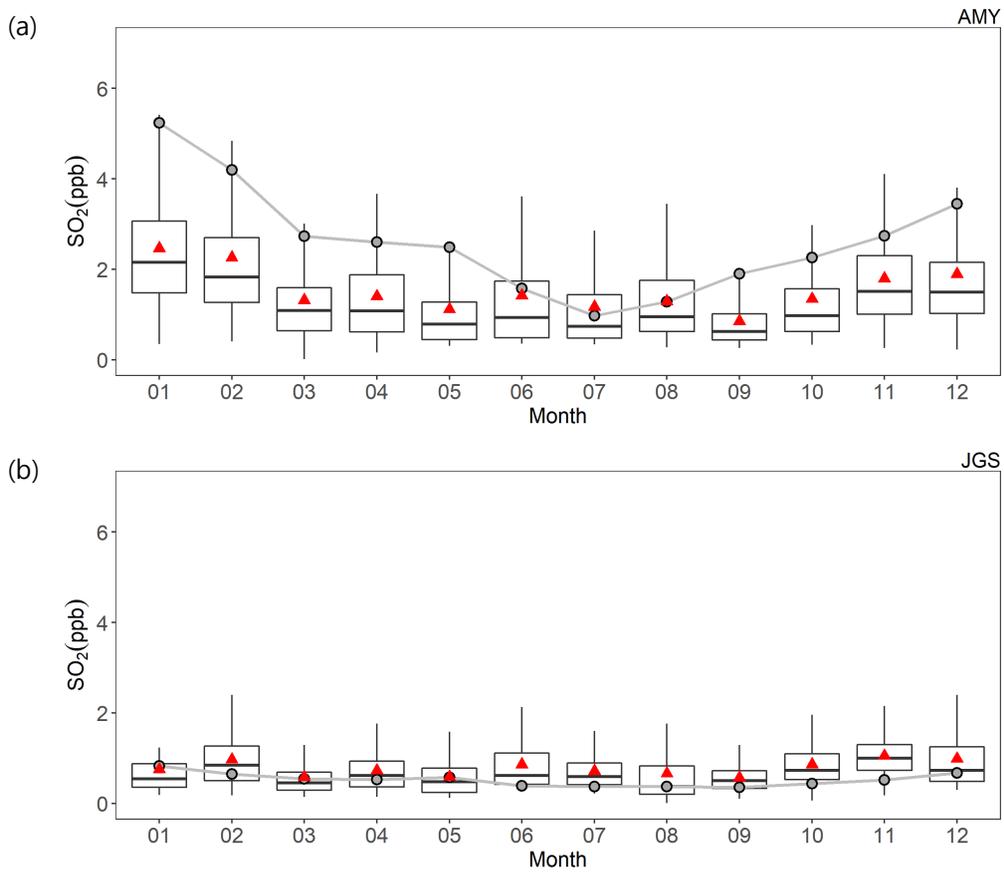


그림 3.2.10 2018년 (a)안면도와 (b)고산 SO<sub>2</sub>의 월변화. 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년(안면도), 2012 ~ 2017년(고산)의 평균(점-선).

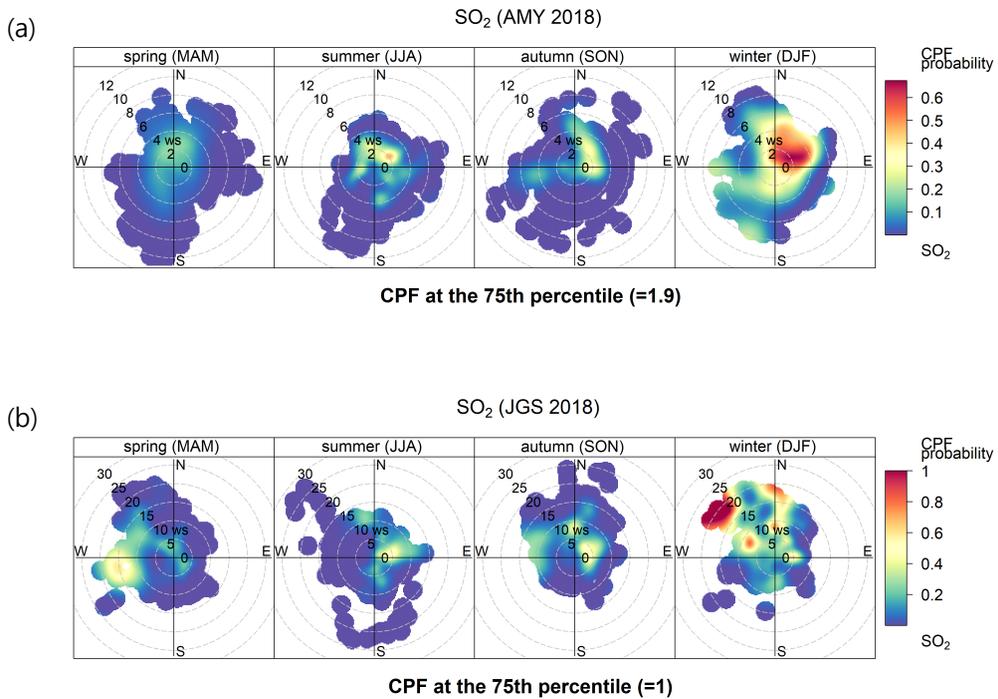


그림 3.2.11 (a)안면도, (b)고산의 2018년 SO<sub>2</sub>의 CBPF plot.

각 감시소에서 풍향, 풍속 등의 바람조건에 따라 2018년 관측한 SO<sub>2</sub>의 75% 이상의 값이 나타날 확률을 계절별로 그림 3.2.11에 나타내었다. SO<sub>2</sub>와 기상자료는 2018년의 시간평균을 사용하였고, 2018년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

안면도에서는 주로 북동풍이 불 때 내륙에서 영향을 받아 고농도 SO<sub>2</sub>가 관측될 확률이 높다. 고산에서는 봄과 겨울에 서풍 혹은 북서풍일 때 해상에서 영향을 받아 SO<sub>2</sub> 농도가 높아질 수 있다. 한편, 고산에서 여름과 가을에는 동풍이 불 때 제주 내륙의 영향을 받을 가능성도 보였다.

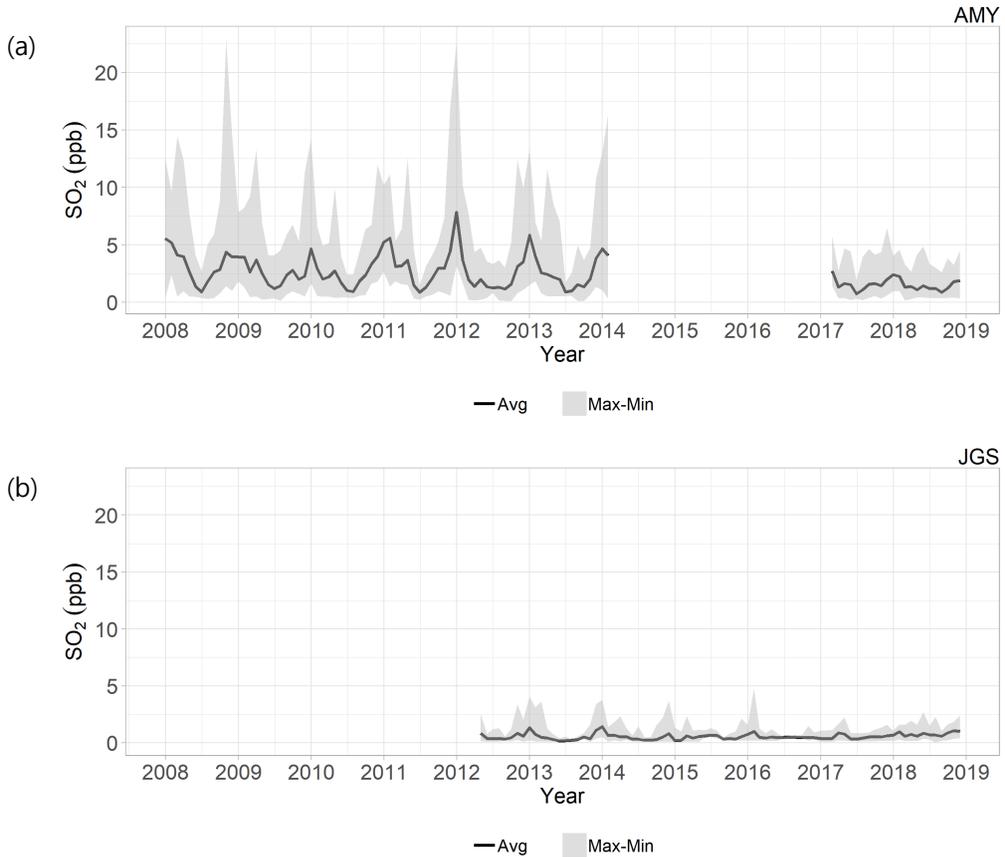


그림 3.2.12 (a)안면도(2008 ~ 2018년)와 (b)고산(2012 ~ 2018년)에서 장기간 관측한 SO<sub>2</sub> 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색음영은 월 최댓값과 월 최솟값의 차이를 나타냄).

일평균으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.12에 나타내었다. 안면도에서 2017 ~ 2018년의 SO<sub>2</sub> 농도는 2008 ~ 2013년의 SO<sub>2</sub> 농도보다 월평균과 월 최댓값이 낮았다. 고산에서 SO<sub>2</sub>는 월 최댓값이 2012년 이후 2017년까지 감소하다가 2018년에 조금 증가하였다.

안면도 SO<sub>2</sub> 월평균과 월 최댓값의 수준이 고산에 비해 높고 그 분범위가 넓었다.

### 3.3 에어로졸

에어로졸은 공기 중에 떠 있는 고체 또는 액체 상태의 작은 입자로 보통 0.001 ~ 100  $\mu\text{m}$  정도의 크기를 갖는다. 에어로졸은 기후변화와 인간 건강과 직접적으로 연관된 중요한 지구대기감시 요소이다. 또한 에어로졸에 의한 대기질은 인간 건강에 직접 영향을 주면서 관심이 더욱 커지고 있다.

에어로졸은 황사, 화산재, 해염같이 자연적 요인에 의해 생성되기도 하고 인간 활동에 따른 인위적 요인에 의해서 만들어질 수도 있다. 도시·산업시설 배출, 소각, 자동차 등은 인위적 오염물질의 주요 발생원이다. 인위적 오염 물질로는 검댕, 황화합물, 유기화합물 등이 있다. 이처럼 다양한 종류의 에어로졸은 운동 역학과 광학 특성이 서로 다르며, 배출 후 대기 중에 머무르는 시간은 수 일에서 수 주 정도로 온실가스에 비해 매우 짧은 편이다. 그래서 에어로졸은 지역적으로, 시간적으로 분포가 매우 다양하다.

에어로졸 크기는 핵화 모드(0.001 ~ 0.01  $\mu\text{m}$ ), 에이트켄 모드(0.01 ~ 0.1  $\mu\text{m}$ ), 축적 모드(0.1 ~ 1  $\mu\text{m}$ ), 조대 모드(1  $\mu\text{m}$  이상)로 나눈다. 에이트켄 모드는 확산이나 응축 과정을 거치며, 수 시간에서 수 일 동안 공기 중에 잔존하는 반면, 조대 모드는 쉽게 침착되면서 수 시간에서 수 일 간 대기 중에 잔류하게 된다. 핵화 모드는 수 분에서 수 시간 동안 가장 짧은 시간 대기 중에 존재하는 편이며, 축적 모드는 수 주 동안 대기 중에 떠 있을 수 있다.

대기 중 직경 10  $\mu\text{m}$  이하의 미세먼지는 호흡기질환, 심질환 발병에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 에어로졸은 대기오염물질과 결합하여 산성비, 스모그, 시정 감소의 원인이 될 뿐만 아니라 대기 중에 부유하여 지표면으로 들어오는 태양복사에너지를 산란하거나 흡수하여 기후변화를 유발시키는 강제력으로 작용하기도 한다. 에어로졸 복사강제력은 평균적으로 음(-)의 강제력인  $-0.9$  ( $-1.9 \sim -0.1$ )  $\text{W}/\text{m}^2$  (1750 ~ 2011년) 수준으로 알려져 있다(IPCC, 2014). 그 밖에 대기에서 구름이나 강수형성에 중요한 응결핵이나 빙정핵의 역할을 함으로써 구름 형성과 물리특성을 변화시킨다. 이것을 에어로졸 간접효과라고 하는데 이는 지구알베도를 바꾸어 기후변화를 초래하는 원인이 된다.

에어로졸은 두 가지 상반되는 복사특성을 가지는데, 하나는 대부분의 에어로졸로 인한 냉각효과와 이로 인한 구름 특성 변화이며, 다른 하나는 태양 복사를 흡수하는 검댕(black carbon)으로 인한 온실 효과이다(IPCC, 2014). 에어로졸이 기후에 미치는 영향에 대해서는 점차 과학적 이해수준이 높아져 가고는 있지만, 온실가스의

기후 영향에 비해 과학적 이해도가 매우 낮고 시간적, 공간적 다양성이 크기 때문에 전지구적 복사 강제력을 추산하는 데 있어 여전히 가장 큰 불확실도를 제공하는 요소이다. 따라서, 지정된 장소에서 종합적인 에어로졸의 장기관측은 에어로졸과 기후 상호작용을 과학적으로 이해하고 미래 기후변화를 예측하는 데 기여할 수 있다.

기상청은 WMO GAW의 권고에 따라 안면도, 고산, 울릉도에서 PM10 질량농도, 이온성분, 에어로졸 광산란계수 등 에어로졸 분야 11종을 관측하고 있으며, 위탁관측소인 연세대학교에서 에어로졸 광학깊이를, 광주과학기술원에서 에어로졸 광학깊이와 연직분포를 관측하고 있다.

2018년에는 기후변화감시소 에어로졸 관측자료 품질관리의 일환으로 3월에 WMO GAW 에어로졸 세계표준센터(World Calibration Centre for Aerosol Physics, WCCAP)로부터 에어로졸 관측환경 전반에 대한 적합성 평가를 받았다. 또한, 9월과 10월에는 WCCAP에서 수행하는 국제 비교실험(응결핵계수기, 전자기유도입자계수기, 광산란계수측정기(예비장비), 광흡수계수측정기)에 참여하였다.

### 3.3.1 에어로졸 물리특성

한반도 배경대기 에어로졸 물리특성 감시를 위해 질량농도와 수농도를 관측하여 분석한다. PM10 질량농도는 부유분진측정기( $\beta$ -ray PM10)로 관측하며 이 장비는 국내 황사관측망의 기본 관측장비로도 운영되고 있다. 광학입자계수기(OPC)도 질량농도를 산출하고 있으나, 이 장비는 습도가 높은 환경에서는 충분한 제습이 어렵기 때문에, 같은 장소에서 운영되는 부유분진측정기나 공기역학입자계수기(APS)의 품질 관리와 상대적인 입자 크기 분포의 정합성 확인에 활용되고 있다. 에어로졸 총수농도는 응결핵계수기로, 에어로졸 입경별 수농도는 공기역학입자계수기와 전자기유도입자계수기를 이용하여 관측한다.

#### 가. PM10 질량농도

부유분진측정기는 베타선흡수법을 이용하여 대기에 부유하는 직경  $10\ \mu\text{m}$  이하 에어로졸(PM10)의 질량농도를 연속 관측한다. 탄소의 방사성 동위원소인 탄소-14( $^{14}\text{C}$ )에서 방출되는  $\beta$  선을 에어로졸이 포집된 필터에 투과시킬 때 에어로졸이 흡수·산란하여 감쇠된 관측률(count rate)로부터 에어로졸 질량  $m_R$ 으로 다음과 같이 환산한다.

$$m_R = F_{cal} \times \ln \frac{R_0}{R} \quad (\text{식 3.1})$$

여기서  $R_0$ 은 필터의 순관측률이고  $R$ 은 에어로졸이 쌓인 필터의 관측률로써 단위는  $s^{-1}$ 이다.  $F_{cal}$ 은 질량 교정인자로 단위는  $\mu g$ 이며, 장비를 포일(foil)로 교정할 때 기기로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{cal} = \frac{A}{\mu/\rho} = \frac{2}{0.3} \times mg \approx 6600\mu g \quad (\text{식 3.2})$$

여기서  $A$ 는 필터 스폿(spot)의 면적( $cm^2$ )이며,  $\mu/\rho$ 는  $^{14}C$ 의 질량감쇠계수( $cm^2/mg$ )이다.

WCCAP의 적합성평가 권고(2018. 3.) 및 GAW Report NO. 227에 따라 인렛의 가열온도를 기존  $40^\circ C$ 에서  $35^\circ C$ 로 낮추어 운영하였다. 2018년 안면도에서 관측한 PM10 질량농도의 월평균은  $19 \sim 51 \mu g/m^3$  사이에 분포하며 11월과 12월을 제외하고 지난 10년간(2008 ~ 2017년) 월별 평균보다 낮았다. 7월의 월평균 농도가 가장 낮고( $19 \mu g/m^3$ ), 11월의 평균이  $51 \mu g/m^3$ 로 연중 가장 높았다(그림 3.3.1(a), 8월의 유효자료 비율은 50%). 11월 27일 ~ 30일 동안 안면도는 황사의 영향을 받았는데, 이로 인해 11월 평균이 상승한 것으로 보인다. 안면도 PM10 질량농도 연평균은 2004년 이후로 꾸준히 감소하는 추세이며, 지난 10년 평균은  $37 \mu g/m^3$ 이고, 2018년의 연평균은  $32 \mu g/m^3$ 로 지난 10년 평균보다 약 14% 낮았다(그림 3.3.2).

2018년 고산의 PM10 질량농도 월평균은  $24 \sim 42 \mu g/m^3$  사이에 분포하며 지난 7년간(2011 ~ 2017년) 월별 평균과 비교할 때 4, 7, 8, 11월은 과거보다 높고, 나머지는 낮았다(그림 3.3.1(b)). 월별 변동은 봄철에 가장 높고, 여름과 가을에 낮아 안면도와 유사한 양상을 보였다. 고산의 2018년 PM10 질량농도 연평균은  $29 \mu g/m^3$ 로 지난 7년 평균인  $30 \mu g/m^3$ 과 유사하며, 과거 3년(2015 ~ 2017년)보다 약 10% 낮았다(그림 3.3.2).

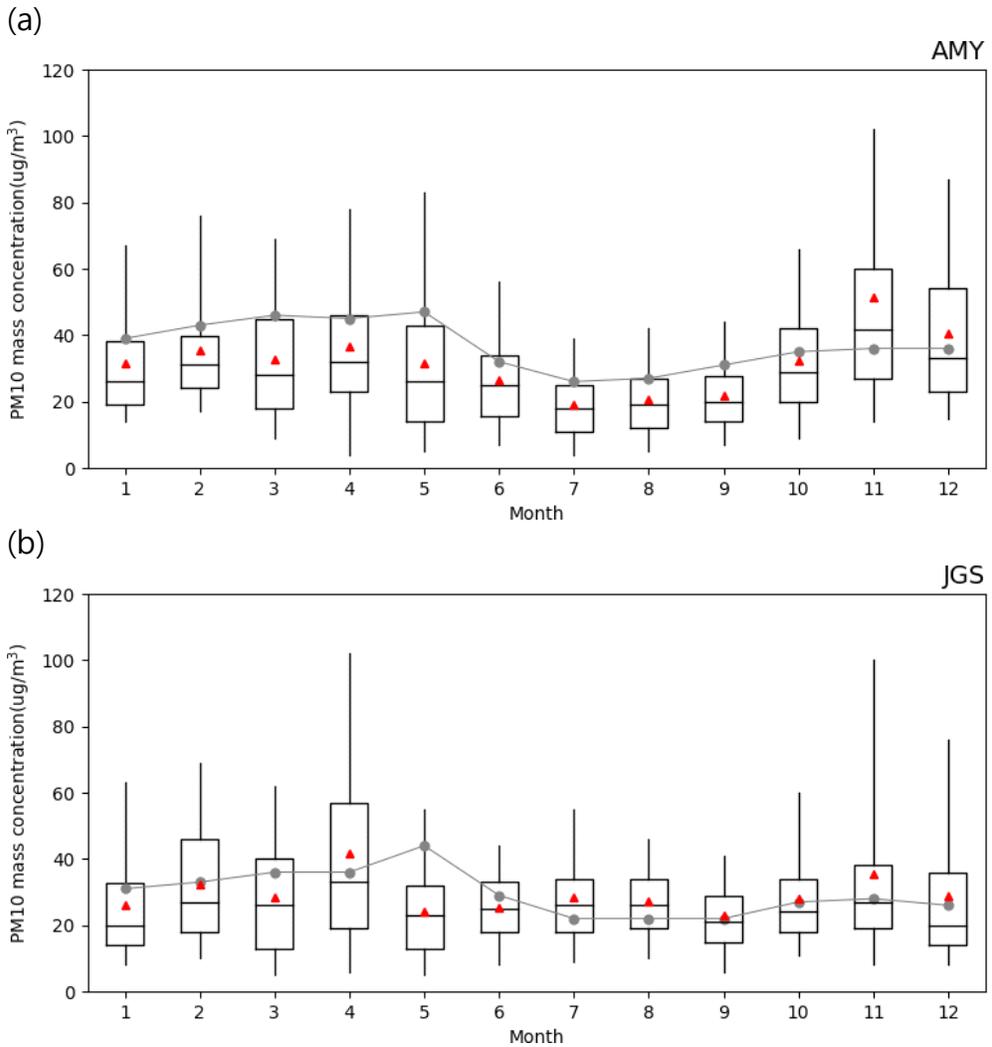


그림 3.3.1 (a)안면도와 (b)고산의 PM10 질량농도 월변화( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 2018년 월별분포 (상자의 세로실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년(안면도), 2011 ~ 2017년(고산) 평균(점-선).

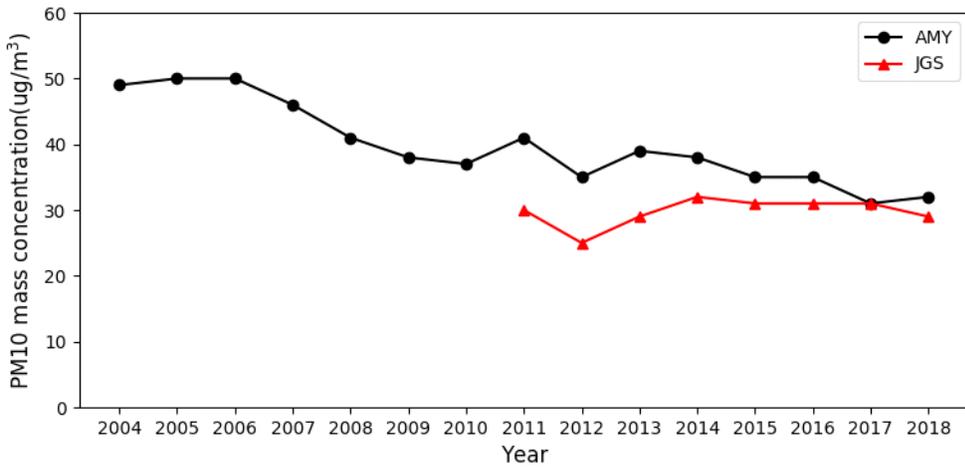


그림 3.3.2 안면도와 고산 PM10 질량농도의 최근 연평균 변화(μg/m³).

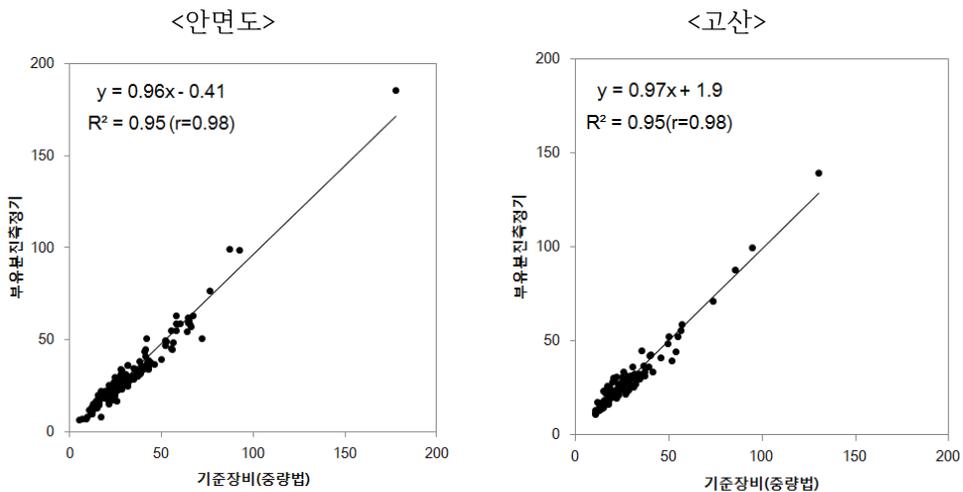


그림 3.3.3 2018년 안면도와 고산에서 관측한 부유분진측정기(β-ray PM10) PM10 질량농도의 등가성 확인.

안면도와 고산에서 24시간 동안 포집된 저용량 미세먼지채취기 PM10 질량농도(중량법)로부터 부유분진측정기 PM10 질량농도의 등가성을 평가하였다(그림 3.3.3). PM10 에어로졸 화학성분의 품질관리 절차(지구대기감시 업무매뉴얼(II), 2017)를 거쳐 최종 확정된 PM10 질량농도(중량법) 시료 수는 안면도, 고산 각각 148, 125개이다. 등가성 확인 결과 안면도는 기울기 0.96,

절편은 0.041, 고산은 기울기 0.97, 절편은 1.9로 부유분진측정기 등가성평가 기준(기울기 0.90~ 1.1, 절편 -5.0~5.0)을 모두 만족하였다.

## 나. PM 질량농도(중량법)

안면도에서는 PM10과 PM2.5의 화학 성분 분석을 위해 저용량 미세먼지채취기를 주1회 운영하고 있으며, 이로부터 PM10과 PM2.5의 질량농도를 산출한다. 저용량 미세먼지채취기에서 포집된 에어로졸의 질량농도는 포집 전후의 필터 무게의 차이와 평균 유량을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\text{질량농도 } (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{(W_2 - W_1) \times 10^6}{V} \quad (\text{식 3.3})$$

여기서  $W_1$ 은 포집 전의 필터 무게(g),  $W_2$ 는 포집 후의 필터 무게(g),  $V$ 는 통과시킨 공기량( $\text{m}^3$ )으로 평균 유량( $\text{m}^3/\text{min}$ )에 포집시간(1440 min)을 곱한 값이다.

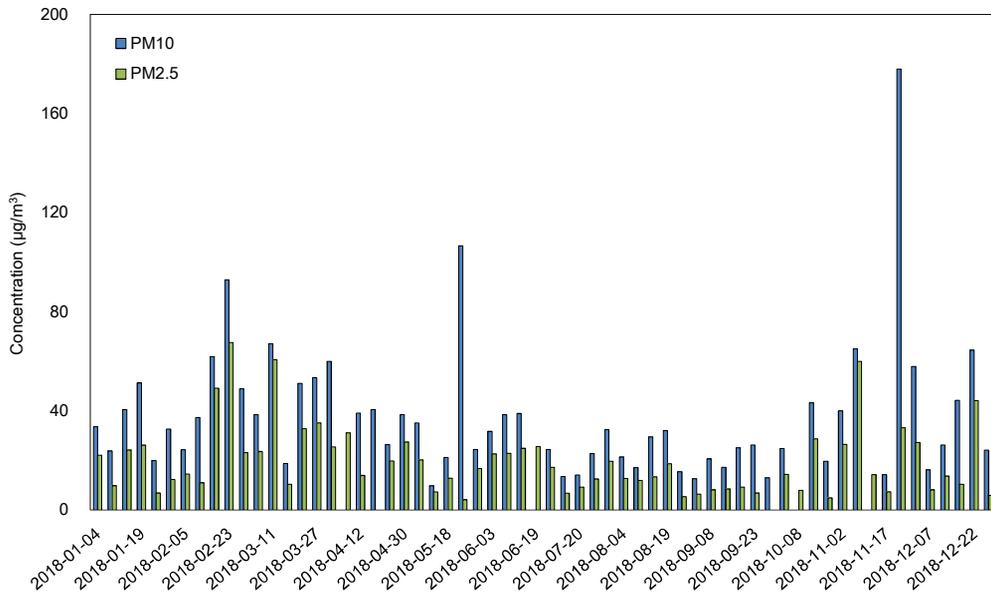


그림 3.3.4 2018년 안면도에서 측정된 저용량미세먼지채취기 PM10, PM2.5 질량농도.

2018년에 저용량 미세먼지채취기에서 산출한 유효 PM10, PM2.5 질량농도를 비교한 결과, PM10과 PM2.5 질량농도의 경향은 대체적으로 비슷하나 황사 영향으로 PM10 질량농도가 PM2.5보다 더 큰 비율을 보이는 기간도 있는 것으로 확인되었다(그림 3.3.4). 채취된 PM10, PM2.5 시료는 각각 58, 60개이며, 2018년 평균은 각각  $37.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $19.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 저용량 미세먼지채취기 PM10, PM2.5 질량농도의 계절별 분포는 그림 3.3.5와 같으며, 전체적으로 가을철 PM10을 제외하고 과거 10년(2008 ~ 2017년) 평균보다 낮은 농도를 보였다. 지난 10년(2008 ~ 2017년)의 PM10, PM2.5의 계절 평균을 보면 봄철에 가장 높은 농도를 보였으나 2018년에는 겨울과 봄철에 유사한 수준으로 높았다. 가을철에 황사(11월 27일 ~ 12월 1일)의 영향으로 인해 그림 3.3.5에서 PM10 whisker가 길게 나타났다.

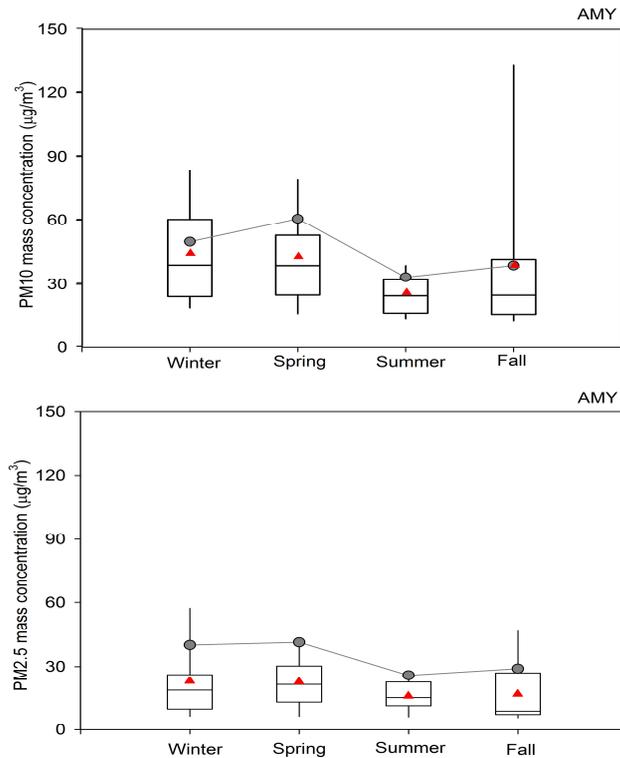


그림 3.3.5 안면도 2018년 저용량 미세먼지채취기 (위) PM10과 (아래) PM2.5 질량농도의 계절변화( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 계절별 분포(상자의 세로실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 상자 가운데 빨간색 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년 평균(회색점-선).

## 다. 에어로졸 수농도

에어로졸 수농도 분포는 모든 에어로졸 과정에 있어 가장 기본이 되는 정보이다. 고산에서는 0.01 ~ 3.0  $\mu\text{m}$  구간의 에어로졸 총수농도( $\#/ \text{cm}^3$ )를 관측하는 응결핵계수기를 운영하고 있다. 안면도에서는 2006년부터 공기역학입자계수기와 2005년부터 전자기유도입자계수기로 직경이 0.5 ~ 20  $\mu\text{m}$ 인 에어로졸과 직경이 0.01 ~ 0.5  $\mu\text{m}$ 인 에어로졸의 수농도를 각각 관측해 왔다. 2017년 7월부터는 0.01 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  범위의 크기별 수농도를 관측하는 전자기유도입자계수기가 운영되고 있다. WCCAP 적합성평가 권고(2018. 3.)에 따라 응결핵계수기와 공기역학입자계수기 관측에 적용하던 희석기를 사용하지 않았다.

응결핵계수기는 광학적인 방법으로 관측이 불가능한 작은 크기의 입자를 열역학적 특성을 이용해 광학적으로 관측 가능한 크기로 성장시켜 입자의 수농도를 관측한다. 9월에는 WCCAP의 국제비교실험에 참여하였는데, 실험과 운송으로 인해 9 ~ 10월 자료가 결측되었다. 국제비교실험에서는 응결핵계수기의 입자크기별 포집 효율곡선을 산출하였고, 표준장비와 매우 유사한 것으로 평가되었다.

고산에서 관측한 에어로졸 응결핵 수농도의 월변동을 그림 3.3.6에 보였다. 지난 6년(2012 ~ 2017년) 평균과 비교할 때 8월의 수농도가 높게 관측된 점이 눈에 띈다. 그 외 월별분포는 과거와 유사한 수준으로 관측되었다. 연평균 수농도는 2014년 이래로 조금씩 감소하는 것으로 관측되고 있다(그림 3.3.7).

공기역학입자계수기는 다음과 같은 원리로 52개 입자크기별 에어로졸 수농도를 관측한다. 에어로졸을 포함한 공기가 노즐을 통과하면서 가속될 때 작은 입자일수록 빠른 속도로 가속되어 노즐 끝 부분에서의 입자속도가 크므로, 입자가 일정한 간격을 유지하고 있는 2개의 Laser 빔을 통과하면서 산란시키는 2개의 펄스 간격(TOF = Time of Flight)을 관측하여 입자의 속도를 구하고 공기역학적 입경으로 변환된다. 1  $\mu\text{m}$  이상으로 비교적 큰 입자의 크기별 분포를 표현할 때는 에어로졸의 부피농도를 사용한다. 에어로졸 부피농도는 관측으로부터 얻은 에어로졸 수농도를 다음 식에 대입하여 입자 크기별 부피농도를 얻을 수 있다.

$$\frac{dV}{d(\log D_p)} = \frac{\pi}{6} D_p^3 \frac{dN}{d(\log D_p)} \quad (\text{식 3.4})$$

여기서  $D_p$ 는 에어로졸 입자의 직경,  $N$ 은 수농도이다.

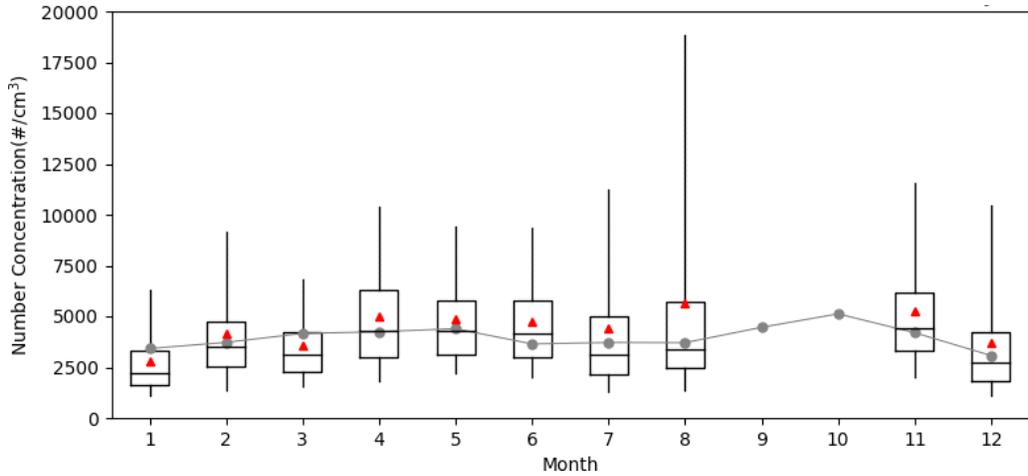


그림 3.3.6 고산의 총수농도 월변화( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 2018년 월별분포(상자의 세로실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2012-2017년 평균(점-선).

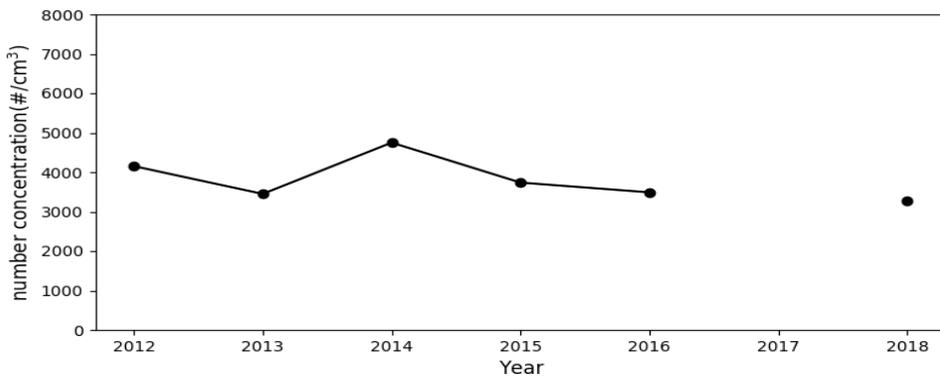


그림 3.3.7 고산 총수농도( $\#/ \text{cm}^3$ )의 최근 연평균 변화.

WMO GAW 프로그램 권고에 따라 표준대기상태( $0^{\circ}\text{C}$ , 1기압)로 보정한 수농도를 제시하였다. WCCAP 적합성평가 권고에 따라 표준입자(3개 입경)를 도입하여 주기적으로 입자크기분포 검정을 자체 수행하였으며, 이를 통해 고산에서 운영 중인 공기역학입자계수기의 관측 오류를 빠르게 진단하여 예비품으로 교체 관측하거나 수리를 의뢰할 수 있게 되었다. 또한, 같은 장소에서 관측 중인 예비 장비나  $\beta$ -ray PM10, OPC와의 정합성 확인을 통해 일부 자료는 무효처리하였다.

두 지점 모두 미세입자 영역( $1 \mu\text{m}$  이하)과 조대입자 영역에 피크가 관측되는

이산형(bi-modal) 분포를 보였다. 그림 3.3.8에서 보는 바와 같이, 2월과 3월에는 안면도보다 고산에서 더 높은 부피농도가 관측되었는데, 이는 그림 3.3.2의 PM10 월별 농도 분포와도 유사하다. 11월 27일부터 12월 1일 사이 관측된 황사로 인해 두 지점 모두 조대입자 영역의 부피농도가 상승하였다.

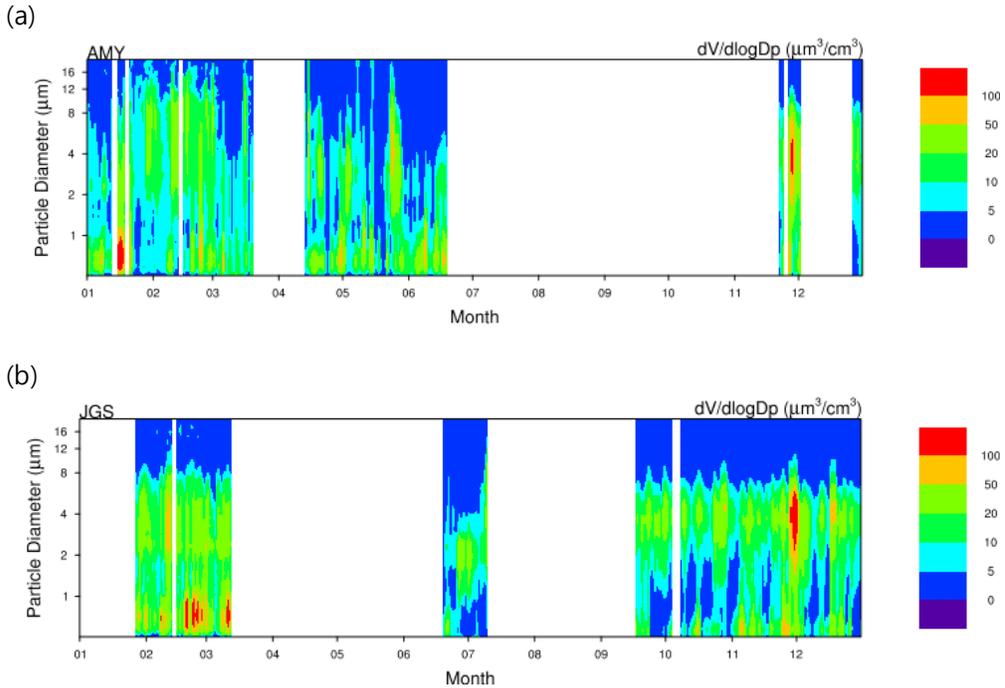


그림 3.3.8 (a)안면도와 (b)고산에서 관측한 2018년 크기별 에어로졸(0.5 ~ 20  $\mu\text{m}$ , 52 채널) 부피농도( $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ ) 분포.

전자기유도입자계수기는 미세 에어로졸의 입자가 가지고 있는 전기적 특성을 이용하여 입자를 크기별로 분류하고, 응결성이 큰 부탄올을 이용하여 분류된 입자를 성장시켜서 입자의 크기를 광학적으로 계수하는 방식을 이용한다. 유입된 공기는 에어로졸 중화기(Aerosol Neutralizer) 내부의 아메리슘 241 ( $\text{Am-241}$ )가 봉인된 관을 거쳐, DMA 내 전기장에 입자 크기별(0.01 ~ 1  $\mu\text{m}$ )로 분리 포집될 수 있도록 입자에 전하를 띠게 한다. 다음으로 과포화 상태의 부탄올에 통과시켜 응결과정을 거쳐, 광학적으로 관측할 수 있는 크기로 성장시킨 후에 수농도를 관측한다.

2018년 안면도에서 전자기유도입자계수기로 관측한 초미세먼지 입자크기별 수농도(1 ~ 8월)는 그림 3.3.9와 같다. 장비 장애와 WCCAP 비교실험으로 인해 5 ~ 7월과 9월 이후에는 관측이 수행되지 못하였다. 1 ~ 4월에 비해 7 ~ 8월은 입자 수농도가 높아 이 기간의 입자 생성이 활발했던 것으로 해석된다.

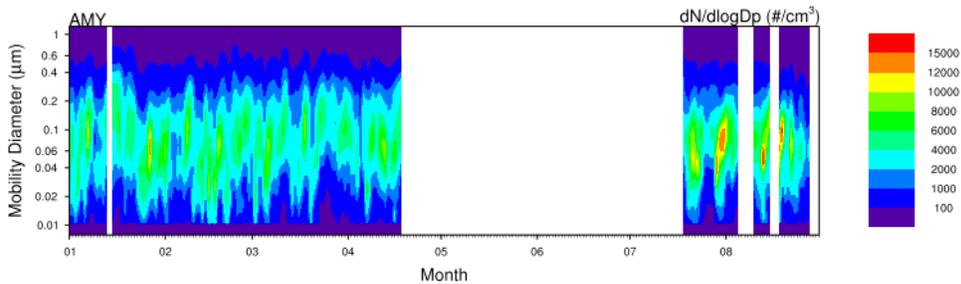


그림 3.3.9 2018년 안면도 미세입자 크기별 수농도 분포(개/cm³).

### 3.3.2 에어로졸 광학특성

#### 가. 에어로졸 광산란계수

광산란계수측정기(TSI model 3563)는 가시영역 세 파장(450, 550, 700 nm)의 입자 산란정도를 Beer-Lambert 법칙을 적용하여 에어로졸 광산란계수(Total scattering coefficient)와 에어로졸 후방산란계수(Back scattering coefficient)를 산출한다. 광산란계수측정기는 흡입부, 산란부, 측정부로 구분된다. 흡입부는 자동밸브(automated valve)와 HEPA(High Efficiency Particulate Air) 필터로 구성되며, 55분 동안 에어로졸이 포함된 공기의 산란계수를 관측하고, 나머지 5분은 HEPA 필터를 통해 에어로졸이 제거된 공기의 산란계수를 관측하여 에어로졸의 광산란계수를 산출한다. 산란부는 할로겐램프, 후방산란셔터, 참조 변환기로 구성되며, 흡입된 공기를 할로겐램프로 산란시키고, 후방산란셔터로 광산란계수와 후방광산란계수를 구별한다.

에어로졸 광산란계수( $\sigma_{sp}$ )는 Anderson et al.(1996)에서 제시한 방법으로 아래와 같이 구해진다.

$$\sigma_{sp} = K_2 C_m - W - \sigma_{s-air}(T, P) \quad (\text{식 3.5})$$

위 식에서  $K_2$ 는 보정계수,  $C_m$ 은 광자수,  $W$ 는 기기 내부에 의한 산란,  $\sigma_{s-air}(T,P)$ 는 건조대기 온도( $T$ ), 압력( $P$ ) 상태에서 알려진 대기(공기)의 광산란계수이다. 산란계수를 알고 있는 스펠(span) 가스인 CO<sub>2</sub>의 광자수를 관측하여  $K_2$ 를 구하여 기기에 대한 검·교정을 실시한다. 매월 1회 스펠 체크를 하였고, 필요 시 교정하였다.

광산란계수는 표준대기상태와 기기보정이 필요하며, 2017년 보고서부터 이 보정을 적용하였다. 표준대기상태(0°C, 1013.25 hPa) 보정은 관측기기에서 관측하는 온도와 압력을 이용하여 계산하였으며, 보정식은 아래와 같다 (Anderson and Ogren, 1998).

$$\sigma(T, P) = \sigma(STP) \frac{273.15}{T} \frac{P}{1013.25} \quad (\text{식 3.6})$$

여기서  $\sigma$ 는 광산란계수, T, P는 온도와 압력, STP는 표준대기 상태를 의미한다. 그리고 광산란계수측정기는 각도의 비이상적인 기기 특성으로 인해 보정계수(Angular Correction Factor)가 필요하다. 보정계수를 구하는 과정은 Anderson and Ogren (1998)을 참고하여 적용하였다.

2018년 안면도에서 관측한 에어로졸 광산란계수(550 nm)의 월변화를 그림 3.3.10에 나타내었다. 월평균 에어로졸 광산란계수는 54.4 ~ 131.6 Mm<sup>-1</sup>을 보였으며, 월평균 최댓값과 최솟값은 각각 3월과 10월에 나타났다. 1월의 짙은 연무와 11월 황사(그림 3.3.8)로 인해 1월과 11월은 지난 10년 평균과 유사하지만(3% 차이) 그 외의 월평균은 과거 평균에 비해 8% ~ 63% 낮았고, 특히 9월과 10월의 에어로졸 광산란계수는 과거의 약 40% 수준이었다.

에어로졸 광산란계수의 2018년 연평균은 76.2 Mm<sup>-1</sup>으로 관측 이래로 가장 낮으며, 최근 3년간 유사한 값을 보이고 있다(그림 3.3.11).

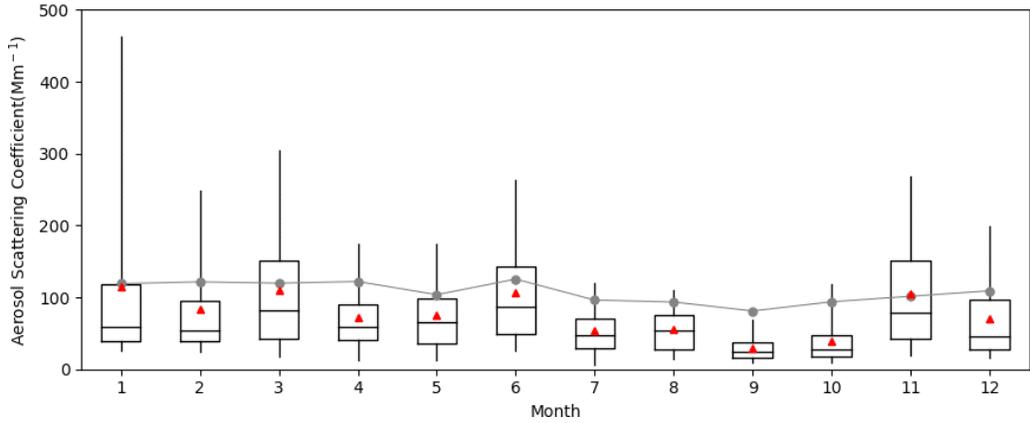


그림 3.3.10 안면도의 550 nm 광산란계수 월변화(Mm<sup>-1</sup>). 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년 평균(점-선).

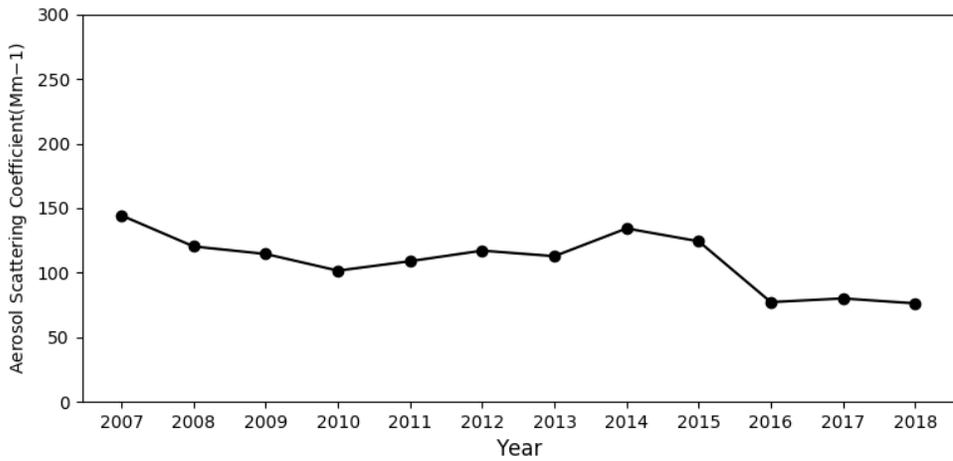


그림 3.3.11 안면도 550 nm 광산란계수(Mm<sup>-1</sup>)의 최근 연평균 변화.

지상 에어로졸 옹스트롬 지수( $\text{\AA}$ )는 광산란계수의 파장 의존도를 나타내는 것으로 다음과 같은 관계가 있다.

$$\sigma_{sp} \propto C\lambda^{-\text{\AA}} \quad (\text{식 3.7})$$

여기서  $\sigma_{sp}$ 는 파장별 에어로졸 광산란계수,  $C$ 는 산란정도를 나타내는 상수(산란효율),  $\lambda$ 는 파장이다. 위의 식에 로그를 취하고, 파장에 따른 광산란계수를 유한차분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathring{A} = \frac{\log \sigma_{sp}(\lambda_1) - \log \sigma_{sp}(\lambda_2)}{\log \lambda_2 - \log \lambda_1} \quad (\text{식 3.8})$$

위의 식으로부터 광산란계수측정기에서 산출되는 세 파장(450, 550, 700 nm) 중 450과 700 nm 광산란계수로부터 지상 에어로졸의 산란 옹스트롬 지수(Ångström Exponent:  $\alpha$ )를 구하였다. 산란 옹스트롬 지수는 에어로졸의 상대적인 크기 정보를 알려주며, 이 값이 작을수록 큰 입자가 우세하다고 해석할 수 있다.

2018년 안면도에서 관측한 월평균 에어로졸 산란 옹스트롬 지수를 그림 3.3.12에 보였다. 2018년에 에어로졸 옹스트롬 지수의 월평균은 1.15 ~ 1.51이며 최댓값은 4월, 최솟값은 1월에 관측되었다. 과거 10년 평균과 비교할 때 대체로 12% ~ 25% 낮은 수준이었다. 2007 ~ 2018년의 에어로졸 산란 옹스트롬 지수 연평균은 2016년 이후로 점차 낮아져 2018년에 1.34로 가장 낮았다(그림 3.3.13).

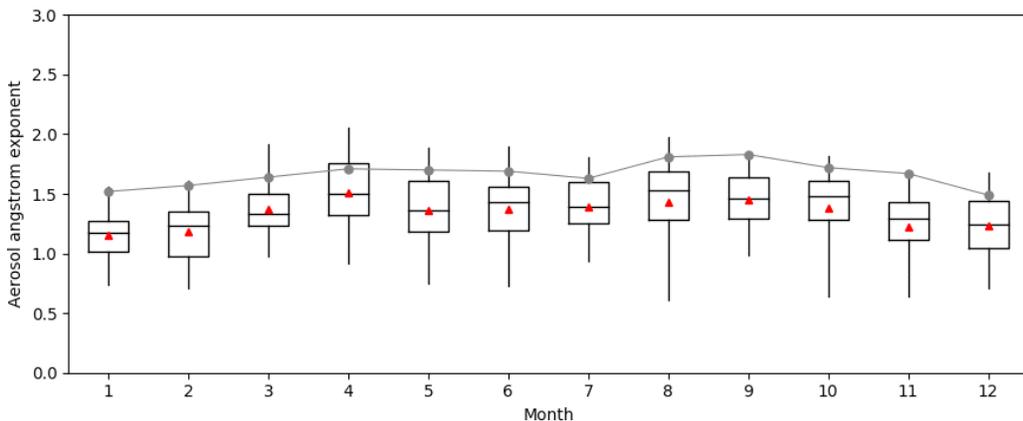


그림 3.3.12 안면도의 450 ~ 700 nm 옹스트롬 지수 월변화. 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년 평균(점-선).

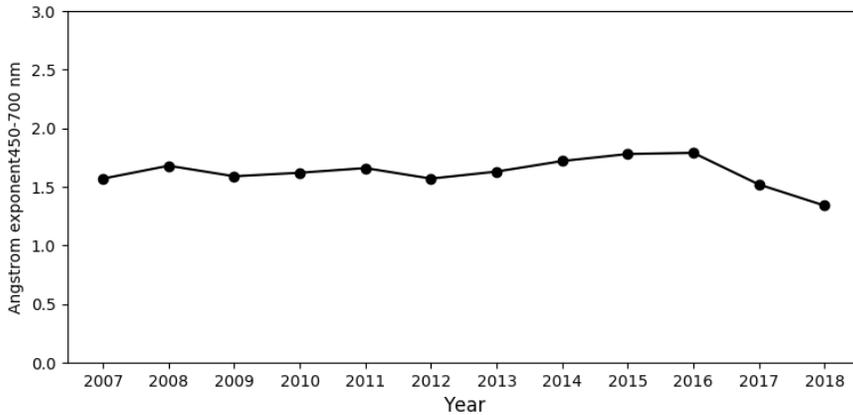


그림 3.3.13 안면도 산란 옹스트롬 지수(470 ~ 700 nm)의 최근 연평균 변화.

#### 나. 에어로졸 광흡수계수

에어로졸 광흡수계수측정기(aethalometer, Magee Sci., AE-31)는 석영필터에 에어로졸을 포집하여 370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm의 7파장에서 빛의 감쇄도(ATN)를 관측한다(Hansen et al., 1984).

$$ATN = 100 \ln \left( \frac{I_0}{I} \right) \quad (\text{식 3.9})$$

여기서  $I$ 와  $I_0$ 는 각각 처음 빛의 세기와 필터에 포집된 에어로졸로 인해 감쇄된 빛의 세기를 뜻한다. 에어로졸이 필터에 일정 시간( $\Delta t$ ) 동안 포집되면, 감쇄 계수( $\sigma_{ATN}$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_{ATN} = \frac{A}{100Q} \frac{\Delta ATN}{\Delta t} \quad (\text{식 3.10})$$

여기서  $A$ 는 에어로졸이 필터에 포집된 면적,  $Q$ 는 포집공기의 유량이다. 검댕(Black Carbon)의 질량농도는 다음과 같이 산출된다.

$$BC_{ATN} = \frac{b_{ATN}}{\alpha_{ATN}}, \quad \alpha_{ATN} [m^2 g^{-1}] = \frac{14625}{\lambda [nm]} \quad (\text{식 3.11})$$

안면도에서는 2001년부터 검댕의 농도를 관측해오고 있다. 2001년 1월부터 2010년 8월까지의 1개 파장의 검댕 농도를 관측하였고(aethalometer, Magee Sci., AE-16), 2010년 9월부터 현재까지는 7파장의 검댕 농도를 관측하는 장비(aethalometer, Magee Sci., AE-31)를 운영하고 있다.

광흡수계수측정기는 20°C, 1013.25 hPa에서의 유량으로 관측되고 있으므로 온도만 표준대기 상태(0°C)로 변환한다. 표준대기상태 보정은 광산란계수에 적용했던 식을 적용한다.

검댕의 농도를 광흡수계수( $\sigma_{ap}$ )로 변환하기 위해 GAW 보고서(Report No. 227)에서 제시한 바와 같이 다음 식을 이용하였다.

$$\sigma_{ap} = b_{ATN}/C_0 \quad (\text{식 3.12})$$

여기서,  $C_0$ 는 보정상수(single multiplier)로 3.5를 적용하였으며, 약 25% 불확실도를 보인다.

2018년 안면도에서 관측한 880 nm 검댕 농도를 그림 3.3.14에 나타내었다. WCCAP 국제비교실험과 이를 위한 국제운송으로 인해 10월과 11월에는 관측이 수행되지 않았다. 2018년 검댕농도 월평균은 0.44(7월) ~ 1.13(3월)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 관측되었다. 각 월의 평균 검댕 농도는 과거(2008 ~ 2017년) 평균보다 2% ~ 53% 낮았다. 광흡수계수(550 nm) 월평균은 3.2(7월) ~ 8.9(1월)  $\text{Mm}^{-1}$ 으로 관측되었으며, 과거(2011 ~ 2017년) 평균보다 19% ~ 54% 낮았다(그림 3.3.15).

2007 ~ 2018년 동안 검댕의 농도는 2007년과 2013년에 1.21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며 점차 감소하는 추세를 보이다 2018년에 0.70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다(그림 3.3.16). 에어로졸 광흡수계수(550 nm)의 연평균은 2012년에 가장 높고(9.4  $\text{Mm}^{-1}$ ), 2016년 이후 감소하여 2018년에 5.4  $\text{Mm}^{-1}$ 로 가장 낮았다(그림 3.3.17).

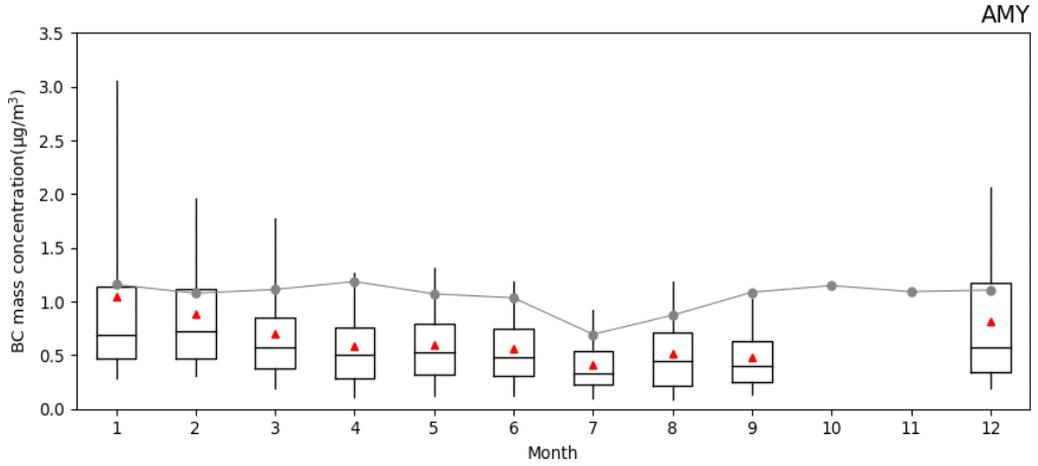


그림 3.3.14 안면도의 880 nm 검댕 월변화( $\text{Mm}^{-1}$ ). 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2008 ~ 2017년 평균(점-선).

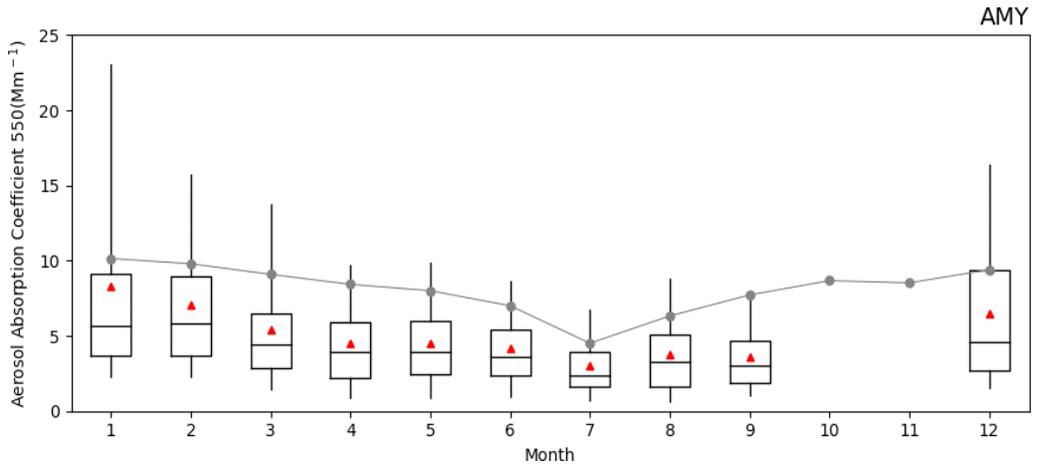


그림 3.3.15 안면도의 550 nm 광흡수계수 월변화( $\text{Mm}^{-1}$ ). 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95% 값, 상자 양끝은 25%, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 삼각형은 평균)와 2011 ~ 2017년 평균(점-선).

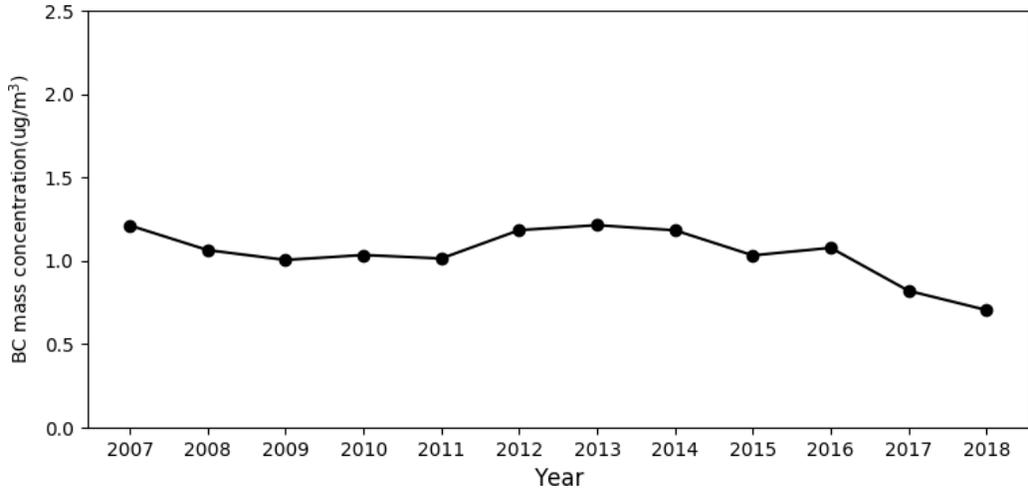


그림 3.3.16 안면도 880 nm 검댕의 최근 연평균 변화.

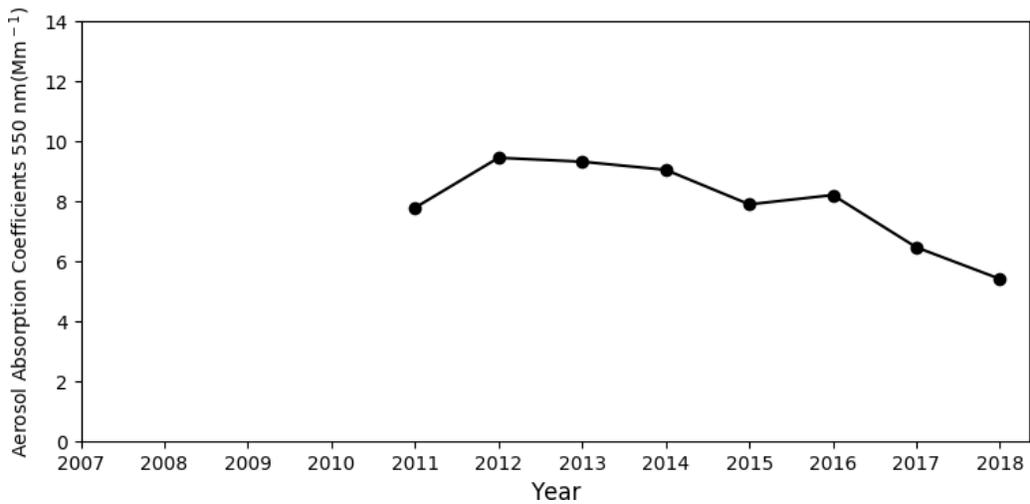


그림 3.3.17 안면도 550 nm 광흡수계수의 최근 연평균 변화.

## 다. 에어로졸 광학깊이(AOD)

### 1) 기후변화감시소

에어로졸 광학깊이(Aerosol optical depth, AOD)는 태양복사가 대기의 상한에서 지표까지 도달하는 동안 대기 중에 존재하는 여러 성분들에 의해 감쇄되는 효과를

나타내는 척도이다. 이는 에어로졸과 복사강제력의 평가를 위한 가장 중요한 단일요소이다. AOD는 태양광도계(Sun-Photometer)나 필터복사계(Filter Radiometer) 등의 관측기기를 이용하여 태양으로부터 직달 태양복사의 스펙트럼 투과를 관측한다.

안면도에서는 AOD 산출을 위하여 2010년 11월에 GAW-PFR (Precision Filter Radiometer, 스위스 PMOD) 장비를 설치하였고, 2011년 12월에 고산과 울릉도에 추가 설치하였다. 2018년 고산의 관측장비는 검교정으로 인해 11월 7일 이후의 관측자료가 존재하지 않는다.

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

$$AOD = \delta_A = \frac{\log(S_0) - \log(S) - 2\log(R) - \delta_R m_R - \delta_0 m_0}{m_A} \quad (\text{식 3.13})$$

이 공식에서  $S$ 는 관측된 신호이고  $S_0$ 는 교정상수이다.  $R$ 은 천문단위로 표시되는 태양과 지구간의 거리이며,  $m_A$ 는 에어로졸 air mass이다.  $\delta_R$ 과  $\delta_0$ 는 공기분자와 오존의 광학깊이이며,  $m_R$ 과  $m_0$ 는 각각의 air mass이다.

본 보고서에서는 2018년 안면도, 고산, 울릉도에서 관측된 에어로졸 광학깊이, 옹스트롬 지수를 중심으로 분석하였다. 최종적인 품질관리는 WORCC에서 이루어지며 본 보고서에서는 WORCC에서 제공하는 기본적인 알고리즘을 통해 산출한 결과를 수록하였다.

그림 3.3.18과 3.3.20은 안면도에서 2013년부터 2018년까지 관측한 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수를 보여준다. 2013년 1월 ~ 2014년 4월의 관측결과는 WORCC에서 품질관리가 완성된 자료(○모양)이며, 2014년 5월 ~ 2018년은 자체 분석자료(●모양)이다. 그림 3.3.19와 3.3.21은 안면도의 2018년 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 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 주로 작은 에어로졸의 영향을 약하게 받은 것으로 나타났다.

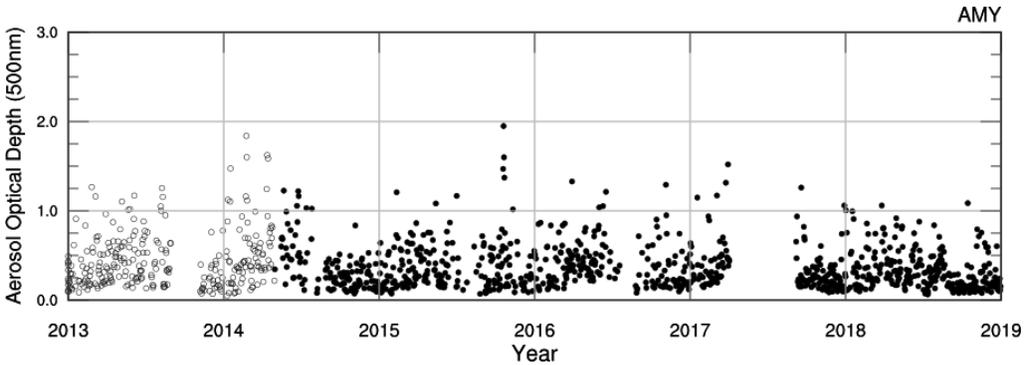


그림 3.3.18 안면도의 에어로졸 광학깊이(2013 ~ 2018년).

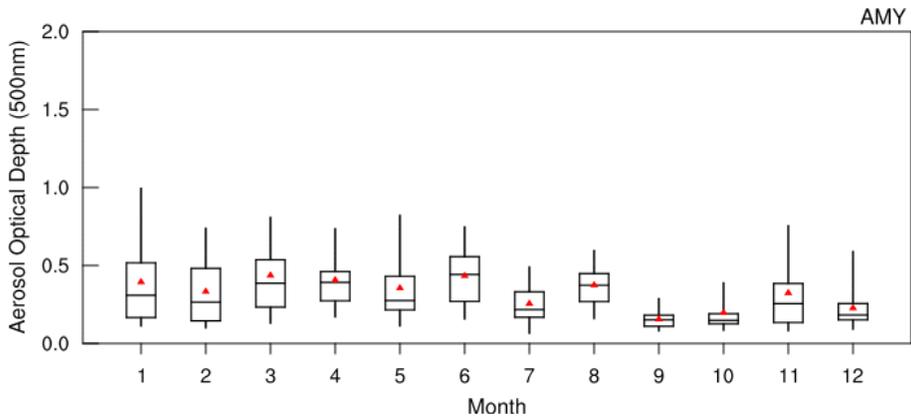


그림 3.3.19 2018년 안면도의 에어로졸 광학깊이 월 변동성(선의 양끝: 5%, 95%, 상자 양끝: 25%, 75%, 상자가운데 선: 중간값, 빨간 삼각형: 월 평균값).

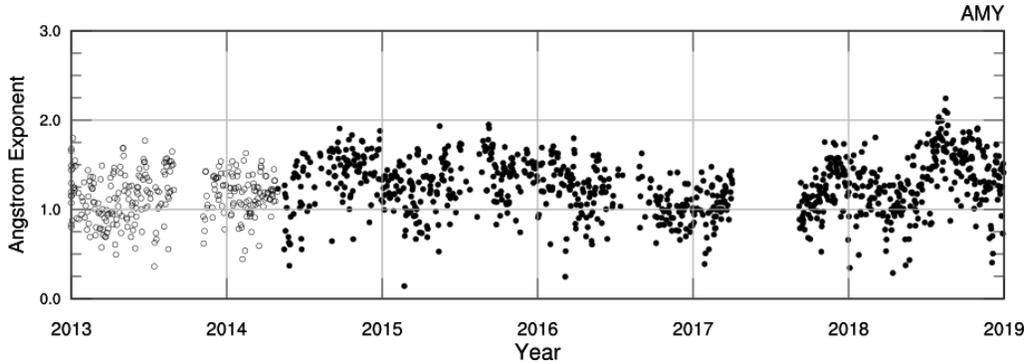


그림 3.3.20 안면도의 에어로졸 옹스트롬 지수(2013 ~ 2018년).

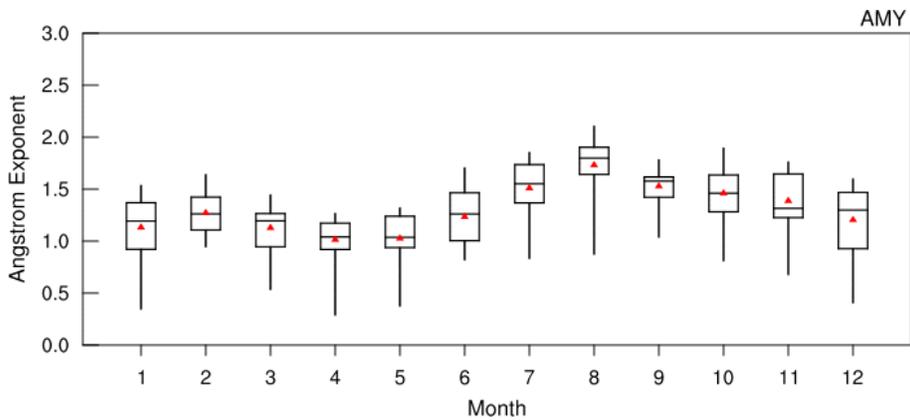


그림 3.3.21 2018년 안면도의 에어로졸 옹스트롬 지수 월 변동성(선의 양끝: 5%, 95%, 상자양끝: 25%, 75%, 상자가운데 선: 중간값, 빨간 삼각형: 월 평균값).

고산의 PFR에서는 2017년 6월부터 500 nm의 감도에 문제가 발견되어 500 nm를 제외한 3 파장대(368, 412, 862 nm)를 이용하여 옹스트롬 지수를 산출하였다. 그 다음, 옹스트롬 지수를 기울기로 하고 412 nm와 862 nm의 광학 깊이를 이용하여 각각 500 nm의 광학 깊이를 추정하였고, 추정된 두 개의 500 nm 광학 깊이를 산술평균하여 그림 3.3.22와 3.3.23에 나타내었다. 즉, 2017년 6월부터 12월 자료는 2017년 지구대기감시보고서의 내용과 달라져 불가피하게 수정하였다. 그림 3.3.22는 고산에서 2013년부터 2018년까지 관측한 500 nm에서의 에어로졸 광학 깊이를 보여준다. 그림 3.3.23은 고산에서 2018년에 관측한 에어로졸 광학 깊이의 월변동성을 나타낸 것이다. 한편 2018년 11월 7일부터 기기 교정으로 인한 공백이 있었다.

이 그림들을 통해 대체로 봄철과 여름철에 에어로졸 광학깊이의 값은 높은 경향을 보이고, 가을철에서 겨울철에는 작은 경향을 알 수 있다. 봄철에는 황사 등의 영향으로, 여름철에는 흡습성장하는 에어로졸의 영향으로 인해 에어로졸 광학깊이가 높아진 것으로 사료된다. 안면도와 마찬가지로 하반기로 갈수록 에어로졸의 광학깊이는 낮게 관측되었다.

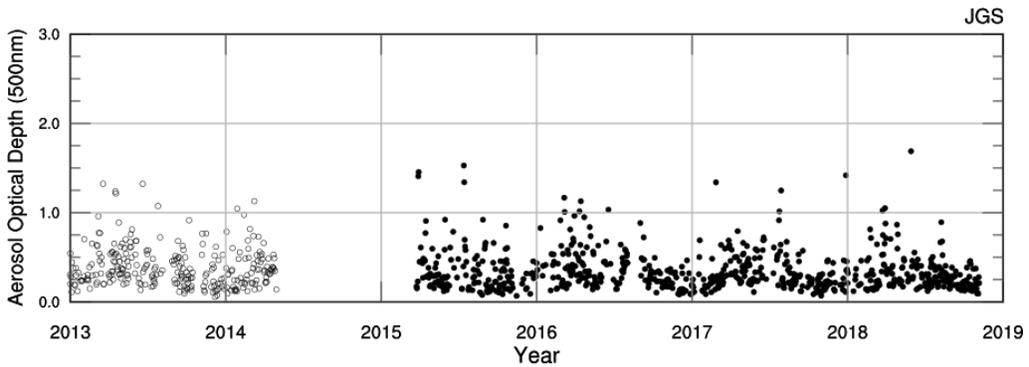


그림 3.3.22 고산의 에어로졸 광학깊이(2013 ~ 2018년).

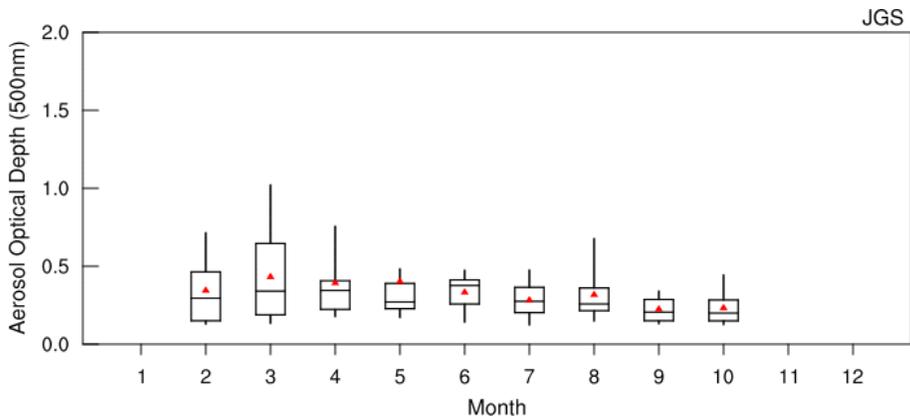


그림 3.3.23 2018 고산의 에어로졸 광학깊이 월 변동성(선의 양끝: 5%, 95%, 상자양끝: 25%, 75%, 상자가운데 선: 중간값, 빨간 삼각형: 월 평균값).

그림 3.3.24는 고산에서 2013년부터 2018년까지 관측한 옹스트롬 지수를 보여준다. 앞서 설명한대로, 2017년 6월부터는 3파장(368, 412, 862 nm)을 이용하여 산출된 옹스트롬 지수를 사용하였다. 옹스트롬 지수는 대체로 봄철에 낮고 가을, 겨울철에는 2.0 이상의 값을 보이며 높게 나타났다. 종합적으로 고산

에서 에어로졸의 광학특성은 안면도와 유사하게 상반기에는 황사와 같은 조대입자의 영향을 받다가 하반기로 갈수록 상대적으로 미세한 입자의 영향을 약하게 받은 것으로 사료된다.

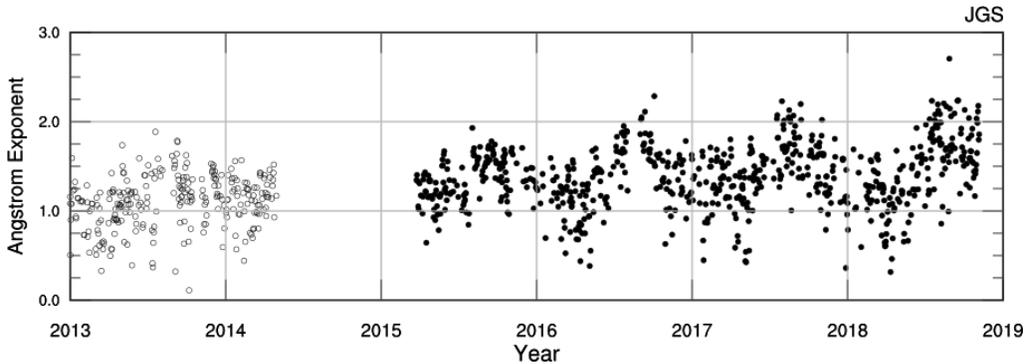


그림 3.3.24 고산의 에어로졸 옹스트롬 지수(2013 ~ 2018년).

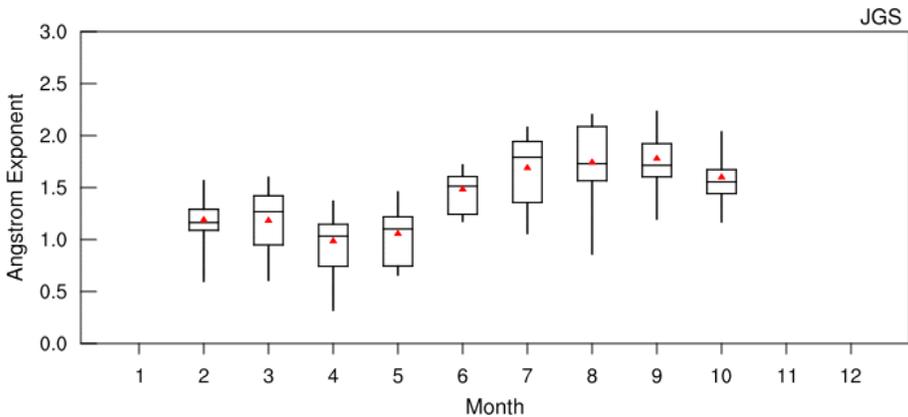


그림 3.3.25 2018년 고산의 에어로졸 옹스트롬 지수 월 변동성(선의 양끝: 5%, 95%, 상자양끝: 25%, 75%, 상자가운데 선: 중간값, 빨간 삼각형: 월 평균값).

그림 3.3.26과 3.3.28은 울릉도의 2013년부터 2018년까지의 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수를 보여주고 있으며, 그림 3.3.27과 3.3.29는 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬 지수의 월변동성을 나타내고 있다. 울릉도의 PFR도 2018년 7월부터 862 nm의 감도가 급격히 낮아졌으며, 2018년 8월부터는 412 nm의 감도가 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. 울릉도에서는 에어로졸 광학깊이가 안면도와 고산과 유사하게 봄철 중심의 상반기에 높게 나타나고 하반기로 갈수록 낮게 나타났다. 그러나 옹스트롬 지수는 안면도와 고산에서와 반대로 상반기에 높고 8월 이후로 갈수록 낮게 나타났다. 이는 옹스트롬 지수를 산출함에 있어 두 파장만의 광학깊이를 사용하는 한계로 인한 것일 수도 있어서 울릉도의 에어로졸 광학특성으로 논의하기에는 부족한 실정이다.

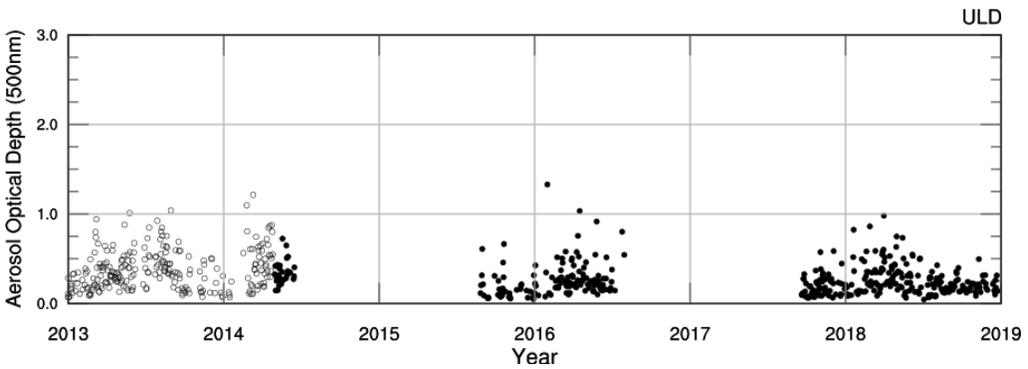


그림 3.3.26 울릉도의 에어로졸 광학깊이(2013 ~ 2018년).

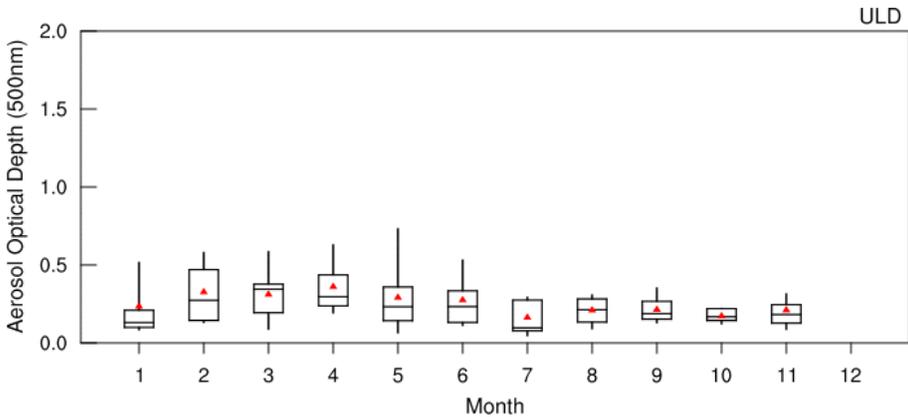


그림 3.3.27 2018년 울릉도의 에어로졸 광학깊이 월 변동성(선의 양끝: 5%, 95%, 상자 양끝: 25%, 75%, 상자가운데 선: 중간값, 빨간 삼각형: 월 평균값).

GAW-PFR의 관측에 있어서 기기 센서의 감도가 곳곳에서 문제가 노출되고 있으나 기기 제작사인 세계복사센터(PMOD-WRC)에서도 센서의 필터 재고가

부족하다는 답신(2018.12.14.)이 와서 당분간 간접적인 방법으로 광학깊이와 옹스트롬 지수를 산출해야하는 실정이다.

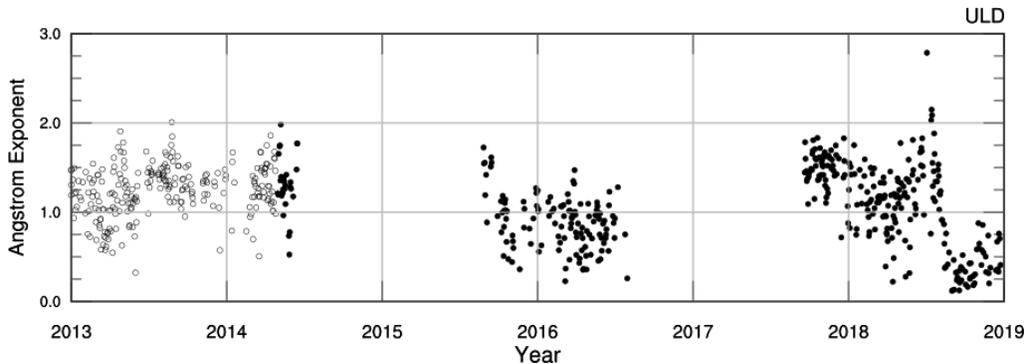


그림 3.3.28 울릉도의 에어로졸 옹스트롬 지수(2013 ~ 2018년).

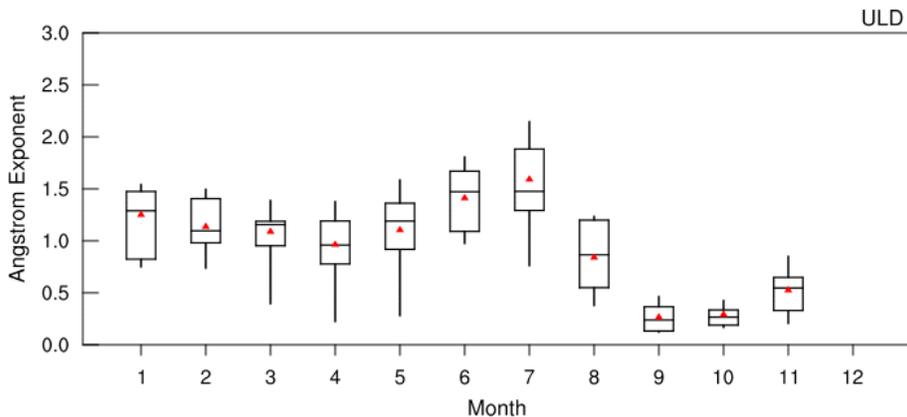


그림 3.3.29 2018년 울릉도의 에어로졸 옹스트롬 지수 월 변동성(선의 양끝: 5%, 95%, 상자양끝: 25%, 75%, 상자가운데 선: 중간값, 빨간 삼각형: 월 평균값).

## 2) 서울(위탁관측소)

연세대학교 서울 위탁관측소는 2004년부터 현재까지 Brewer 분광광도계 (SCI-TEC #148)를 이용하여 자외선 영역의 AOD를 관측하고 있다. Brewer 분광광도계는 290.5 nm부터 363.0 nm까지 관측하고 있고, 그 중에서 직달관측을 통한 320.1 nm의 파장을 이용하여 AOD를 산출하고 있다. Brewer 분광광도계는 일별로 계산된 태양 천정각을 따라서 관측을 수행하기 때문에, 강수가 있는 날에는 직달 관측을 수행할 수 없고, 천정 관측만 수행이 가능하다. 3월부터 관측이 중지된 2018년도의 전체 관측일은 60일이다.

그림 3.3.30은 2004년 3월부터 2018년 2월까지의 일평균 AOD의 시계열 이고, 그림 3.3.31은 장기간(2004 ~ 2018년) AOD의 월평균과 표준편차를 표시하였다. 장기 월평균의 월 변화는 여름철에 최대, 겨울철에 최소를 보인다. 이는 여름철 습도가 높기 때문에 흡습성장으로 AOD가 높아짐을 유추할 수 있다.

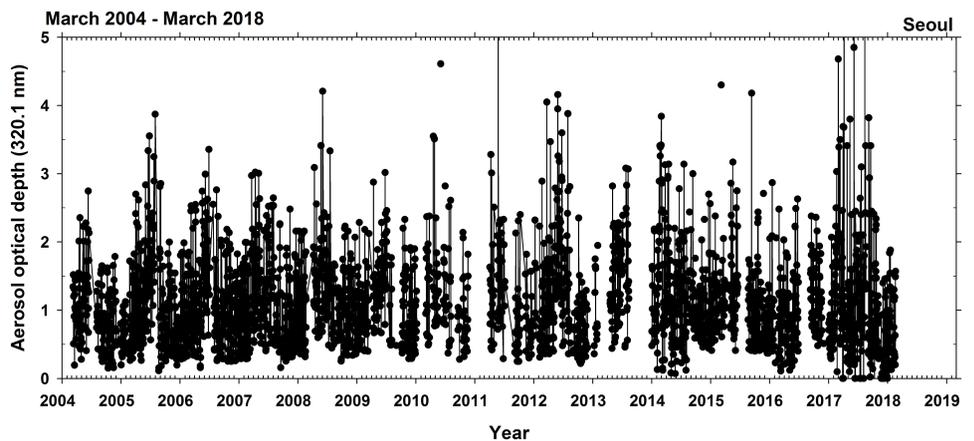


그림 3.3.30 일평균 AOD (320.1 nm)의 시계열(2004. 3. ~ 2018. 3.).

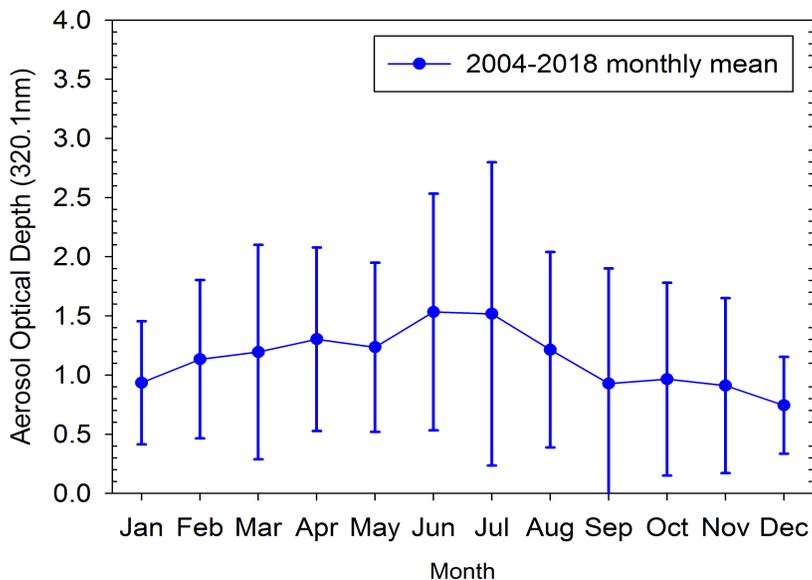


그림 3.3.31 서울 상공 310 nm AOD의 2004년부터 2018년도의 월평균과 표준편차 (2018년 자료는 2월까지의 자료만 사용되었음).

### 3) 광주(위탁관측소)

광주과학기술원은 지난 2004년부터 현재까지 CIMEL사의 태양 파장별 일사계(Sun/sky radiometer 또는 Sunphotometer, 이하 선포토포미터)를 광주과학기술원 다산빌딩 옥상(35.22°N, 126.84°E)에 설치하여 운영 중이다. 본 장비는 태양광을 사용하며, 구름이 있을 경우 제거하고 관측하여 AOD를 산출한다. 또한, inversion 알고리즘을 통해 에어로졸의 광학적 특징인 옹스트롬 지수, 에어로졸 입자의 크기 분포(Aerosol volume size distribution), 단산란알베도(Single scattering albedo) 등 대기 에어로졸의 물리적 및 광학적 특성에 대한 인자를 산출할 수 있다. 현재 광주과학기술원의 선포토포미터는 전 지구적 에어로졸의 광학적 특성 산출 및 인공위성의 자료의 검보정에 활용을 위해 미 항공우주국(NASA)의 에어로졸 로봇 네트워크(AErosol RObotic NETwork, AERONET)에 소속되어 있으며 AERONET 사이트(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)에서 업데이트 되고 있어 사용자에게 실시간으로 데이터를 제공하고 있다. 태양 파장별 일사계의 관측 파장은 자외선 영역인 340 nm 파장과 가시광선 영역의 380, 440, 500, 675, 870 nm의 5개 파장과 적외선 영역인 1020 nm 파장에서의 태양 광도를 관측 중에 있다. AERONET에서는 2018년부터 Version 3 데이터를 배포하고 있는데, 이 버전에는 입자의 비구형성을 파악할 수 있는 440, 675, 870 및 1020 nm에서 편광소멸도(Depolariation ratio)를 포함하고 있다.

표 3.3.1에서와 같이 2004년부터 관측을 시작한 광주과학기술원에서의 선포토포미터 관측은 2018년까지 총 373일의 관측 데이터를 축적하였다. 본 보고서에서는 이 데이터를 이용하여 2004년부터 2018년까지 광주 지역에서 대기 에어로졸의 AOD와 광학적 특성 변화를 살펴보았다. 이를 위하여 편광소멸도와 입자 크기 분포 자료를 이용하여 관측된 대기 에어로졸의 광학적 두께를 황사, 조대 및 미세 오염입자로 구분된 AOD를 산출하는 새로운 방법을 개발하여 관측 데이터에 적용하여 연도별 및 계절별 특성 변화를 살펴보았다.

표 3.3.1 연도별 관측일 수

연도	관측일수	연도	관측일수
2004	27	2012	53
2005	29	2013	32
2006	0	2014	61
2007	19	2015	5
2008	6	2016	37
2009	54	2017	16
2010	9	2018	9
2011	16		
총관측일		373 일	

먼저 새롭게 개발된 종류별(황사, 조대 및 미세 오염입자) 광학적 두께를 산출하는 방법에 대하여 아래에 설명되어 있다.

대기 에어로졸의 종류별 광학적 두께 산출은 편광소멸도와 입자크기분포를 이용하여 산출할 수 있다. 먼저 편광소멸도를 이용하여 전체 에어로졸에서 황사가 차지하는 비율을 알 수 있는 황사비( $R_D$ )를 식 3.14으로부터 산출할 수 있다.

$$R_D = \frac{(\delta_P - \delta_2)(1 + \delta_1)}{(\delta_1 - \delta_2)(1 + \delta_P)} \quad (\text{식 3.14})$$

여기서,  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 는 각각 순수 황사와 황사 입자가 포함되지 않은 순수 오염입자로서 선행연구로부터 산출된 경험값을 적용한다. 본 연구에서는 Noh et al.(2017)의 연구에서 산출된 0.32를  $\delta_2$ 로 적용하였다.  $\delta_1$ 은 0.01을 적용하였다.  $\delta_P$ 가  $\delta_1$ 보다 낮거나  $\delta_2$ 보다 높은 값이 산출될 경우에  $R_D$ 는 각각 0과 1로 적용하였다.

산출된  $R_D$ 를 활용하여 황사와 오염입자를 포함하는 전체 광학적 두께(AOD)에서 황사 입자의 광학적 두께(DUST AODT)를 식 3.15로 산출하였다.

$$AOD_{Dust} = R_D \times AOD_T \quad (\text{식 3.15})$$

조대 오염입자(Coarse-mode pollution:  $AOD_{coarse}$ , CP AOD)와 미세 오염입자(Fine-mode pollution:  $AOD_{fine}$ , FP AOD)의 AOD는 아래의 식으로 산출되었다.

$$AOD_{coarse} = AOD_T \times (CMF - R_D) \quad (\text{식 3.16})$$

$$AOD_{fine} = AOD_T - AOD_{DUST} - AOD_{coarse} \quad (\text{식 3.17})$$

여기서, CMF는 입자크기자료로부터 산출되는 조대입자의 농도를 말한다.

광주지역에서 관측된 AOD의 연도별 변화를 먼저 살펴보았다. 2006년을 제외하고 매년 관측이 지속적으로 수행되었으나 표 3.3.1에서 보여 주듯이 전체 관측일 373일로 관측일이 매우 제한되어 연도별 경향을 파악하기에는 무리가 있다. 본 보고서에서 언급되는 연도별 AOD의 변화는 이와 같은 점을 고려하고 경향성을 판단해야 할 것이다.

그림 3.3.32는 앞에서 설명한 대기 에어로졸 종류별 AOD를 산출하는 방법을 적용하여 440 nm에서의 각 종류별 AOD를 연도별로 누적하여 표시한 것 (그림 3.3.32(위))과 각 에어로졸 종류별 AOD가 전체 AOD에서 차지하는 비율을 표시한 그림(그림 3.3.32(아래))을 보여주고 있다. 연도별로 관측일의 수와 관측 계절의 차이가 있어서 절대적 비교는 힘들지만 전체에서 가장 높은 비율을 보이는 것은 미세 오염 입자로서 연도별로 70% ~ 90%의 비율을 보이고 있다. 조대 오염입자의 경우에는 그 비율이 10% ~ 15% 정도로 연도별로 비슷한 비율을 보이고 있다. 황사의 AOD는 최대 20%에서 최소 3%로 연도별로 차이가 나고 있다. 연도별 차이가 발생하는 것은 황사의 경우 봄에 높은 비율로 발생하는데, 앞에서 언급한 바와 같이 관측일수의 제한이 있어 봄에 관측한 데이터가 많을 경우 황사의 비율이 증가하고 봄을 제외한 다른 계절의 관측일이 많은 경우 그 비율이 감소한 것으로 판단된다.

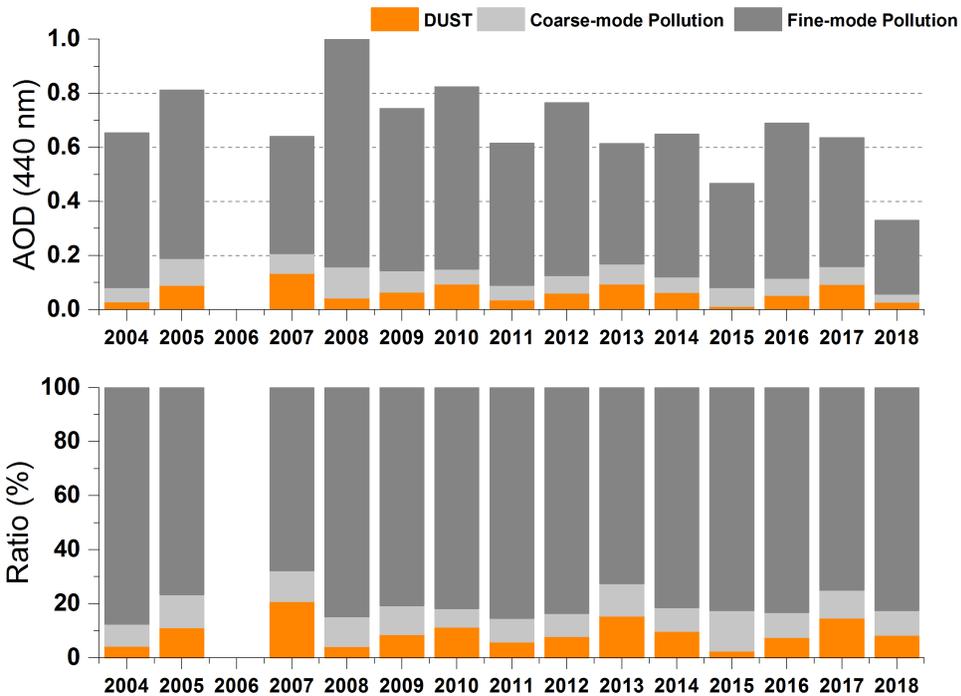


그림 3.3.32 연도별 AOD (위). 황사(DUST)는 주황색, 조대 오염입자(Coarse-mode Pollution)은 연한 회색, 미세 오염입자(Fine-mode Pollution)은 진한 회색으로 구분. 각 종류별 AOD가 전체 AOD에서 차지하는 비율(아래).

그림 3.3.33에서는 종류를 구분하지 않은 전체 AOD와 황사, 조대 오염입자 및 미세 오염입자의 연간 AOD 변화를 440 nm와 1020 nm에서 살펴보았다. 각 종류별 연간 변화율 또한 그래프에 함께 표시하였다. 2004년부터 2018년까지 연간 AOD는 약하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 파장대 별로 연간 변화율은 440 nm와 1020 nm에서 각각  $-0.0215/\text{yr}$ 과  $-0.079/\text{yr}$ 로 감소하는 경향을 보이고 있다. 파장별로 연도별 감소 경향의 차이가 나는 것은 440 nm에서의 AOD가 1020 nm에서의 AOD보다 높은 값을 보이기 때문에, 이 파장별 AOD의 차이로 발생하는 것이며 두 파장에서 모두 유사한 감소경향을 보이는 것으로 판단된다. AOD의 감소 경향은 위성과 선포토미터 등 원격탐사를 통하여 산출된 AOD의 연간 변화율을 보고한 이전 연구와는 다른 변화량을 보였다. Nam et al., 2017, Zhang et al., 2017, de Leeuw et al., 2018 그리고 Sogacheva et al., 2018은 2004년부터 2015년까지 Moderate Resolution Imaging

Spectroradiometer (MODIS, collection 6) 자료로부터 산출된 한국과 중국을 포함한 동북아시아 지역 AOD의 연간변화율을 분석하여 AOD가 감소경향이 없이 일정한 변화를 보이거나 약간 감소하는 경향이 있다고 밝혔다. 이는 본 관측일의 횡수가 매우 제한되어 발생한 차이로 판단되거나 감소 경향을 판단할 때 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

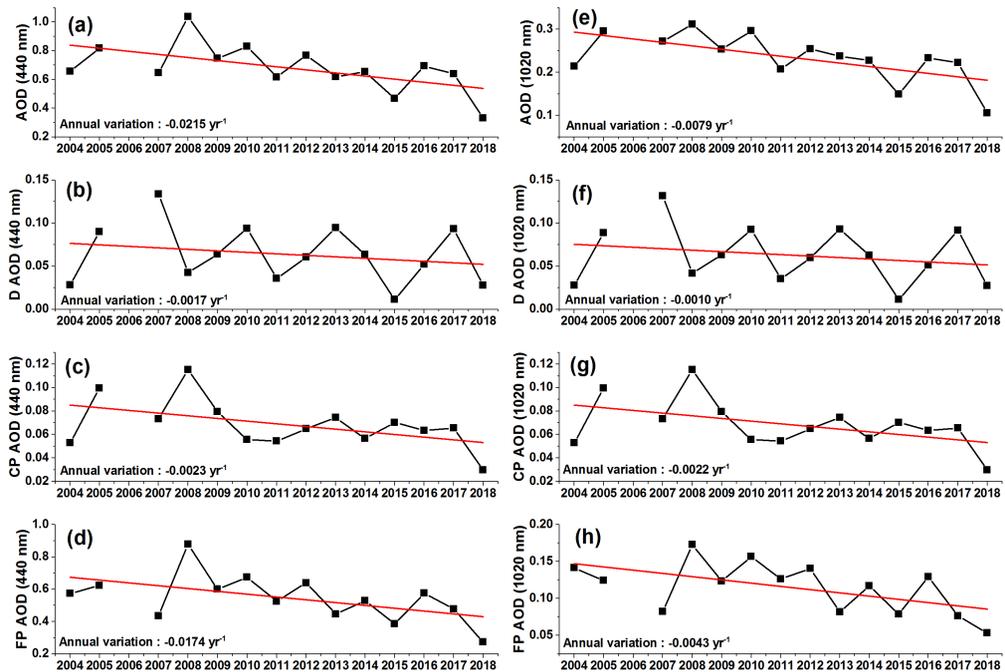


그림 3.3.33 전체 AOD의 연간 변화율과 각 종류별 연간변화율.

대기 에어로졸의 종류를 황사, 조대 및 미세오염입자로 구분한 각각의 AOD도 전체 AOD의 경향과 마찬가지로 감소하는 경향을 보이고 있다.

앞서 언급한 것과 같이 선포토미터를 이용하여 2004년부터 지속적으로 관측이 수행되었으나, 관측일이 매우 제한되어 AOD의 연도별 값은 어떠한 경향성을 찾아내기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 그림 3.3.33에서 보여주는 전체 및 종류별 AOD의 변화는 2004년 이후 AOD가 감소하는 경향을 보여 타 연구에서 밝혀진 동북아시아 지역에서의 AOD 변화 경향과는 약간의 차이가 보이나 전체적인

경향이 일치함을 확인하였다. 하지만, 이 결과가 광주 지역 AOD를 대표한다고는 현재로서는 확인할 수 없다. 따라서 본 보고서에서는 대기 에어로졸의 농도를 표현하는 AOD 외에 다른 물리적 및 광학적 특성 변화를 살펴보고자 하였다.

동북아시아 지역은 계절적으로 주요한 대기 에어로졸의 종류가 다르고 광학적 특성도 변화하게 된다. 예를 들어, 봄의 경우 황사가 많이 발생하고 가을과 겨울에는 오염입자의 농도가 증가하게 된다. 이러한 계절적 특성에 대한 연구는 많은 연구가 이루어져 그 특성에 대하여 밝혀져 있다. 본 보고서에서는 관측일이 제한된 점을 고려하여 먼저 전체 관측 데이터를 월별로 평균을 내어 그 특징이 기존 연구와 일치되는지를 확인하였다.

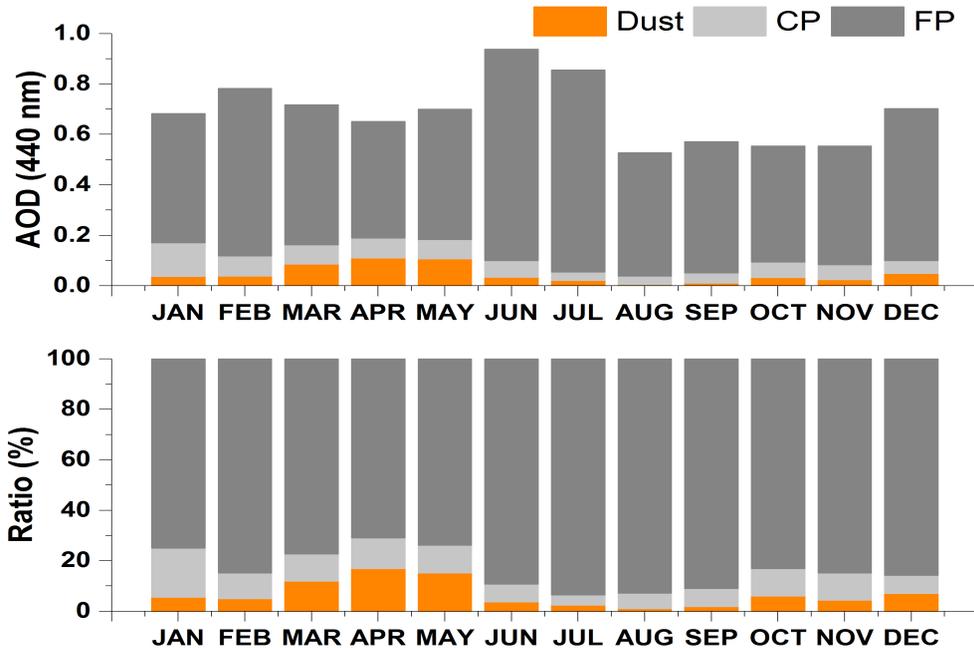


그림 3.3.34 에어로졸 종류에 따른 월별 AOD 변화(위), 각 종류별 비율(아래).

그림 3.3.34는 에어로졸 종류별 AOD를 누적하여 표시한 AOD 변화와 각 종류별로 차지하는 비율을 표시하고 있다. 월별로 가장 높은 AOD는 6월에 관측되었고 가장 낮은 AOD는 8월에 관측되었다. 동북아시아 지역에서의 AOD는 일반적으로 봄(3, 4, 5월)과 여름(6, 7, 8월)에 높은 AOD를 보인다(Wang et

al., 2011, Xia et al., 2006, Kim et al., 2010, Wu et al., 2015). 봄에 높은 값을 보이는 것은 봄에 주로 발생하는 황사의 영향으로 볼 수 있고, 여름에 높은 값을 보이는 것은 계절적 영향으로 높은 상대습도로 인하여 미세입자의 산란효과가 증가된 것으로 보인다. 본 보고서에서는 6월에 높은 AOD가 관측되었다. 이는 일반적인 동북아시아 지역의 AOD 농도 경향과 일치한다. 봄철의 AOD는 기존 연구결과들과 비교하여 상대적으로 낮은 값을 보이고 있지만, 황사의 AOD는 3, 4, 5월에 가장 높은 값을 보이고 여름인 6, 7, 8월에 낮은 값을 보여 전체적으로 계절에 따른 대기 에어로졸의 종류별 농도 특성이 잘 반영되었다고 판단된다.

월별 AOD에서 확인하였듯이 본 관측 데이터들이 동북아시아 지역의 계절적 특성을 잘 반영하고 있다는 결과를 바탕으로 연도별 광학적 특성의 변화를 살펴 보고자 하였다.

그림 3.3.35는 모든 종류 에어로졸을 포함하는 전체 AOD에서 각 종류별 (황사, 조대 및 미세 오염입자)의 AOD가 각각 차지하는 비율을 연평균 자료로 표시하였다. 관측 데이터의 부족으로 명확한 연도별 경향을 나타내기에는 부족한 부분이 있지만 15년간의 데이터 해석을 통하여 추세는 확인할 수 있었다. 황사의 경우 근래에 들어 심각한 황사나 약한 황사의 발생이 줄어들고 있는 추세가 반영되어, 각 연도별로 비율의 변화는 있으나 전체적으로는 약하게 감소하고 있는 추세를 보이고 있다. 하지만, 조대 오염입자와 미세 오염입자는 반대로 약하게나마 증가하고 있는 추세를 보이고 있다.

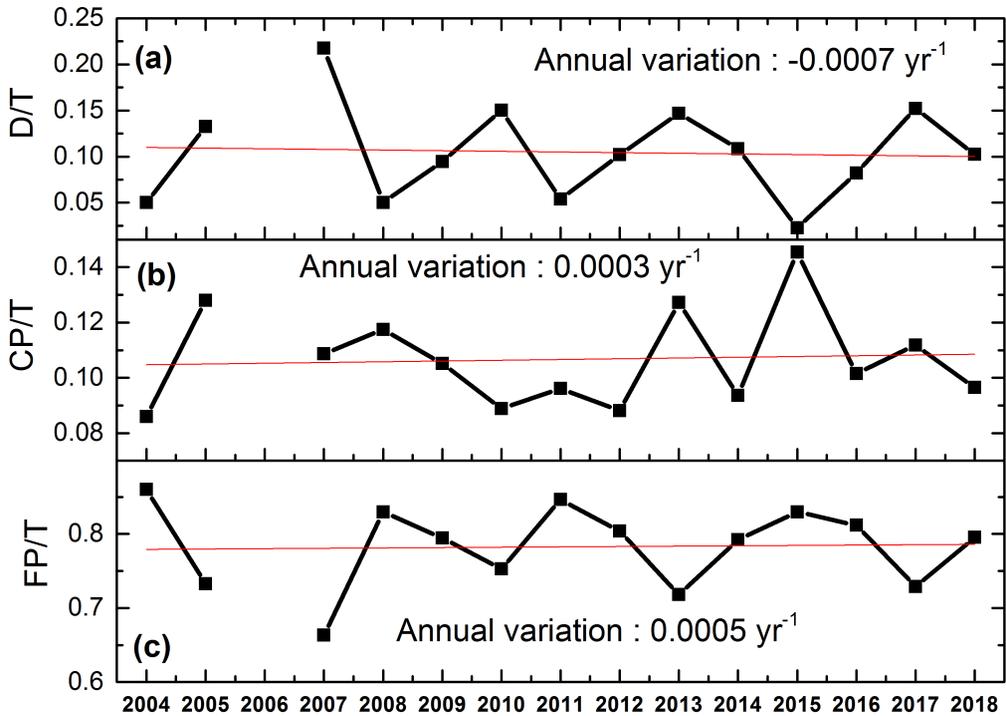


그림 3.3.35 각 종류별 AOD가 전체 AOD에 차지하는 비율의 연간 변화량. (a)황사, (b)조대 오염입자, (c)미세 오염입자.

그림 3.3.36은 각 종류별 AOD가 차지하는 비율을 연도별, 계절(봄, 여름, 가을, 겨울)로 구분하여 변화 추세를 확인하였다. 황사의 경우 봄과 여름에는 증가하는 추세를 보이고, 가을과 겨울에는 감소하는 추세를 보였다. 특히 여름의 경우 증가 추세가 봄에 비하여 확연히 높은 값을 보였는데, 그림 3.3.34에서 보이듯이 여름철에 황사의 AOD는 매우 낮은 값을 보이고 있기에 매우 낮은 비율 변화에도 민감하게 반응한 것으로 높은 의미를 가지는 결과로는 판단되지 않는다. 조대 오염입자는 봄만 감소하는 경향을 보이고 나머지 계절에는 증가하는 추세를 보였다. 미세 오염입자의 경우는 반대로 봄에 증가하는 추세를 보이고 여름, 가을, 겨울에 감소하는 추세를 보였다.

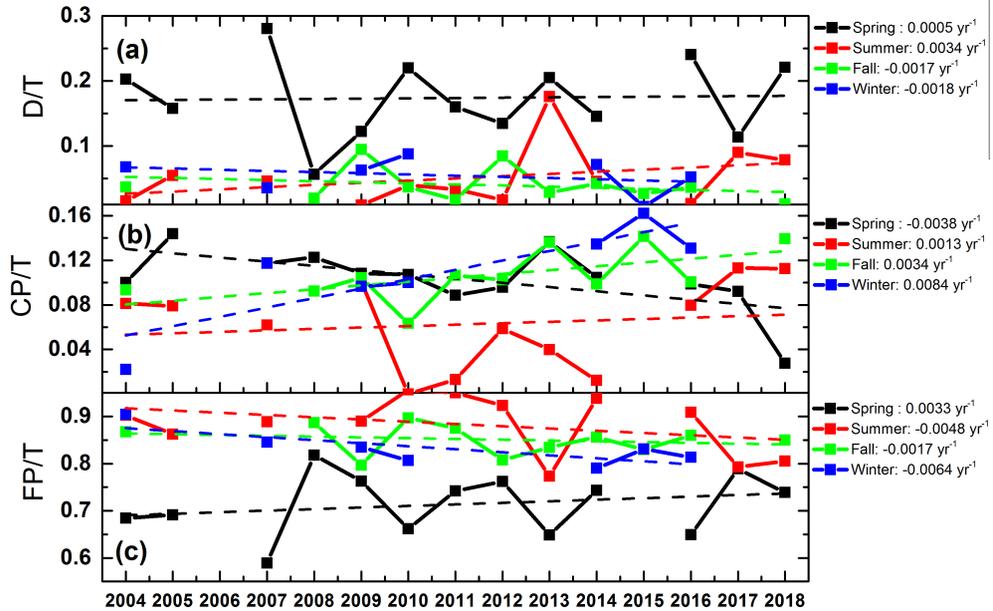


그림 3.3.36 계절별로 구분된 각 종류별 AOD 비율의 연간 변화량.

그림 3.3.37은 440 nm와 1020 nm의 AOD 값을 이용하여 산출한 미세 오염 입자의 옹스트롬 지수를 보여준 그림으로써 연평균값과 연도에 따른 각 계절별로 구분된 파장별 옹스트롬 지수의 연간 변화율을 확인할 수 있다. 연평균과 각 계절별 평균값의 연간 변화율은 모두 증가하고 있는 경향을 보였다. 그리고 그 변화 경향도 0.0094/yr ~ 0.0276/yr로 높은 증가율을 보이고 있다. 옹스트롬 지수는 입자의 크기와 상관된 파라미터로 그 값이 클수록 작은 입자가 많이 분포하고, 값이 작을수록 큰 입자가 많이 분포하고 있음을 의미한다. 미세 오염입자의 옹스트롬 지수가 과거에 비하여 증가하고 있다는 것은 미세 오염입자들의 입자 크기가 과거에 비하여 더욱 작아지고 있다는 것을 의미한다. 이는 비록 미세 오염 입자로서 PM<sub>2.5</sub>에 해당하는 입자일지라도 과거에 비하여 현재로 올수록 그 입자의 크기가 더욱 미세한 입자의 비율이 증가하고 있음을 나타낸다. 이러한 값을 나타내는 원인은 미세 오염입자의 경우 1차 생성보다는 광화학 반응에 의한 2차 생성이 주요 원인이기 때문이다. 공장이나 자동차 배기가스 등 1차 발생원은 과거에 비하여

제어 기술이 발전되고, 각 국가의 규제가 강화되면서 발생 자체가 과거에 비하여 근래에 많이 줄어들고 있는 추세이다. 본 보고서에서 확인된 것과 같이 미세 입자의 비율이 증가하고 있는 것은 2차 생성 입자가 과거에 비하여 증가하고 있다는 것을 의미하며, 이는 1차 생성입자가 줄어드는 것에 비하여 2차 생성 입자는 줄어드는 비율이 미비하고, 기후변화 등 여러 원인에 의하여 2차 생성될 수 있는 조건이 더욱 잘 형성되고 있다고 유추할 수 있게 한다. 또한, 이와 같은 결과는 초미세먼지로 표현되는 PM2.5의 경우 연도별 농도 변화 추세가 2000년 이후 2015년까지 명확히 감소하는 추세를 보였는데, 위성과 선포도미터 등 원격탐사 장비로 관측된 AOD로 표현되는 광학적 농도는 감소추세가 보이지 않거나 감소하더라도 질량농도 감소에 비하여 미약한 추세를 보인 원인을 파악하게 한다. 초미세먼지의 수농도가 증가하더라도 증가된 입자의 크기가 매우 작은 경우 질량 농도는 감소한다. 하지만, 광학적 농도의 경우 미세한 입자의 경우 산란효과가 가시광선 영역대(400 ~ 700 nm)에서는 증가되기 때문에 광학적 농도는 감소하지 않는다. 본 연구에서 확인된 미세 오염입자의 옹스트롬 지수가 지속적으로 증가하고 있는 것이 이를 뒷받침한다.

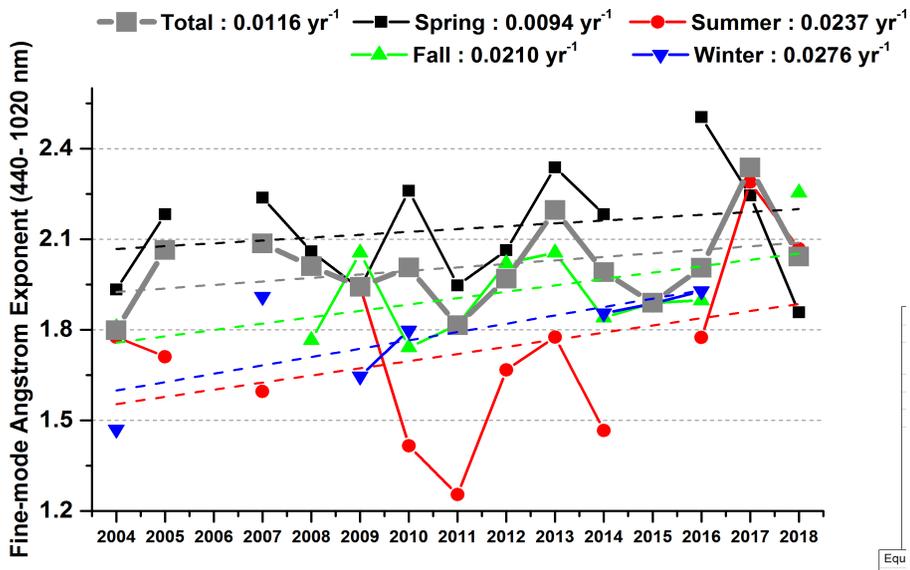


그림 3.3.37 옹스트롬 지수 연평균 자료 및 2004년부터 2018년까지 계절별 자료의 연간 변화율.

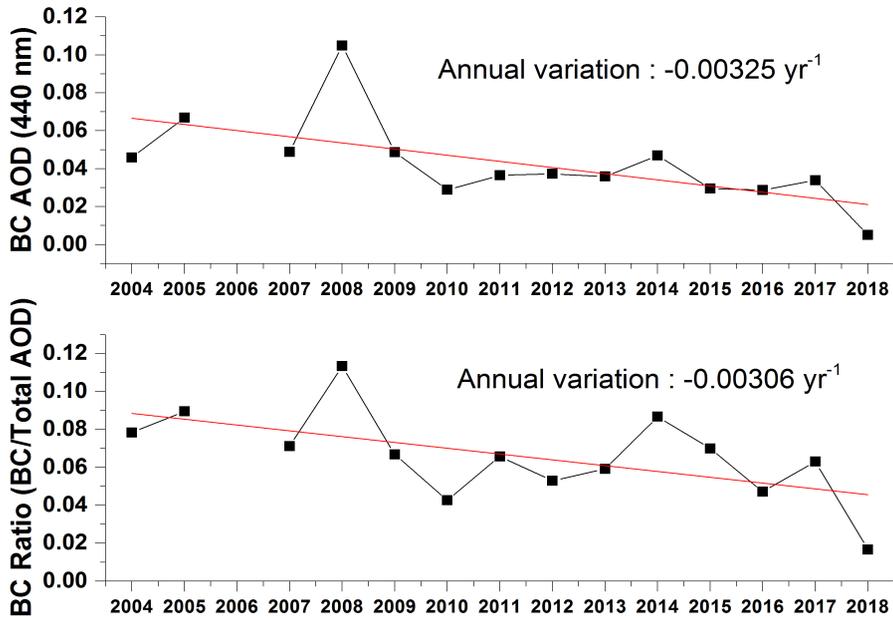


그림 3.3.38 블랙카본 AOD의 연간 변화율(위)과 블랙카본이 전체 AOD에서 차지하는 비율의 연간 변화율 (아래).

그림 3.3.38은 선포토크미터 자료로 산출한 블랙카본의 AOD 연간 변화를 나타낸다. BC는 화석 연료 등이 불완전 연소할 때 발생하는 입자로 1차 생성에 의하여 발생된다. BC의 AOD가 감소하고 있고, BC가 전체 AOD에서 차지하는 비율도 명확하게 감소하는 경향이 확인된다. 이는 과거에 비하여 1차 생성 입자의 비율이 감소하고 있는 것을 뒷받침할 수 있는 결과이다.

2018년 관측결과를 이용하여 AOD를 황사, 조대 및 미세 오염입자 각각의 AOD로 산출할 수 있는 분석 방법을 새롭게 개발하였으며, 광주에서 2004년부터 2018년까지 관측된 AERONET 선포토크미터 데이터에 적용하여 연간 AOD 및 광학적 특성 변화를 연구하였다. 2006년을 제외한 매년 관측이 수행되었으나 전체 관측일은 373일로 매우 제한되어 AOD의 연간 변화는 비록 이전 연구 및 타 사이트의 변화와 유사한 경향을 보이더라도 대표성을 가지기는 힘들었다. 하지만, 종류 구분을 통한 광학적 특성 변화는 의미 있는 결과를 산출하였다.

과거에 비하여 질량 농도는 감소하고 있더라도 초미세먼지의 경우 2차 생성이

더욱 활발해져 입자의 크기 및 수농도는 더욱 증가되고 있는 추세가 있음을 본 보고서에서 간접적으로 확인할 수 있었다. 이러한 초미세먼지의 수농도 및 입자 크기에 대한 연구가 향후 더욱 강화되어야 할 것으로 판단된다.

## 다. 에어로졸 연직분포

기상청은 대기 중 부유물질의 연직 광학특성을 감시하기 위하여 안면도에서 에어로졸 라이다(Light Detection and Ranging, LIDAR)를 운영하고 있다. 안면도의 에어로졸 라이다(Micro Pulse LIDAR, MPL)는 2000년에 처음 도입하였고 장비 노후화로 2010년에 새로운 다파장 편광 라이다(Multi-wavelength Polarization Lidar for Atmospheric Research 2020, MPoLAR 2020)로 교체하여 현재까지 관측 중이다.

에어로졸 라이다(MPoLAR 2020)가 지상에서 수직으로 레이저를 조사하면 대기 중 부유물질은 빛을 산란하게 된다. 이 산란된 빛을 라이다 망원경으로 측정하여 부유물질의 연직 고도뿐만 아니라 편광신호와 후방산란신호를 구할 수 있다(그림 3.3.39). 관측된 신호로부터 비편광도와 후방산란비 등 다양한 요소들이 산출되며 이러한 2차 산출자료들은 황사와 연무의 판별, 에어로졸의 연직 광학 특성 분석 등에 활용된다. 안면도의 다파장 편광라이다의 세부 규격은 표 3.3.2와 같다.

2018년 안면도 에어로졸 라이다의 자료생산율은 60% 수준이다. 에어로졸 라이다는 2018년 9월에 실시한 종합점검에서 레이저출력기와 헤드 노후화 등의 문제로 인해 수리 후 12월 25일 정상화되었다.

그림 3.3.40은 2018년 동안 안면도 에어로졸 라이다로 원시자료로 그린 후방산란신호, 편광소멸도의 연직 일평균 시계열이다. 2018년에 우리나라에는 총 6차례의 황사가 유입되었고, 이 기간은 그림 3.3.40의 날짜축에 주황색으로 표시하였다. 후방산란신호는 대기 중에 부유물질이 많거나 구름이 있을 경우 큰 값으로 관측된다. 2018년의 고도별 후방산란신호를 보면 지표 부근에 큰 신호가 나타나는 날은 거의 없었고, 1월과 2월, 12월에 고도 1 km 부근에서 큰 신호가 관측되었다(그림 3.3.39 (a)). 편광소멸도는 비구형 입자들이 많을 경우 값이 높아지는데, 대체로 빙정 상태의 구름이나, 황사 탐지에 유용하다. 황사가 관측된 2월 10일과 5월 23 ~ 25일에 지표부터 고도 1.5 km 사이의 편광소멸도가 증가하였다(그림 3.3.39 (b)).

표 3.3.2 다파장 편광 라이다 세부 규격

규격	내용
측정범위(유효고도)	0 ~ 12 km
레이저	Nd:YAG 레이저(발진 파장 : 1064 nm, 최대 펄스에너지 : 50 mJ) 2차 조화파 발생장치(파장 : 532 nm 사용파장) 최종 빔 퍼짐도 < 0.5 mrad, 펄스폭 < 10 ns
빔익스팬더	10 배율
카세그레인식 망원경	D = 200 mm, F = 2,000 mm
APD	스펙트럼영역 400 ~ 1100 nm, 암전류 100 nA 이하
PMT	스펙트럼영역 185 ~ 850 nm, 암전류 3 nA 이하(typical)
8 채널	Waveform digitizer: 12bit, 60MHz(simultaneously 8ch)

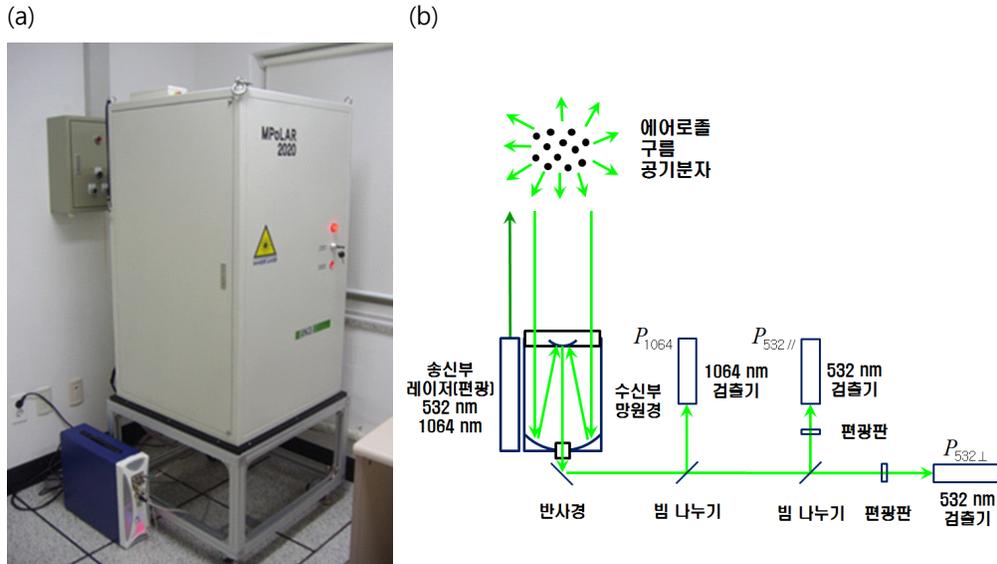


그림 3.3.39 안면도의 (a)에어로졸 라이다(MPoLAR 2020; Multi-wavelength Polarization Lidar for Atmospheric Research 2020)와 (b)라이다 관측원리 모식도.

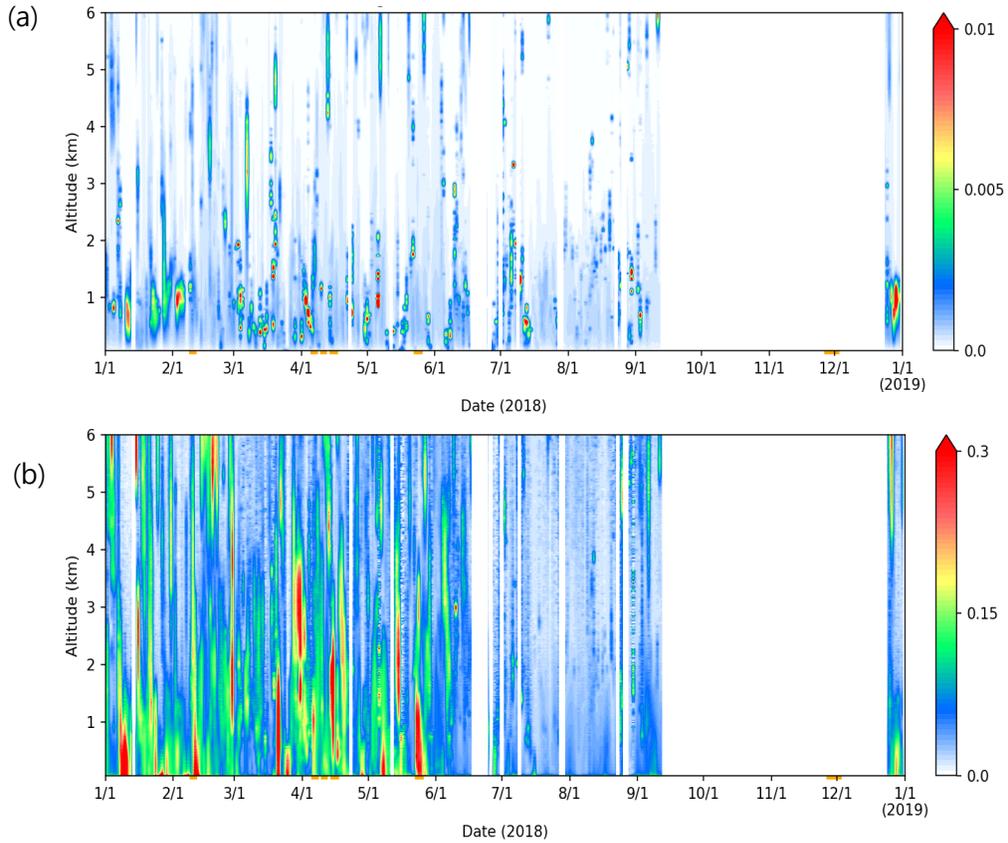


그림 3.3.40 2018년 안면도에서 측정된 2018년 에어로졸 라이다 (a)후방산란강도와 (b)편광소멸도. x축 하단의 주황색 사각형(■)은 우리나라 황사발생일.

### 3.3.3 에어로졸 화학특성

2016년도에 발간한 “WMO/GAW Report No.227”에 따르면, 저용량 (Low Volume Sampler)의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>을 6일 간격(24시간 동안) 매 1회씩 채취하도록 권고하여, 기상청 기후변화감시소에서는 이를 준수하여 안면도에서 6일 간격으로 PM<sub>10</sub>(직경이 10  $\mu\text{m}$  이하인 에어로졸), PM<sub>2.5</sub>(직경 2.5  $\mu\text{m}$  이하인 에어로졸)를 포집하였다. 그리고 2008년부터 사용한 사이클론(cyclone) 방식의 포집기에서 2017년 4월부터는 이온 및 질량농도 분석용으로 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 충돌판(impactor) 방식의 저용량 포집기를 사용하였고, 2017년 11월부터 원소성분 분석용으로 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>를 추가 설치·운영하였다. 따라서 2018년

부터는 에어로졸의 수용성이온성분과 원소성분용 시료를 동시에 채취하고 화학 성분 분석을 하였다. 표 3.3.3은 안면도에서 사용하고 있는 에어로졸 채취용 기기에 대한 정보이다. 또한 PM10과 PM2.5의 2018년도 질량농도에 관련된 내용은 3.3.1의 에어로졸 물리특성의 질량농도에 기술하였고, 본 단원에서는 PM10과 PM2.5의 수용성 이온성분과 원소성분에 관해 기술하였다.

표 3.3.3 에어로졸 채취기기 정보

방식	저용량			
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
장비 도입연도	2017년 4월~현재	2017년 4월~현재	2017년 11월~현재	2017년 11월~현재
관측요소	이온, 질량농도	이온, 질량농도	원소	원소
제조사/모델명	APM/PMS-104	APM/PMS-104	APM/PMS-104	APM/PMS-104
채취방식	충돌판형	충돌판형	충돌판형	충돌판형
기본 유량	16.7 L/min	16.7 L/min	16.7 L/min	16.7 L/min

### 가. PM10, PM2.5 수용성 이온성분

2018년 1월부터 2018년 12월까지 안면도에서 PM10, PM2.5 시료를 채취하여 수용성 이온 9종( $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $F^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ )을 분석하였다. 이 중 PM10 질량농도가 PM2.5 질량농도보다 작은 경우의 시료를 제거하였다. 또한 화학성분 농도의 합보다 질량농도가 높은 시료와 이온 불균형(ion balance) 있는 데이터는 제거하였으며, 또한 각각의 PM10 이온성분농도보다 PM2.5 이온성분농도가 높았을 때 PM2.5 에어로졸 시료를 제거하였다. 이러한 결과를 가지고 PM10, PM2.5 에어로졸 시료의 수용성 이온성분을 살펴 보았으며, 안면도에서 관측한 PM10, PM2.5 에어로졸의 이온성분에 대한 연평균 농도는 그림 3.3.41과 그림 3.3.42와 같다.

에어로졸 화학성분은 저용량미세먼지 채취기의 입경분리 방식이 2008년부터 2017년 3월까지 싸이클론, 2017년 4월부터 충돌판 방식을 채용한 장비의 데이터를

사용하였다.

수용성 이온성분 중  $nss-SO_4^{2-}$ 는 비해염(non-sea salt)  $SO_4^{2-}$ 의 농도로, ‘ $[nss-SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - [Na^+] \times 0.251$ ’의 식에 의해  $SO_4^{2-}$  총 농도에서 해염으로부터 유입된  $SO_4^{2-}$ 의 농도를 뺀 결과이다.  $nss-Ca^{2+}$  역시 비해염  $Ca^{2+}$ 의 농도로  $nss-SO_4^{2-}$ 과 유사하게 ‘ $[nss-Ca^{2+}] = [Ca^{2+}] - [Na^+] \times 0.04$ ’의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho et al, 2003).

PM10 에어로졸에서 이차오염물질( $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ) 중  $nss-SO_4^{2-}$ 의 2008년부터 2017년까지 지난 10년간 평균농도는  $6.3 \mu g/m^3$ , 2018년은  $5.6 \mu g/m^3$ 로 지난 10년 평균 농도보다는 낮은 값을 보였다.  $NO_3^-$ 의 농도를 보면, 지난 10년 평균과, 2018년도는 각각  $8.1$ ,  $5.8 \mu g/m^3$ ,  $NH_4^+$  성분은 각각  $3.2$ ,  $3.1 \mu g/m^3$ 이며, 지난 10년 평균 농도보다 이차오염물질 성분들은 낮은 값을 보였다. 연도별로는  $nss-SO_4^{2-}$ 와  $NH_4^+$ 성분은 2014년도에 가장 높고, 반면에  $NO_3^-$ 성분은 2008년도에 가장 높은 경향을 보였다. 상대적으로  $nss-SO_4^{2-}$ 은 2012년,  $NO_3^-$ 은 2018년,  $NH_4^+$ 성분은 2008년에 낮은 경향을 보였다. 토양성분인  $nss-Ca^{2+}$ 은 지난 10년간 평균  $0.7 \mu g/m^3$ , 2018년은  $0.2 \mu g/m^3$ 로 10년 평균 농도의 30% 수준이었다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 상대적으로 2018년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외의  $Na^+$  성분은 지난 10년간의 평균 농도보다 2018년에 더 높은 농도를 보였고,  $Cl^-$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ 성분은 지난 10년간 농도보다 2018년도보다 비슷하거나 감소하였다(그림 3.3.41(위)).

연도별 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과(그림 3.3.41(아래)), 2008년부터 2018년까지의 이차오염물질이 차지하는 비율은 PM10 질량농도의 65.3% ~ 86.0%이며, 2014년이 가장 높고, 2008년이 가장 낮았다. 지난 10년간과 2018년의 이차오염물질의 평균조성비는 각각 80.7%, 82.9%로 나타났다. 반면에 해염기원의 성분들( $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Mg^{2+}$ )은 2008년부터 2018년까지의 조성범위는 9.6% ~ 27.2%이며, 이차오염물질 성분과는 반대로 2008년이 가장 높고, 2014년이 가장 낮은 조성비를 보였다. 토양기원의  $nss-Ca^{2+}$  성분 조성비는 2.0% ~ 4.7%였다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 이온성분은 다른 성분들에 비해 이차오염물질 성분들의 조성비가 다른 성분들에 비해 높은 것으로 확인되었다.

PM2.5 에어로졸에서 이차오염물질 중  $nss-SO_4^{2-}$ 의 2008년부터 2017년까지 지난 10년간 평균은  $5.5 \mu g/m^3$ , 2018년은  $5.1 \mu g/m^3$ 로 지난 10년간의 자료가 약간 높은 농도를 보였다. 연도별로는 2011년이 가장 높고, 상대적으로 2012년에 낮은 경향을 보였다.  $NO_3^-$ 의 농도를 보면, 지난 10년간의 평균 농도가  $7.0 \mu g/m^3$ , 2018년은  $3.5 \mu g/m^3$ 로 지난 10년 평균 농도의 절반정도 낮은 농도를 보였다.

연도별로는 2008년에 가장 높고, 2018년에 가장 낮은 값을 보였다.  $\text{NH}_4^+$  성분은 지난 10년간의 평균농도와 2018년은 각각 3.3, 2.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균농도보다 낮은 값을 보였다. 연도별로는 2014년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 경향을 보였다. 따라서  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  연도별로는 2011년에 가장 높고, 상대적으로 2012년에 낮으며,  $\text{NO}_3^-$  성분은 2008년에 가장 높고, 2018년에 가장 낮은 값을 보였다.  $\text{NH}_4^+$  성분은 2014년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 경향을 보였다. 토양성분인  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 은 지난 10년간의 평균농도와 2018년은 각각 0.3, 0.03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지난 10년 평균 농도보다 낮은 값을 보였다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 상대적으로 2018년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외의 성분은 2018년  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  성분이 10년간 전체 평균농도보다 낮은 값을 보였다(그림 3.3.42(위)).

연도별 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과(그림 3.3.42(아래)), 2008년부터 2018년까지의 이차오염물질의 조성범위는 73.0% ~ 95.2%이며, 2018년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 조성비를 보였다. 지난 10년간과 2018년의 이차오염물질의 조성비는 각각 88.4%, 95.2%로 나타났다. 반면에 해양기원의 성분들은 2008년부터 2018년까지의 조성범위는 3.1% ~ 20.0%이며, 이차오염물질 성분과는 반대로 2008년에 가장 높고, 2018년에 가장 낮은 조성비를 보였다. 토양기원의  $\text{nss-Ca}^{2+}$  성분은 대체적은 0.3% ~ 2.7%를 보였다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 이온성분은 다른 성분들에 비해 이차오염물질 성분들의 조성비가 다른 성분들에 비해 증가하는 것으로 확인되었다.

안면도에서 관측한  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ 의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 3.3.43과 그림 3.3.44와 같다. 여기서  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  에어로졸 이온성분의 계절별 평균농도는 2008년부터 2017년까지 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해연도 1, 2월의 데이터를 평균하였고, 당해연도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

$\text{PM}_{10}$  에어로졸에서 이차오염물질의 지난 10년(2008 ~ 2017년)간과 2018년의 계절별 농도를 비교한 결과(그림 3.3.43(위)) 겨울, 봄, 여름, 가을철  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분의 농도범위는 각각 3.8 ~ 7.7, 3.5 ~ 9.1, 2.2 ~ 4.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다.  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  성분의 2018년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 6.4 (n=14), 6.4 (n=16), 6.8 (n=13), 3.8 (n=13)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_3^-$ 의 2018년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 9.0 (n=14), 6.2 (n=16), 3.5 (n=13), 6.0 (n=13)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NH}_4^+$ 의 2018년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 4.2 (n=14), 3.6 (n=16), 2.8 (n=13), 2.5 (n=13)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 여름철에 높은 농도를 보이며, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>성분은 봄철에 높은 것으로 조사되었다. 토양기원성분인 nss-Ca<sup>2+</sup>은 지난 10년간과 2018년의 계절별 농도를 비교해 보면, 10년간의 계절별 농도 범위는 0.4 ~ 0.9 μg/m<sup>3</sup>, 2018년 계절별 농도 범위는 0.1 ~ 0.6 μg/m<sup>3</sup>로 지난 10년간 자료는 봄철에 높았으나, 2018년은 겨울철에 가장 높은 농도를 보였다.

이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과(그림 3.3.43(아래)), 이차오염물질 성분들의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 75.9%, 81.5%, 88.4%, 79.1%로, 여름철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다. 또한 2018년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 74.3%, 89.9%, 86.7%, 85.5%로, 봄철에 가장 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다. 그리고 해염기원 성분들의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 18.5%, 12.7%, 7.9%, 15.2%를 보였고, 2018년의 계절별 조성비는 각각 21.7%, 7.4%, 11.9%, 11.8%로 나타나, 오히려 겨울철이 가장 높은 상반된 경향을 보였다. 마지막으로 토양기원의 nss-Ca<sup>2+</sup> 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 2.8%, 3.6%, 2.1%, 3.1%, 2018년 조성비는 2.1%, 1.7%, 0.7%, 1.3%를 보여 지난 10년간의 자료는 봄철이 높고, 2018년은 겨울철이 높은 것으로 판단된다.

PM2.5 에어로졸에서 이차오염물질의 지난 10년(2008 ~ 2017년)간과 2018년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 3.3.44(위)), 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도범위는 각각 4.5 ~ 6.4, 5.4 ~ 7.8, 2.5 ~ 3.7 μg/m<sup>3</sup>로 조사되었다. nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>성분의 2018년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 5.1 (n=15), 5.7 (n=16), 6.1 (n=14), 3.5 (n=14) μg/m<sup>3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 2018년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 5.3 (n=15), 3.9 (n=16), 1.3 (n=14), 3.6 (n=14) μg/m<sup>3</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 2018년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 3.1 (n=15), 3.2 (n=16), 2.4 (n=14), 3.1 (n=14) μg/m<sup>3</sup>로 나타났다. PM10과 마찬가지로, nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>성분은 봄철, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>성분은 겨울철에 높은 것으로 조사되었다. 토양성분인 nss-Ca<sup>2+</sup>은 지난 10년간과 2018년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 3.3.44(아래)), 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.23 ~ 0.41 μg/m<sup>3</sup>, 2018년 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.01 ~ 0.07 μg/m<sup>3</sup>로 지난 10년은 봄철에, 2018년에는 겨울철에 가장 높았다. 이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 83.9%, 88.8%, 93.6%, 88.8%로, 여름철에 높은 경향을 나타내었다. 또한 2018년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 92.0%,

96.2%, 97.5%, 96.1%로 나타내었다. 그리고 해염기원 성분들 성분들의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 11.9%, 7.6%, 4.1%, 7.0%를 보였고, 2018년의 계절별 조성비는 각각 5.5%, 2.7%, 1.9%, 2.0%로 나타내었다. 그리고 토양기원의  $nss-Ca^{2+}$  조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 1.9%, 2.0%, 1.4%, 1.9%, 2018년 조성비는 0.4%, 0.2%, 0.1%, 0.2%를 보였다.

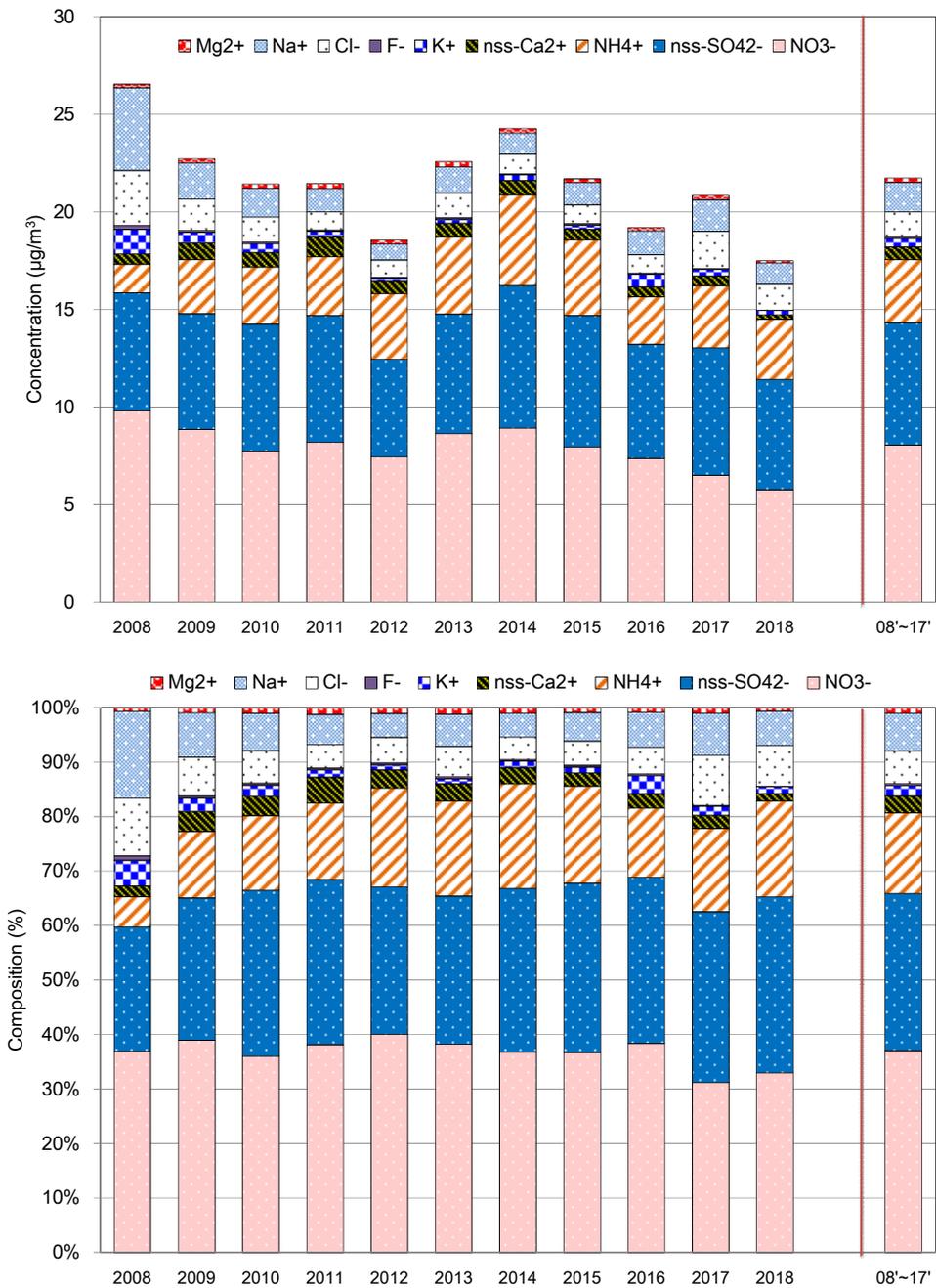


그림 3.3.41 2008 ~ 2018년 PM10 에어로졸 수용성 이온성분의 (위)연평균 농도, (아래) 연평균 조성.

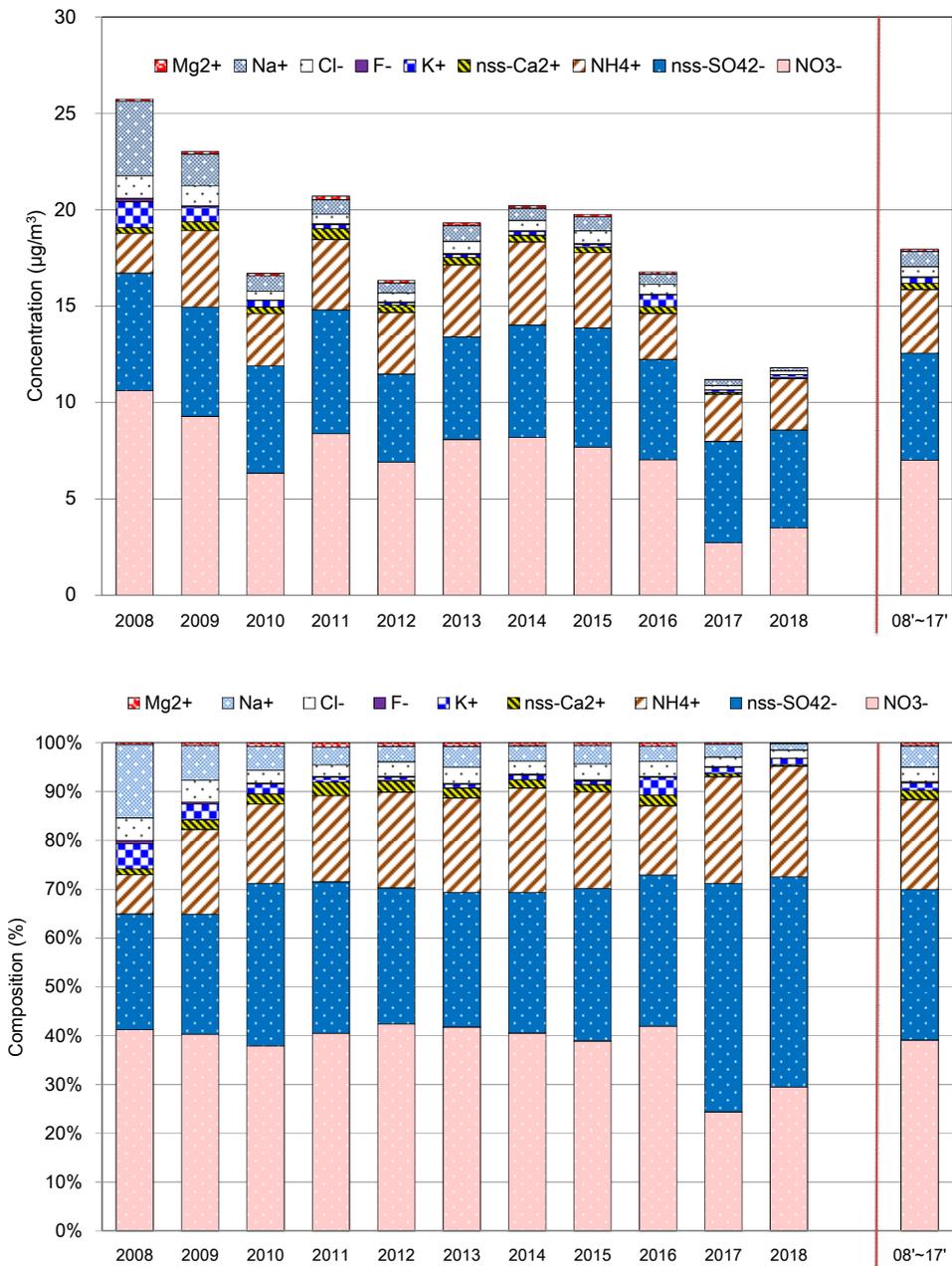


그림 3.3.42 2008 ~ 2018년 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분의 (위)연평균 농도, (아래) 연평균 조성.

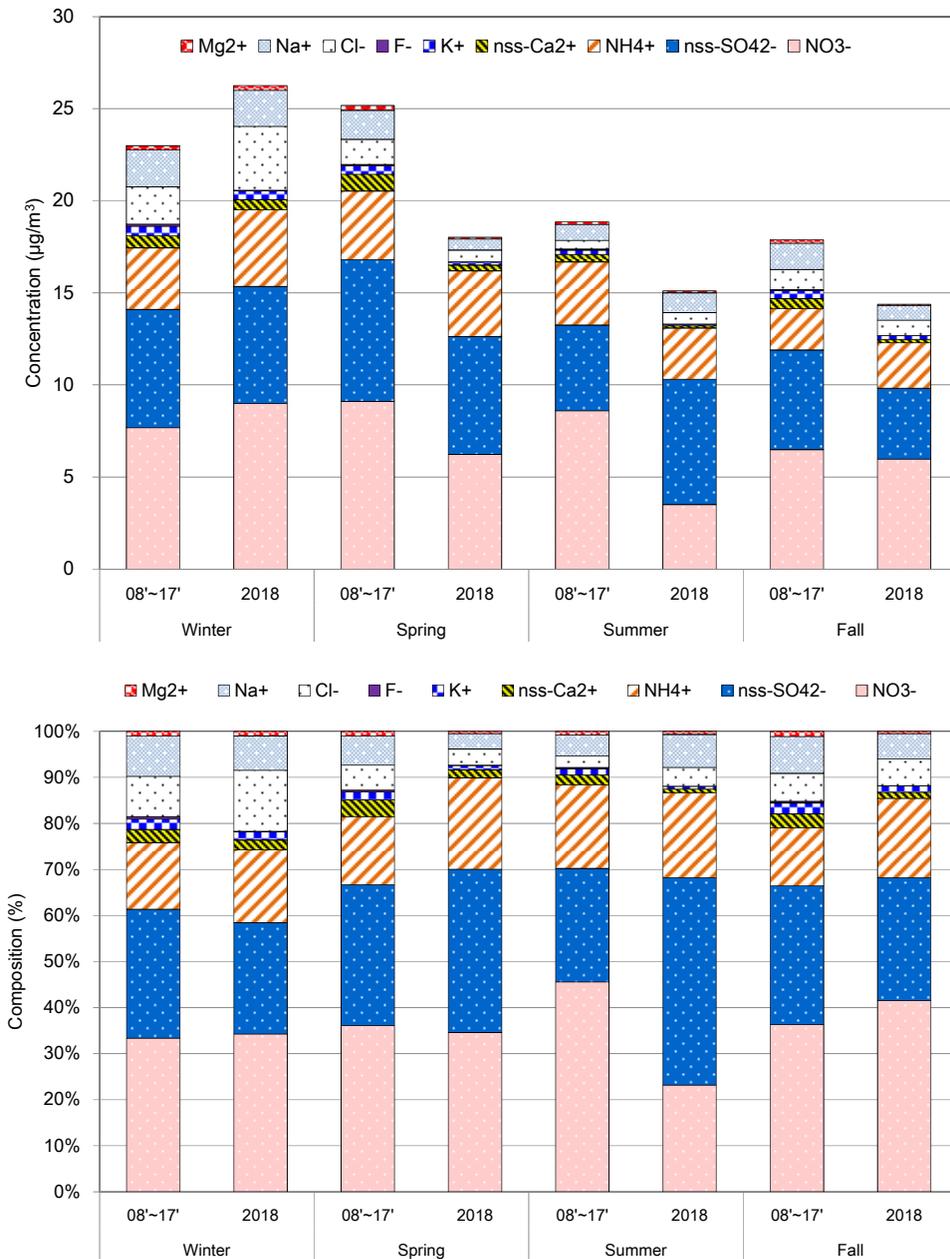


그림 3.3.43 2008 ~ 2018년 PM10 에어로졸 수용성 이온성분의 (위)계절별 평균 농도, (아래) 계절별 평균 조성.

\*Winter: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.

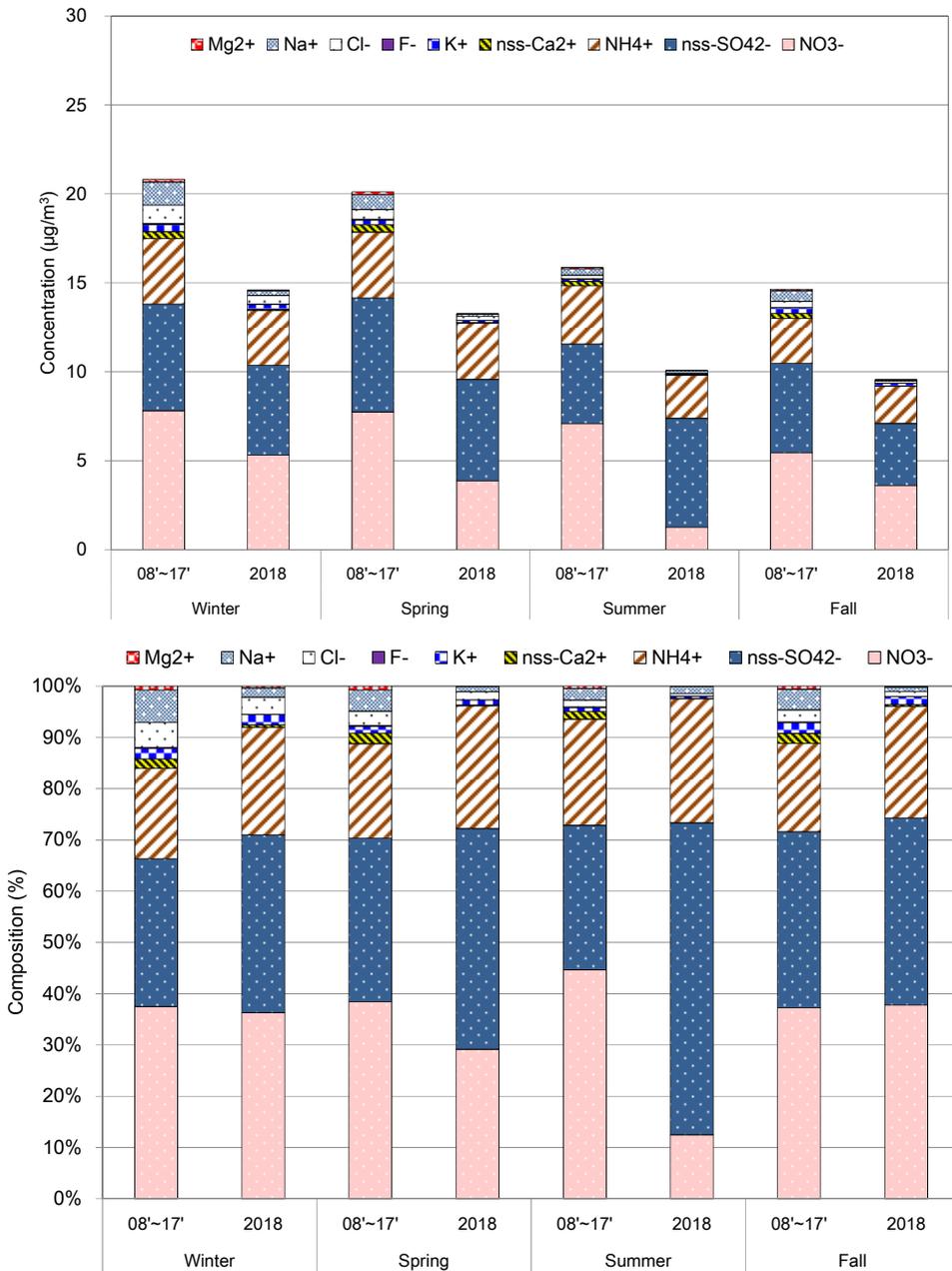


그림 3.3.44 2008 ~ 2018년 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분의 (위)계절별 평균 농도, (아래) 계절별 평균 조성.

\*Winter: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.

## 나. PM10, PM2.5 원소성분 특성

2018년 1월부터 2018년 12월까지 안면도에서 PM10, PM2.5 원소성분의 연평균농도와 계절별 평균 농도를 살펴보았다. 이때 분석성분의 요소는 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti, Mn, Zn, Cu, V, Cr, Co, Ni, Sr, Co, Ba, Pb, Mo이다. PM10과 PM2.5 모두 S성분의 조성비가 가장 높고, 그다음으로는 PM10에서는 Na성분이 PM2.5에서는 K성분의 조성비가 높은 것으로 판단된다(그림 3.3.45).

PM10과 PM2.5의 계절별 원소성분을 그림 3.3.44에서 살펴보면, PM10, PM2.5 모두 S인 황성분이 가장 높은 농도를 보였다. PM10 원소성분 중 약 50%정도, PM2.5 원소성분 중 약 40%정도가 가을철에 높은 농도를 보였다. 특히 Al, Ca, Mg, Fe, Zn, Ti 등과 같은 토양에서 발생한 성분이 다른 계절보다 높은 농도를 보여 이는 2018년도에 가을철(11. 27. ~ 12. 1.)에 발생한 황사의 영향으로 판단된다. 전체 계절의 원소성분의 조성을 보면, S성분이 PM10, PM2.5에서 각각 19.9%, 49.0%의 가장 적은 조성비를 보였고, 여름철에 가장 큰 조성비를 나타냈다. Al, Ca, Fe, Zn 성분도 역시 가을철에 가장 큰 조성비를 보였으나, Na 성분은 겨울철에 가장 큰 조성비를 나타냈다.

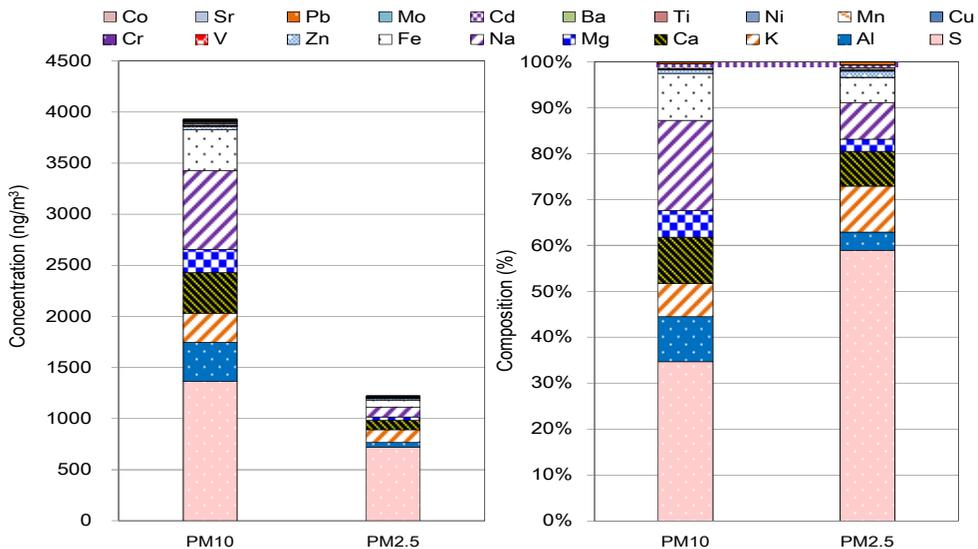


그림 3.3.45 2018년 안면도에서 관측한 PM10, PM2.5 에어로졸 원소성분 (좌)농도, (우)조성.

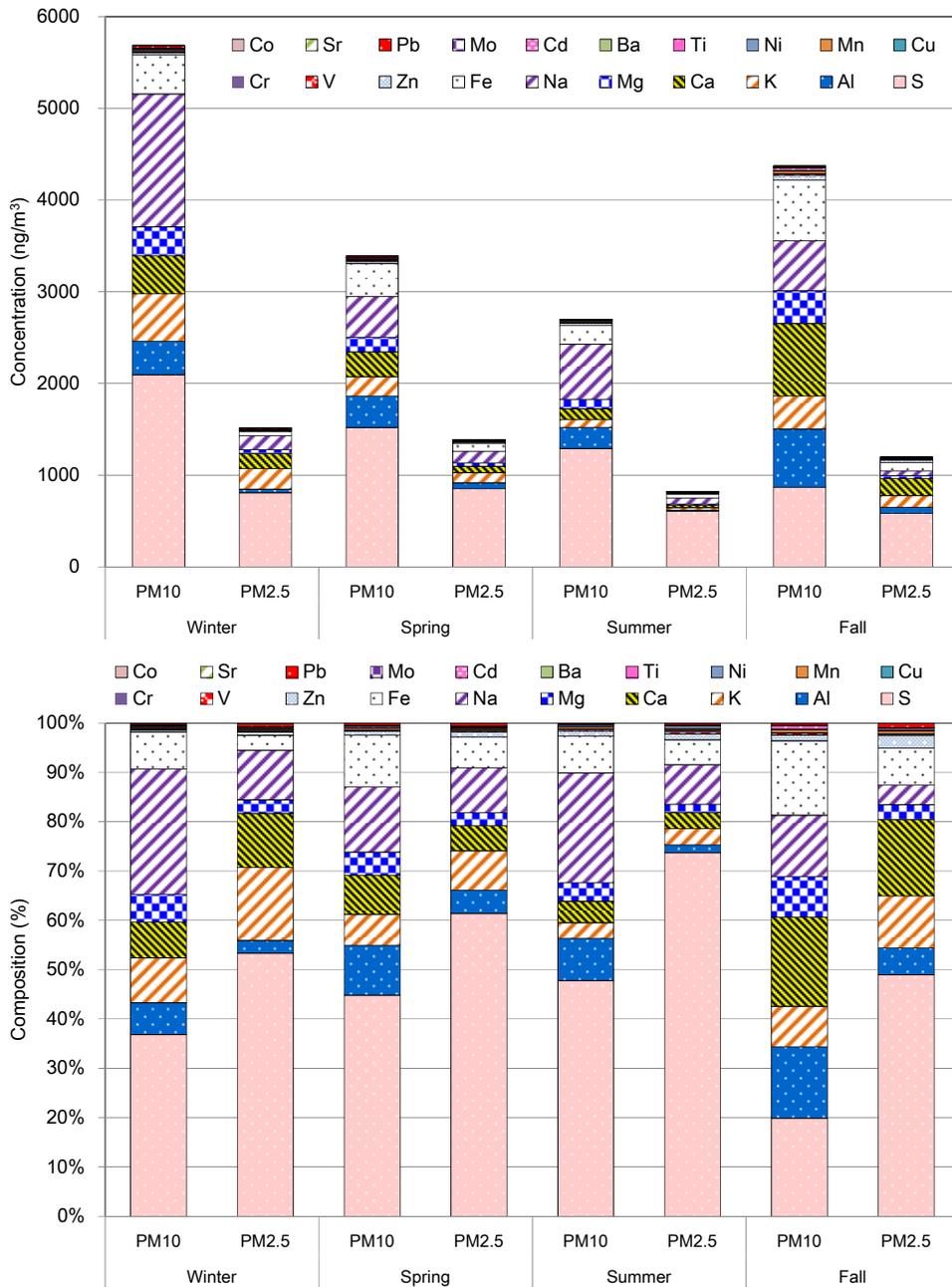


그림 3.3.46 2018년 PM10, PM2.5 에어로졸 원소성분의 (위)계절별 평균 농도, (아래) 계절별 평균 조성.

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

## 3.4 대기복사

기상청은 태양복사에너지 및 그 변화를 감시하기 위해 안면도, 고산에서 대기 복사 관측을 수행하고 있다. 지구 대기에 유입되는 에너지의 대부분은 태양에서 근원한 빛에너지이며, 태양에너지는 대기를 통과하면서 일부는 대기 구성 성분에 의하여 산란 및 반사되거나 흡수되고 나머지는 대기를 통과하여 지표에 도달한다. 대기복사자료는 기후학적으로 장기간 대기 복사량의 변화를 파악하기 위한 기본 자료가 된다.

복사자료는 태양복사와 지구복사로 구분되며, 각각의 상향·하향복사(4성분), 태양 하향복사의 두 성분인 직달일사와 산란일사, 지표면의 에너지 수지를 관측하는 순복사 등 7가지 요소가 있다. 안면도는 7가지 요소 모두를 관측하고, 고산은 태양복사 3가지 요소(태양하향, 직달, 산란)를 관측하고 있다. 관측 자료는 1분 간격으로 생산되며 단위는  $W/m^2$ 이다. 자료의 QC는 BSRN (Baseline Surface Radiation Network)에서 권고하는 방법을 따랐다. QC 방법은 3단계로 진행되며 QC1, QC2 단계는 Long and Dutton (2002)을 참고하였다. 2018년 10월에는 안면도의 전천일사, 직달일사, 지구상향복사, 고산의 직달일사, 산란일사 신규장비 교체 작업이 있었다.

복사자료는 구름, 강수량과 일조시간에 영향을 받기 때문에 월 강수량, 월평균 일조시간을 같이 분석하였다(그림 3.4.1). 안면도 자료 분석을 위해 기후변화 감시소에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129, SES) 자료를 이용하였고, 고산은 약 4 km 떨어져 있는 고산(185) 자료를 이용하였다. 서산의 연 강수량은 1227.2 mm이며, 고산은 1345.8 mm이다. 서산의 연 강수량은 작년대비 47% 증가하였으며, 고산은 약 52% 증가하였다. 고산의 경우 5월의 강수량이 가장 높았는데, 이는 작년 대비 약 8.3 배가 증가한 양이며, 서산의 경우 6개월 이상에서 100 mm 이상의 강수량을 보였다.

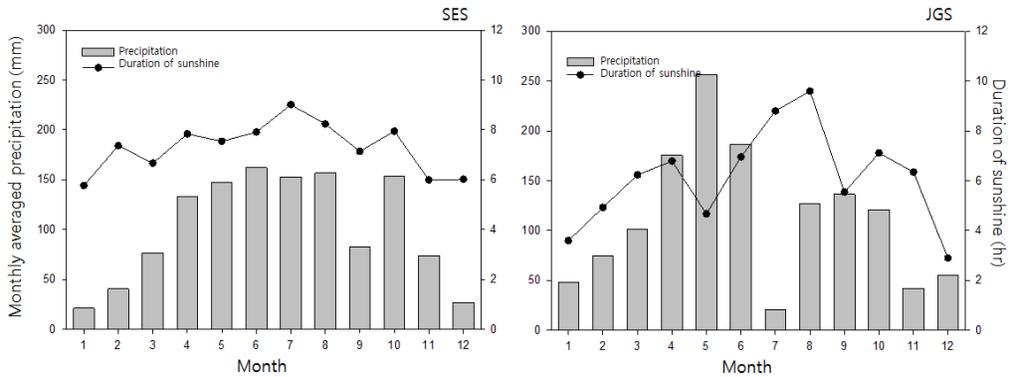


그림 3.4.1 2018년 (좌)서산, (우)고산의 월 강수량과 월평균 일조시간.

### 3.4.1 직달일사, 산란일사

그림 3.4.2는 안면도, 고산의 2018년 직달일사, 산란일사 월평균을 지난 관측 평균(안면도: 2008 ~ 2017년, 고산: 2009 ~ 2017년)과 비교한 것이다. 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 차폐 판을 이용하여 직달일사 성분을 차단하고 관측한 복사량을 말한다. 안면도의 2018년 직달일사 월평균 최대는 9월의  $218.4 \text{ W/m}^2$ 이다. 또한 일조시간이 가장 길었던 7월에는 직달일사 월평균 값이 평년대비 약 1.6배 증가하였다. 고산의 직달일사 월평균 최대는 8월에  $213.6 \text{ W/m}^2$ 이다. 산란일사는 안면도, 고산 모두 평년값과 비슷하였으며, 안면도의 최댓값은 6월  $119.2 \text{ W/m}^2$ , 고산의 최댓값은 5월  $117.5 \text{ W/m}^2$ 이다.

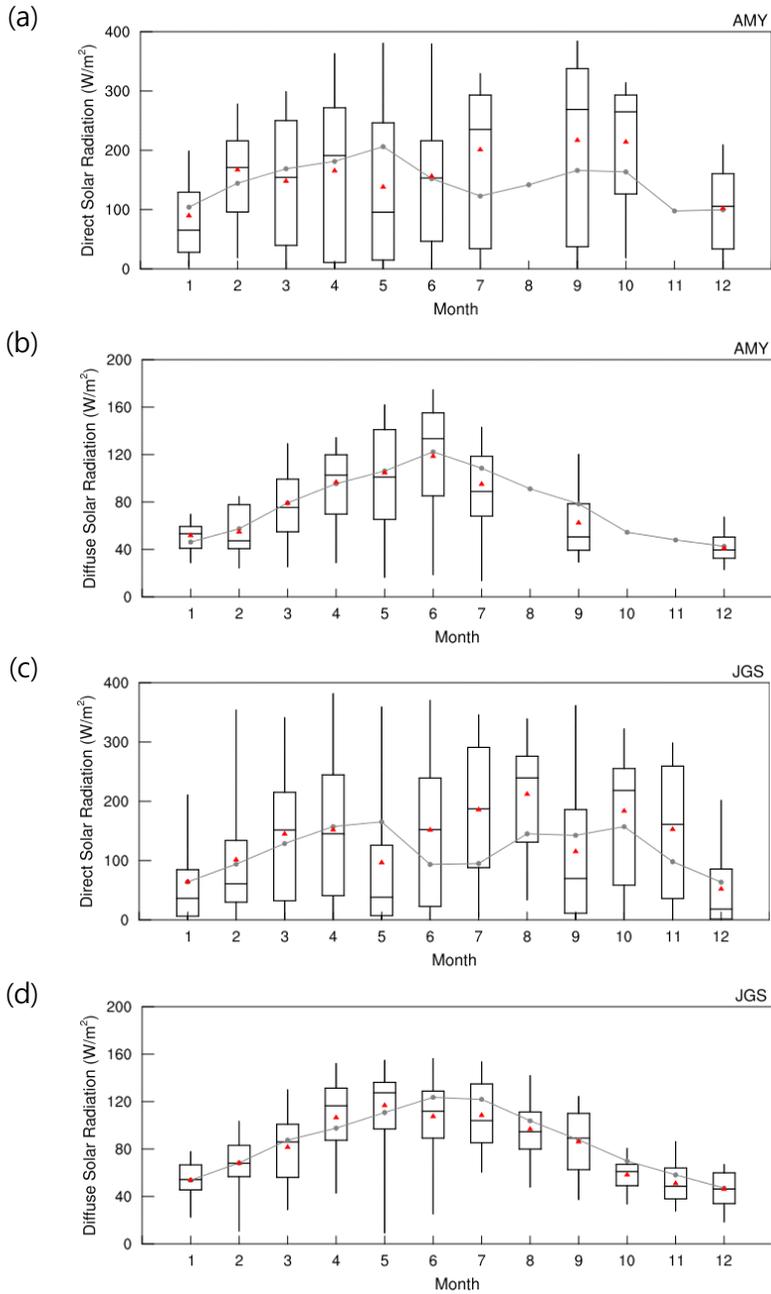


그림 3.4.2 2018년 안면도의 (a)직달일사, (b)산란일사 고산의 (c)직달일사, (d) 산란 일사 월변화. 2018년 월분포(상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 빨간색 점 평균)와 2008 ~ 2017년(안면도), 2009 ~ 2017년(고산)의 평균(점-선).

### 3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)

그림 3.4.3은 안면도의 태양상향복사와 태양하향복사의 월평균과 고산의 태양하향복사의 월평균을 나타낸 것이다. 안면도의 2018년 태양상향복사 월평균 최대는 7월에  $49.9 \text{ W/m}^2$ , 최소는 12월에  $22.2 \text{ W/m}^2$  이다. 안면도의 태양하향복사는 관측기기 오류 및 신규장비 교체로 인해 관측값이 없는 날이 많아 분석이 불가하였다. 고산의 2018년 태양하향복사 최대는 7월에  $248.4 \text{ W/m}^2$ , 최소는 12월에  $68.8 \text{ W/m}^2$  이다. 태양복사의 월평균은 계절변동으로 봄철부터 증가하여 겨울로 갈수록 감소하나 여름철에는 구름과 강수로 인해 오히려 낮은 값을 보이기도 한다. 그러나, 2018년 서산과 고산의 경우 여름철 강수량은 지난해에 비해 오히려 감소하였고, 일조시간은 높아져 7, 8월에 월평균 최댓값을 보였다.

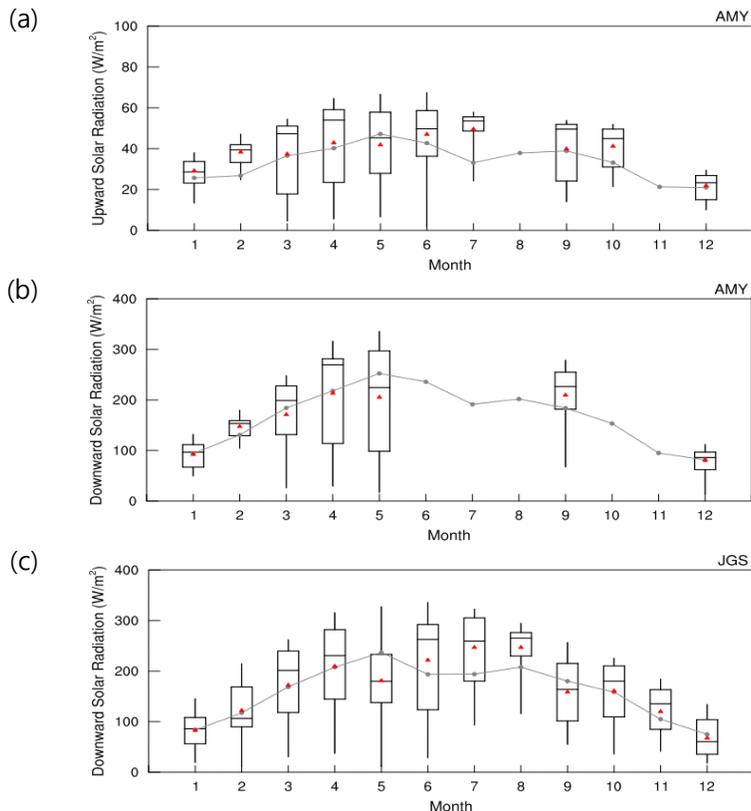


그림 3.4.3 2018년 (a)안면도 태양상향복사, (b)안면도 태양하향복사, (c)고산 태양하향복사의 월변화.

### 3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사

지구상향복사는 지표에 의해 방출되는 성분으로서 지면온도의 영향을 받는다. 지구하향복사는 대기에서 지표로 방출되는 성분으로서 주로 기온과 습도의 연직분포, 운량, 구름물리성분 등에 따라 달라진다. 지구복사는 태양복사에 비해 일변화 폭이 적고, 하층운이 지속적으로 있는 경우나, 기온 역전현상이 있을 시를 제외하고는 지구상향복사량이 하향복사량보다 크다. 안면도에서는 2018년에 지구상향복사 연평균이 지구하향복사 연평균보다 약  $69 \text{ W/m}^2$  정도 높았다. 지구복사 최댓값은 주로 여름철에 나타나는데, 평년 최댓값이 나타난 8월에는 관측값 오류로 인해 지구복사 월평균 값이 계산되지 않았다. 2018년 월평균 지구상향복사의 최대는 7월에  $432.1 \text{ W/m}^2$ , 최소는 1월에  $293.0 \text{ W/m}^2$ 이며, 지구하향복사의 최대는 7월에  $363.6 \text{ W/m}^2$ , 최소는 2월에  $225.6 \text{ W/m}^2$ 이다(그림 3.4.4).

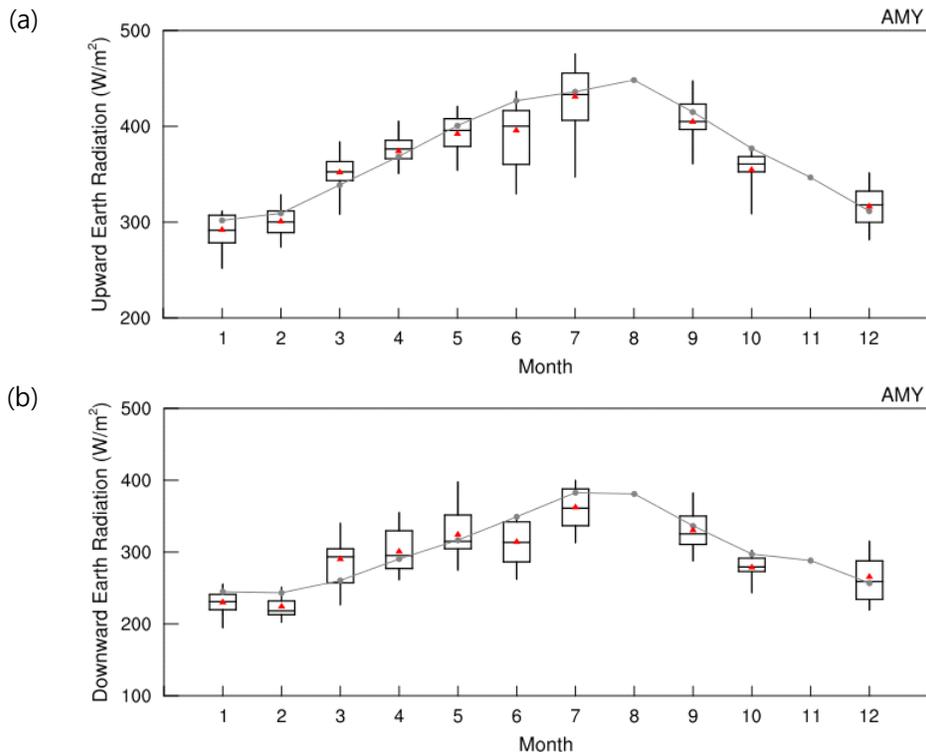


그림 3.4.4 2018년 안면도 (a)지구상향복사, (b)지구하향복사의 월변화.

### 3.4.4 순복사

순복사는 태양과 지구사이의 복사에너지 수지로서 태양으로부터 들어오는 태양복사와 지구에서 방출하는 지구복사의 관계식(산출 순복사 = 태양하향복사 - 태양상향복사 + 지구하향복사 - 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 양과 음의 값을 가진다. 맑은 날의 시간별 순복사량은 태양 고도 각이 증가함에 따라 서서히 증가하여, 정오에 최대가 된다. 그림 3.4.5는 안면도 순복사의 월평균 분포이다. 2018년 월평균 최대는 7월에  $156.6 \text{ W/m}^2$ , 최소는 12월에  $9.8 \text{ W/m}^2$ 으로 겨울철에 낮고 여름철에 높은 분포를 보였다.

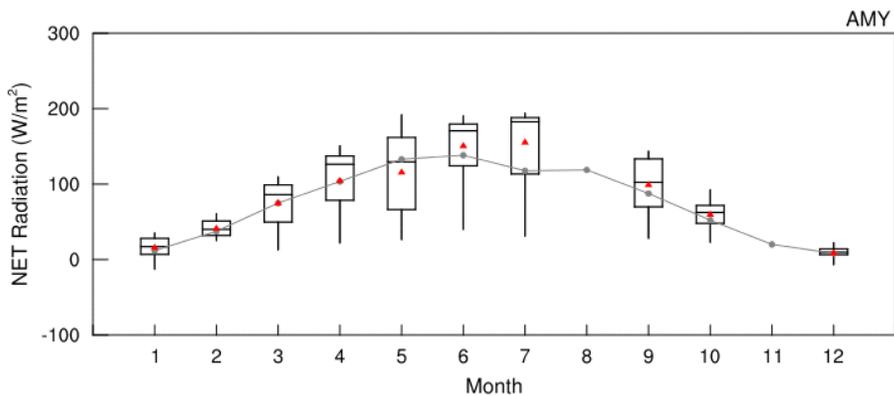


그림 3.4.5 2018년 안면도 순복사의 월변화.

## 3.5 성층권오존

성층권 오존은 태양에서 방출되는 유해한 자외선으로부터 인류를 지켜준다. 오존층의 변화는 지구 대기의 복사 에너지 균형에 막대한 영향을 미치고 있고 대기 대순환에 직접 관계되고 있다. 오존전량은 지상 어느 곳이든 그 위치 상공에 존재하는 오존의 총량으로 정의되는데, 돕슨 단위(Dobson Unit, DU)로 기록된다. 일반적으로 오존전량은 적도에서 최솟값을 갖고 고위도로 갈수록 높아진다(Butchart, 2014, Hu et al., 2017). 태양 자외선 복사에 의한 오존 생성 비율은 열대지방에서 평균적으로 최고치를 보이지만, 성층권 내 공기 대순환으로 열대 오존이 극지방으로 서서히 수송되기 때문에 오존층 두께는 중위도와 고위도에서 두꺼워지고, 저위도에서는 상대적으로 얇아진다. 오존전량은 계절별로 달라지는데, 늦가을과 겨울 동안 열대지방에서 극지방으로의 오존 수송이 증가하기 때문에 오존전량은 봄철 고위도에서 최댓값을 갖게 된다.

대기 중 극미량으로 존재하는 오존은 분포하는 고도 영역에 따라 다른 성격으로 기후에 영향을 미치고 있다. 오존층이라 알려진 성층권의 오존은 6 ~ 8 ppm의 최대 농도를 갖고 대기 중 가장 높은 농도로 분포하고 있으며, 자외선 유입 차단역할을 통해 기후 및 보건, 생태에도 영향을 미치고 있어 기후 관측 분야에서 필수적인 인자이다(Williamson et al., 2014). 이에 반해 대류권에 분포하는 지표 오존은 주로 배기가스로 알려진 질소산화물이나 휘발성유기화합물로부터 광화학반응에 의해 생성되어 건강에 해로운 물질로 알려져 있다.

대기 중 분포하는 오존량의 관측은 단위면적 상공에 분포하는 오존의 전체 양을 관측하는 오존전량 관측방법과 연직 분포를 관측하는 방법이 있다.

### 3.5.1 오존전량

기상청은 안면도와 고산에서 오존분광광도계(Brewer MkIII)를 이용하여 오존전량을 관측하고 있으며, 위탁관측소인 연세대학교 월봉(月峰) 오존관측소(서울)에서는 Dobson 오존분광광도계(Beck #124)를 도입하여 1984년부터 관측을 수행 중이다. 안면도와 연세대학교 월봉관측소는 WMO GAW의 세계 오존 및 자외선 자료센터(World Ozone and Ultraviolet Data Center, WOUDC)와 관측 자료를 공유하고 있다.

## 가. 안면도, 고산

그림 3.5.1은 포항, 안면도, 고산의 오존전량 연평균을 1994년부터 나타낸 것이다. 2017년 12월에 관측이 중단된 포항관측소의 오존전량값은 같은 위도대인 안면도 자료와 비교하기 위해서 2013년 전후로 같이 나타내었다. 2018년 오존전량은 안면도 320 DU, 고산 304 DU로 두 지점 모두 2017년 연평균 값과 큰 차이를 보이지 않았으나, 고산은 다소 증가하였고, 안면도는 감소하였다.

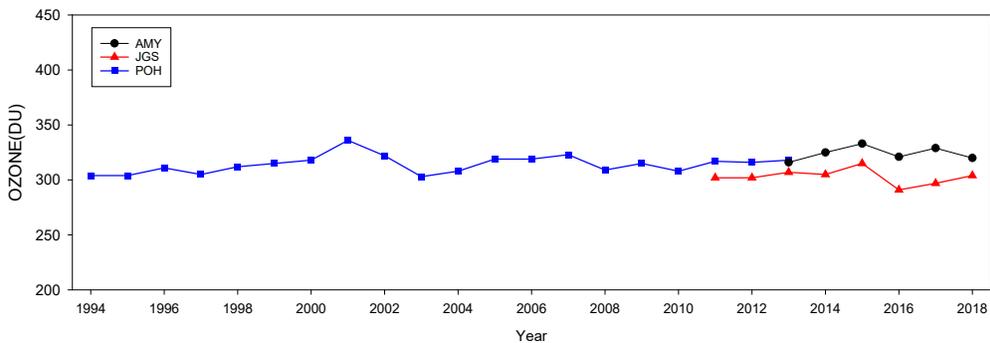


그림 3.5.1 안면도, 포항, 고산에서 관측된 연평균 오존전량 분포.

북반구의 오존전량은 봄에 뚜렷한 최댓값을 갖고 여름부터 가을까지 값이 낮아지는 계절변동을 보인다. 그림 3.5.2는 안면도, 고산에서 관측한 2018년 오존전량 월평균을 과거 관측 평균(포항+안면도: 2008 ~ 2017년, 고산: 2011 ~ 2017년)과 같이 비교한 것이다. 안면도와 고산의 월 변동성을 보면, 안면도 월평균 최댓값은 2월(382 DU), 최솟값은 8월(285 DU), 고산 최댓값은 4월(345 DU), 최솟값은 12월(257 DU)에 나타났다. 안면도는 평년 대비 2월의 증가폭이 가장 컸으며, 여름에는 다소 감소했다. 고산은 평년 월평균 분포와 비슷한 경향을 보였다.

그림 3.5.3(a), (c)는 각각 안면도와 고산의 일 오존전량을 시계열로 나타낸 것이다. 오존전량은 매년 규칙적인 계절변동을 나타내고 있다. 2018년 안면도와 고산의 오존전량 최댓값은 각각 470 DU (2월 5일), 417 DU (2월 7일)이며, 최솟값은 각각 248 DU (12월 28일), 222 DU (12월 22일)였다. 오존전량의 단기 일변화는 주로 종관기상장의 일변화에 의해서 나타난다. 그림 3.5.3(b), (d)는 각각 안면도와 고산의 일일차 변화율을 나타낸 것으로써, 일일차 변화율은 일일 자료를

근거로 당일과 바로 전 날짜의 일 오존전량 차이값의 비율(%)을 의미한다. 안면도, 고산의 증가율 최댓값은 각각 45%, 31%, 감소율 최댓값은 각각 33%, 19%로 모두 증가율이 더 높았다. 이는 일 종관 기상장의 변화가 오존전량의 증가 변화에 크게 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

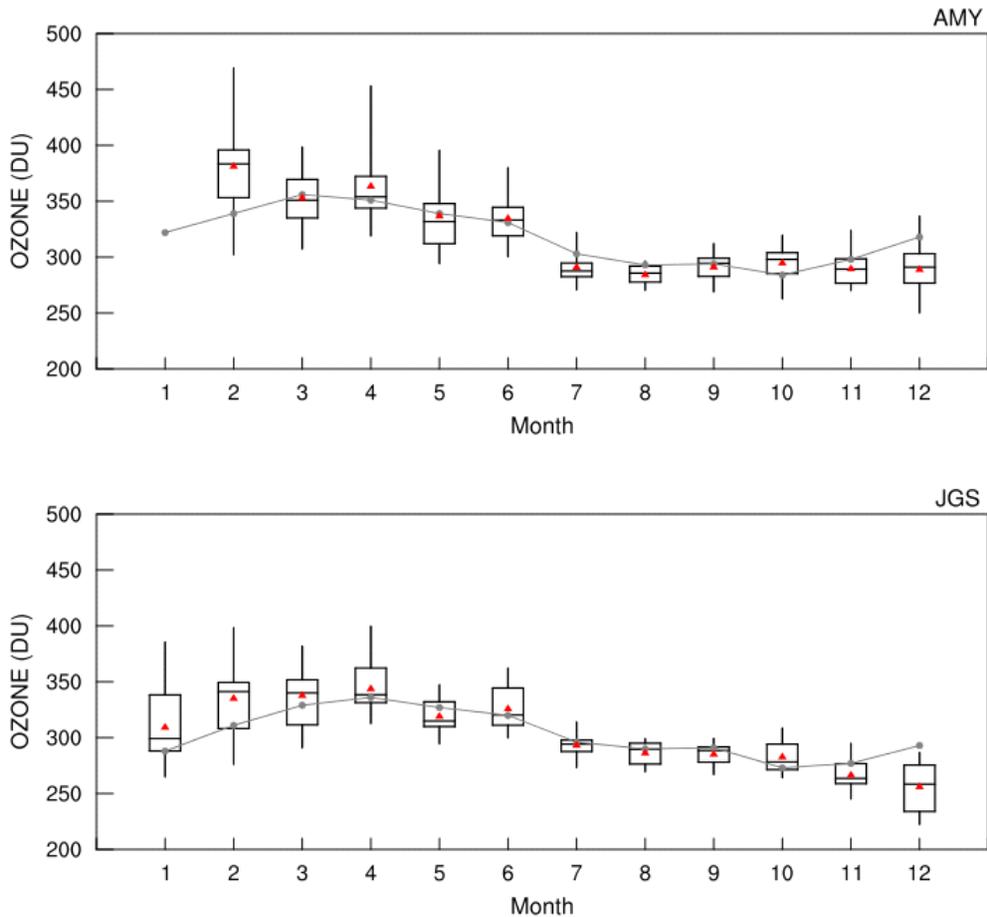


그림 3.5.2 2018년 월평균 (위)안면도, (아래)고산 오존전량의 월변화. 2018년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간점 월평균)와 2008 ~ 2017년(포항+안면도), 2011 ~ 2017년(고산)의 평균(점-선).

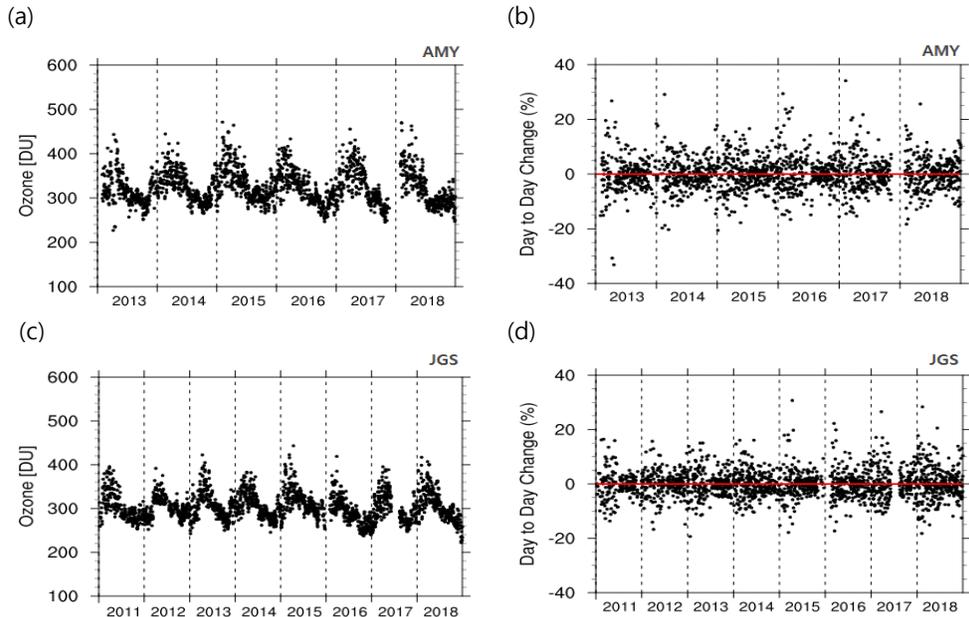


그림 3.5.3 안면도 (a)오존전량, (b)일일차변화율, 고산 (c)오존전량, (d)일일차변화율의 시계열.

오존전량의 일일차 변화 절댓값의 평균과 표준편차를 표 3.5.1에 나타내었다. 2018년 안면도의 일일차 변화율 절댓값은 4월 6.8%로 가장 높았으며, 같은 기간 표준편차도 8.1%로 매우 높았다. 고산은 1 ~ 6월과 12월의 일일차 변화율 절댓값이 약 4.0% 이상으로 높게 유지되며 오존전량 값이 높아지기 시작하는 겨울철부터 가장 높은 값이 나타나는 봄철까지 변동성이 큰 모습을 보였고, 7월에서 10월은 3.0% 이하로 비교적 안정한 편이었다. 일일차 증가율의 연평균 값은 안면도 4.8%, 고산 4.6%, 감소율은 안면도 -4.4%, 고산 -4.0%로 증가율과 감소율의 큰 차이는 없었다.

표 3.5.1 안면도, 고산 지역의 오존전량 일일차 변화율 월 평균값

Difference (%)		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
안 면 도	(2018) Absolute (Stddev)	-	6.7 (5.8)	5.5 (4.3)	6.8 (8.1)	5.6 (5.4)	4.9 (3.0)	2.7 (2.7)	2.2 (1.9)	2.6 (2.2)	3.0 (2.1)	4.1 (2.7)	5.6 (4.0)	4.5 (3.8)
	(2013-2017) Absolute (Stddev.)	5.3 (5.4)	7.4 (6.1)	6.6 (5.2)	8.8 (7.7)	4.6 (3.8)	4.7 (3.4)	3.7 (3.2)	2.5 (2.2)	2.3 (1.8)	2.7 (2.1)	3.9 (3.0)	5.0 (4.6)	4.8 (4.1)
	(2018) Increase	-	6.8	6.5	9.8	5.9	4.9	2.1	1.9	2.5	3.1	4.1	5.2	4.8
	(2018) Decrease	-	-6.6	-4.5	-5.2	-5.4	-4.9	-3.8	-2.7	-2.6	-3.0	-4.1	-6.2	-4.4
	(2018) Absolute (Stddev)	7.1 (4.9)	6.8 (4.8)	4.4 (3.2)	4.3 (4.1)	4.0 (3.3)	5.8 (4.9)	2.2 (1.7)	1.5 (1.8)	2.7 (2.4)	2.8 (2.7)	3.7 (2.9)	4.8 (3.6)	3.0 (2.4)
	(2011-2017) Absolute (Stddev.)	4.5 (3.6)	4.9 (4.0)	5.7 (4.8)	5.2 (4.4)	4.2 (3.1)	4.0 (3.0)	2.2 (1.8)	2.3 (1.7)	2.3 (1.8)	2.2 (1.8)	2.6 (2.0)	3.9 (2.9)	3.0 (2.7)
	(2018) Increase	8.1	5.6	4.5	4.9	4.8	7.8	1.8	1.3	3.2	2.6	4.1	7.0	4.6
	(2018) Decrease	-6.4	-8.8	-4.4	-3.6	-3.5	-4.5	-2.7	-1.8	-2.1	-2.9	-3.3	-3.9	-4.0
고 산	(2018) Absolute (Stddev)	7.1 (4.9)	6.8 (4.8)	4.4 (3.2)	4.3 (4.1)	4.0 (3.3)	5.8 (4.9)	2.2 (1.7)	1.5 (1.8)	2.7 (2.4)	2.8 (2.7)	3.7 (2.9)	4.8 (3.6)	3.0 (2.4)
	(2011-2017) Absolute (Stddev.)	4.5 (3.6)	4.9 (4.0)	5.7 (4.8)	5.2 (4.4)	4.2 (3.1)	4.0 (3.0)	2.2 (1.8)	2.3 (1.7)	2.3 (1.8)	2.2 (1.8)	2.6 (2.0)	3.9 (2.9)	3.0 (2.7)
	(2018) Increase	8.1	5.6	4.5	4.9	4.8	7.8	1.8	1.3	3.2	2.6	4.1	7.0	4.6
	(2018) Decrease	-6.4	-8.8	-4.4	-3.6	-3.5	-4.5	-2.7	-1.8	-2.1	-2.9	-3.3	-3.9	-4.0

## 나. 서울(위탁관측소)

연세대학교 오존 관측소는 2004년부터 오존 관측 시스템의 자동화를 통해 객관적인 관측 방법을 구축하여 보다 정확한 오존전량 자료를 생산하고 있다. 1997년 Brewer 분광도계(SCI-TEC, #148)가 설치되어 자외선과 오존 전량을 동시에 관측하고 있고, 2012년에 오존과 이산화질소를 중점으로 관측하는 Pandora가 설치되었다. 이들 자료는 Dobson 오존 분광도계에서 관측된 오존 전량과의 비교, 검증 자료로 사용되어 한반도 상공의 오존전량 관측의 정확도 향상에 기여하고 있다. 이 관측소는 2004년부터 기상청 지구대기감시위탁관측소로 지정되어 운영되고 있다. 대기 중의 연직 오존전량의 90% 이상이 성층권 오존층에 분포되어 있기 때문에 오존전량의 변화는 오존층의 변화를 의미한다. 여기에서는 2018년도 한반도 상공의 오존전량 변화를 과거 장기간 참조값(1985 ~ 2017년)과 비교분석하였다.

그림 3.5.4(a)는 2018년도 서울 상공의 일 오존전량의 시계열, 그림 3.5.4(b)는 서울 상공 오존전량의 장기평균 연변화(1985 ~ 2018년)를 나타낸

것이다. 기상 및 장비 보정으로 인한 결측 날짜 동안의 관측 자료는 OMI-TOMS 오존전량 관측 자료로 재구성하였다. 서울 지역의 일 대푯값 관측 자료를 기준으로 보게 될 경우, 봄철에 300 DU 이하로 감소하는 경우는 나타나지 않았다. 2018년의 일 최댓값은 4월 7일에 476 DU, 일 최솟값은 12월 29일에 253 DU로 나타났으며, 2018년도에 관측된 일 최댓값 476 DU는 과거 극댓값인 518 DU (2011년 5월 11일)에 비해서 약 40 DU 적은 값이다. 2월과 4월에는 평년보다 높은 오존값을 나타냈으며 3월 오존값보다도 더 높았는데, 이는 기존 패턴과는 다른 모습이다. 특히 2월에는 평년에 비해 특히 높은 값을 보였다.

서울 상공의 1985 ~ 2017년까지의 평균 오존전량은 325 DU로 나타났으며, 3월에 최대인 361 DU, 10월에 최소인 290 DU로 월평균 기준으로 연교차가 71 DU로 연평균 오존전량 기준으로 22%의 변동폭을 보였다(그림 3.5.4(b), 표 3.5.2). 그리고 오존량의 변동은 2월에 표준편차가 19.5 DU로 가장 크고, 9월에 7.5 DU로 가장 낮아 안정적인 변동을 나타내었으며, 계절 변화의 폭이 3월을 중심으로 봄에 가장 많고, 9월을 중심으로 가을철에 적은 변화를 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 6 ~ 7월에 걸쳐 여름에 오존의 감소가 급격히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

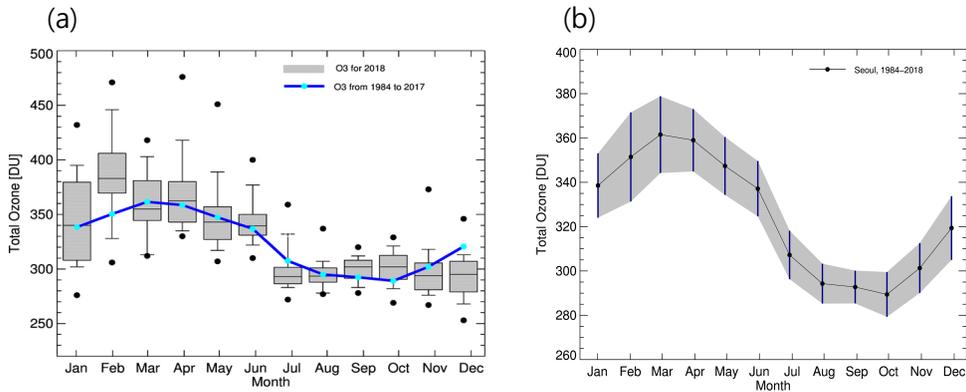


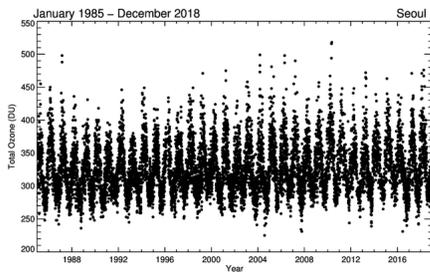
그림 3.5.4 서울 상공 오존전량의 (a)2018년 연변화(회색 박스 플롯 2018년의 오존 전량, 상자 선의 양끝 10%, 90% 상자 양끝 25%, 75% 상자가운데 선은 중간값 검은 점은 최댓값 및 최솟값) 및 (b)장기월평균 연변화(1985~2018).

표 3.5.2 서울 상공의 장기 오존전량 및 참조값(1985 ~ 2017년)과 2018년 값과의 비교, 장기기후 평균값(1985 ~ 2018년) 및 극값(최대와 최소), (단위: DU)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
참조값 (Ref. 85-17)	338	350	362	359	347	337	307	295	292	289	302	321	325
2018	344	386	361	371	347	343	299	295	299	301	297	294	328
Diff (%)	1.8	10.3	-0.3	3.3	0.0	1.8	-2.6	0	2.4	4.2	-1.7	-8.4	0.9
기후값 (Avg. 85-18)	339	351	362	359	347	337	307	295	293	290	302	320	324
Stdev	14.5	20.1	17.3	14.1	13.0	12.5	11.0	8.0	7.5	10.2	10.9	14.3	6.7
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	262	264	252	283	267	231	225	240	234	231	242	241	225
(Date, YY/DD)	(02/ 12,15)	(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)

2018년의 연평균 오존전량은 328 DU로 나타났다. 이는 과거 참조값(1985 ~ 2017년)의 325 DU에 비해서 약 1.0% 증가하였으며, 월별로는 2월에 최대 증가 10.0%를 보이고, 12월에 -8.4%로 최대 감소를 보였다. 2018년의 연교차는 2월의 386 DU와 12월의 294 DU로 92 DU의 연교차를 보이고 있다. 이는 과거 참조값의 연교차인 71 DU보다 높게 나타났다.

(a)



(b)

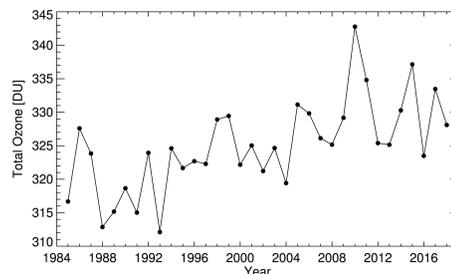


그림 3.5.5 1985년부터 2018년까지 (a)일 오존전량의 장기 시계열 및 (b)연평균값의 경년 변화.

그림 3.5.5(a)는 1985년부터 2018년까지의 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 그 차이는 293 DU로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 주로 종관기상장의 변화에 의해서 나타나고 있으며, 연변화는 대기대순환의 영향을 받고 있다. 그림 3.5.5(b)의 연평균 오존전량의 경년변화에서 보게 되면, 과거 관측 기간(1985 ~ 2018년)동안 연평균 오존전량이 가장 높았던 시기는 2010년으로 343 DU이며, 최솟값은 1993년에 나타난 312 DU였다. 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). 2018년 2월 평균 오존전량(386 DU)은 과거 기후값(350 DU)과 36 DU의 차이를 보이며 가장 높게 나타났으나, 다른 월에서는 차이가 적게 나타났다.

그림 3.5.5(a)에서 보인 일 오존전량을 바탕으로 일일차 변화율(Day To Day Change, DTDC)을 계산하여 그림 3.5.6에 나타내었다. DTDC는 전일 오존량에 대한 그 다음날 오존량의 차이를 대한 변화율로 정의하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 오존전량의 일일차 변화율은 -30.3% ~ 41.7%의 범위에서 나타났다. 오존전량은  $\pm 10\%$  이내에서 변화하는 것으로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 종관 기상장의 일변화에 기인한 것으로 생각된다. 표 3.5.3은 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% 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 일일차 변화율의 증감 경향에서 증가 경향의 평균은 5.7%, 감소 경향의 평균은 -5.2%로, 오존전량의 일일차 변화는 감소 경향보다는 증가 경향이 더 큼을 알 수 있다.

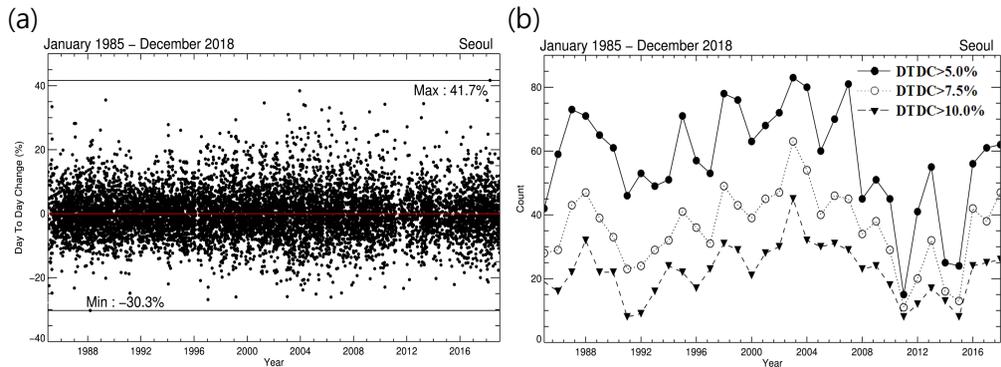


그림 3.5.6 서울 지역 오존전량의 일일차 변화율의 (a)시계열 및 (b)증가 경향의 일일차 변화율에 대한 관측횟수.

표 3.5.3 서울 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 월평균 및 연평균(1985 ~ 2018년)

Difference (%)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Absolute	6.3	6.6	6.1	5.8	5.2	5.2	4.3	3.8	3.9	3.9	4.6	5.7	5.3
Stddev.	5.2	5.6	5.6	5.3	5.0	4.4	4.4	3.9	3.3	3.6	3.9	4.9	4.7
Increase	6.6	7.0	7.6	6.6	6.4	5.4	5.0	4.5	3.9	4.0	5.0	6.2	5.7
Stddev.	5.5	6.2	6.0	6.1	6.0	4.9	4.6	4.3	3.6	3.8	4.2	5.4	5.2
Decrease	-6.2	-6.3	-6.5	-5.9	-5.5	-5.1	-5.1	-4.2	-3.8	-4.0	-4.5	-5.4	-5.2
Stddev.	4.7	4.8	5.1	4.4	3.9	3.9	4.1	3.4	2.9	3.4	3.5	4.2	4.2

중관 규모 기상장은 매년 여러 자연 진동에 의해서 패턴이 변화하게 되므로 오존전량의 변화에도 이러한 영향을 미치게 된다. 따라서 오존전량이 급변하는 경우에 대해서 경년 변화가 다르게 나타날 수 있으며, 이는 오존전량의 장기 변화 경향을 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 경년 변화는 오존전량의 경년 변화 및 장기 변화 경향을 파악하는데 있어서 매우 중요한 분석이다. 그림 3.5.6(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. 2018년도의 경우, 전년에 비해 5% 이상 증가한 관측횟수는 62회, 7.5% 이상 증가한 관측횟수는 47회, 10% 이상 증가한 관측횟수는 26회이다. 그림 3.5.5(b)의 오존전량의 연평균 경년변화와 비교할 경우, 오존전량의 증가를 나타내는 일일차 변화율의 관측횟수는 대체적으로 오존전량의 연평균 경년 변화와 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.

### 3.5.2 오존 연직분포

성층권 오존은 약 25 ~ 30 km 상공에서 최고 농도대를 형성하며, 태양으로부터 오는 유해한 자외선을 막아주는 역할을 한다. 그러나 오존이 대류권에서 높은 농도로 존재할 경우, 산화제로 작용하여 인간에게 뿐만 아니라 식물과 건물 등에도 여러 유형의 악영향을 미치게 된다. 따라서, 대기 중 오존의 형태를 더 정확하게 이해하고, 각 대기권 간의 오존량에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 대기 중 오존의 수직분포에 관한 연구가 대단히 중요하다(Kim et al., 2000). 이 밖에도 오존의 연직분포 분석은 오존의 수평, 연직적 이동 추정 등에 활용될 수 있다. 오존 연직분포는 연직 공기기둥에 존재하는 각 층의 오존 정보를 의미하며 오존 생성의 광화학과정에 의해 결정된다. 오존은 주로 성층권에서 생성이 이루어진 후, 대류권으로 수송되어 소멸되고 있으며, 이러한 특성상 오존농도는 하부성층권에서 최대로 나타나고, 대류권에서는 대체적으로 균일한 농도를 보이고 있다. 기상청은 포항 기상관측소에서 1995년부터 ECC (Electrochemical Concentration Cell Ozonesonde) 오존존대를 이용해서 오존의 연직분포를 관측하고 있으며, 위탁 관측소인 숙명여자대학교에서는 마이크로파 수신기를 이용하여 2008년부터 연직 오존을 관측하고 있다.

#### 가. 포항

기상청은 1995년부터 포항관측소에서 ECC 오존존대를 이용하여 WMO의 권고에 따라 주 1회의 관측주기를 설정하여 매주 수요일에 연직 오존 관측을 실시하는 것을 원칙으로 하며, 악천후일 경우 수요일 전후의 날을 택하여 관측을 실시하고 있다. ECC 오존존대는 정기적으로 연직오존분포를 관측하기 위하여

NOAA에서 개발된 측기로서 1200 ~ 2000 g 정도로 무게가 가볍고 부피가 작아 일반적으로 30 km 이상 올라 갈 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). 2018년에는 총 48회 관측이 실시되었으며, 이 중 성층권까지 관측을 성공한 46회를 분석에 이용하였다. 그림 3.5.7은 2018년 포항 상공의 월평균 연직 오존분포를 오존분압으로 나타낸 그림이다. 고농도 오존은 주로 18 ~ 28 km에 존재하며, 1 ~ 5월에 주로 높게 나타난다. 특히, 1월에서 2월 걸쳐 약 19 ~ 21 km 고도에서 최대 농 값이 나타나며, 가을로 갈수록 최대 농도가 나타나는 층은 높아지고 그 강도는 약해진다. 이런 계절 변동은 성층권 하층과 대류권 상부에서 주로 보이며, 성층권 상부에서는 약한 계절변동을 갖는다.

성층권 오존과 대류권 오존은 상반된 영향력을 보이며 생성 메커니즘 또한 차이가 난다. 오존의 연직분포를 분석할 때는 주로 성층권과 대류권을 구분하여 분석하는데 최근 대류권계면 주변에서 나타나는 Second Ozone Peak (SOP)에 의해 오존전량 급증현상이 나타난다고 알려져 있다(Park et al., 2012). 그림 3.5.8은 포항에서 오존존데 관측이 시작된 1995년부터 2018년까지 오존연직분포이며, 주로 봄철에 고도 약 16 km 까지 오존양이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 SOP 현상으로써 2017년 가장 많은 양의 오존농도가 16 km까지 관측되었으며, 2018년에는 그 정도가 약해졌다. 한반도에서 SOP 현상은 주로 제트기류로 인해 발생하며, 극지방 성층권 오존이 폴딩 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).

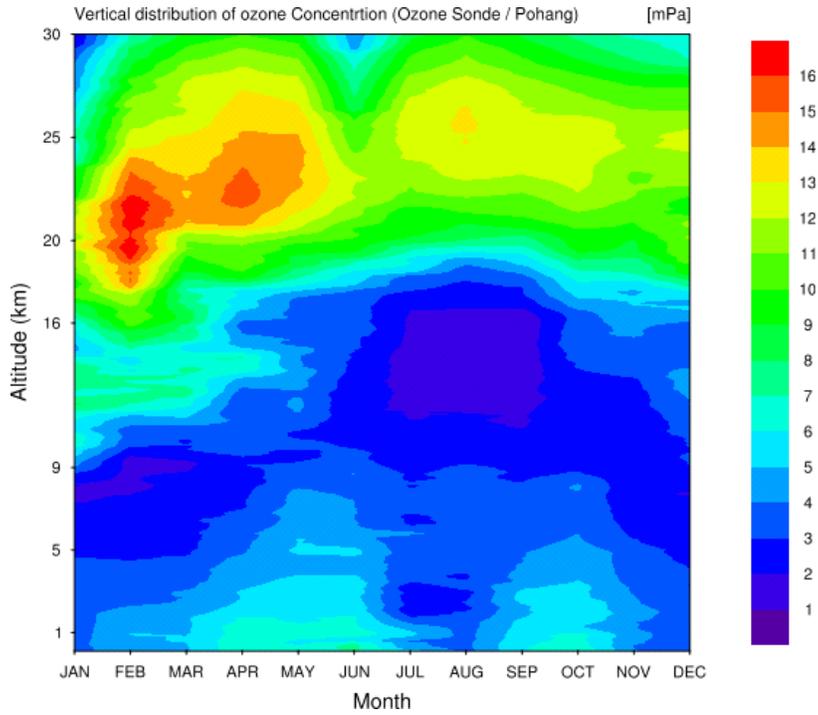


그림 3.5.7 2018년 포항지역의 오존농도 연직분포.

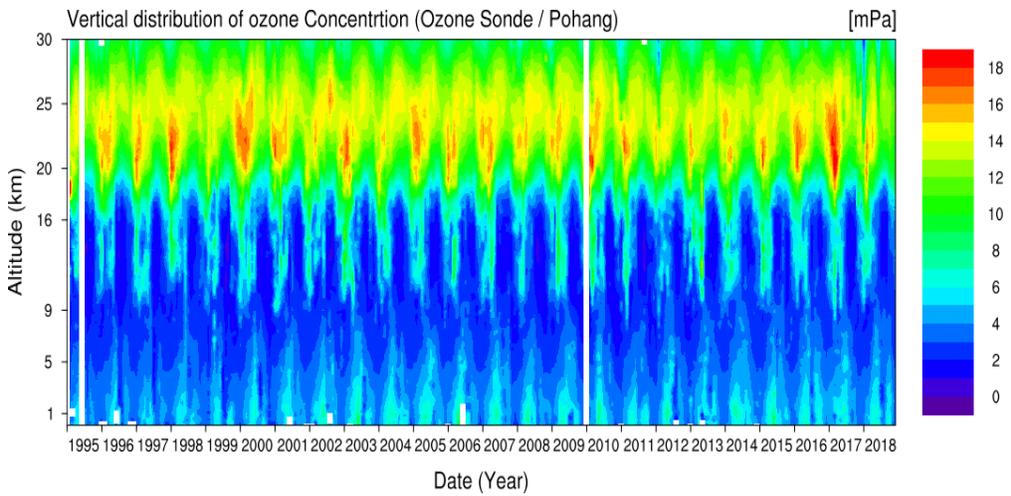


그림 3.5.8 포항지역의 오존농도 연직분포(1995 ~ 2018년).

## 나. 서울(위탁관측소)

오존농도 연직분포 관측을 위한 마이크로파 수신기는 구축 이후 운영 시 상당히 경제적인 이점이 있으며, 요구 면적이 작고 상당기간 무인 관측이 가능하여 국내 관측망 확보에 유리하다(Ulaby et al., 1981, Janssen, 1993). 또한 24시간 상시 관측으로 운영이 가능하기 때문에 장·단기 시계열 분석 및 이상 기상현상에 대한 성층권 영역의 특이 현상 추적의 기초자료로 활용이 가능하며, 오존존데보다 높은 고도 영역까지 분석할 수 있다. 따라서 성층권 전반에 대한 오존의 변동 자료 확보가 가능하고, 대류권 오존량 변동에 대한 성층권 오존의 유입 기여도 평가 및 오존량 변동에 대한 역학적, 화학적 분석의 기초자료로 활용할 수 있다.

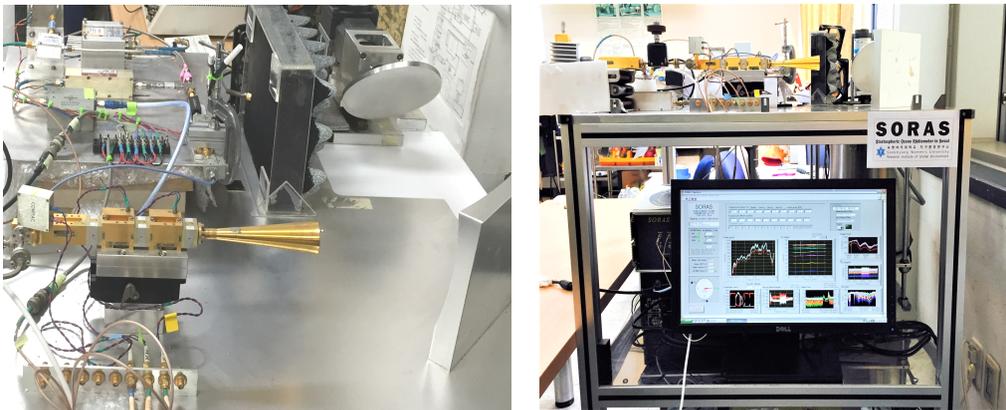


그림 3.5.9 숙명여자대학교 지구환경연구소 110 GHz 오존전파수신기 SORAS (Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul).

숙명여자대학교 지구환경연구소에서 운영하는 성층권 오존 연직분포 관측용 오존전파수신기 SORAS (Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul)는 오존의 회전전이 주파수 중 하나인 110.836 GHz 전파를 지상에서 수신하여 1 GHz 영역에 대한 전파 스펙트럼 분석을 통해 성층권 전 영역과 중간권 하층 영역에 대한 오존 연직분포를 상시 관측하고 있다(그림 3.5.9). 오존전파수신기 SORAS는 수신 전파를 스펙트럼 형태로 변환하는 부속 장치인 푸리에변환 전파분광기의 수리·교정을 2018년 상반기에 걸쳐 진행하였으며, 7월 테스트기간 이후 9월부터 상시 관측 체계로 재정비하였다. 여기서 나타낸 오존 연직분포 자료는 상시 관측되고 있는 오존 전파 스펙트럼을 2시간 단위로 평균하여 분석하였다.

이 중 개별 전파스펙트럼의 품질이 좋지 않거나 비가 온 날의 자료는 제외하였으며, 8 ~ 9월의 자료는 잦은 강수로 인한 관측 자료의 품질 저하와 장비 시험 등으로 인해 유효 자료 수가 100개 미만으로 상대적으로 적게 표출되었다. 이후 관측 환경이 개선되고 장비가 안정적으로 운영되기 시작하여 12월에는 222개의 연직분포도가 나타나 세밀한 변동자료를 확인할 수 있다. 분석한 오존 농도는 공기의 전체 부피 대비 오존이 차지하는 부피의 비율을 나타내는 부피혼합비 단위인 ppm로 나타내었다. 아래에서 나타낸 고도는 기압으로부터 변환한 값이며, 0 km를 1000 hPa로 가정하여 16 km 증가할 때마다 기압은 1/10으로 감소한다는 가정 하에 변환하였다.

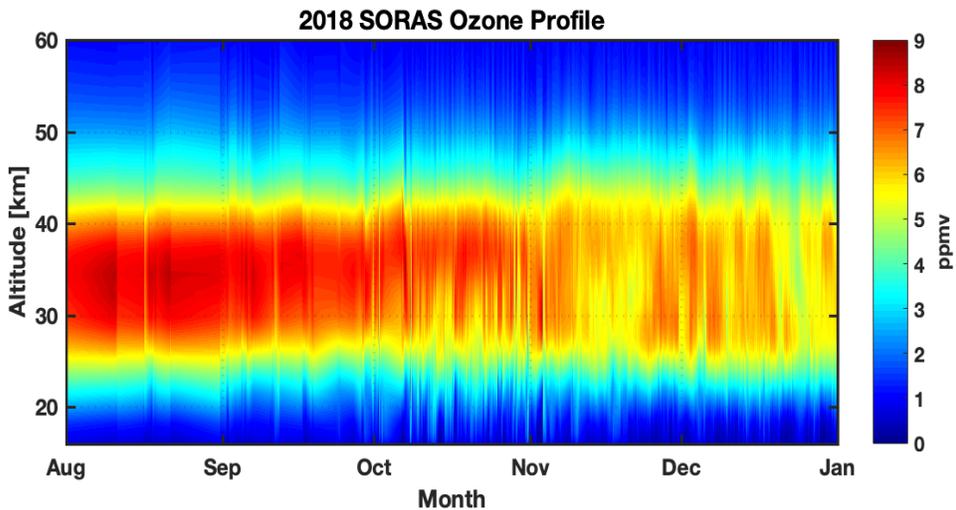


그림 3.5.10 2018년 8 ~ 12월 서울지역 고도별 오존 분포도 관측 결과.

서울 상공의 오존 농도는 고도 약 20 km에서 50 km 사이에서 두터운 층을 이루고 있고, 최대 농도는 32 ~ 36 km에서 나타나며, 9월 이후 점차 감소하나 전체적인 농도가 26 ~ 42 km의 넓은 구간에 걸쳐 퍼져있는 것으로 관측되었다 (그림 3.5.10).

오존 부피비의 8 ~ 12월의 변동성을 20 ~ 42 km 구간에 대해 고도별로 나누어 아래 그림 3.5.11에 나타내었다. 변동성을 살펴보면 고도 별로 증감 경향성이 다르게 나타난 것을 볼 수 있는데, 20 ~ 26 km 영역에서는 농도의 변동성이 크지 않으나 8월부터 10월까지 약간의 감소 경향을 보이다가 다시 회복되는 경향을 보였으며, 26 km 이상의 고도영역에 대해서는 8월부터 12월까지 계속적으로

감소하는 경향을 보였다. 오존 농도가 높게 나오는 26 ~ 32 km 구간과 32 ~ 36 km 구간에서는 8월부터 11월까지 1.4 ~ 1.9 ppm의 차이로 급격하게 감소하다가 이후 매우 약한 감소 경향을 보였으나, 36 ~ 42 km 구간에서는 8월부터 10월까지 거의 일정한 상태를 유지하다가 11월부터 약간의 감소 추세를 나타내었다.

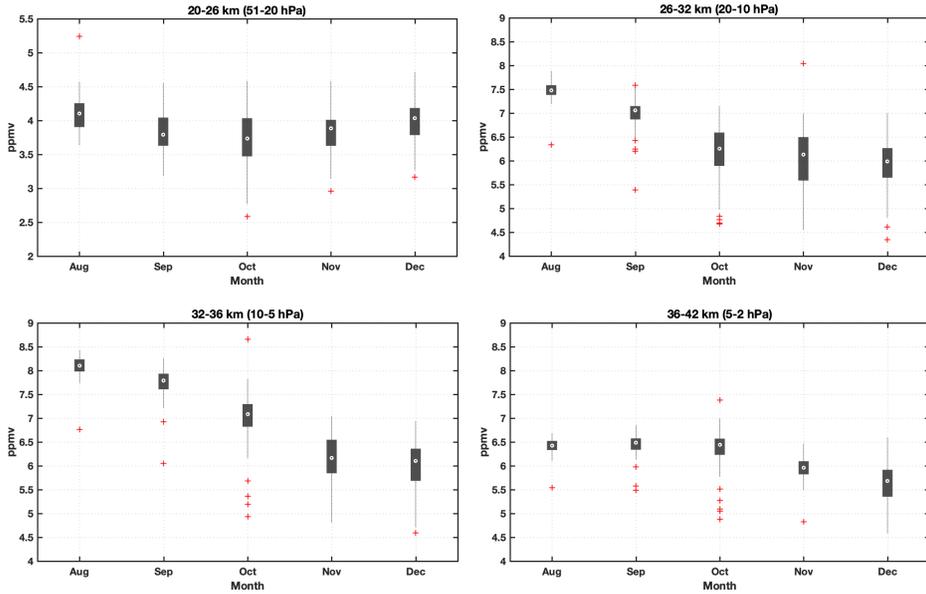


그림 3.5.11 서울지역의 오존 고도별 부피비 분포 변화.

표 3.5.4 고도 구간별 오존 농도의 월별 중간값(median) 농도, (단위: ppm)

[ppm]	8월	9월	10월	11월	12월
20-26 km	4.1	3.8	3.7	3.8	4.0
26-32 km	7.5	7.0	6.3	6.1	6.0
32-36 km	8.1	7.8	7.1	6.2	6.1
36-42 km	6.4	6.5	6.4	6.0	5.7

2016 ~ 2018년과 변동성을 비교하면 고도 20 ~ 26 km 구간에서는 9월을 제외하고 유사한 농도를 보이고 있으나, 26 km 이상의 영역에서는 11 ~ 12월에 이전 년도보다 1 ppm 이상 낮은 농도를 보인 것으로 나타났으며, 이러한 농도

감소가 단순히 감소 시기의 변동에 의한 것인지 다른 요인에 의한 것인지는 좀 더 세밀한 분석을 필요로 한다(그림 3.5.12, 표 3.5.4).

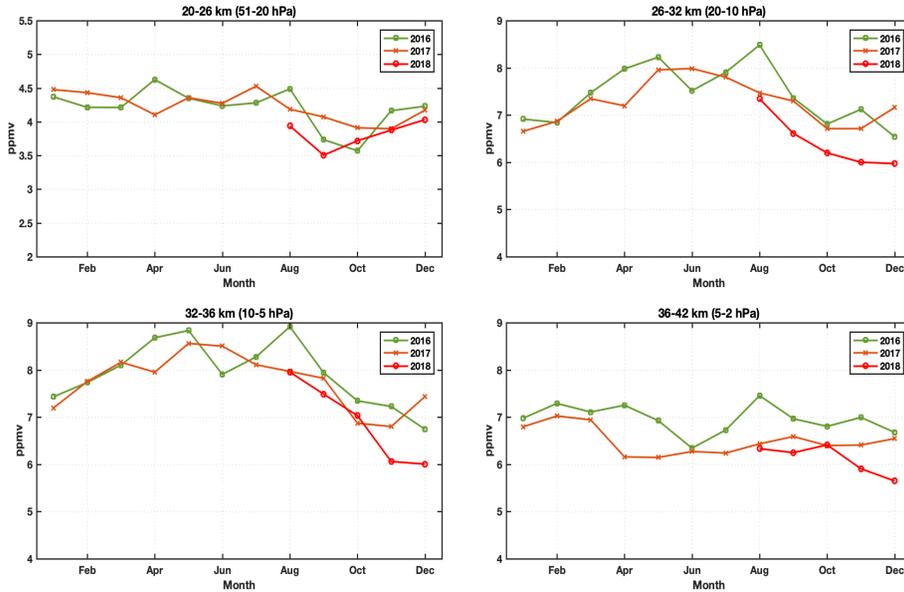


그림 3.5.12 서울 상공 고도별 오존 농도의 변동 비교(2017 ~ 2018년).

SORAS로 관측한 자료를 미국 NASA의 AURA위성에 탑재된 MLS (Microwave Limb Sounder) 관측 결과와 비교하였다. MLS 위성은 1일 1회 한반도 상공의 오존 농도의 연직분포값을 제공하고 있다. SORAS로 관측한 오존 농도는 위성자료와 비교했을 때 1 ppm 이내의 차이를 나타내었으며, 25 km 이상 고도에 대해 SORAS로 관측한 값이 위성자료보다 작게 산출됨을 보였으나, 변동성은 유사하게 나타났다(그림 3.5.13).

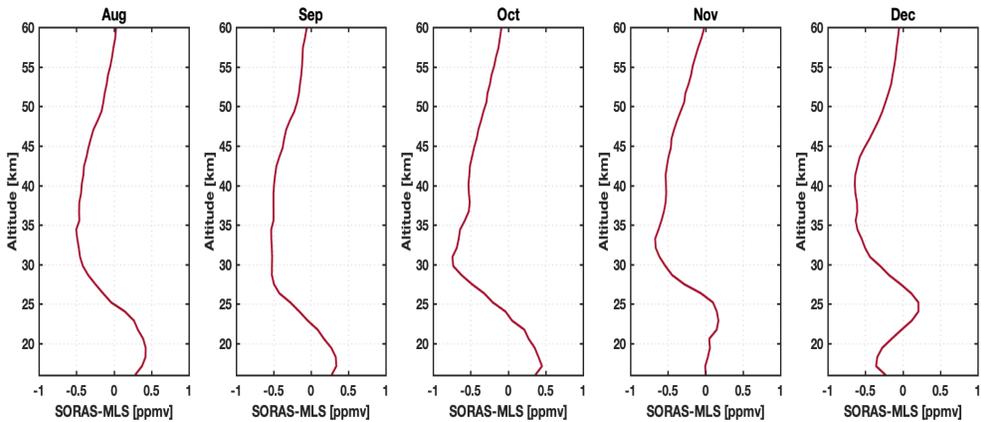


그림 3.5.13 숙명여대 오존전파수신기(SORAS)의 오존 관측량과 AURA MLS 위성의 오존 관측량의 차이.

### 3.5.3 남극 오존홀(위탁관측소)

극지방은 겨울에 성층권에서 극 소용돌이(Polar Vortex)에 의하여 극지방 상공과 그 주위에 공기의 교환이 제한되어 극지방상공의 성층권 대기는 주위로부터 오존과 열공급을 받지 못하고 고립된다. 겨울에는 태양빛을 받지 못하므로 극 소용돌이 내부는 복사냉각에 의하여 기온이 현저하게 하강한다. 성층권의 기온이 내려가면 극 성층권구름(Polar Stratospheric Cloud, PSCs)으로 불리는 미세한 입자로 구름이 성층권에 형성된다. PSCs는 초산 또는 수증기 등이 낮은 온도에서 응결되어 액체와 고체의 입자가 형성된다. 이 PSCs를 크게 나누어 하부성층권의 기온이  $-78^{\circ}\text{C}$ 이하에서 발생하는 형태 I 과  $-85^{\circ}\text{C}$ 에서 발생하는 형태 II가 있다. 전자는 질산( $\text{HONO}_2$ )이 많이 함유하여 있는 반면 후자는 빙정( $\text{H}_2\text{O}$ )이 주성분으로 되어 있다(WMO, 1999). PSCs가 형성되면 그 입자의 표면에 불 균일 반응(가스분자가 고체 또는 액체의 표면에서 일어나는 화학반응)으로부터 성층권의 초산염소( $\text{ClONO}_2$ )와 염화수소( $\text{HCl}$ )의 염소분자( $\text{Cl}_2$ )가 발생되어 겨울동안 축적된다(WMO, 1995). 봄이 되면 극지방 상공의 성층권에 태양 빛이 비추어져 겨울동안 축적된  $\text{Cl}_2$ 가 광해리되어 활성염소원자가 된다. 이 염소가 촉매작용을 하게 되어 오존을 파괴하는데, 오존홀은 남극지방에서 이 메커니즘에 의하여 급격한 오존감소, 파괴가 진행되어 형성된다. 이와 같이 오존홀 형성은 극 소용돌이의 활동과 밀접한 관계가 있다. 따라서 극 소용돌이의 연 변동에 따라 오존홀의 크기가 매년 달라진다.

이와 관련된 변동을 살펴보기 위해서, 미국 NOAA와 NASA에서는 SBUV-2 등의 위성 자료를 활용하여 남극의 오존홀의 면적 변화에 대한 감시를 수행하고 있다. 오존홀은 오존전량이 220 DU보다 낮은 영역을 기준으로 정하였으며, 남극 극 소용돌이에서 제트기류가 강화되는 8 ~ 12월 사이에 생성되어 주로 남극의 봄(9 ~ 10월)에 최대 면적을 보이게 된다. 남극 지역에서의 오존전량은 1980년 이전에는 300 DU 수준을 보였으나, 오존홀의 발견 이후 계속해서 감소하다가 1993년에는 82 DU로 관측 기록 중 최저를 나타내었다.

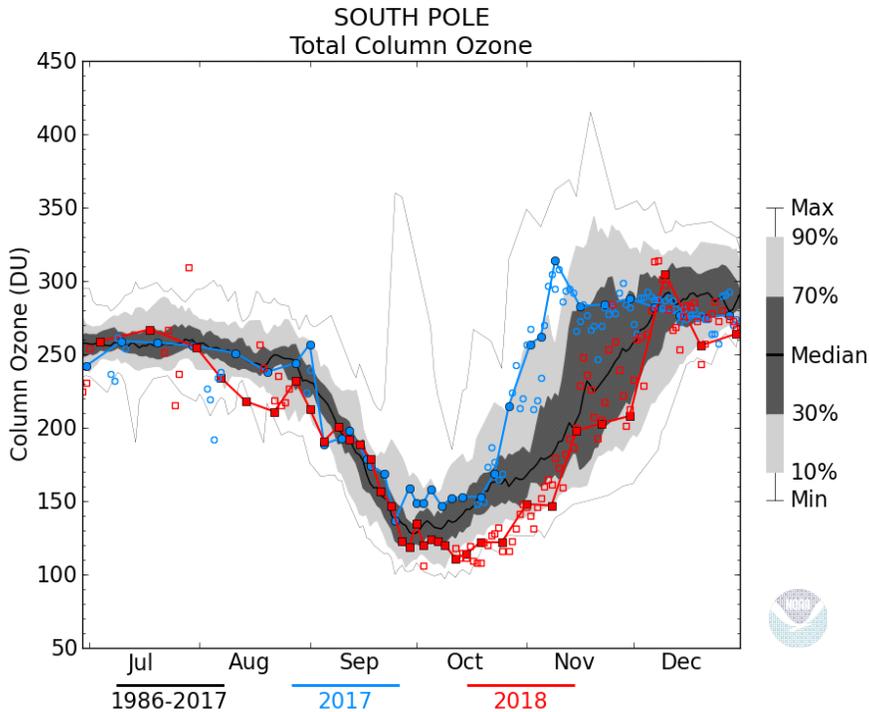


그림 3.5.14 남극 오존전량의 변화

(참조: [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/spo\\_oz/spototal.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/spo_oz/spototal.html)).

그림 3.5.14는 남극 오존홀이 자주 발생하는 7 ~ 12월의 오존전량의 변화를 시계열로 나타낸 것이다. 2018년(빨간선)의 경우, 장기 월평균(1986 ~ 2017년)보다 오존의 감소가 크게 나타났다. 이러한 오존전량에 대한 분석과 관련하여 여러 참고문헌(Solomon et al., 2016, Salby et al., 2011)에서 오존층의 회복세의 가능성을 나타내었고, 추후 장기적인 분석이 필요할 것이라 생각된다.

그림 3.5.15는 NASA ‘Ozone watch’ 에서 제공하는 오존홀의 연 최대면적에 대한 경년 변화를 시계열로 나타낸 그림이다. 2018년도 또한 장기 월평균(2006 ~ 2018년)에 비해 오존홀의 월 최대면적이 10월에 높게 나타났다.

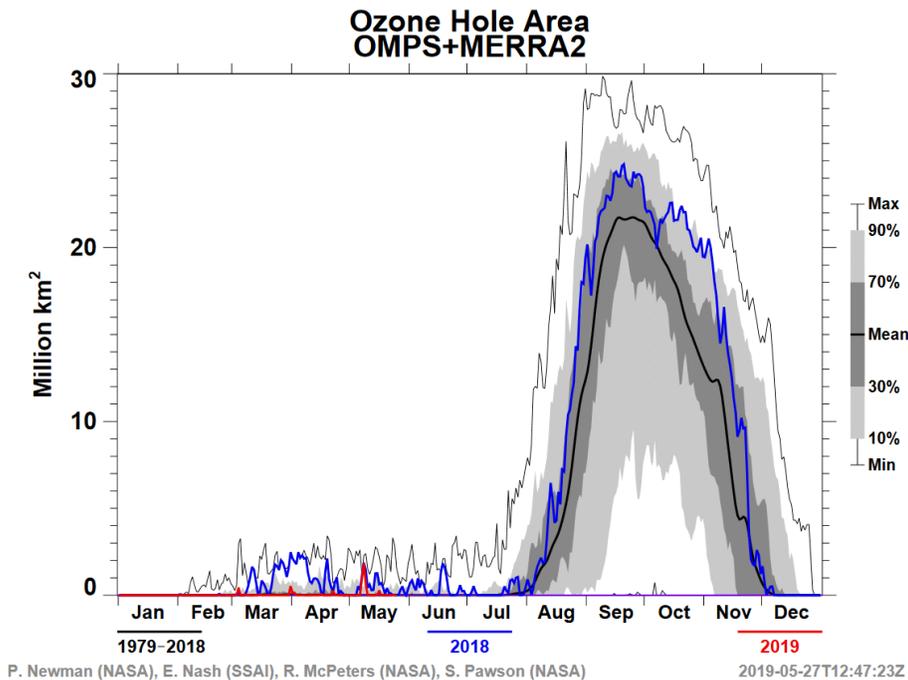


그림 3.5.15 최근 남극 오존홀의 면적 변화

(참조: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar>).

1979년 오존홀이 처음 발견된 이후로 급증하던 오존홀의 연 최대면적은 1990년 후반 이후로 그 면적이 계속해서 유지되는 경향을 보여 왔다. 2012년에 관측된 연 최대 면적은 1850만  $\text{km}^2$ 으로 최근 20년 동안 관측된 오존홀의 최대 면적 중 가장 적은 값으로 나타났다. 2013년의 오존홀의 연 최대면적은 2100만  $\text{km}^2$ 으로 2011년의 2500만  $\text{km}^2$ 에 비해 약 16%가 작은 값으로 나타났으며, 2012년에 관측된 극대 값인 1850만  $\text{km}^2$ 에 비해서 약 13.5%가 증가한 면적으로 나타났다. 2018년의 오존홀은 9 ~ 10월에 2400만  $\text{km}^2$ 으로 평년값과 비슷하게 나타났다.

## 3.6 자외선

자외선 복사는 파장에 따라 자외선A(320 ~ 400 nm), 자외선B(280 ~ 320 nm), 자외선C(100 ~ 280 nm)로 분류된다. 파장이 짧은 자외선C는 대기 상부에서 모두 흡수되거나 산란되기 때문에 지표에 도달하는 자외선 복사는 자외선A와 자외선B가 대부분을 차지한다. 자외선A는 인체의 피부 조직에 가장 깊숙이 침투하며 피부노화 등 장기적 피부손상을 일으킬 수 있다. 한편, 자외선B는 인체에 피부암, 면역성 감퇴, 백내장, DNA 손상 등의 해를 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 복사파장, 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.

기상청에서는 UVA-Detector (Solar Light Co. Model #501)와 UV-Biometer (Solar Light Co. Model #501)를 이용하여 자외선A와 자외선B를 각각 관측하고 있으며, 국내 7개 지점(안면도, 고산, 울릉도, 강릉, 포항, 목포, 서울)에 자외선 관측기를 설치하여 운영하고 있다. 위탁관측소인 연세대학교(서울)에서는 Brewer 분광광도계를 이용해 자외선 복사를 관측하고 있다.

### 3.6.1 자외선A

자외선A는 인체의 피부 조직에 가장 깊숙이 침투하며 피부노화 등 장기적 피부손상을 일으킬 수 있기 때문에, 일 누적 값의 분석이 중요하다. 2018년도 자외선A 일누적 복사량의 최댓값은 강릉 1.56 MJ/m<sup>2</sup> (5월 19일), 서울 1.55 MJ/m<sup>2</sup> (7월 7일), 울릉도 1.59 MJ/m<sup>2</sup> (6월 21일), 안면도 1.60 MJ/m<sup>2</sup> (7월 17일), 포항 1.47 MJ/m<sup>2</sup> (7월 14일), 목포 1.64 MJ/m<sup>2</sup> (7월 14일), 고산 1.71 MJ/m<sup>2</sup> (7월 13일) 이었다. 그림 3.6.1은 2018년 자외선A의 일 누적 복사량 월 변화를 지난 과거 평균값과 같이 비교하여 나타낸 것이며, 과거 평균은 관측 시작년도의 차이로 인해 지점마다 평균 기간의 차이를 갖는다(강릉, 서울, 목포는 2015 ~ 2017년, 울릉도 2012 ~ 2017년, 안면도 2008 ~ 2017년, 포항 2009 ~ 2017년, 고산은 2012 ~ 2017년). 각 지역별 과거 평균값 대비

2018년 월평균 값은 울릉도, 포항, 고산 지역의 경우 봄철에 증가하였으며, 그 외의 지역은 감소 혹은 비슷한 값을 유지하였다. 일누적 복사량의 월평균 최댓값은 강릉(1.11 MJ/m<sup>2</sup>), 서울(1.08 MJ/m<sup>2</sup>), 울릉도(1.04 MJ/m<sup>2</sup>) 지역은 6월, 고산(1.32 MJ/m<sup>2</sup>), 안면도(1.30 MJ/m<sup>2</sup>), 목포(1.30 MJ/m<sup>2</sup>), 포항(1.04 MJ/m<sup>2</sup>)은 7월에 가장 높았다. 여름철인 7 ~ 8월에는 일사는 강하지만 강수의 영향으로 인해 자외선이 낮아지는 경우가 있다. 과거 월평균 값은 주로 5월에 월 최댓값을 보였으나, 2018년 자외선A의 월평균은 여름철에 가장 높은 값이 나타났다(그림 3.6.1).

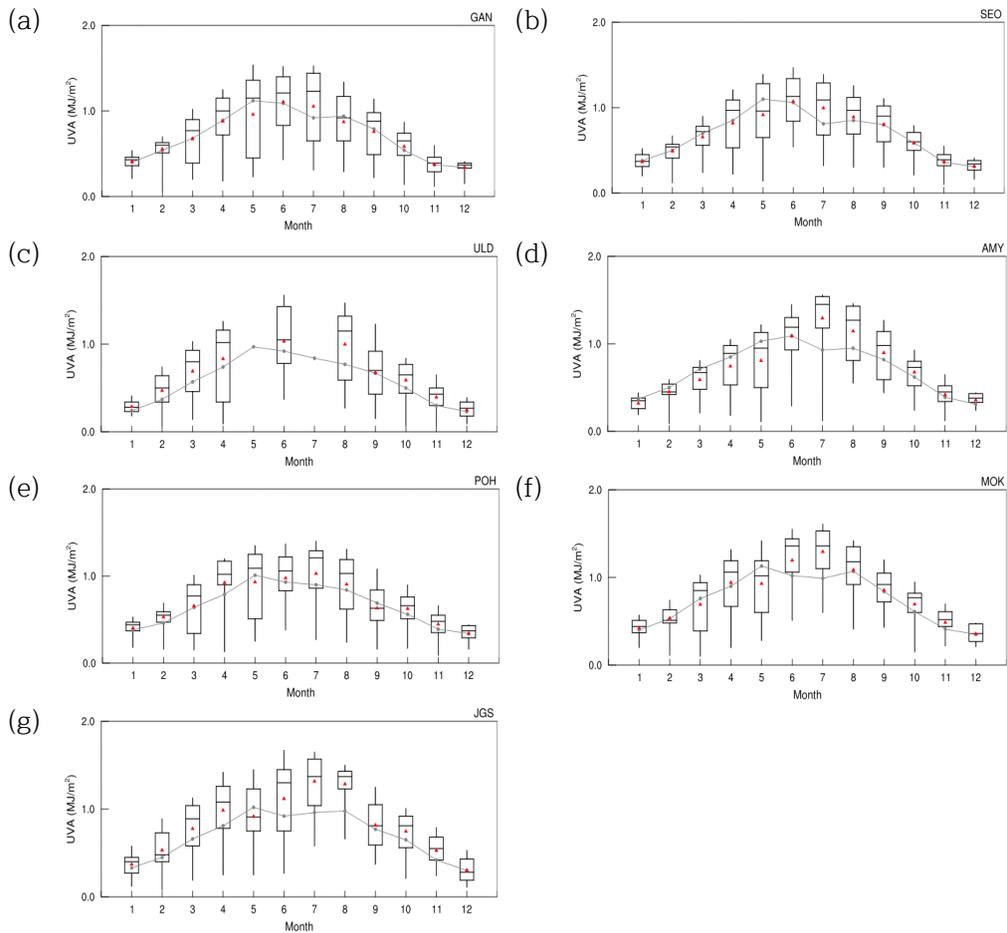


그림 3.6.1 2018년 (a)강릉, (b)서울, (c)울릉도, (d)안면도, (e)포항, (f)목포, (g)고산 자외선A 일 누적 복사량의 월 변화. 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 점 평균과 지난 과거 평균값(점-선)).

### 3.6.2 자외선B

UV-Biometer를 이용해 관측하는 자외선B는 홍반에 대한 가중함수가 적용된 홍반자외선(Erythral ultraviolet, EUV-B) 복사량이다. 자외선B의 관측단위는 MED이며, MED는 유해자외선 파장영역(280 ~ 320 nm)의 최소 홍반점 조사(Minimum Erythral Dose)를 나타내는 값으로 1 MED는  $210 \text{ Jm}^{-2}$ 의 복사량 값으로 환산할 수 있다. 자외선B는 지속시간도 중요하지만 높은 자외선 값일수록 인체에 미치는 영향이 크기 때문에 일 최대값 분석이 중요하다. 2018년 자외선B 일 최대 복사량의 최대값은 강릉  $0.320 \text{ W/m}^2$  (7월 3일), 서울  $0.289 \text{ W/m}^2$  (7월 15일), 울릉도  $0.322 \text{ W/m}^2$  (7월 4일), 안면도  $0.331 \text{ W/m}^2$  (7월 11일), 포항  $0.232 \text{ W/m}^2$  (5월 19일), 목포  $0.313 \text{ W/m}^2$  (7월 23일), 고산  $0.322 \text{ W/m}^2$  (7월 23일)으로 나타났다. 자외선B 최대값의 변화는 태양천정각과 일조 시간, 날씨의 영향을 받아 뚜렷한 계절변화를 보이기 때문에 여름에 높고 겨울에 낮은 특징을 보인다. 그림 3.6.2는 자외선B 일 최대 복사량의 월변동성을 지난 과거 월 평균값과 비교한 그림이다. 과거 월 평균값은 강릉, 안면도, 포항, 목포는 2007 ~ 2017년, 고산, 울릉도는 2012 ~ 2017년, 서울은 2015 ~ 2017년을 평균 하였다. 2018년도 자외선B 일 최대 복사량의 월변동성은 여름에 높은 계절변화를 뚜렷하게 보였으며, 과거 평균값에 비해 매우 높은 값을 나타냈다. 일 최대 복사량의 월평균은 강릉( $0.220 \text{ W/m}^2$ ), 안면도( $0.260 \text{ W/m}^2$ ), 울릉도( $0.320 \text{ W/m}^2$ ), 고산( $0.248 \text{ W/m}^2$ ), 목포( $0.262 \text{ W/m}^2$ ), 포항( $0.180 \text{ W/m}^2$ )지역은 7월, 서울( $0.218 \text{ W/m}^2$ )은 8월에 가장 높았다. 최대값은 주로 7 ~ 8월에 나타났다. 계절특징이 뚜렷하였다.

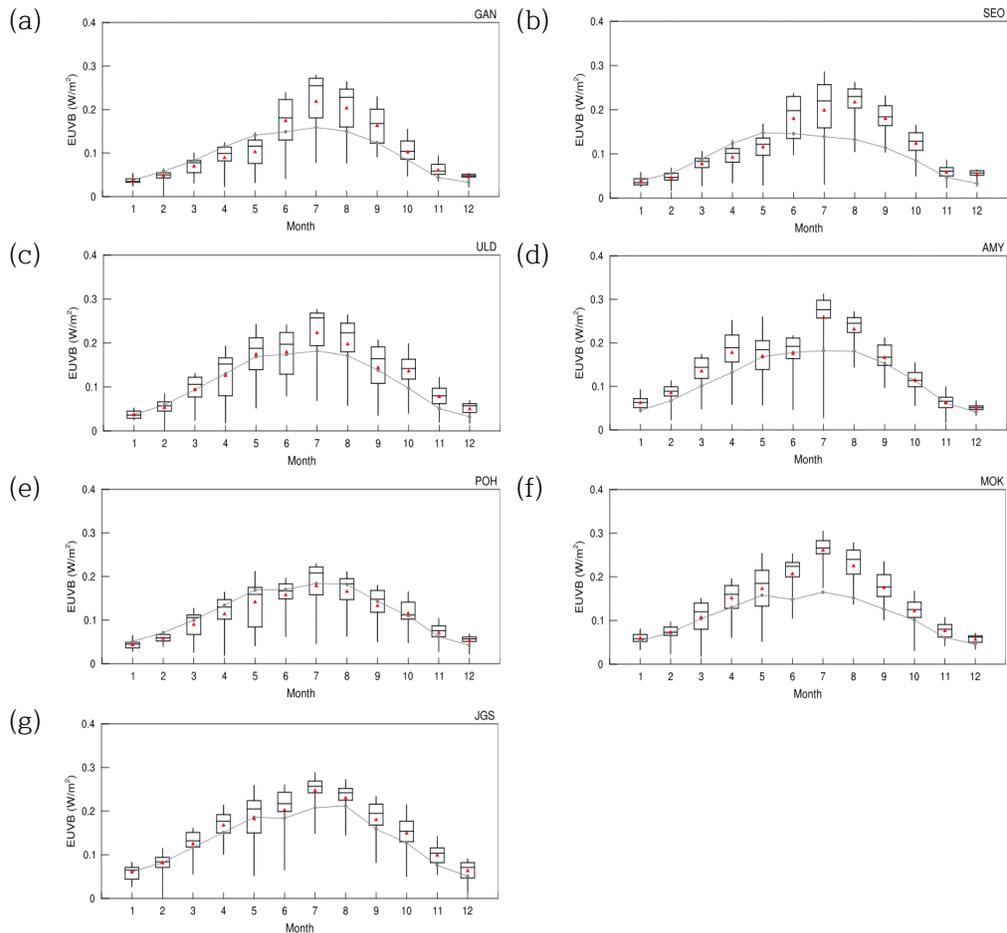


그림 3.6.2 2018년 (a)강릉, (b)서울, (c)울릉도, (d)안면도, (e)포항, (f)목포, (g)고산 자외선B 복사량의 일 최댓값 월변화. 2018년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값, 빨간색 점 평균과 지난 과거 평균값(점-선)).

### 3.6.3 자외선 복사량(위탁관측소)

연세대학교(서울)는 2004년부터 위탁감시망에 등록되어 현재까지 Brewer 분광광도계로 자외선 복사(290 ~ 363 nm)를 0.5 nm 간격으로 관측하고 있다. 287 ~ 363 nm 파장역의 적분을 총자외선(Total ultraviolet radiation, TUV)이라고 하며, 287 ~ 320 nm의 영역에 피부 홍반에 대한 가중함수를 적용하여 EUV 복사량을 계산하였다. EUV의 가중함수는 McKinlay and Diffey (1987)의 참고문헌의 데이터를 사용하였다. Brewer 분광광도계의 자외선

관측은 날씨의 유무와 관계없이, 태양 천정각에 따라 정해진 관측을 수행하고 있다. 따라서 강수가 있는 날에도 관측을 수행하고 있지만, 정확도는 낮다. 2018년도는 장비의 통신연결과 관측에 중요한 부품인 slitmask의 이상으로 3월 8일부터 관측이 중단되어 관측가능일은 60일이다. 직달관측을 수행하는 오존과 에어로졸의 관측과는 달리, 자외선 관측은 기기의 온도변화에 대해 관측값이 민감하게 반응하기 때문에 온도가 높은 여름철에는 과장별 변동성이 매우 크게 나타나는 문제가 있다. 따라서 7월과 8월의 월평균은 사용한 데이터 수가 15일 이하이기 때문에 신뢰도가 낮다.

자외선 복사량의 변화는 태양천정각과 일조시간의 천문학적 원인과 날씨에 의해 영향을 주로 받아 뚜렷한 계절변화를 보이고 있기 때문에, 여름에 높고 겨울에 낮은 특징을 보인다.

그림 3.6.3은 2004년부터 2018년도까지의 일 적산된 TUV (그림 3.6.3(a))와 EUV(그림 3.6.3(b))의 시계열이다. TUV의 연중 최댓값은 2005년을 제외한 2004년부터 2011년도까지 6월에 나타났으나, 2012년과 2013년도에는 연중 최댓값이 각각 8월과 7월에 나타났다. 특히, 2013년도부터 5월과 6월에 꾸준히 높은 값이 나타났다. EUV의 연중 최댓값은 7 ~ 8월에 나타났다.

2004년부터 2018년까지의 연평균 값의 장기월평균과 표준편차를 각각 그림 3.6.4에 나타냈다. TUV (그림 3.6.4(a))의 장기 월평균 값은 6월에 최댓값( $0.90 \text{ MJ/m}^2$ ), 12월에 최솟값( $0.27 \text{ MJ/m}^2$ )을 나타내었으며, 이는 2017년 지구 대기감시보고서에 실린 2004년부터 2016년까지의 최댓값( $0.92 \text{ MJ/m}^2$ )과 최솟값( $0.28 \text{ MJ/m}^2$ )보다 다소 감소한 수치이다. 그림 3.6.4(b)는 EUV의 장기평균과 표준편차를 나타낸 그림이다. 장기평균값은 6월에 최댓값( $2.68 \text{ kJ/m}^2$ )을 가지고, 12월에 최솟값( $0.45 \text{ kJ/m}^2$ )을 가지며, 이는 2017년 지구 대기감시보고서에 실린 2004년부터 2016년까지의 최댓값( $2.70 \text{ kJ/m}^2$ )과 최솟값( $2.73 \text{ kJ/m}^2$ )보다 다소 감소한 수치이다.

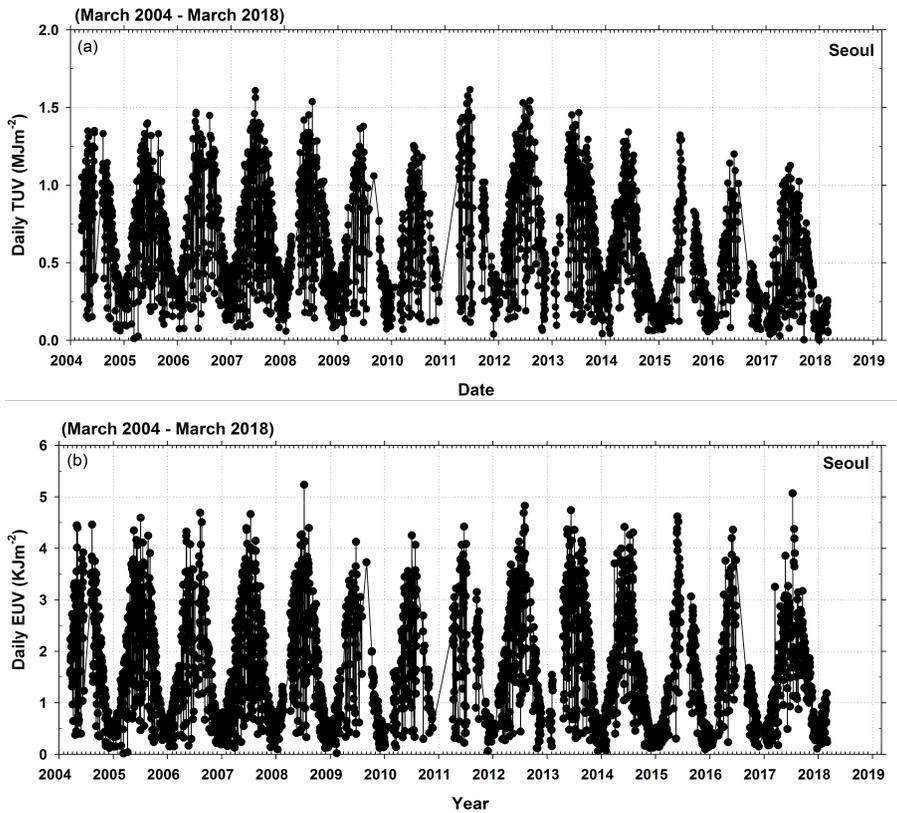


그림 3.6.3 일 적산된 (a)총자외선과 (b)홍반자외선의 시계열(2004. 3. ~ 2018. 2.).

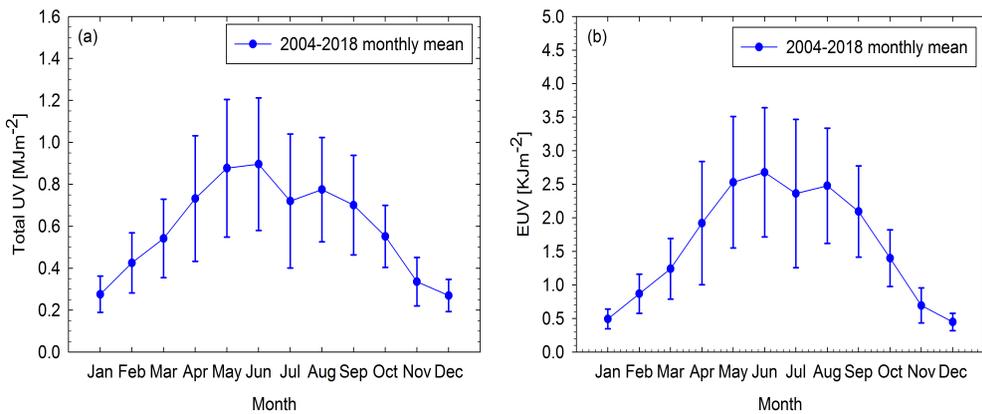


그림 3.6.4 서울 상공 (a) TUV와 (b) EUV의 2004년부터 2018년도의 월평균과 표준편차 (2018년 자료는 2월까지의 자료만 사용되었음).

자외선 지수는 EUV에 지수 인자를 곱하여 계산하기 때문에, 시간에 대한 일변화를 가지고 있다. 따라서 일평균보다는 일별 최댓값을 이용하여 분석하였다. 그림 3.6.5는 2004년 3월부터 2018년 2월까지 자외선 지수(UVI)의 일 최댓값을 시계열로 나타내었고, 기상청 생활기상정보의 자외선 지수의 등급에 따라서 나누었다. 연도별 최댓값은 주로 7 ~ 8월에 나타나고 있으며, 7 ~ 8월에 나타나지 않았던 2004년과 2005년의 경우에도 극댓값의 시기가 5월 31일과 9월 1일로 비교적 여름철에 높은 관측 값이 나오고 있음을 알 수 있다. 관측 기록 중 최댓값은 2008년 7월 20일에 관측된 10.9로 UVI 중, ‘매우 높음’에 해당하는 값이 관측되었다. 또한 2017년의 연 극댓값도 7월 14일에 관측한 8.12로 ‘매우 높음’에 해당하는 관측 값이었고, ‘매우 높음’은 비상대비가 필요하고 한낮 시간에는 외출 자제를 권고하는 수준이다.

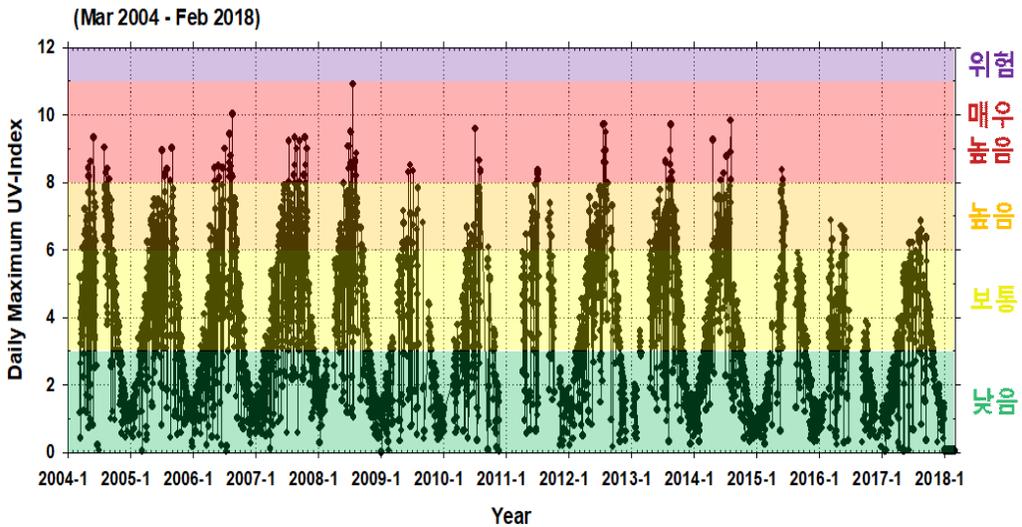


그림 3.6.5 일 최대 자외선 지수(UV-Index)의 시계열(2004. 3. ~ 2018. 2.).

### 3.7 총대기침적

대기 중에 부유하는 오염물질은 습성침적과 건성침적의 형태로 지면에 도달하게 된다. 이중 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, 2003). 기상청은 1997년부터 한반도 청정지역인 안면도, 고산, 울릉도의 3개 지점으로 구성된 총대기침적 관련 관측망을 구축·운영하고 있다. 이때의 총대기침적은 대기의 습성침적(강수)과 건성침적을 분석한다. 강수는 전일 9시부터 당일 9시까지 채수한 시료를 분석하며, 강수량이 0.5 mm 이하의 시료를 제거한 후 나머지 시료를 유효시료로 판단한다. 각 지점에서 채취된 강수시료는 여과지로 시료에 포함된 불순물을 제거한 후 전기전도도(EC)와 산성도(pH), 이온크로마토그래프를 이용하여 수용성 이온성분인 양이온 5개 성분( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )과 음이온 4개 성분( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )을 분석한다. 분석된 자료는 품질관리(QA/QC)를 거쳐 강수화학 데이터센터 등 국내·외로 자료를 공유하고 있다. 또한 건성침적(강하분진)을 분석하기 위해 자유낙하하는 강하분진을 한 달 동안 누적·채취하여 이온크로마토그래프를 이용하여 수용성 이온성분인 양이온 5개 성분과 음이온 4개 성분을 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 고려해야 하며, 계산식은 식 7.1 과 같다.

$$C_{pw} = \sum_{i=1}^m (C_i \cdot P_i) / P_{tot} \quad (\text{식 7.1})$$

$C_{pw}$ : 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

### 3.7.1 2018년 강수특성

강수채취율이란 총강수량 중 채취한 강수량의 비율을 의미하며, 2018년 강수채취율은 안면도 96.5%, 고산 97.3%, 울릉도 90.0%로, 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 강수화학 분야에서 강수채취율의 품질목표인 70%보다 높았다(WMO GAW Report No. 160, 2004). 그림 3.7.1은 지역별, 연도별 총 강수량이다. 연도별 강수량은 지역에 따라 증가와 감소를 반복하는 등 서로 다른 양상을 보인다. 이 중 안면도는 2012년부터 2017년까지 강수량이 계속 감소하다 2018년도에는 다시 증가하는 경향을 보였다. 고산지역은 2015년부터 2017년까지 감소하다 안면도와 마찬가지로 다시 증가하는 경향을 보였다. 그러나 울릉도의 경우 연도별 강수량이 증가와 감소를 반복하는 경향을 나타냈다.

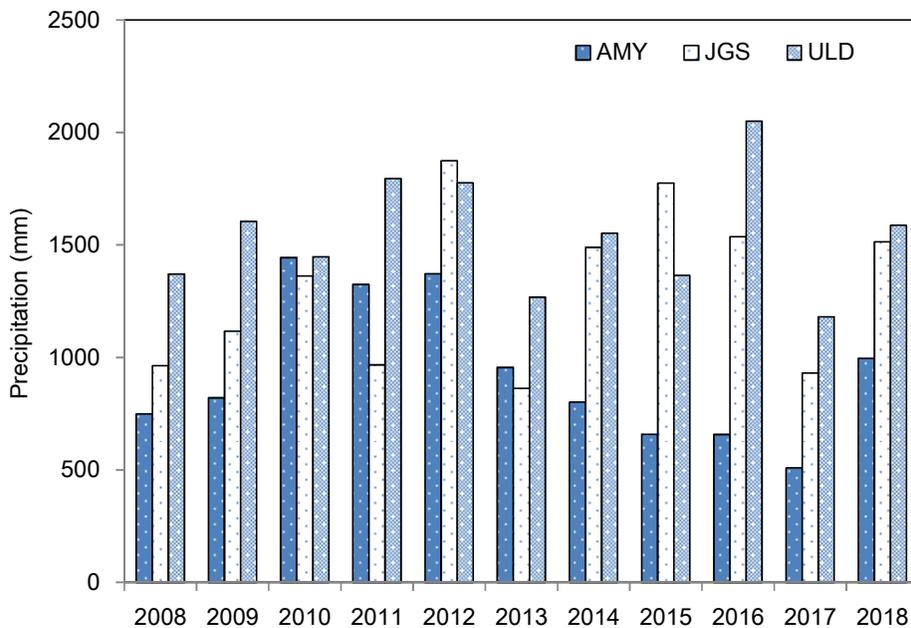


그림 3.7.1 연도별 총강수량(mm).

그림 3.7.2는 강수화학의 품질관리를 통과한 전체 강수량을 지역별로 10년(2008 ~ 2017년)과 2018년의 단순평균강수량그래프이다. 2008년부터 2017년까지의 10년간의 평균강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 929.5, 1288.1, 1541.8 mm이며, 2018년 세 지역의 강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 880.0, 1368.0, 1357.1 mm로 평년의 약 94.7%, 106.2%, 88.0%이며, 고산을 제외한 나머지 지역인 안면도, 울릉도는 평년보다는 낮은 강수량을 보였다.

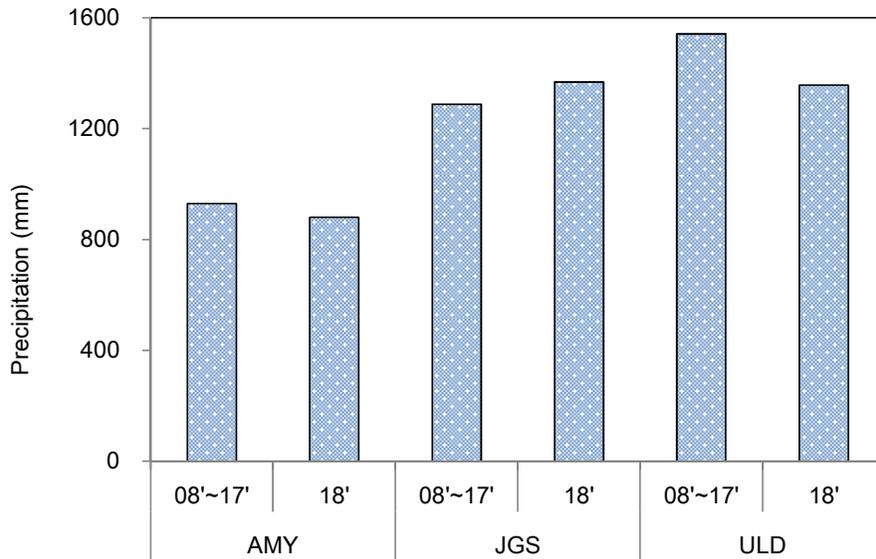


그림 3.7.2 지역별 평년(2008 ~ 2017년) 평균 강수량(mm)과 2018년 총강수량(mm) 비교.

또한 2018년 강수량과 평년(2008 ~ 2017년) 강수량을 단순 평균한 값을 계절별로 비교하였다(그림 3.7.3). 모든 지역이 여름철에 최대 강수량을 보였다. 안면도는 평년보다 낮은 강수량을 보였고, 고산지역은 봄과 가을철에는 평년보다 강수량이 적었으나 겨울철과 여름철에는 평년보다 많은 강수량을 보였다. 울릉도는 겨울철을 제외하고 평년보다 적은 강수량을 나타냈다.

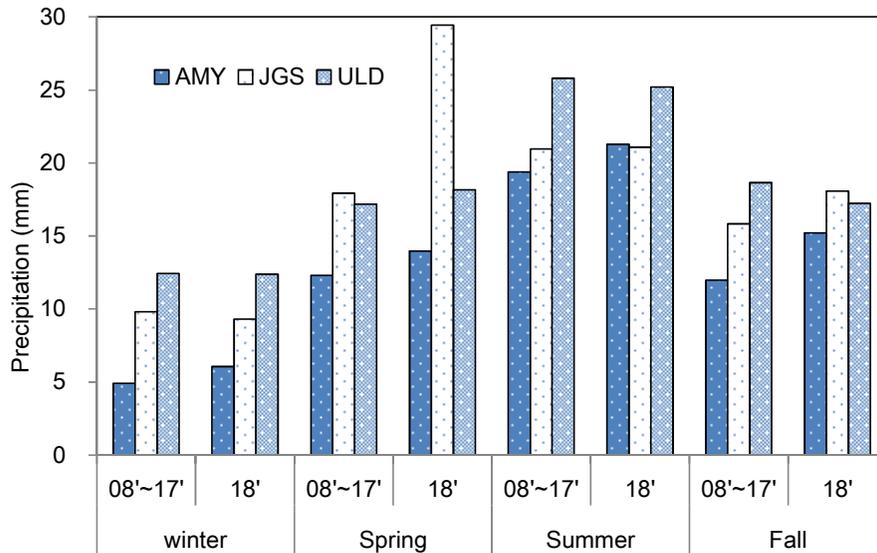


그림 3.7.3 계절평균 평년(2007 ~ 2017년)과 당해년도 단순평균 강수량(mm).

### 3.7.2 강수의 산성도(pH)

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 2008년부터 2017년까지 약 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 산성도와 2018년의 산성도는 각각 4.65, 4.87, 4.77이며, 2018년도의 부피가중평균 산성도는 안면도 5.25, 고산 4.95, 울릉도 4.96으로 나타났다(표3.7.1과 그림3.7.4(위)). 2018년도의 강수 산성도가 약 10년간의 부피가중평균 산성도보다 약간 높은 것으로 조사되었다. 또한 10년간 계절별 부피가중 평균의 산성도와 2018년의 계절별 산성도를 비교 해본 결과(그림3.7.4(아래)) 안면도, 고산, 울릉도 세 지역 모두 겨울철의 산성도 값이 낮은 값을 보였으며, 특히 다른 지역에 비해 안면도 지역이 4.4로 가장 낮은 값을 나타냈다. 반면에 2018년 여름철에 안면도, 고산 지역이 pH 5.3으로 가장 높은 농도를 나타냈다.

관측지점별 강수에 대한 pH 구간별 발생빈도는 그림 3.7.5와 같다. 2008 ~ 2017년 분포에서 안면도, 고산에서 pH 4.5 ~ 5.0 구간에서, 울릉도는 pH 5.0 ~ 5.5 구간에서 최대 빈도가 나타났다. 2018년 고산지역은 평년(2008 ~ 2017년)분포와 유사한 경향을 보였으나, 안면도는 pH 5.0 ~ 5.5 구간, 울릉도인 경우 pH 4.5 ~ 5.0 구간에서 빈도가 증가하는 결과를 보였다.

표 3.7.1 관측지점별 부피가중평균 산성도(pH)

기간 \ 지점	안면도	고산	울릉도
2018	5.25	4.95	4.96
2008~2017	4.65	4.87	4.77

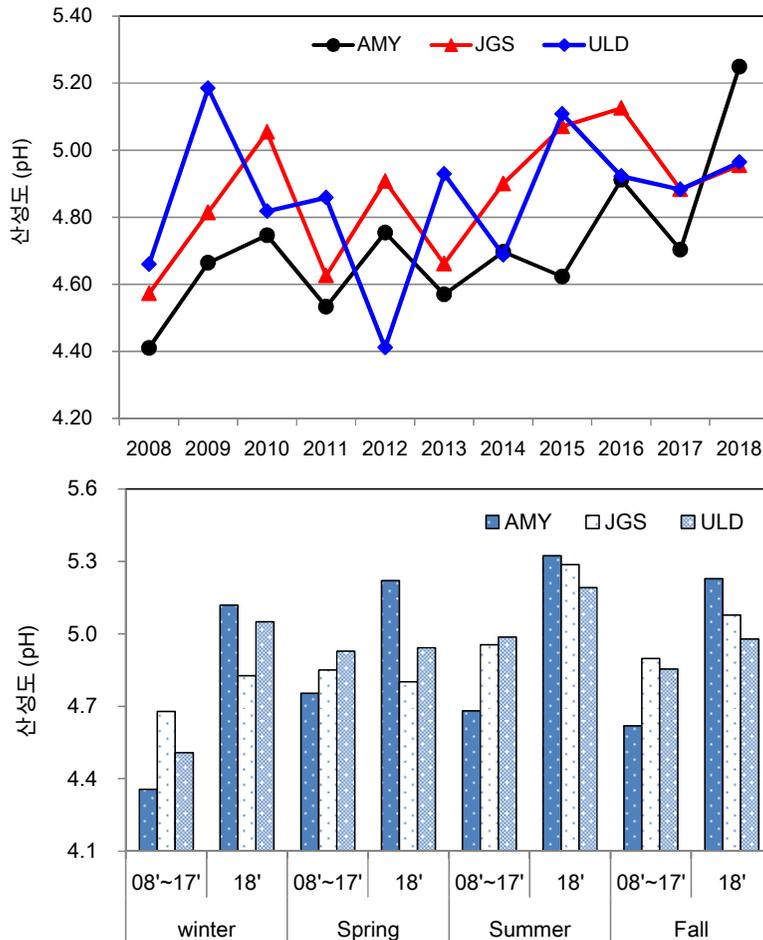


그림 3.7.4 안면도, 고산, 울릉도지역의 (위)연도별, (아래)계절별 부피가중평균의 산성도변화.

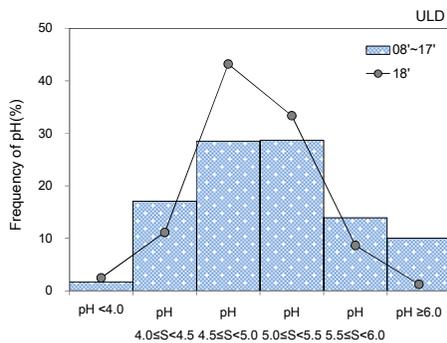
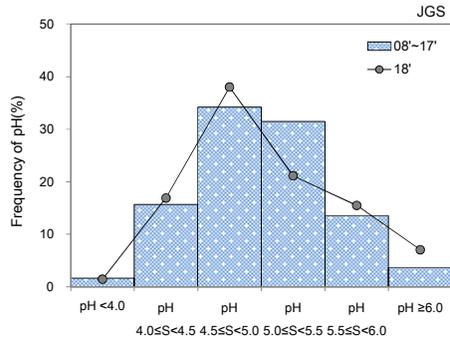
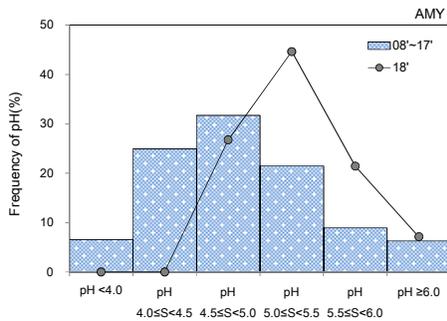


그림 3.7.5 관측지점별 강수의 pH 발생 빈도.

### 3.7.3 강수의 전기전도도

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 2008년부터 2017년까지 약 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도의 값은 각각 28.5, 24.3, 50.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났다(표 3.7.2와 그림 3.7.6). 그리고 2018년도의 부피가중평균 전기전도도는 안면도 12.0  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 고산 17.1  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 울릉도 31.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 안면도가 가장 낮았다. 2008년부터 2017년까지의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 전기전도도는 겨울철에 높은 값을 보였으나, 여름철에는 낮은 값을 나타냈다. 또한 2018년도는 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도가 평년과 마찬가지로 겨울에 높고, 안면도, 울릉도는 여름에 낮으나 고산지역은 가을에 낮았다.

표 3.7.2 관측지점별 전기전도도( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

기간 \ 지점	안면도	고산	울릉도
2018	12.0	17.1	31.5
2008~2017	28.5	24.3	50.5

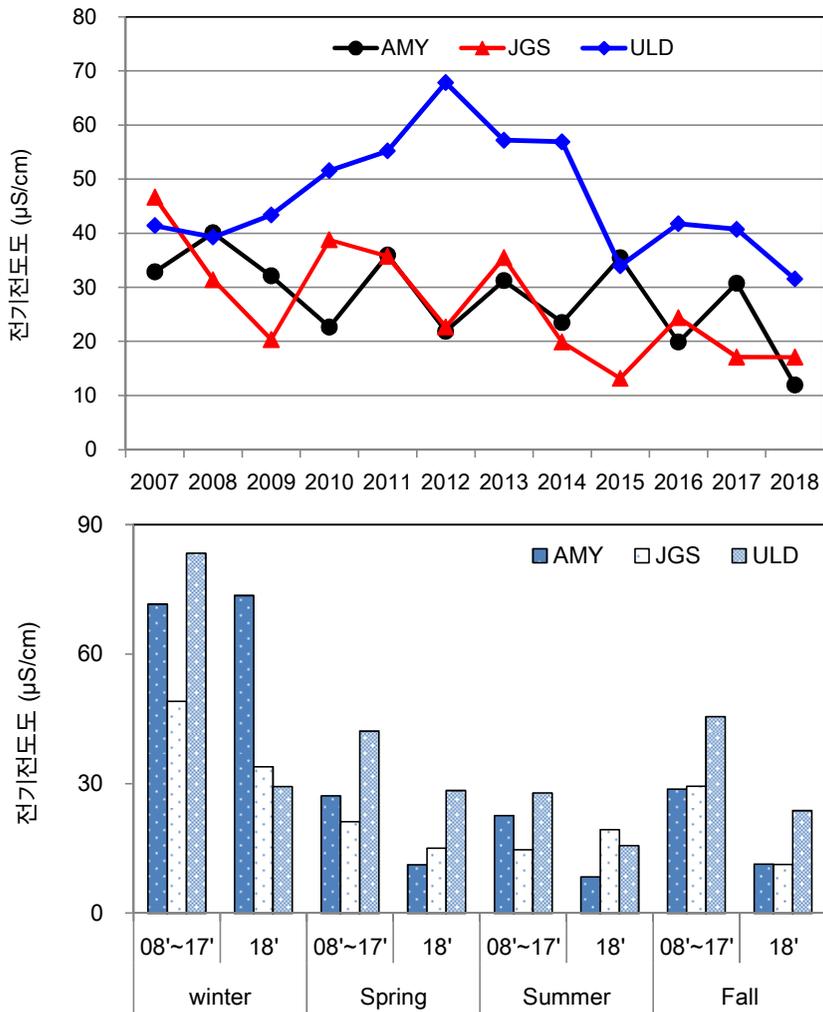


그림 3.7.6 관측지점별 전기전도도의 부피가중평균변화 (위)연도별 부피가중평균 (아래) 계절별 부피가중평균.

### 3.7.4 강수 이온성분

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

그림 3.7.7은 2008년부터 2017년까지 평균값과 당해연도인 2018년의 평균값이며, 이때의 평균은 각각의 채취된 강수량이 가중되어 계산되었다. 그림 3.7.7에서 보듯이 안면도, 고산, 울릉도의 모든 관측지점이 해안가에 위치하여 있으므로, 해염성분인  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ 성분의 농도가 가장 높았다. 2018년도 안면도, 고산, 울릉도 세 관측지점에서 해염성분을 제외하고 높은 농도를 보인 성분은  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$ 성분이며,  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 의 부피가중평균농도는 각각 17.4, 17.9, 26.2  $\mu\text{eq/L}$ 이며, 이때의 조성은 각각 13.2%, 10.1%, 6.7%를 차지하였다.  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 의 2008 ~ 2017년 안면도, 고산, 울릉도 세 관측지점 부피가중평균농도는 각각 45.3, 25.6, 44.6  $\mu\text{eq/L}$ 이며, 이때의 조성은 각각 16.5%, 9.5%, 7.2%를 차지하였다.  $\text{NH}_4^+$  성분은 2018년과 지난 10년간의 부피가중평균농도의 범위는 각각 16.9 ~ 23.9, 17.4 ~ 41.4  $\mu\text{eq/L}$ 의 값을 보였고, 이때의 조성비의 범위 또한 각각 4.3% ~ 18.0%, 4.3% ~ 15.1%를 보였다.  $\text{NO}_3^-$  성분인 경우, 2018년과 지난 10년간의 부피가중평균농도의 범위는 각각 15.3 ~ 18.6, 19.8 ~ 33.7  $\mu\text{eq/L}$ 의 값을 보였고, 이때의 조성비의 범위 또한 각각 4.8% ~ 12.5%, 4.8% ~ 12.3%를 보였다. 따라서 지난 10년간의 평균농도와 비교한 결과 안면도, 고산, 울릉도지역에서  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  성분은 농도가 감소하였고,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  성분은 비슷하거나 소폭 증가하였다.  $\text{nss-Ca}^{2+}$  성분은 세 지역 모두 2018년이 지난 10년간의 부피가중평균농도보다 낮았다.

표 3.7.3 2018년 관측지점별 부피가중평균 이온농도( $\mu\text{eq/L}$ )

요소 지점	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	nss-Ca <sup>2+</sup>
안면도	0.5	32.1	16.5	28.0	23.9	1.3	6.8	17.4	5.8
고산	0.5	58.5	15.3	48.7	18.6	1.7	11.1	17.9	4.9
울릉도	0.5	152.4	18.6	134.3	16.9	4.1	29.4	26.2	6.7

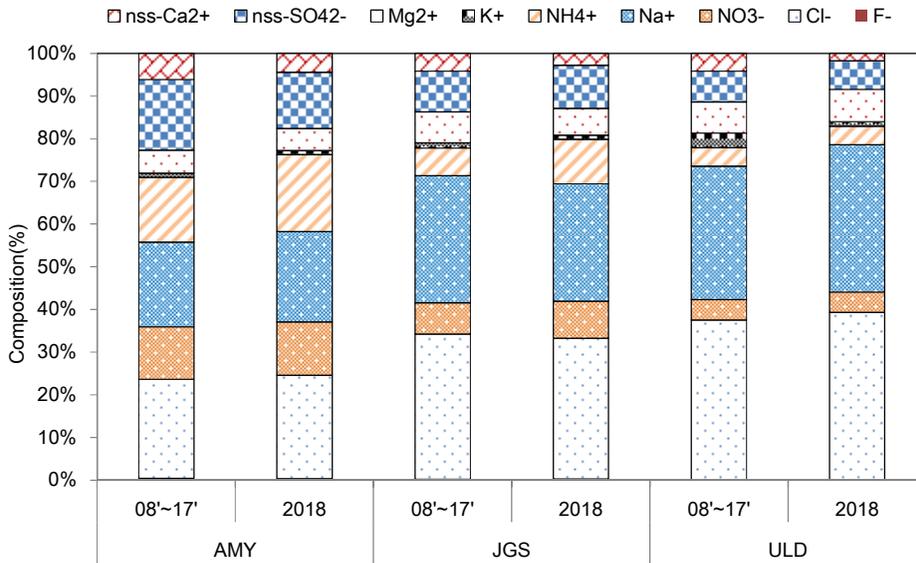
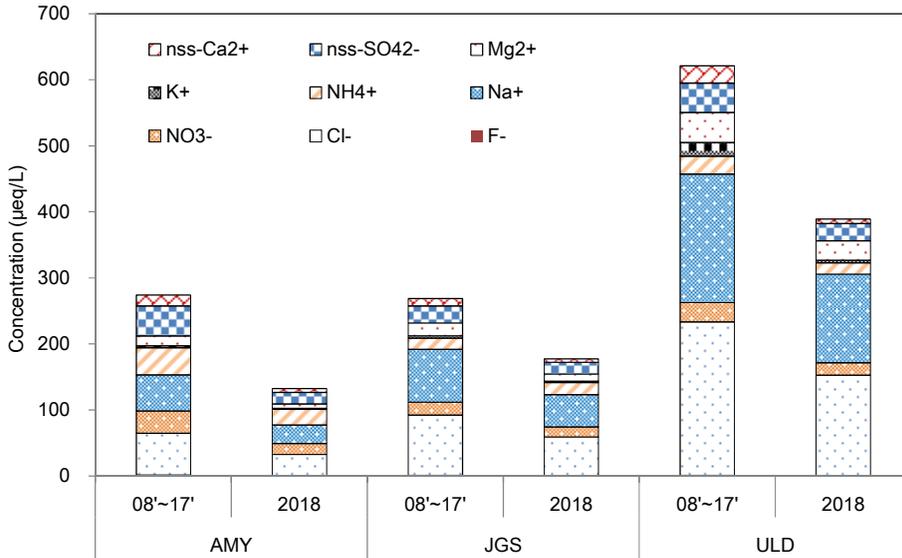


그림 3.7.7 2008 ~ 2018년 안면도, 고산, 울릉도 지역의 강수성분 (위)연도별 부피가중 평균 농도, (아래) 연도별 부피가중평균 조성비.

안면도, 고산, 울릉도에서 채취한 강수의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 3.7.8 ~ 3.7.10과 같다. 여기서 강수이온성분의 계절별 평균농도는 2008년부터 2017년까지 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해년도 1, 2월의 데이터를 평균하였고, 당해년도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

우선 안면도 강수에서 이차오염물질의 지난 10년(2008 ~ 2017년)간과 2018년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분 농도범위는 각각 9.3 ~ 93.0, 11.7 ~ 84.1, 11.9 ~ 82.3  $\mu\text{eq/L}$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 지난 10년간 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 47.8%, 48.4%, 49.1%, 49.2%로, 여름, 가을철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향이 나타났었으며, 2018년은 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 44.5%, 49.6%, 46.3%, 45.7%로 나타났었다.

고산지역 강수에서 이차오염물질의 지난 10년(2008 ~ 2017년)간과 2018년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분 농도범위는 각각 12.1 ~ 42.4, 13.8 ~ 34.5, 13.3 ~ 23.1  $\mu\text{eq/L}$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 46.4%, 47.6%, 47.4%, 45.6%이며, 2018년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.9%, 51.9%, 42.0%, 47.7%로 봄철에 높고, 지난 10년은 가을철에, 2018년은 여름철에 낮은 경향을 나타냈었다.

마지막으로 울릉도지역 강수에서 이차오염물질의 지난 10년(2008 ~ 2017년)간과 2018년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면, 겨울, 봄, 여름, 가을철의  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분 농도범위는 각각 15.3 ~ 68.6, 10.2 ~ 50.2, 7.6 ~ 40.2  $\mu\text{eq/L}$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해본 결과, 이차오염물질 성분들의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.0%, 42.6%, 40.6%, 42.2%이며, 2018년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.6%, 46.8%, 47.0%, 46.8%로 울릉도 지역의 지난 10년은 겨울철이 높고 반면에 2018년도는 여름철이 높은 조성비를 보였다. 그러나 반대로 지난 10년간은 여름철이 낮고, 2018년도 강수는 겨울철에 낮은 조성비를 나타낸 것으로 확인되었다.

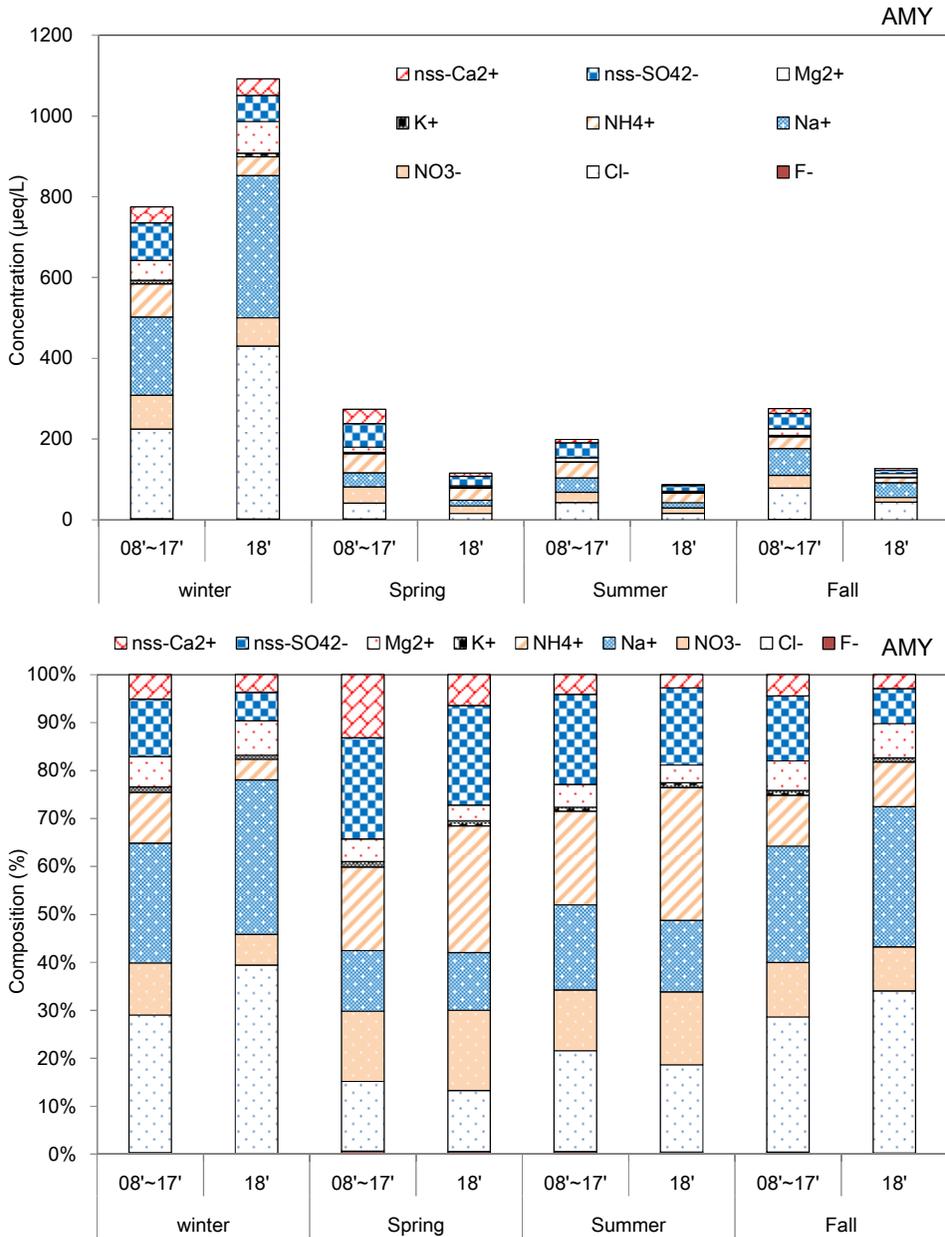


그림 3.7.8 2008 ~ 2018년 안면도 지역의 강수성분 (위)계절별 부피가중평균 농도, (아래) 계절별 부피가중평균 조성비.

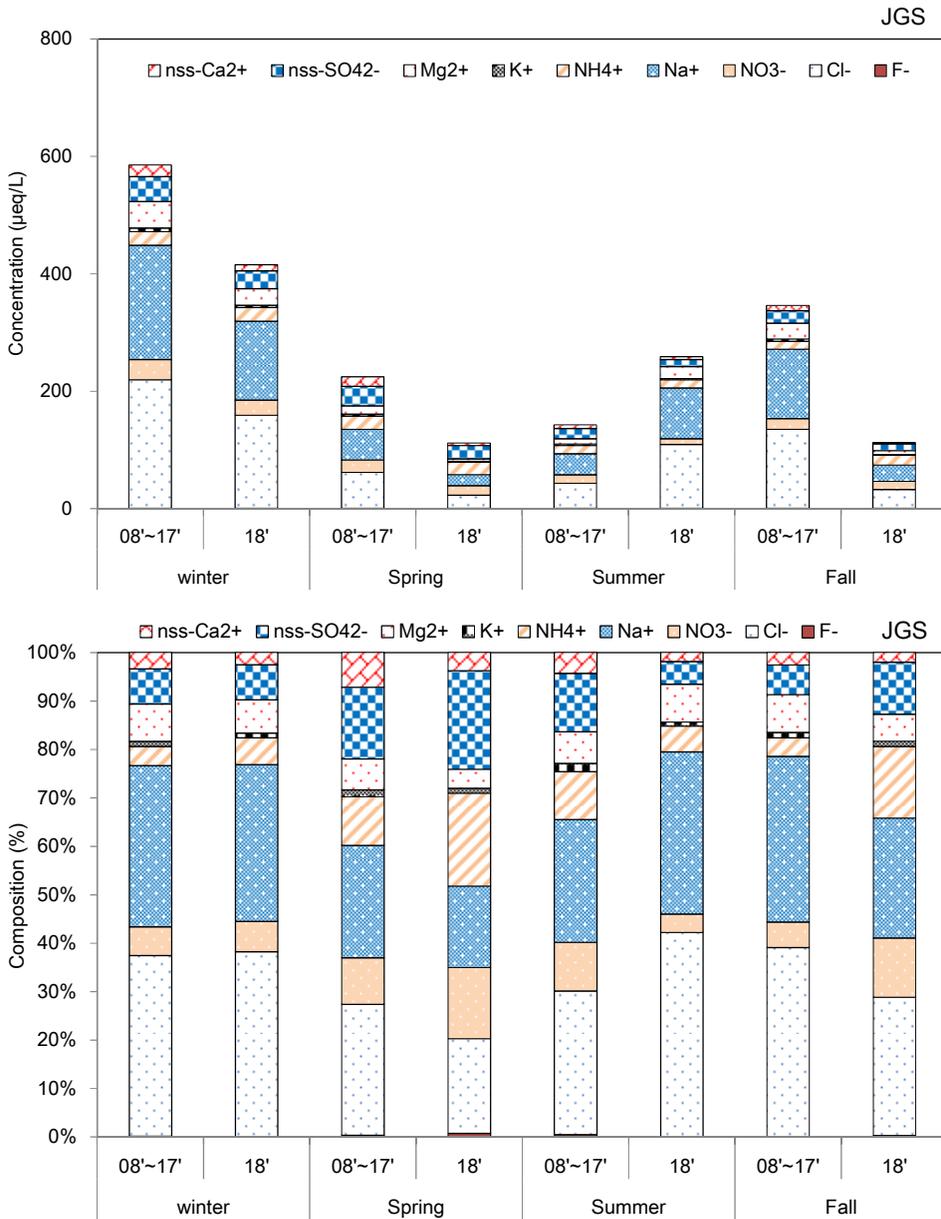


그림 3.7.9 2008 ~ 2018년 고산 지역의 강수성분 (위)계절별 부피가중평균 농도, (아래) 계절별 부피가중평균 조성비.

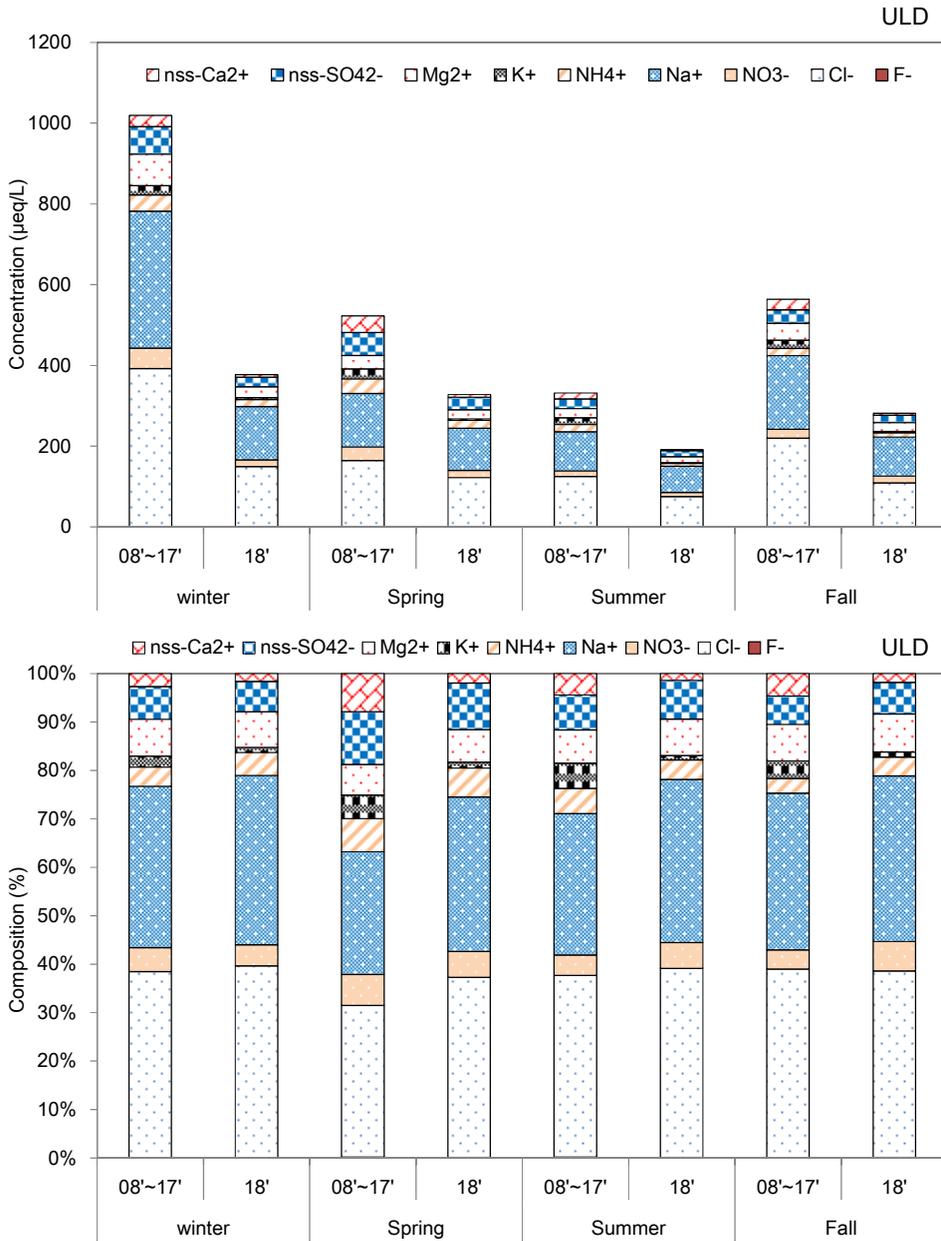


그림 3.7.10 2008 ~ 2018년 울릉도 지역의 강수성분 (위)계절별 부피가중평균 농도, (아래) 계절별 부피가중평균 조성비.

### 3.7.5 강하분진

안면도에서 채취한 2008 ~ 2018년 건성 및 습성 침적량을 보면(그림 3.7.11), 2013년 이후 대체로 감소하는 경향을 보였으며, 2018년도의 전체 침적량은  $6946.4 \text{ mg/m}^3$ 이다. 2018년도는 2017년도보다 약 1.3배 정도 적은 침적량을 보였고, 이는 건성침적량은 크게 변화가 없으나 2017년보다 2018년도에 습성침적량이 약 1.4배 정도 적게 관측된 결과로 보인다. 또한 2008년부터 2018년까지 건성침적량이 차지하는 비율은 약 25.1% ~ 45.5%였으며, 2011년 가장 적은 비율을 보였고, 2014년 가장 높은 비율을 차지하였다.

안면도에서 채취한 2008 ~ 2018년 계절별 건성 및 습성 침적량은 그림 3.7.12와 같다. 여기서 계절별 평균농도는 2008년부터 2017년까지 평균한 값이며, 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해년도 1, 2월의 데이터를 평균하였고, 당해년도 12월의 자료는 사용하지 않았다.  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분별 농도는 대체적으로 건성침적량보다 습성침적량이 더 높은 농도를 보였다. 그러나  $\text{Ca}^{2+}$ 인 경우 10년간의 평년결과에서는 여름철을 제외하고는 습성보다는 건성침적량이 높은 결과를 보였고, 나머지 계절에는 비슷하거나 습성침적량이 높게 나타났다. 2018년도에는  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분의 경우 전 계절에 습성침적량이 건성침적량보다 높은 조성비를 보였고,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 경우, 여름철을 제외한 나머지 계절에 건성침적량이 습성침적량보다 높은 조성비를 나타냈다.

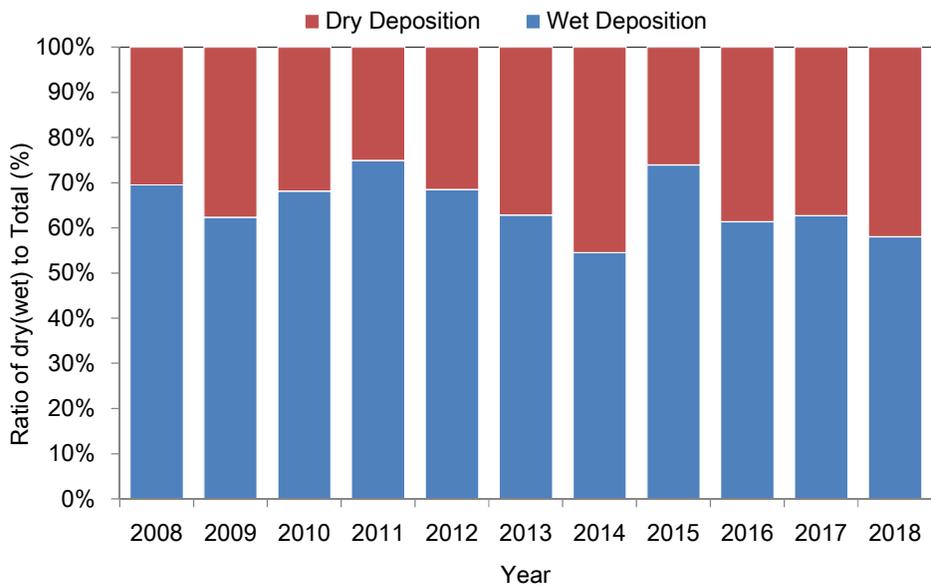
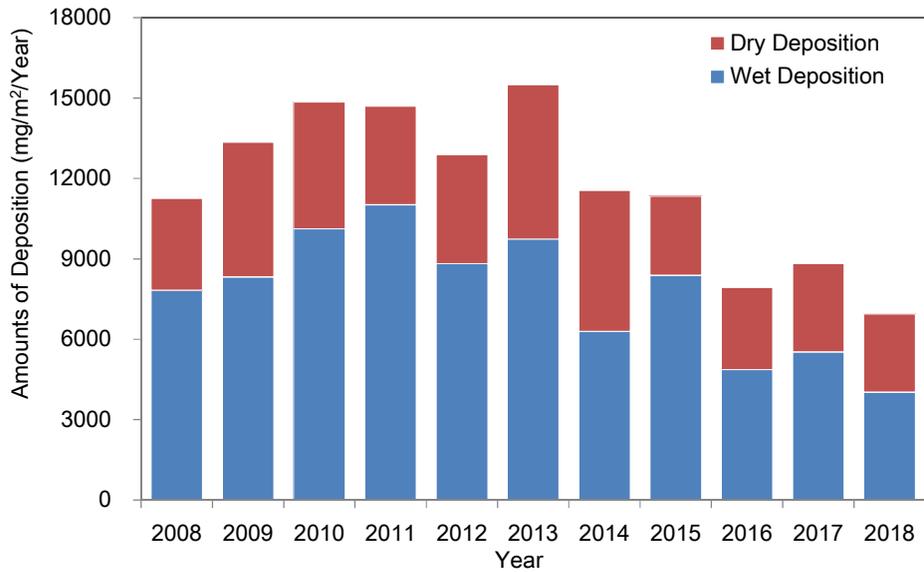
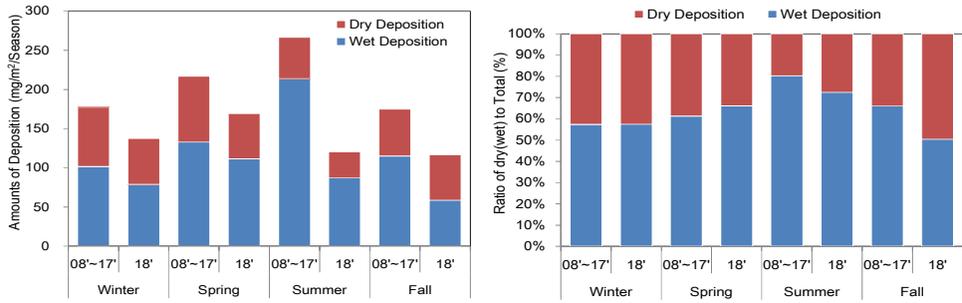
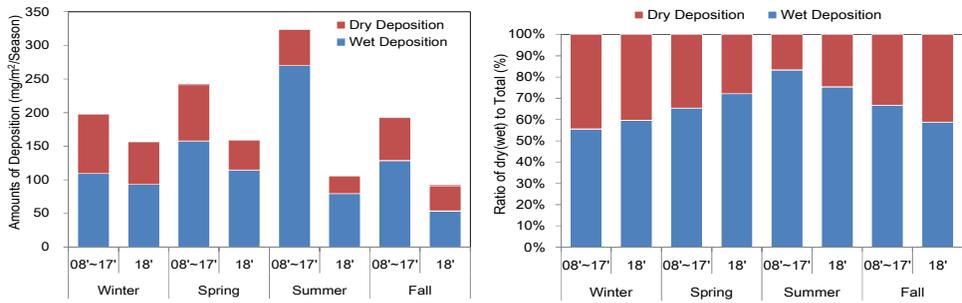


그림 3.7.11 연도별 건성 및 습성 침적량의 농도(위)와 비율(아래).

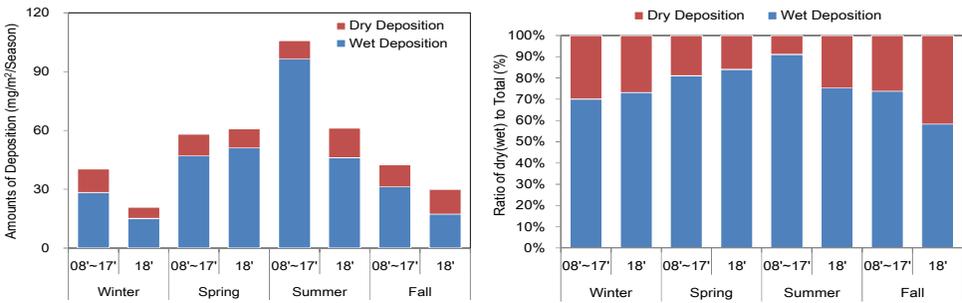
(a)  $\text{NO}_3^-$



(b)  $\text{SO}_4^{2-}$



(c)  $\text{NH}_4^+$



(d)  $\text{Ca}^{2+}$

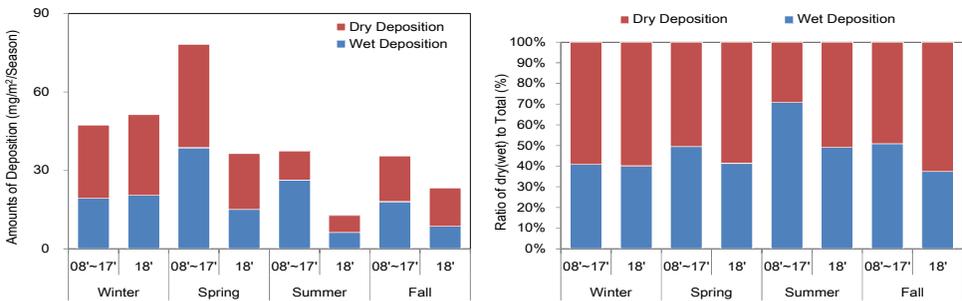


그림 3.7.12 계절별, 이온성분별 건성·습성 (좌)침적량과 (우) 침적량비율.

## 3.8 기타

### 3.8.1 수증기 농도 연직분포(위탁관측소)

수증기는 온실가스 중 가장 큰 비율을 차지하는 성분으로 지표면 부근에서의 수증기는 기상현상과 밀접한 관련을 갖고 있으며, 성층권에서 중간권 영역에 이르는 중층대기 내에 분포하는 수증기는 대류권에서 유입되거나  $\text{CH}_4$ 의 산화 반응으로 인해 생성되어 존재한다(Lossow et al., 2019). 중층대기의 수증기는 ppm 단위의 미량으로 존재하나, 대기 중 많은 화학반응에 참여하여 오존 파괴 반응과도 밀접하게 연계되어 있다. 따라서 수증기양을 추적함으로써 수 십 km 상공의 메탄이나 오존의 변동을 추적하거나 예측하는데 활용이 가능하다. 또한 대기 중 수증기는 인위적 배출물이 아닌 자연적 현상으로 인해 농도가 결정되기 때문에, 수증기의 농도를 추적함으로써 고층대기 특성의 변동을 감지할 수 있는 척도로도 사용할 수 있다.

우리나라의 고층대기 수증기 관측은 기후변화감시 위탁관측소인 숙명여자대학교 지구환경연구소에서 22 GHz 수증기전파 수신기 SWARA (Seoul Water vapor RAdiometer)를 통해 상시 관측하고 있다. SWARA는 수증기로부터 자체 발산되는 22.235 GHz 전파를 61 kHz 간격의 1 GHz 대역의 스펙트럼 형태로 수신한다(그림 3.8.1).



그림 3.8.1 숙명여자대학교 지구환경연구소 22 GHz 수증기 전파수신기(SWARA, Seoul Water vapor RAdiometer).

수신된 스펙트럼은 통계학적 분석방법을 통해 성층권에서 중간권 영역에 걸친 연직분포로 역산된다. SWARA는 2006년 10월부터 중층대기의 수증기 강수 시를 제외한 모든 시간에 대해 24시간 상시 관측을 수행하고 있어 시계열 분석에 적합하다. 2018년의 관측 일수를 월별로 나타내면 매달 25일 이상의 관측 일수를 나타냈었으나, 6 ~ 7월은 잦은 강수로 인해 관측이 이루어지지 않거나 높은 습도로 인해 관측 자료의 품질 기준을 만족하지 않아 각각 22일과 20일의 관측 일수를 나타내고 있다.

표 3.8.1 2018년 SWARA 월별 자료 표출일 수

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
표출일 수	30	28	31	26	28	22	20	30	30	30	30	31

수증기 연직분포는 부피혼합비(Volume mixing ratio, ppmv)로 표현되며, 서울 상공의 수증기 연직분포의 연중 변동은 다음 그림에 나타냈었다. 중층대기의 수증기는 20 km부터 고도가 높아짐에 따라 농도가 점차 증가하여 8월 이전에는 50 km 부근, 8월 이후에는 60 km 부근에서 최대 농도를 나타낸다. 또한 7 ~ 8월에 걸쳐 중간권 영역까지 높은 수증기 농도를 보이는 것은 성층권영역에서의 수증기 유입량 증가와 더불어 여름철 CH<sub>4</sub>의 산화반응으로 인해 수증기 생성량이 많아졌기 때문이다(Khosrawi et al., 2018).

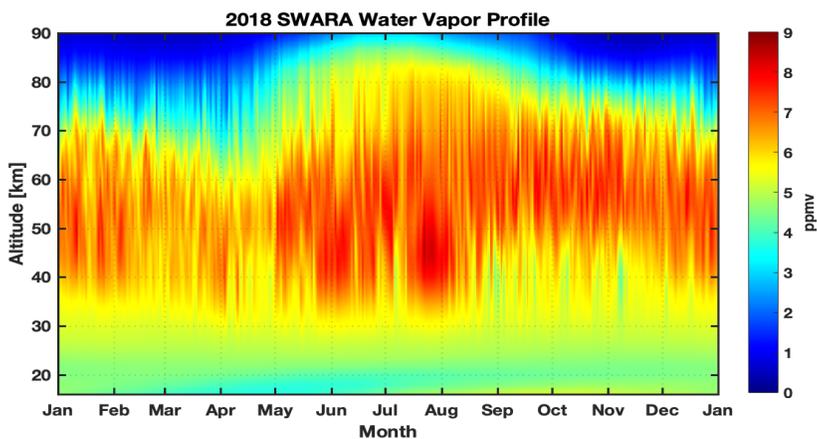


그림 3.8.2 2018년 서울 상공의 중층대기 수증기 연직분포.

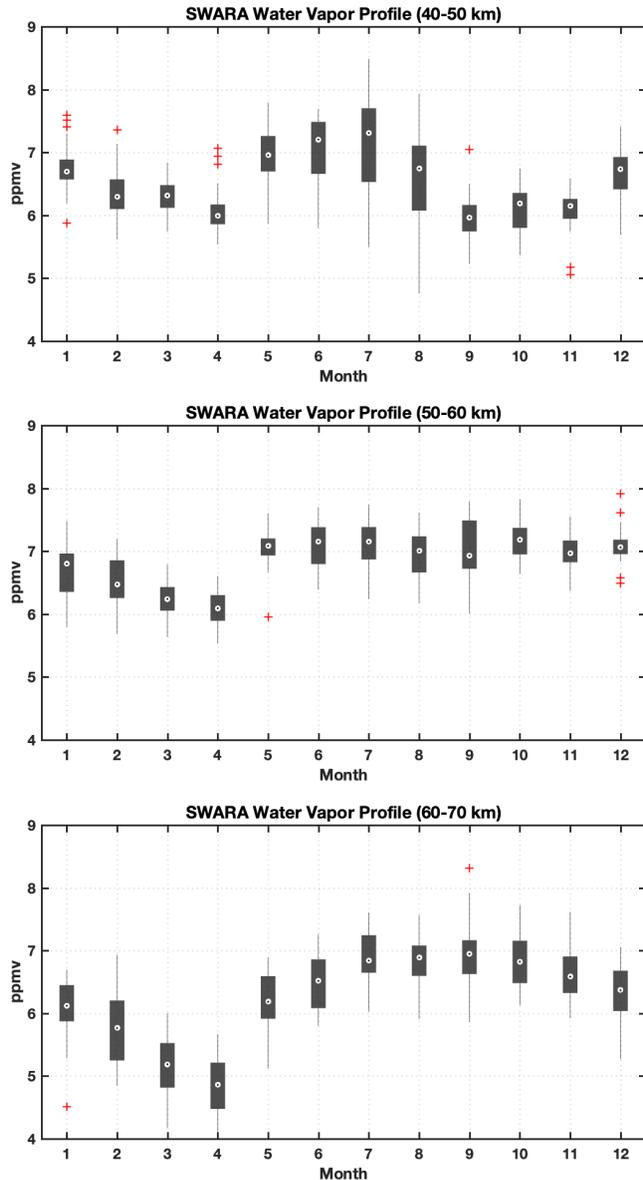


그림 3.8.3 2018년 서울 상공 중층대기 내 고도별 수증기 월 농도 변화.

위의 그림은 수증기의 농도 변동을 40 ~ 70 km 구간에 대해 10 km 간격으로 나타낸 것이다. 박스는 농도값 분포의 25%와 75% 사이의 구간을 나타내며, 박스 안의 포인트는 중앙값을 의미한다. 고도별 분포를 보면 낮은 고도와 높은 고도에 대해 수증기 농도 변동이 다른 양상으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

특히 8월 이후에 대해 40 ~ 50 km 영역에서는 감소하다 다시 증가하는 경향을 보이고 있으나, 더 높은 고도 영역에 대해서는 일정하게 유지되거나 약간의 감소 경향을 보이는 것으로 나타났다.

중층대기 수증기 관측 과정에서 대류권 투과율은 신호 보정을 위해 매 20분마다 관측된다. 22 GHz를 포함하는 마이크로파 대역에서 대류권 투과율을 결정하는 주요 원인은 습도와 기온이며, 특히 습도의 영향이 매우 크게 작용한다. 대류권의 습도는 시시때때로 변동하며, 마이크로파 수신기 관측 운영은 24시간 운영하고 있기 때문에 대류권의 습도 변동 특성을 실시간으로 알아볼 수 있는 자료를 생산하고 있다. SWARA로 관측한 2018년 대류권 투과율의 변동을 살펴보면 1 ~ 5월, 11 ~ 12월 기간에는 90% 이상의 투과율을 보이고 있으나, 5월부터 감소하기 시작하여 8월 중에 연중 최저점인 60% 수준까지 투과율을 저감되었다. 또한 90% 이상의 높은 투과율이 나타나는 기간에도 구름이 접근함에 따라 투과율이 10% 정도 감소하는 것을 감지할 수 있었다. 이러한 투과율 감소는 신호 분석에 보정 인자로 계산되어, 대류권의 영향을 최대한 제거하여 중층대기의 신호 분석을 할 수 있도록 하였다.

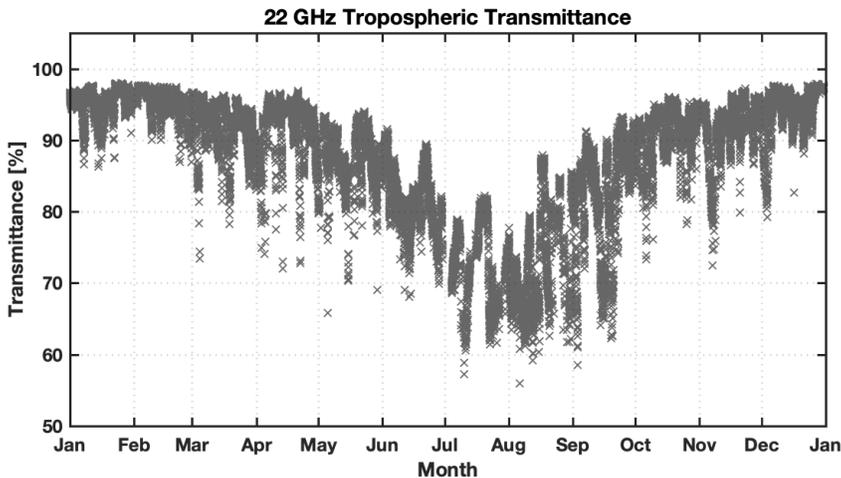


그림 3.8.4 2018년 22 GHz 대역에서의 대류권 투과도 관측 결과.

SWARA를 이용한 수증기 관측이 시작된 2006년 10월부터 2018년 12월까지의 12년간의 수증기 변동과 22 GHz에서의 대류권 투과율 변동을 아래에 나타내었으며, 뚜렷한 시계열 변동을 확인할 수 있다. 또한 35 km 이하 영역에서 나타난 변동 경향은 대기 순환 및 대류권계면에서의 대기 교환을 확인할 수 있는

자료를 제공한다. 또한 대류권에서의 투과율 변동 분석을 통해 기온과 수증기의 농도 감지를 할 수 있다.

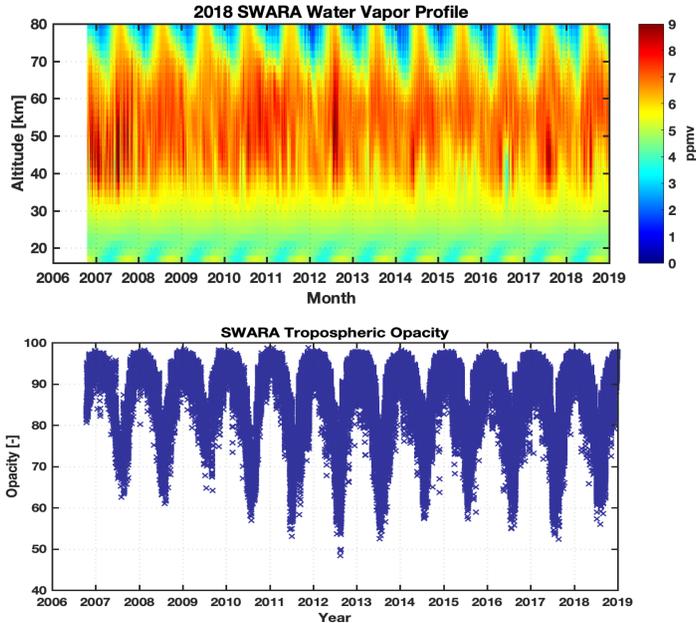


그림 3.5.5 2006 ~ 2018년 서울 상공의 중층대기 수증기 연직분포 변동과 22 GHz 대류권 투과율 변동.

### 3.8.2 라돈 농도(위탁관측소)

라돈은 자연계에서 가장 널리 분포하는 천연방사성 물질로 암석이나 토양에서 방출된다. 그리고 반응성이 낮아서 화학적으로는 안정하나 방사선을 방출하면서 붕괴되기 때문에 물리적으로는 불안정한 특성을 보인다. 라돈의 주요 동위원소로는 라돈( $^{222}\text{Rn}$ ), 토론( $^{220}\text{Rn}$ ), 악티논( $^{219}\text{Rn}$ ) 등이 있고, 이 중  $^{222}\text{Rn}$ 에 의한 피해가 가장 크게 나타나고 있다. 토론은 토륨( $^{232}\text{Th}$ )의 붕괴에 의해 생성되며 반감기가 54.5초로 짧다. 악티논 역시 우라늄( $^{235}\text{U}$ )의 붕괴에 의해 생성되고 반감기가 3.9초로 매우 짧아서 이들 두 성분의 대기 농도는 아주 낮다. 이와 달리 라돈은 우라늄( $^{238}\text{U}$ )의 붕괴 과정에서 생겨난 라듐( $^{226}\text{Ra}$ )의  $\alpha$ -붕괴로 생성되며 상대적으로 긴 반감기를 갖는다(Whittlestone and Zahorowski, 1998). 그리고 다른 동위원소들에 비해 가장 널리 분포하는 대표적인 자연방사능 물질로 4번의  $\alpha$ -붕괴와 4번의  $\beta$ -붕괴를 거쳐 최종적으로  $^{206}\text{Pb}$ 으로 안정화된다(Moon et al.,

2009; WMO/GAW, 2004).

라돈에 의한 피폭은 자체보다는 주로 라돈 자핵종인  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$ 의  $\alpha$ -붕괴에 의해 발생하며, 방사선에 장기간 노출 시 폐 조직이 손상되어 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다. 또 라돈 붕괴과정에서 생성되는 라돈 자핵종은 고체물질로 정전기 전하를 띤 입자이다. 따라서 공기에 존재하는 먼지, 담배연기, 수증기 등에 흡착되면 에어로졸 형태로 폐에 침착된다. 이들 중 일부는 폐에서 제거되거나 기침으로 배출되지만 대부분은 붕괴과정에서  $\alpha$ -ray를 방출하여 장기적으로 폐암을 유발한다(Choi et al., 2009, Miles, 1988). 또한 미국 환경청(EPA)과 NAS (National Academy of Sciences)에 의하면 라돈이 담배 흡연에 이어 두 번째로 폐암 발생률을 높이고, 라돈에 대한 노출로 연간 15000 ~ 25000명의 폐암 사망자가 발생한다고 보고되고 있다(US EPA 2003, NRC, 2000).

WMO GAW에서는 라돈을 주요 관측요소에 포함시켜 지속적으로 관리하도록 권장하고 있다. 관측을 요하는 주요 방사능 물질로는  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  등이 있다(WMO GAW, 2001). 이 중  $^{222}\text{Rn}$ 은 자연계에 널리 분포하는 주요 자연방사능 물질로 인체 노출 방사선량의 50% 이상을 차지한다(Almeida et al, 2004). 라돈은 흡연 다음으로 위험한 폐암 유발 물질로 평가되고 있고, WHO에서는 폐암환자 중 3% ~ 14%가 라돈에 기인한 것으로 추정하고 있다. 2007년 한국원자력안전기술원에서 국민 방사선 위해도 평가를 조사한 결과, 자연방사선원에 의한 우리 국민 총 피폭 유효선량은 2.99 mSv/y이며, 이 중 라돈 흡입에 의한 내부피폭이 1.35 mSv/y로 전체의 45% 정도를 차지하는 것으로 조사되었다(MST, 2007).

대기 중의 자연방사능 물질 관리를 위해서는 실내는 물론 실외 라돈농도를 관측할 필요가 있다. 또 대기 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.  $^{222}\text{Rn}$ 은 반감기가 3.82일 정도로 몇몇 주요 대기오염물질과 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 지시물질로 활용이 가능하다.

호주핵과학기술기구(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)에서는 세계적인 라돈 관측망을 구축하여 대기 라돈을 모니터링하고 있다. 특히 주요 WMO GAW 관측소를 중심으로 세계 30여개 지점에

라돈검출기를 설치하여 라돈농도를 지속적으로 관측하고 있다. 고산에서는 ANSTO에서 제작한 라돈검출기를 이용하여 2001년 초부터 라돈농도 관측을 시작하였고, 2018년말 현재 18년째 지속적으로 라돈 배경농도를 관측해오고 있다.

## 가. 라돈 모니터링

대기 라돈농도는 고산(33.17° N, 126.10° E)에 고감도 라돈검출기를 설치하여 2018년 1월부터 12월까지 30분 간격으로 실시간 관측하였다. 라돈 관측을 위한 공기 유입관은 50 mm HDPE 파이프를 사용하여 지상 10 m 높이로 설치하였고, 공기의 유속은 대략 ~ 60 l/min이 되도록 조절하였다. 라돈 검출기는 배경농도 관측을 위한 목적으로 호주 ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 High Sensitivity Radon Detector (모델 D1500) 시스템이다. 이 검출기는 필터를 거친 후 자연확산 또는 동력펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈과 셀 내부에서 생성된 라돈자손으로부터 방출된 알파입자를 관측하는 방식이다. 알파입자는 ZnS(Ag)와 반응하여 섬광을 발생하며 이를 광전증배관으로 검출·계수하였다. 라돈 모니터링을 위해 사용한 라돈검출기의 감도(sensitivity)는 0.28 ~ 0.29 counts · sec<sup>-1</sup>/Bqm<sup>-3</sup>이며, 검출한계(low limit of detection)는 25 mBq/m<sup>3</sup>이다. 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.

관측 데이터의 검정은 월 1회 주기로 매회 5시간 동안 실시하였으며, 검정용 <sup>222</sup>Rn standard source는 18.5±4% kBq의 <sup>226</sup>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 관측하였다. 이 때 배경 값은 검출기의 2차 필터에 포집된 <sup>210</sup>Pb의 양에 따라 시간이 경과함에 따라 서서히 상승하는 경향을 보였다.



그림 5.5.6 고산 라돈검출기(ANSTO, Model D1500).

#### 나. 라돈 배경농도 모니터링 결과

고산의 ‘기후변화감시 통합운영실’에 고감도 라돈검출기를 설치하여 라돈 농도를 실시간으로 모니터링하였다. 그림 5.5.7은 2018년의 라돈농도 시계열 변화를 나타낸 것으로 라돈의 시간별 농도변화를 도시한 결과이다. 2018년 고산의 라돈농도는 시간평균  $2539 \pm 1326$  mBq/m<sup>3</sup>를 나타냈고, 이를 일평균농도로 환산한 농도는  $2544 \pm 1043$  mBq/m<sup>3</sup>이었다. 이 결과를 이전의 고산 관측결과와 비교해 보면, 2001 ~ 2017년의 평균농도  $2655 \pm 1104$  mBq/m<sup>3</sup>에 비해 조금 낮은 결과를 보이고 있다.

계절별 농도는 가을( $3094$  mBq/m<sup>3</sup>) > 겨울( $3061$  mBq/m<sup>3</sup>) > 봄( $2144$  mBq/m<sup>3</sup>) > 여름( $1852$  mBq/m<sup>3</sup>) 순으로 높았다. 또 월별 농도는 11월 > 1월 > 10월 > 12월 > 3월 > 9월 > 2월 > 6월 > 4월 > 8월 > 5월 > 7월 순으로 농도가 가장 높은 11월( $3513$  mBq/m<sup>3</sup>)과 낮은 7월( $1483$  mBq/m<sup>3</sup>)에 약 2.4배 정도의 편차를 보였다. 또한 일간 농도변화를 조사해 본 결과, 대체적으로 하루 중에는 야간이 낮 시간에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그리고 오전 7시 전후에  $2941$  mBq/m<sup>3</sup>로 가장 높고, 오후 2시 경에  $2018$  mBq/m<sup>3</sup>로 낮은 농도를 보였다. 이를 계절별로 비교해 본 결과, 봄, 여름, 가을철에는 오전 7 ~ 8시 경에 높은 농도를 보이거나 겨울철은 자정 전후에 높은 농도를 보여 겨울철에 다소 다른 시계열 변동 특성을 나타냈다.

이러한 국내 배경지역의 농도를 외국의 배경지역과 비교해 보면, 홍콩의 Hok Tsui와 이탈리아의 L' Aquila지역 보다는 훨씬 낮으나 하와이 Mauna Loa보다는 대략 24.9배 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).

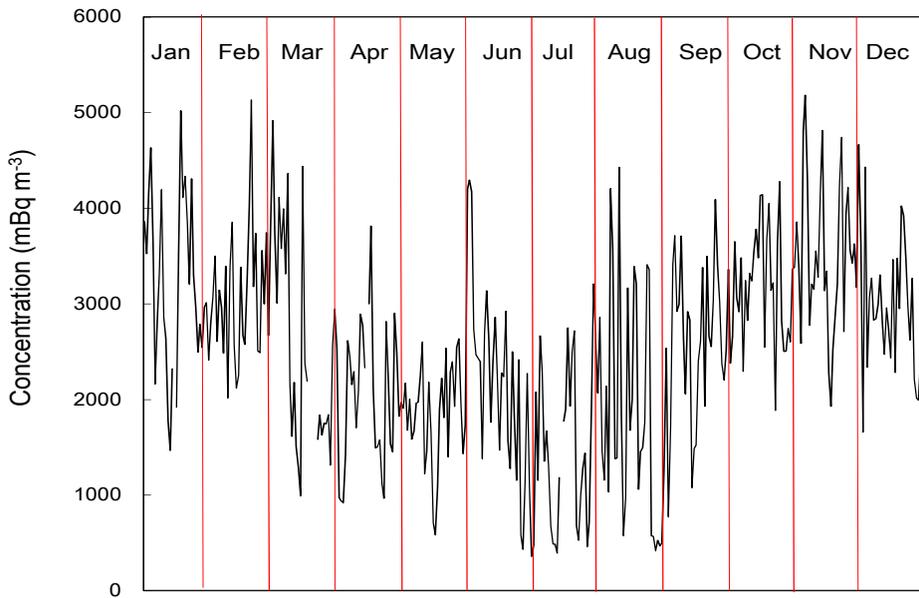


그림 5.5.7 2018년 고산관측소 라돈농도 시계열 변화.

고산의 2018년 라돈농도를 그림 5.5.8에 계절별로 구분하여 비교하였다. 그림에서 농도는 시간별 농도를 계절별로 평균한 결과로 고농도와 저농도 시의 추세 변화를 확인하기 위하여 중앙값(median)과 90, 75, 25, 10분위수 농도를 나타낸 것이다. 그림 5.5.8의 결과를 보면 계절별 평균농도는 봄에 2144 mBq/m<sup>3</sup>, 여름 1852 mBq/m<sup>3</sup>, 가을 3094 mBq/m<sup>3</sup>, 겨울 3061 mBq/m<sup>3</sup>로 4계절 중에서는 가을철에 가장 높고, 다음으로 겨울, 봄, 여름 순으로 높은 경향을 보였다. 또한 농도가 높은 90분위수와 낮은 10분위수를 각 계절별로 분류하여 비교해 본 결과, 90분위수와 10분위수에서 모두 가을철에 높은 농도 값으로 평균농도와 유사한 패턴을 보였다. 이처럼 계절별 비교에서 겨울, 가을, 봄에 라돈농도가 높은 것은 이 시기에 북서계열 풍향이 주류를 이루고 있고 이 때 대륙으로부터 대기가 유입

되었기 때문으로 추정된다. 반면에 여름에 훨씬 낮은 농도를 나타내는 것은 이 시기에 주로 남동 계절풍의 영향을 받아 해양으로부터 공기가 유입되었기 때문인 것으로 추정된다. 또 대기 혼합고의 높이(mixing depth)는 대기오염물질의 누적, 확산, 희석에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1985). 이러한 대기 혼합고를 계절별로 비교해 보면, 대체적으로 가을과 겨울에는 기온이 낮아서 혼합고 높이가 낮아지는 반면, 봄과 여름에는 대기 혼합고의 높이가 상대적으로 높은 경향을 보이고 있다. 따라서 대기 라돈농도는 계절별로 혼합고의 높이에 따라 영향을 받고 있는 것으로 보이며, 혼합고 높이에 반비례하여 겨울과 가을에는 높은 농도를 유지하고, 봄과 여름에는 상대적으로 더 낮은 농도를 유지하는 것으로 추정된다(Kim et al., 2007).

2018년의 라돈농도를 월별로 비교하였고 그 결과를 그림 5.5.9에 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 > 1월 > 10월 > 12월 > 3월 > 9월 > 2월 > 6월 > 4월 > 8월 > 5월 > 7월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 11월에  $3513 \text{ mBq/m}^3$ , 가장 낮은 7월에  $1483 \text{ mBq/m}^3$ 로 월별로는 거의 2.4배 정도의 편차를 보이는 것으로 확인되었다. 또 농도가 높은 90분위수와 낮은 10분위수 농도를 월별로 비교해 본 결과, 중앙값과 90분위수, 10분위수 농도는 3월, 8월, 10월에 다소 다른 경향을 보였고, 그 외에는 월평균 농도와 비슷한 변화추세를 보였다.

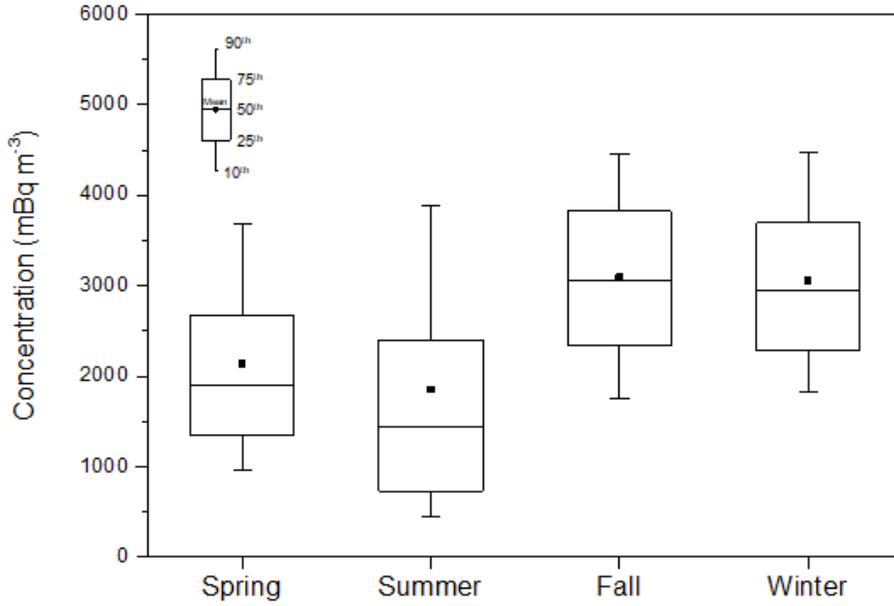


그림 5.5.8 2018년 고산에서 계절별 라돈농도 비교.

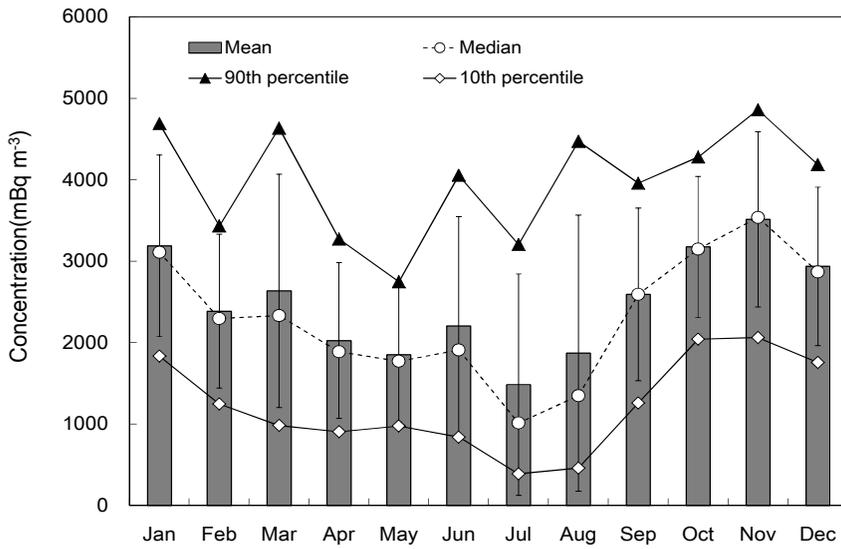


그림 5.5.9 2018년 고산의 월별 라돈농도 비교.

대기 라돈농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 비교하였고 그 결과를 그림 5.5.10에 나타내었다. 일간 변화를 비교한 결과에서 라돈농도는 오전 7시에 2941 mBq/m<sup>3</sup>로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 2시 경에 2018 mBq/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 대체적으로 야간에 더 높고 주간에 낮은 경향을 보였으며, 일간 변화는 아침부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 2 ~ 4시경까지 감소하고 다시 저녁시간에 상승하여 밤에는 점차로 상승하는 추세를 보였다(Omori et. al., 2009). 이러한 경향은 대기의 혼합고의 변화에 따라 영향을 받았기 때문인 것으로 추정된다. 혼합고 높이는 날씨가 맑을 때에는 늦은 오전이나 오후의 낮 동안에 최고가 되어 대기 경계의 높이까지 이르게 되고, 이 높이 이내의 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 낮아져 밀집된 라돈이 더 높은 농도를 나타내는 것으로 추정된다. 이처럼 라돈의 일간 농도는 월별, 계절별 농도와 마찬가지로 혼합고의 확장, 축소에 따라 라돈의 확산과 밀집에 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 5.5.11). 겨울철에는 주야간 온도변화가 큰 차이를 보이지 않고 대기 혼합고의 차이도 상대적으로 작다. 따라서 라돈의 일간 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않게 된다. 그러나 이와 반대로 주야간 온도차가 큰 편차를 보이는 여름철에는 혼합고의 확장 및 축소가 큰 변화를 보인다. 따라서 여름철에는 라돈의 최대, 최소 농도가 겨울에 비해 더 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다(Chambers et al., 2016).

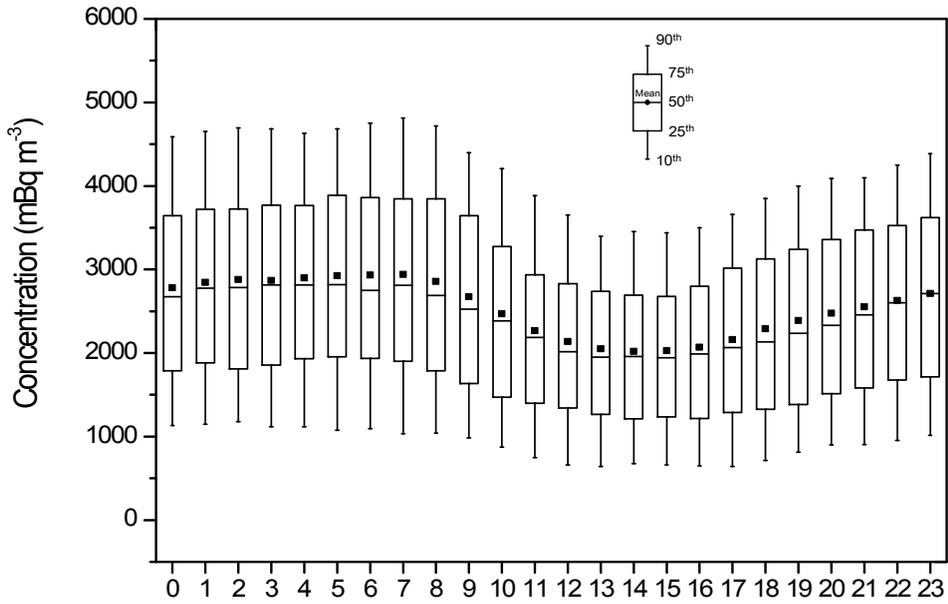


그림 5.5.10 2018년 고산 일중 시간별 라돈농도 비교.

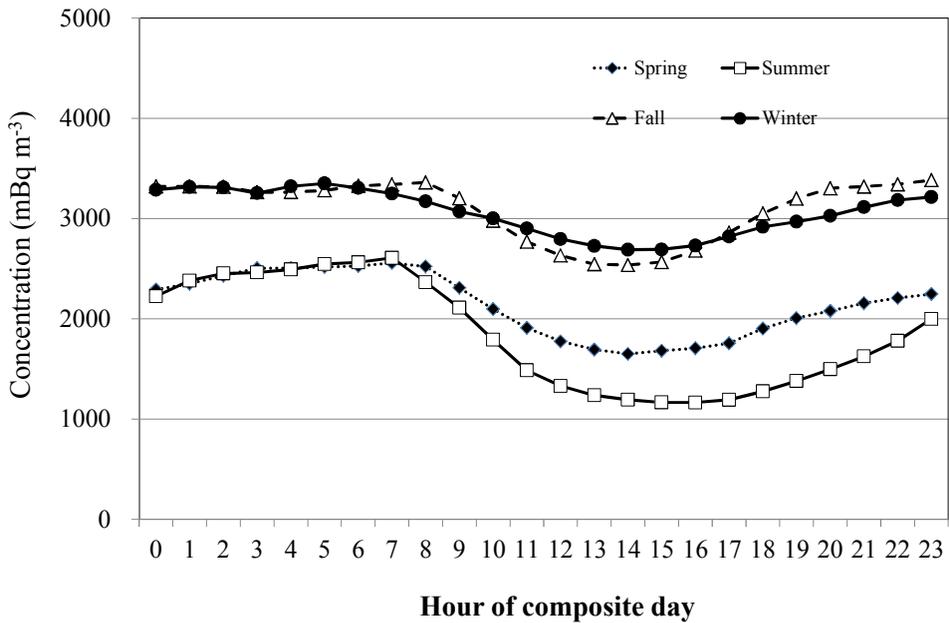


그림 5.5.11 2018년 고산 계절별 일중 시간 라돈농도 비교.

## 다. 라돈 장거리 이동 수송경로

2018년의 라돈 일평균 농도를 기준으로 이 시기의 기류 이동궤적을 역궤적 군집분석법으로 조사하였고, 그 결과를 그림 5.5.12에 나타내었다. 기류의 유입 경로를 고산을 중심으로 중국북부(Cluster 1), 중국중부 및 한반도(Cluster 2), 북태평양(Cluster 3), 일본 및 동해(Cluster 4)의 4개 구간으로 나누고, 역궤적 군집분석 결과를 기초로 고산으로 유입된 기단의 이동경로를 조사하였다. 역궤적 분석은 NOAA의 HYSPLIT 4.0 모델과 NCEP의 GDAS 기상 데이터를 이용하였다. 또 중국대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 3일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사시간은 72시간으로 설정하였고, 관측 지점 좌표는 고산(33.17° N, 126.10° E)을 기점으로 선정하였다. 또 출발점 고도는 72 m, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC (09 KST)를 기준으로 설정하였다.

역궤적 군집분석을 기초하여 5개 군집별 일평균 라돈농도를 분석한 결과, 기류의 이동은 Cluster 1 ~ Cluster 4에서 각각 37%, 35%, 19%, 10%의 빈도를 나타내어 대부분 북서풍을 타고 중국대륙으로부터 고산으로 이동한 것으로 확인되었다. 그리고 이 때 각 기류 이동경로별 라돈농도를 비교한 결과, Cluster 1 ~ Cluster 4에서 각각 3090, 2588, 1382, 2570 mBq/m<sup>3</sup>를 나타내었다. 이처럼 라돈 농도는 기류가 중국대륙에서 고산으로 이동했을 때 대체적으로 더 높은 경향을 보였다. 반면에 기류가 북태평양에서 고산으로 유입되었을 때에는 중국에서 유입되었을 때에 비해 2.2배 정도 더 낮은 농도를 나타냈다. 이와 같이 라돈 농도는 대체적으로 대륙에서 기류가 유입(continental fetch)되었을 때 높고, 북태평양에서 이동했을 때에 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

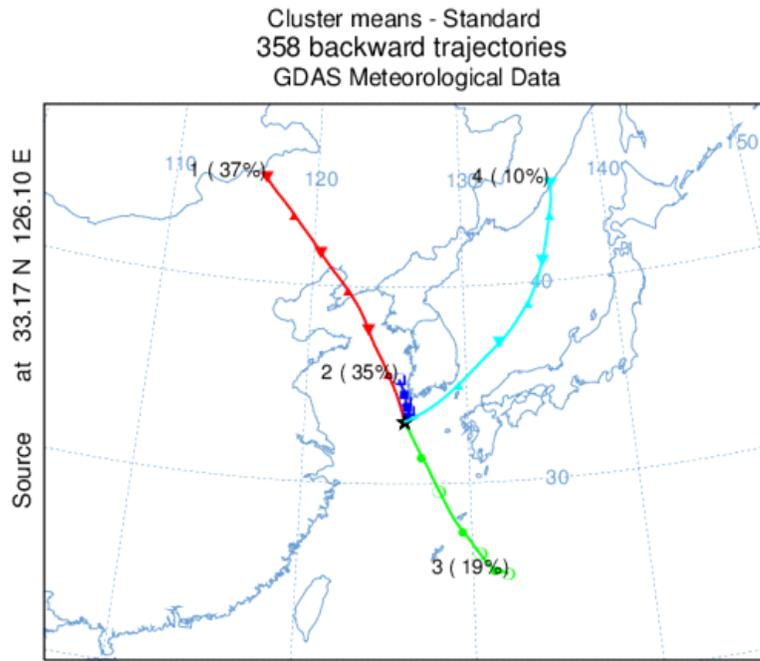


그림 5.5.12 라돈 유입경로별 추적을 위한 역궤적 군집분석.

# 제4장 지구대기감시 자료 통계 방법

## 4.1 온실가스

### 4.1.1 관측장비

#### ○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측기간
CO <sub>2</sub>	비분산적외선분석기 (NDIR)	Simense	1시간	1999년 ~ 2011년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	가스크로마토그래프- 불꽃이온화검출기 (GC-FID)	Agilent	1일	1999년 ~ 2015년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2016년 ~ 현재
N <sub>2</sub> O	가스크로마토그래프- 전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1일	1999년 ~ 현재
SF <sub>6</sub>				2007년 ~ 현재
CFC-11				1999년 ~ 현재
CFC-12				1999년 ~ 현재
CFC-113				2007년 ~ 현재

#### ○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측기간
CO <sub>2</sub>	비분산적외선분석기 (NDIR)	Simense	1시간	2009년 ~ 2013년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2014년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2015년 ~ 현재
N <sub>2</sub> O	가스크로마토그래프 -전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1일	2010년 ~ 현재
SF <sub>6</sub>				2016년 ~ 현재

※ 2012년 고산 한경면에서 고산 수월봉(현위치)로 이동하여 2012년부터 자료제공

○ 울릉도

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측기간
CO <sub>2</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년 ~ 현재
N <sub>2</sub> O SF <sub>6</sub>	가스크로마토그래프 -전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1일	2012년 ~ 현재 2015년 ~ 현재

○ 독도

관측요소	장 비 명	제 작 사	관측주기	관측기간
CO <sub>2</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	1시간	2012년 ~ 현재

#### 4.1.2 자료선별법 및 배경대기 산출법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
이산화탄소 (CO <sub>2</sub> )	1시간	<p>&lt;입력자료 선정&gt;</p> <p>① 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거</p> <p>② 이산화탄소 표준가스 교정기간 제거</p> <p>&lt;시간평균&gt;</p> <p>③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균을 구함</p> <p>④ 시간평균의 표준편차가 A보다 크고 연속된 앞 뒤 시간평균값의 차이가 B이상 차가 나면, 시간자료 기각</p> <p>* 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</p> <p>* 자료의 약 30 ~ 32% 기각됨</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt;</p> <p>⑤ ④의 시간평균 자료가 n개 이상일 때 1차 일평균 산정</p> <p>* 안면도: (n) 15개, 나머지 관측소: (n) 10개</p> <p>⑥ ⑤의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅</p> <p>⑦ 관측값 - 커브피팅 = 잔차(a) 산정</p>

		<p>⑧ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/yr)한 잔차(b) 생성</p> <p>⑨ 잔차(a) &lt; 잔차(b)의 <math>\sigma</math>안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택 * 안면도 = 잔차(b)의 <math>2\sigma</math>, 고산, 울릉도, 독도는 잔차(b)의 <math>3\sigma</math></p> <p>⑩ ⑥ ~ ⑨ 번 5번 반복</p> <p>⑪ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정</p> <p>* 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/yr 반영 (Thoning et al., 1989)</p>
메탄(CH <sub>4</sub> )	1시간	<p>&lt;입력자료 선정&gt;</p> <p>① 메탄 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입)</p> <p>② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거</p> <p>&lt;시간평균&gt;</p> <p>③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균을 구함</p> <p>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</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt;</p> <p>⑤ ④의 시간평균 자료가 6개 이상일 때 1차 일평균 산정</p> <p>⑥ ⑤의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅</p> <p>⑦ 관측값 - 커브피팅 = 잔차(a) 산정</p> <p>⑧ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/yr)한 잔차(b) 생성</p> <p>⑨ 잔차(a) &lt; 잔차(b)의 <math>3\sigma</math>안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택</p> <p>⑩ ⑥ ~ ⑨ 번 5번 반복 후</p> <p>⑪ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정</p> <p>* 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/yr 반영 (Thoning et al., 1989)</p>
아산화질소 (N <sub>2</sub> O)	1일	<p>&lt;입력자료 선정&gt;</p> <p>① 아산화질소 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입)</p> <p>② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거</p> <p>&lt;시간자료 선택&gt;</p> <p>③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로</p> <p>④ 시간자료의 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 1.6 ppb, 고산: (A) 1.4 ppb * 자료의 약 30 ~ 32% 기각됨</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt;</p> <p>⑤ ④의 시간평균 자료가 6개 이상일 때 1차 일평균산정</p> <p>⑥ ⑤의 선택된 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 커브피팅</p>

		<p>⑦ 관측값 - 커브피팅 = 잔차(a) 산정</p> <p>⑧ 잔차(a)에 대해 단주기성분제거(low pass filtering, 주기: 7.3 cycle/yr)한 잔차(b) 생성</p> <p>⑨ 잔차(a) &lt; 잔차(b)의 3σ안에 들어있으면, 그 때의 일자료 선택</p> <p>⑩ ⑥ ~ ⑨ 번 5번 반복 후</p> <p>⑪ 최종 남은 잔차(b) + 커브피팅 = 월평균, 연평균확정 * 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/yr 반영 (Thoning et al., 1989)</p>
염화불화탄소류(CFCs)	1일	<p>&lt;입력자료 선정&gt;</p> <p>① 염화불화탄소류의 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입)</p> <p>② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거</p> <p>&lt;시간자료 선택&gt;</p> <p>③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로</p> <p>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 기 준함</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt; ※ O'Doherty et al., 2001</p> <p>⑤ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting 함</p> <p>⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출</p> <p>⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출</p> <p>⑧ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별</p> <p>⑨ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 <b>일평균 산정</b></p> <p>⑩ ⑨를 이용하여 <b>월평균 산정</b></p>
육불화황 (SF <sub>6</sub> )	1일	<p>&lt;입력자료 선정&gt;</p> <p>① 육불화황 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입)</p> <p>② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플래깅을 원시자료에서 제거</p> <p>&lt;시간자료 선택&gt;</p> <p>③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로</p> <p>④ 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 1 ppt * 전체자료의 연속값의 차이값 분포를 통해 상위 90%, 하위 10% 값을 기 준함</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt; ※ O'Doherty et al., 2001</p> <p>⑤ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting함</p> <p>⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출</p> <p>⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출</p> <p>⑧ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별</p> <p>⑨ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 <b>일평균 산정</b></p> <p>⑩ ⑨를 이용하여 <b>월평균 산정</b></p>

## 4.2 반응가스

### 4.2.1 관측장비

#### ○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
O <sub>3</sub>	오존분석기	ECOTECH	ML9812	1시간	1998년 ~ 2005년
		THERMO	49i	1시간	2005년 ~ 2007년
				1시간	2007년 ~ 현 재
CO	일산화탄소분석기	ECOTECH	ML9830	1시간	1998년 ~ 2005년
		THERMO	48i	1시간	2005년 ~ 2007년
				1시간	2007년 ~ 현 재
NO <sub>x</sub>	질소산화물분석기	ECOTECH	ML9841A	1시간	1998년 ~ 2005년
		THERMO	42i	1시간	2005년 ~ 2007년
				1시간	2007년 ~ 현 재
SO <sub>2</sub>	이산화황분석기	ECOTECH	ML9850	1시간	1998년 ~ 2005년
		THERMO	43i	1시간	2005년 ~ 2007년
				1시간	2007년 ~ 현 재

#### ○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
O <sub>3</sub>	오존분석기	THERMO	49i	1시간	2012년 ~ 현재
CO	일산화탄소분석기	THERMO	48i	1시간	2012년 ~ 현재
NO <sub>x</sub>	질소산화물분석기	THERMO	42i	1시간	2012년 ~ 현재
SO <sub>2</sub>	이산화황분석기	THERMO	43i	1시간	2012년 ~ 현재

#### ○ 울릉도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
CO	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	G2401	1시간	2015년 ~ 현재

## 4.2.2 반응가스 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
<p>오존(O<sub>3</sub>) 일산화탄소(CO) 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 이산화황(SO<sub>2</sub>)</p>	<p>1시간</p>	<p>○ 통계 최소자릿수: 0.1 ○ 생산자료 → 시간통계 → 일통계 → 월통계 → 연통계</p> <p>&lt; 시간 통계 &gt; ○ 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</p> $\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1} + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ <p>○ CO는 주기적으로 분석하는 zero값으로 표류오차값을 보정함. 예) 04시 zero = 5 ppb, 06시 zero = 10 ppb라면 2시간동안 5ppb가 선형적으로 증가하였다고 가정하여 관측값에서 빼 줌.</p> <p>○ NO<sub>x</sub>자료 중 NO는 전일 밤 10시 ~ 당일 새벽 2시의 NO 평균을 zero 값으로 산출하여 연속된 날의 zero값과 zero값 사이를 선형내삽한 후 관측값에서 빼 줌. 이 때 O<sub>3</sub> &lt;20 ppb인 경우 NO 고농도사례로 보고 zero값 산출하지 않음</p> <p>&lt; 일통계 &gt; ○ 자료기간 : 시간평균자료가 하루 75% 이상일 때 산출(시간자료 18개 이상) ○ 자료종류 : 일평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음</p> <p>&lt; 월통계 &gt; ○ 자료기간 : 일자료가 50% 이상일 때 산출 ○ 자료종류 : 월평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음</p> <p>&lt; 연통계 &gt; ○ 자료기간 : 해당 연의 1월부터 12월까지의 1년간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 연평균 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음</p>

## 4.3 에어로졸

### 4.3.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측 주기	관측기간
PM10 질량농도	부유분진측정기 ( $\beta$ -ray PM <sub>10</sub> )	Thermo	FH62C14	1시간	2003년 ~ 현재 (안면도)
					2009년 ~ 현재 (고 산)
크기별 수농도 (0.5~20 $\mu$ m)	공기역학입자계수기 (APS)	TSI	3321	1시간	2006년 ~ 현재 (안면도)
					2009년 ~ 현재 (고 산)
미세입자 크기별 수농도(0.01~0.5 $\mu$ m)	전자기유도 입자계수기 (SMPS)	TSI	3034	1시간	2005년 ~ 2016년 (안면도)
		GRIMM	5.416	1시간	2017년 ~ 현재 (안면도)
응결핵 수농도 (0.01~3 $\mu$ m)	응결핵계수기 (CPC)	TSI	3772	1시간	2010년 ~ 현재 (고 산)
연직분포	에어로졸 라이더	EN3엔지니어링	MPoLAR 2020	15분	2010년 ~ 현재 (안면도)
광산란계수	광산란계수측정기 (Nephelometer)	TSI	3563	1시간	2003년 ~ 현재 (안면도)
광흡수계수	광흡수계수측정기 (Aethalometer)	Magee Scientific	AE16	1시간	2001년 ~ 2010년 (안면도)
			AE31	1시간	2011년 ~ 현재 (안면도)
광학깊이	정밀필터복사계 (PFR)	PMOD, Switzerland	GAW-PFR	수시	2010년 ~ 현재 (안면도)
					2011년 ~ 현재 (고 산)
	태양광도계 (Sun-Photometer)	Cimel	CE-318N	수시	안면도 2013년 ~ 현재 (안면도)

### 4.3.2 에어로졸 물리·광학 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
PM10 질량농도 (β-ray 흡수법)	1시간	<p>&lt;자료품질관리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○장비의 검교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거</li> <li>○기기상태 검사: 6자리 상태 코드가 '000000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심'으로 분류</li> <li>○계측한계: 1~5,000 μg/m<sup>3</sup>를 벗어나면 '의심'으로 분류</li> <li>○시간연속성 검사               <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul> </li> </ul> $\Delta PM10 = \min [PM10(t) - PM10(t \pm 1)] \quad (1)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>○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.</li> </ul> $d = [PM10(t) - PM10(t-1)] - [PM10(t+1) - PM10(t)] \quad (2)$ $d \geq Md - z \times MAD \text{ or } d \leq Md + z \times MAD \quad (3)$ $MAD = \text{median}( d - Md ) \quad (4)$
		<p>PM10 질량농도가 지난 1시간 평균의 20%를 초과하면 '의심'으로 분류</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○지속성 검사: 과거 60분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'으로 분류</li> <li>○정합성 검사: 인근 동일 요소 산출물 비교하여 차이가 50% 초과할 경우 '의심'으로 분류</li> </ul> <p>○'의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리함.</p> <p>&lt;통계방법&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 75% 이상일 때 시간평균값 산출</li> <li>○시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 75% 이상일 때 월평균, 연평균 산출</li> </ul>
크기별 수농도(0.5~20 μm)	1시간	<p>&lt;자료품질관리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○장비의 검교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거</li> <li>○기기상태 검사               <ul style="list-style-type: none"> <li>① 상태 코드가 '0000 0000 0000 0000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심'</li> <li>② event 4&gt;0 : '의심'</li> <li>③ dead time = 0 : '의심'</li> <li>④ 내부 diode 온도 ≤ 18 °C : '의심'</li> </ul> </li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>○계측한계: 구간별 수농도가 1,000 개/cm<sup>3</sup> 이상일 때 '의심', 10,000 개/cm<sup>3</sup> 일 때 '오류'로 분류</li> <li>○'의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자의 확인을 거쳐 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리함.</li> <li>&lt;통계방법&gt;</li> <li>○위 자료 품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출</li> <li>○시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출</li> </ul>
미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5 μm)	1시간	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기기오류 검사, 튀는 값 제거</li> <li>- 표준대기상태(0°C, 1013.25 hP) 보정</li> <li>- 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출</li> </ul>
응결핵 수농도 (0.01~3 μm)	1시간	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기기오류 검사</li> <li>- 튀는 값 제거</li> <li>- 장비의 검교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거</li> <li>- DB 시스템과 실시간 그래픽으로 자료를 확인</li> <li>- 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출</li> </ul>
광산란계수	1시간	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 기기오류 검사</li> <li>- 배경농도(제로체크) 검사</li> <li>- 계측한계 확인</li> <li>- 파장별 관측 오류 검사</li> <li>- 표준대기상태(0°C, 1013.25 hP) 보정</li> <li>- 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출</li> </ul>
광흡수계수	1시간	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 계측한계 확인, 튀는 값 제거</li> <li>- 감쇄계수 오류 검사</li> <li>- 필터 스팟 이동 검사</li> <li>- 표준대기상태(0°C, 1013.25 hP) 보정</li> <li>- 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출</li> </ul>

### 4.3.3 에어로졸 화학

관측요소	관측 주기	자료통계 방법
PM10 질량농도	주 1회	- PM10 무게 측정 질량농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) < PM2.5 무게 측정 질량농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 일 때, 자료 제거
PM2.5 질량농도	주 1회	
PM10 이온성분	-	- Filter 무게 측정 질량농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) < 화학성분 총 질량농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 일 때, 자료 제거 - 양이온 당량농도 합( $\Sigma[\text{Cation}]_{\text{eq}}$ ), 음이온 당량농도 합( $\Sigma[\text{Anion}]_{\text{eq}}$ )을 의미하며, 아래의 식으로 계산
		$0.7 < \frac{\Sigma[\text{Cation}]_{\text{eq}}}{\Sigma[\text{Anions}]_{\text{eq}}} < 1.3$
PM2.5 이온성분	-	- 양이온과 음이온 당량 농도합의 비가 30% 이상 차이 나는 자료는 최종 결과에서 제외 - PM10 각각의 화학성분( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) < PM2.5 각각의 화학성분( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 일 때, Filter의 상태 및 기기의 상태 확인 후 자료제거
PM10 원소성분	-	- PM10 각각의 화학성분( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) < PM2.5 각각의 화학성분( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) 일 때, Filter의 상태 및 기기의 상태 확인 후 자료제거
PM2.5 원소성분	-	

## 4.4 대기복사

### 4.4.1 관측장비

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

### 4.4.2 대기복사 자료통계방법

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

○ Quality Check 방법(BSRN 기준)

1단계 QC (Physically Possible Limits)	
- Global Radiation	Min : -4 W/m <sup>2</sup> Max : Sa X 1.5 X μ <sub>0</sub> <sup>1.2</sup> + 100 W/m <sup>2</sup>
- Reflected Solar Radiation	Min : -4 W/m <sup>2</sup> Max : Sa X 1.2 X μ <sub>0</sub> <sup>1.2</sup> + 50 W/m <sup>2</sup>
- Direct Solar Irradiance	Min : -4 W/m <sup>2</sup> Max : Sa
- Diffuse Solar Radiation	Min : -4 W/m <sup>2</sup> Max : Sa X 0.95 X μ <sub>0</sub> <sup>1.2</sup> + 50 W/m <sup>2</sup>
- Downwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m <sup>2</sup> Max : 700 W/m <sup>2</sup>
- Upwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m <sup>2</sup> Max : 900 W/m <sup>2</sup>
2단계 QC (Comparisons)	
- Ratio of Global Radiation over SUM	Global / SUM -> within +/- 8% of 1.0 (for SZA < 75°, SUM > 50 W/m <sup>2</sup> ) Global / SUM -> within +/- 15% of 1.0 (for 75° < SZA < 93°, SUM > 50 W/m <sup>2</sup> )
- Ratio of Diffuse over Global Radiation	SWDIFF / Global < 1.05 (for SZA < 75°, Global > 50 W/m <sup>2</sup> ) SWDIFF / Global < 1.10 (for 75° < SZA < 93°, Global > 50 W/m <sup>2</sup> )
- Reflected Solar Radiation comparison	SWUP < SUM (SUM > 50 W/m <sup>2</sup> )
- Air Temperature comparison (Infrared Radiation)	σ(Ta-15K) <sup>4</sup> < LWUP < σ(Ta+25K) <sup>4</sup> 0.4XσTa <sup>4</sup> < LWDOWN < σTa <sup>4</sup> +25
- Infrared Radiation comparison	LWDOWN < LWUP + 25 W/m <sup>2</sup> LWDOWN > LWUP - 300 W/m <sup>2</sup>
3단계 QC (NET Comparison)	
- NET & Cal. NET	NET   < 50 W/m <sup>2</sup> ->   NET - Cal. NET   < 25 W/m <sup>2</sup>   NET   ≥ 50 W/m <sup>2</sup> ->   (NET - Cal. NET) / NET   < 0.5
<p>* 태양상향복사(SWUP), 태양하향복사(전천일사/Global), 적달일사(SWDIR), 산란일사(SWDIFF), 지구상향복사(LWUP), 지구하향복사(LWDOWN)</p> <p>* SUM : SWDIFF + SWDIR × μ<sub>0</sub></p> <p>* SZA : Solar Zenith Angle</p> <p>* μ<sub>0</sub> : Cos(SZA)</p> <p>* Sa : S<sub>o</sub> / AU<sup>2</sup> (S<sub>o</sub> : Solar constant at mean Earth-Sun distance AU : Earth - Sun distance in Astronomical Units)</p> <p>* σ : 5.67 × 10<sup>-8</sup></p> <p>* Ta : air temperature in Kelvin (170K &lt; Ta &lt; 350K)</p>	

## 4.5 성층권오존

### 4.5.1 관측장비

#### ○ 안면도

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

#### ○ 고 산

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

#### ○ 포 향

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

#### ○ 서 울(위탁관측소)

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
오존전량	오존분광광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	SCI-TEC	MK-IV	1일	1997년 ~ 현재 (연세대학교)
오존전량	Dobson 분광광도계	Ealing	Beck #124	일 6회 Direct-오전, 정오, 오후 Zenith-오전, 정오, 오후	1984년 ~ 현재 (연세대학교)
오존연직 분포	110 GHz 마이크로파 수신기	자체개발	SORAS	15분	2008년 ~ 현재 (숙명여자대학교)

## 4.5.2 성층권 오존 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
오존전량	1일	<p>&lt; 오존분광도계 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 태양광 중 6개 파장에 대한 광도를 참조 값과 비교하여 오존전량 산출</li> <li>- 태양의 위치에 따라 하루 10회 이상 관측하여 오차가 적은 유효한 관측 값들을 평균하여 그날의 오존전량으로 산출 (직달일사 만 유효)</li> <li>- 일평균 오존전량(오존분광도계 OZAVG 파일 일 대푯값) 중 편차가 50 [DU] 이하일 경우 =&gt; 일 대푯값</li> <li>- 월평균 : 매월 10일 이상의 일 자료가 있을 경우 일 대푯값의 평균값</li> <li>- 년평균 : 월평균이 6개월 이상 존재할 경우의 월평균에 대한 평균값</li> </ul>
오존연직분포	주 1회	<p>&lt; ECC 오존존데 &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 관측일 중 베스트 프로파일 선택하여 월별, 계절별 분석 수행</li> </ul>

## 4.6 자외선

### 4.6.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	관측주기	관측기간
자외선A	UVA-Detector	Solarlight	#501	10분	2015년 ~ 현재 (강릉)
					2015년 ~ 현재 (서울)
					2012년 ~ 현재 (울릉도)
					2007년 ~ 현재 (안면도)
					2009년 ~ 현재 (포항)
					2014년 ~ 현재 (목포)
					2012년 ~ 현재 (고산)
자외선B	UV-Biometer	Solarlight	#501	10분	2001년 ~ 현재 (강릉)
					2015년 ~ 현재 (서울)
					2012년 ~ 현재 (울릉도)
					1999년 ~ 현재 (안면도)
					1999년 ~ 현재 (포항)
					2000년 ~ 현재 (목포)
					1999년 ~ 2012년 (수월봉)
2011년 ~ 현재 (고산)					
총자외선	Brewer 분광광도계	SCI-TEC	MK-IV	상시	2004년 ~ 현재 (서울, 연세대학교)

## 4.6.2 자외선 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
자외선A	10분	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 매일 10분 간격으로 144개 원시 파일 생산 자외선A: 10분 누적값 (단위: J/cm<sup>2</sup>) 자외선B: 10분 누적값 (단위: MED)</li> <li>- 원시자료 품질관리 수행               <ul style="list-style-type: none"> <li>• 관측오류 결측 처리</li> <li>• 계측 하한, 계측 상한 값을 벗어날 경우 오류처리</li> <li>• 기기상태 오류                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- 관측센서온도가 24°C ~ 26°C를 벗어날 경우 오류 처리</li> </ul> </li> <li>• Tropospheric Ultraviolet-Visible (TUV) radiation model (V. 5.3) 값 보다 클 경우 오류 값 처리(75° 이하)</li> </ul> </li> </ul>
자외선B		<ul style="list-style-type: none"> <li>- 품질관리를 통과한 원시자료가 80% 이상일 때 자외선A, 자외선B 시간 누적값, 시간 최댓값 산출 1시간 누적값 : 자외선A (단위: MJ/m<sup>2</sup>), 자외선B (단위: kJ/m<sup>2</sup>) 1시간 최댓값 : 자외선A, 자외선B (W/m<sup>2</sup>)</li> <li>- 시간자료 중 80% 이상 존재할 때 자외선A, 자외선B 일누적값, 일 최댓값 산출 일누적값: 자외선A (단위: MJ/m<sup>2</sup>), 자외선B (단위: kJ/m<sup>2</sup>) 일 최댓값: 자외선A, 자외선B (W/m<sup>2</sup>)</li> <li>- 매월 80% 이상의 일 자료가 있을 경우 일누적값의 월 평균값, 일 최댓값의 월평균 산출</li> <li>- 매년 80% 이상의 월 자료가 있을 경우 연 평균값 산출</li> </ul>

## 4.7 총대기침적

### 4.7.1 관측장비

관측요소	장비명	제작사	모델명	관측기간
건성침적, 습성침적	강수자동측정 시스템	Eigenbrodt	NMO 191/ KSDSC	2012년 ~ 현재 (안면도)
		KNR	APK9900	2014년 ~ 현재 (고 산)
		KNR	APK9900	2014년 ~ 현재 (울릉도)
		KNR	Aqua, JP/RM8300	2007년 ~ 2016년 (울 진)
산성도	산성도측정기	Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 현재 (안면도)
		Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 현재 (고 산)
		Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 현재 (울릉도)
		Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 2016년 (울 진)
전기전도도	전기전도도 측정기	Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 현재 (안면도)
		Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 현재 (고 산)
		Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 현재 (울릉도)
		Thermo	Orion 3-Star	2009년 ~ 2016년 (울 진)
강수 이온성분 (9종: F <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Na <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> )	이온크로마토 그래프(IC)	Dionex	ICS-2000	2005년 ~ 현재 (안면도)
		Dionex	ICS-2000	2005년 ~ 현재 (안면도)

## 4.7.2 총대기침적 자료통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법										
산성도	강수 시	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 당일 9시부터 익일 9시까지 강수량이 0.5 mm 이하 시료 제외</li> <li>- 아래 이온밸런스법과 전기전도도 균형을 동시에 만족하는 경우에 이용 &lt; 이온 차의 허용범위 검사 &gt;</li> <li>- 총 이온농도 (CE+AE) 크기에 따른 이온 차의 허용 범위(Acceptable Ion Difference, AID)를 기준으로 자료의 타당성 판단</li> </ul> $Ion\ Difference(\%) = \frac{(CE - AE)}{(CE + AE)} \times 100$ <p>표 1. 총 이온 농도(CE+AE)에 따른 이온 차의 허용범위(AID) (WMO GAW Report No. 160)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>CE+AE (μeq/L)</th> <th>Acceptable Ion Difference(AID, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[CE+AE] ≤ 50</td> <td>AID ≤ ±60</td> </tr> <tr> <td>50 &lt; [CE+AE] ≤ 100</td> <td>AID ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>100 &lt; [CE+AE] ≤ 500</td> <td>AID ≤ ±15</td> </tr> <tr> <td>500 &lt; [CE+AE]</td> <td>AID ≤ ±10</td> </tr> </tbody> </table>	CE+AE (μeq/L)	Acceptable Ion Difference(AID, %)	[CE+AE] ≤ 50	AID ≤ ±60	50 < [CE+AE] ≤ 100	AID ≤ ±30	100 < [CE+AE] ≤ 500	AID ≤ ±15	500 < [CE+AE]	AID ≤ ±10
CE+AE (μeq/L)	Acceptable Ion Difference(AID, %)											
[CE+AE] ≤ 50	AID ≤ ±60											
50 < [CE+AE] ≤ 100	AID ≤ ±30											
100 < [CE+AE] ≤ 500	AID ≤ ±15											
500 < [CE+AE]	AID ≤ ±10											
전기전도도	강수 시	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 전기전도도 차 허용범위 검사 &gt;</li> <li>- 직접 측정된 전기전도도(EC<sub>mea</sub>)와 이론적으로 계산한 전기전도도(EC<sub>cal</sub>) 비교</li> <li>- 전기전도도 차의 허용범위(Acceptable Conductivity Difference, ACD)를 기준으로 타당성 판단</li> </ul> $Conductivity\ Difference(\%) = \frac{EC_{cal} - EC_{mea}}{EC_{mea}} \times 100$ <p>표 2. 측정된 전기전도도에 따른 전기전도도 차의 허용범위(ACD) (WMO GAW Report No. 160)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>EC<sub>mea</sub> (μS/cm)</th> <th>Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EC<sub>mea</sub> ≤ 5</td> <td>ACD ≤ ±50</td> </tr> <tr> <td>5 &lt; EC<sub>mea</sub> ≤ 30</td> <td>ACD ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>30 &lt; EC<sub>mea</sub></td> <td>ACD ≤ ±20</td> </tr> </tbody> </table>	EC <sub>mea</sub> (μS/cm)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)	EC <sub>mea</sub> ≤ 5	ACD ≤ ±50	5 < EC <sub>mea</sub> ≤ 30	ACD ≤ ±30	30 < EC <sub>mea</sub>	ACD ≤ ±20		
EC <sub>mea</sub> (μS/cm)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)											
EC <sub>mea</sub> ≤ 5	ACD ≤ ±50											
5 < EC <sub>mea</sub> ≤ 30	ACD ≤ ±30											
30 < EC <sub>mea</sub>	ACD ≤ ±20											
강수이온성분	강수 시	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 이온 당량농도비 검사 &gt;</li> <li>- 양이온의 당량농도(Cation Equivalents, CE) 총합과 음이온의 당량농도 (Anion Equivalents, AE) 총합은 같음.</li> <li>- Park et al. (2003)에 따라 이온 비가 ±30%를 벗어나는 자료는 제거함.</li> </ul> $70 < Ion\ Ratio(\%) = \frac{CE}{AE} \times 100 < 130$										

## 참고문헌

### □ 제3장 분야별 관측·분석결과

#### 3.1 온실가스

- 2016 지구대기감시 보고서, 2017, 기상청, 11-1360000-000991-10
- Etheridge, D. M., L. P. Steele, R. J. Francey, and R. L. Langernfelds, Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: Evidence of anthropogenic emissions and climatic variability, *J. Geophys. Res.*, 103, 15979-15993, 1998
- Gillette, D. A., W. D. Komhyr, L. S. Waterman, L. P. Steels, and R. H. Gammon, 1987. The NOAA/GMCC Continuous CO<sub>2</sub> Record at the South Pole, 1975-1982. *J. Geophys. Res.*, 92(D4), 4231-4240.
- IPCC, 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, 2013
- 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 Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 9(2), 149-160.
- 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, J. W. Elkins, 2018. An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11. *Nature*, 557, 413-417
- 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, Contribution of ocean, fossil fuel, land biosphere, and

biomass burning carbon fluxes to seasonal and interannual variability in atmospheric CO<sub>2</sub>, *J. Geophys. Res.*, 113,doi:10.1029/2007JG000408,2008.

Rhoderick G., F.Guenther, D. Duewer, J. Lee, J.S.Kim, B.Hall, R.Weiss, C. Harth, S., Reimann, M. vollmer, CCQM-P151 Final Report, [www.bipm.org/utils/common/pdf/final\\_reports/QM/P151/CCQM\\_P151.pdf](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, Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations, *Nature* 569, 546-550, 2019

Schwartz, Stepehen E., and Warneck Peter, 1995: Units for use in atmospheric chemistry, *Pure & Appl.Chem.*, Vol.67 pp. 1377-1406, 1995

WMO 2017: Greenhouse Gas Bulletin, No13, ISSN2078-0796, 2017

### 3.2 반응가스

지구대기감시 업무매뉴얼, 2017, 국립기상과학원

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>

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>

GAW report No. 209, NO. 192, No. 195, WP4/D4.2(M12) (drift)).

Japan Meteorological Agency, WMO WDCGG DATA SUMMARY WDCGGNo.41 (March 2017)

### 3.3 에어로졸

- 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, *American Meteorological Society*, 13, 967-986.
- 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.
- Ho, K. F., S. C. Lee, C. K. Chan, J. C. Yu, J. C. Chow, and X. H. Yao, 2003: Characterization of chemical species in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> aerosols in Hong-Kong, *Atmospheric Environment*, 37(1), 31-39.
- IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Group I.
- Ko, H. J., E. Lim, J. M. Song, W. H. Kim, C. H. Kang, H. Lee, and C. Lee, 2015: Composition Variation of Atmospheric Fine Particulate Matters in Accordance with Air Mass Transport Pathways at Background Site of Korea in 2013, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 15-27.
- World Meteorological Organization (WMO), 2016: WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, 2nd Edition (WMO No.1177), *GAW Report*, No. 227. 15-33.

### 3.4 대기복사

- Long C. N., and E. G. Dutton, 2002 : BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0.

### 3.5 성층권 오존

- 김준, 조희구, 이윤곤, 오성남, 백선균, 2005: 서울 상공의 최신 성층권 오존 변화 경향, *대기*, 15(2), 101–118.
- 조희구, 백선균, 김준, 오성남, 2003: 서울 상공의 근 인위적 오존층 변화 경향, *대기*, 13(1), 144–147.
- 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.
- Janssen, M. A., 1993. *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*. New York: Wiley.
- 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), p. 287–301.
- Manney, G. L., M. L. Santee, M. Rex, N. J. Livesey, M. C. Pitts, P. Veefkind, E. R. Nash, I. Wohltmann, R. Lehmann, L. Froidevaux, L. R. Poole, M. R. Schoeberl, D. P. Haffner, J. Davies, V. Dorokhov, H. Gernandt, B. Johnson, R. Kivi, E. Kyro, N. Larsen, P. F. Levelt, A. Makshtas, C. T. McElroy, H. Nakajima, M. C. Parrondo, D. W. Tarasick, P. von der Gathen, K. A. Walker, and N. S. Zinoviev, 2011: Unprecedented Arctic ozone loss in 2011, *Nature*, doi:10.1038/nature10556.
- 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. Envir.*, 47, 226–235.
- Salby, M., Titova, E., and Deschamps, L, 2011: Rebound of Antarctic ozone. *Geophysical Research Letters*, 38(9).
- Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely, R. R., and Schmidt, A, 2016: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 353(6296), 269–274.

Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K., (1981) Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Vol. I-Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry, Addison-Wesley, Advanced Book Program, Reading, Massachusetts.

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., Hølder D.-P., Paul N. D. and Bornman J. F., Solar ultraviolet radiation in a changing climate, *Nat. Clim. Change*, 4, 434-441, 2014

World Meteorological Organization (WMO), The Global Climate System Review: Climate System Monitoring, June 1991 – November, 1993, WMO No. 819, pp. 150, 1995.

World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. Rep. 44, Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva, 1999.

### 3.6 자외선

McKinlay, A. F., & Diffey, B. L., 1987: A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE j*, 6(1), 17–22.

### 3.7 총대기침적

방소영, 최재천, 박상순, 조경숙, 오성남, 한반도 배경지역 강수 중 수용성 이온 성분의 화학적 특성 분석, 2003: 한국기상학회지, 39(1), 29–41.

NADP, 1999: NATIONAL TRENDS NETWORK SITE OPERATION MANUAL, NADP manual 1999-01, p1.

Olsen, A. R., E. C. Voldner, D. S. Bigelow, W. H. Chan, T. L. Clark, M. A. Lulis, P. K. Misra, and R. J. Vet, 1990. Unified wet deposition data summaries for North America: data summary procedures and results for 1980–1986. *Atmospheric Environment*, 24A(3), 661–672.

WMO, 2004: Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme(Guidelines, Data Quality Objectives and Standard Operating Procedures). WMO GAW Report No. 160.

### 3.8 기타

Almeida R.M., D.C. Lauria, A.C. Ferreira, O. Sracek, 2004: Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil, *Journal of Environmental Radioactivity*, 73(3), 323–334.

Bu, J.O., Song, J.M., Kim, W.H., Kang, C.H., Song S.K., Williams, A.G., Chambers, S.D., 2017: Temporal Variation of Atmospheric Radon-222 and Gaseous Pollutants in Background Area of Korea during 2013–2014, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 11(2), 114–121.

Chambers, S.D., Kang, C.H., Williams, A.G., Crawford, J., Griffiths, A.D., Kim, K.H., Kim, W.H., 2016: Improving the representation of cross-boundary transport of anthropogenic pollution in Southeast Asia using Radon-222, *Aerosol and Air Quality Research*, 16(4), 958–976, doi: 10.4209/aaqr.2015.08.0522.

Chambers, S. D., 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, *Atmospheric Environment*, 43(2), 271–279.

Chambers, S. D., Zahorowski, W., Williams, A. G., Crawford, J., and Griffiths, A. D., 2013: Identifying tropospheric baseline air masses at Mauna Loa Observatory between 2004 and 2010 using Radon-222 and back trajectories, *J. Geophys. Res.*, 118, 1–13, doi:10.1029/2012JD018212.

Choi, I.C., S.H. Shin, and W.K. Jo, 2009: Evaluation of Radon Levels in Various Public-access Buildings or Underground Facilities, and Their Temporal Variation in Underground Facilities, *Journal of*

abstract).

- Khosrawi, F., Lossow, S., Stiller, G. P., Rosenlof, K. H., Urban, J., Burrows, J. P., Damadeo, R. P., Eriksson, P., García-Comas, M., Gille, J. C., Kasai, Y., Kiefer, M., Nedoluha, G. E., Noël, S., Raspollini, P., Read, W. G., Rozanov, A., Sioris, C. E., Walker, K. A., and Weigel, K.: The SPARC water vapour assessment II: comparison of stratospheric and lower mesospheric water vapour time series observed from satellites, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 4435–4463, 2018
- 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, *Bulletin of Environmental Sciences (Research Institute for Environmental Sciences Hanyang University)*, 6(2), 129–136.
- Kim, Y. S., C. M. Lee, K. Y. Kim, H. J. Jeon, J. C. Kim, and Takao Iida, 2007: Time Series Observations of Atmospheric Radon Concentration in Seoul, Korea for an Analysis of Long-Range Transportation of Air Pollutants in the North-East Asia, *Kor. J. Env. Hlth.*, 33(4), 283–292.
- Lossow, S., Khosrawi, F., Kiefer, M., Walker, K. A., Bertaux, J.-L., Blanot, L., Russell, J. M., Remsberg, E. E., Gille, J. C., Sugita, T., Sioris, C. E., Dinelli, B. M., Papandrea, E., Raspollini, P., García-Comas, M., Stiller, G. P., von Clarmann, T., Dudhia, A., Read, W. G., Nedoluha, G. E., Damadeo, R. P., Zawodny, J. M., Weigel, K., Rozanov, A., Azam, F., Bramstedt, K., Noël, S., Burrows, J. P., Sagawa, H., Kasai, Y., Urban, J., Eriksson, P., Murtagh, D. P., Hervig, M. E., Högberg, C., Hurst, D. F., and Rosenlof, K. H.: The SPARC water vapour assessment II: profile-to-profile comparisons of stratospheric and lower mesospheric water vapour data sets obtained from satellites, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 2693–2732, 2019
- Miles, J., 1988: Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses, *Journal of Hazardous Materials*, 61, 53–58.
- 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.
- MST (Ministry of Science & Technology), 2007: Assessment of Radiation Risk for the Korean Population, KINS/GR-355, 185 pp. (accessed on Feb., 2007)
- NRC (National REsearch Council), 2000: Health risk of radon and other internally deposited alpha emitters, report of the Committee on UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report.
- Omori, Y., I. Tohbo, H. Nagahama, Y. Ishikawa, M. Takahashi, H. Sato, T. Sekine, 2009: Variation of atmospheric radon concentration with bimodal seasonality, *Radiation Measurements*, 44, 1045–1050.
- Pitari G., E. Coppari, N. De Luca, P. Di Carlo, 2014: Observations and boc 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.
- Song, J.M., Bu, J.O., Kim, W.H., Kang, C.H., Ko, H.J., Chambers, S., 2017: Background Level and Time Series Variation of Atmospheric Radon Concentrations at Gosan Site in Jeju Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 174–183.
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency), 2003: EPA Assessment of Risks from Radon in Homes, EPA 402-R-03-003.
- Whittlestone, S., and W. Zahorowski, 1998: Baseline radon detectors for shipboard use: Development and deployment in the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1), *Journal of Geophysical Research*, 103(D13), 16,743–16,751.
- WMO/GAW, GLOBAL ATMOSPHERE WATCH MEASUREMENTS GUIDE (No. 143), WMO TD No. 1073, July 2001.
- WMO/GAW, 1st International Expert Meeting on Sources and Measurements of Natural Radionuclides Applied to Climate and Air Quality Studies (No. 155), WMO TD No. 1201, April 2004.
- Zahorowski, W., S. Chambers, T. Wang, C. H. Kang, I. Uno, S. Poon, S.

- N. Oh, S. Werczynski, 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., Dida, M.R., Zoran, A.T., Zoran, L.F., Dida, A., 2013: Outdoor 222Radon concentrations monitoring in relation with particulate matter levels and possible health effects, *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 296(3), 1179-1192.

## 부 록

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

# 1. 지구대기감시 관측자료

## 1.1 온실가스

### □ 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) [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	<b>371.2</b>
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	<b>373.3</b>
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	<b>375.6</b>
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	<b>377.6</b>
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	<b>379.9</b>
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	<b>382.1</b>
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	<b>384.3</b>
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	<b>386.5</b>
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	<b>388.6</b>
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	<b>390.7</b>
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	<b>392.6</b>
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	<b>394.9</b>
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	<b>396.8</b>
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	<b>399.9</b>
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	<b>402.4</b>
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	<b>404.6</b>
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	<b>407.0</b>
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	<b>409.9</b>
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	<b>412.2</b>
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	<b>415.2</b>

○ 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	<b>399.3</b>
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	<b>401.6</b>
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	<b>403.5</b>
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	<b>406.5</b>
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	<b>409.5</b>
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	<b>411.8</b>
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	<b>414.3</b>

○ 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	<b>401.8</b>
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	<b>404.2</b>
2016	410.6	411.6	413.0	414.1	411.0	-	(397.0)	(394.7)	(400.1)	(406.8)	411.4	412.5	<b>407.5</b>
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	<b>409.7</b>
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	<b>412.7</b>

※ "( )"은 보정 자료, 2016 지구대기감시 보고서 참조(2017년)

○ 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	<b>401.7</b>
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	<b>404.3</b>
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	<b>407.0</b>
2017	410.8	412.2	413.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*	*	*	*

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ "\*"은 결측은 아니나 확정값을 발표할 수 없음을 나타냄

□ 메탄(CH<sub>4</sub>) [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	<b>1861</b>
2000	1864	1878	1888	1875	1859	1840	1827	1819	1859	1868	-	-	<b>1858</b>
2001	-	-	-	-	1841	1850	1809	1838	1874	1874	1861	1864	<b>1851</b>
2002	1877	1875	1868	1864	1863	1858	1825	1826	1869	1871	1870	1876	<b>1862</b>
2003	1895	-	-	-	-	1865	1869	1831	-	-	1888	1898	<b>1874</b>
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	1870	-	1873	1873	<b>1872</b>
2005	1871	1866	1874	1865	1860	1859	1812	1823	1862	-	-	-	<b>1855</b>
2006	1857	1862	1857	1848	1870	1881	1832	1813	1881	1901	1890	1901	<b>1866</b>
2007	1905	1901	1892	1892	-	-	-	1831	1900	-	1900	1897	<b>1890</b>
2008	1900	1909	1913	1901	1893	1896	1840	1844	1856	1901	1910	1910	<b>1889</b>
2009	1906	1916	1910	1906	1895	1881	1869	1879	1908	1909	1905	1915	<b>1900</b>
2010	1918	1913	1920	1907	1884	1902	1851	1863	1918	1913	1912	1917	<b>1901</b>
2011	1911	1922	1907	1906	1903	1895	1877	1870	1925	1919	1920	1925	<b>1907</b>
2012	1929	1931	1932	1918	1927	1906	1878	1881	1927	1929	1933	1943	<b>1919</b>
2013	1948	1953	1948	1932	1932	1931	1892	1885	1931	1940	1937	1942	<b>1931</b>
2014	1944	1953	1943	1938	1941	1939	1885	1910	1962	1952	1964	1962	<b>1941</b>
2015	1970	1961	1954	1952	1937	1942	1925	1906	1972	1956	1979	1970	<b>1952</b>
2016	1967	1964	1968	1965	1966	1960	1929	1920	1984	1991	1991	1980	<b>1965</b>
2017	1984	1972	1975	1966	1962	1955	1951	1958	1979	1977	1977	1987	<b>1970</b>
2018	1983	1981	1983	1969	1972	1964	1948	1951	1981	1981	1988	1989	<b>1974</b>

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 아산화질소(N<sub>2</sub>O) [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	<b>314.6</b>
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	<b>314.9</b>
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	<b>316.0</b>
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	<b>318.3</b>
2003	318.5	318.7	320.2	320.2	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>319.4</b>
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	321.1	321.8	321.7	321.7	322.0	<b>321.7</b>
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	<b>321.9</b>
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	<b>322.7</b>
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	<b>323.8</b>
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	<b>324.9</b>
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	<b>324.2</b>
2012	326.6	326.7	326.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<b>326.5</b>
2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	325.5	326.6	<b>326.1</b>
2014	-	-	-	-	-	-	-	326.0	325.7	325.8	326.3	325.5	<b>325.8</b>
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	<b>329.0</b>
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	<b>330.0</b>
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	<b>331.4</b>
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	<b>332.9</b>

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 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	<b>325.5</b>
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	<b>325.9</b>
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	<b>327.4</b>
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	<b>329.3</b>
2016	330.0	329.6	329.8	329.9	329.9	-	-	330.1	330.8	330.6	330.6	330.1	<b>330.1</b>
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	<b>331.0</b>
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	<b>332.3</b>

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 육불화황(SF<sub>6</sub>) [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	<b>6.3</b>
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	<b>6.6</b>
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	<b>7.3</b>
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	<b>7.7</b>
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	<b>8.1</b>
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	<b>8.1</b>
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	<b>8.2</b>
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	<b>9.2</b>
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	<b>9.3</b>
2016	9.4	9.3	9.3	9.6	9.6	9.8	9.5	9.2	9.3	-	9.4	9.5	<b>9.5</b>
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	<b>9.6</b>
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	<b>9.8</b>

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2017	9.4	9.8	9.7	9.5	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.8	9.8	<b>9.7</b>
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	<b>9.9</b>

○ 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	<b>9.6</b>
2018	-	-	-	-	9.7	9.9	9.8	9.9	9.8	9.8	9.9	9.9	(9.8)

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 염화불화탄소-113(CFC-113) [단위: ppt]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2007	-	75.7	82.3	73.9	73.9	79.7	76.7	91.4	90.2	88.5	82.8	80.4	<b>81.4</b>
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	<b>76.8</b>
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	<b>78.2</b>
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	<b>73.6</b>
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	<b>76.1</b>
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	<b>74.9</b>
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	<b>72.6</b>
2014	73.6	72.6	67.8	74.4	74.8	72.0	72.7	72.2	-	71.3	72.6	72.5	<b>72.4</b>
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	<b>71.8</b>
2016	71.9	-	69.6	-	71.9	72.7	73.2	73.5	72.3	72.9	74.2	73.6	<b>72.6</b>
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	<b>71.2</b>
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	<b>70.1</b>

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 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	<b>267.8</b>
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	<b>266.8</b>
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	<b>264.9</b>
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	<b>264.0</b>
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	<b>259.1</b>
2004	258.0	-	-	258.2	258.9	258.6	255.5	256.3	257.6	262.0	265.0	263.1	<b>259.3</b>
2005	264.4	264.3	261.0	265.1	266.2	265.4	265.1	263.5	265.5	264.9	266.3	-	<b>264.7</b>
2006	-	-	-	-	-	-	265.9	265.4	256.6	243.9	240.9	238.4	<b>251.8</b>
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	<b>230.9</b>
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	<b>237.3</b>
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	<b>246.9</b>
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	<b>230.8</b>
2011	257.9	269.0	237.1	240.4	233.7	233.0	234.1	232.8	-	239.3	247.4	246.2	<b>242.8</b>
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	<b>214.9</b>
2013	196.8	194.7	214.7	221.1	221.6	221.8	224.0	-	-	224.4	228.0	241.1	<b>218.8</b>
2014	244.8	219.1	230.3	237.1	239.9	239.8	240.2	237.2	-	234.7	235.6	232.2	<b>235.5</b>
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	<b>233.6</b>
2016	239.6	238.4	-	232.3	235.8	237.1	237.7	239.9	236.8	243.0	249.1	243.3	<b>239.4</b>
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	<b>230.9</b>
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	<b>228.3</b>

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 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	<b>536.0</b>
2000	537.4	539.4	539.2	539.4	540.2	538.5	538.2	-	538.6	540.3	539.5	537.8	<b>539.0</b>
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	<b>539.9</b>
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	<b>543.0</b>
2003	541.3	540.1	540.8	540.2	-	538.4	541.8	540.9	541.1	541.6	540.0	529.0	<b>539.6</b>
2004	530.5	532.3	538.9	-	537.4	539.8	539.2	539.6	539.5	540.3	541.5	538.9	<b>538.0</b>
2005	540.5	540.1	540.8	539.8	539.8	542.1	-	542.4	539.7	541.1	538.9	541.0	<b>540.6</b>
2006	537.3	539.0	540.4	540.6	540.6	-	540.9	-	523.0	511.0	504.0	523.1	<b>530.0</b>
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	<b>535.2</b>
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	<b>522.2</b>
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	<b>527.7</b>
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	<b>525.9</b>
2011	-	-	501.8	510.4	486.1	480.1	480.4	484.2	485.3	550.5	545.6	543.5	<b>506.8</b>
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	<b>509.9</b>
2013	503.7	500.8	524.9	525.4	526.6	520.4	509.6	-	-	-	-	518.5	<b>516.2</b>
2014	519.2	508.6	530.6	531.0	530.4	519.3	521.5	520.5	-	518.8	517.9	513.7	<b>521.1</b>
2015	-	530.4	538.6	518.3	504.9	522.9	514.7	516.1	518.5	516.4	523.7	523.1	<b>520.7</b>
2016	524.6	523.5	-	513.0	522.4	531.1	533.4	533.1	519.7	534.1	550.0	542.4	<b>529.8</b>
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	<b>510.2</b>
2018	503.3	503.4	504.3	505.2	505.0	504.9	504.0	503.6	500.0	499.9	500.5	497.9	<b>502.7</b>

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

## 1.2 반응가스

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄.

### □ 오존(O<sub>3</sub>) [단위: ppb]

#### ○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2004	42.4	52.8	65.2	48.1	41.9	34.2	21.9	22.5	27.5	33.0	32.0	27.2	<b>37.4</b>
2005	28.4	-	-	-	27.5	34.7	34.6	27.5	-	50.5	46.5	34.3	<b>35.5</b>
2006	39.0	45.1	57.2	48.3	56.0	49.4	27.4	36.9	55.2	55.5	38.1	29.4	<b>44.8</b>
2007	29.5	34.5	39.4	48.3	47.3	38.5	43.4	23.6	48.1	45.8	40.4	32.6	<b>39.3</b>
2008	32.7	45.6	50.3	67.2	58.2	53.5	32.3	42.6	49.2	45.0	30.9	27.8	<b>44.6</b>
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	<b>39.6</b>
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	<b>43.1</b>
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	<b>43.2</b>
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	<b>39.1</b>
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	<b>39.6</b>
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	<b>46.7</b>
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	<b>41.3</b>

※ 2014. 3. ~ 2017.2. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 무효 처리됨.

#### ○ 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	<b>40.6</b>
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	<b>41.3</b>
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	<b>44.7</b>
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	<b>45.1</b>
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	<b>39.3</b>
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	<b>46.7</b>
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	<b>41.8</b>

□ 일산화탄소(CO) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2006	137.4	133.6	95.0	95.6	137.5	108.0	74.1	45.4	471.4	537.8	710.8	342.8	<b>240.8</b>
2007	246.0	304.5	308.0	311.0	303.8	216.0	227.2	140.4	269.0	270.6	328.3	336.3	<b>271.8</b>
2008	252.2	227.6	253.3	193.2	126.3	204.0	229.1	239.6	223.2	279.9	216.2	235.3	<b>223.3</b>
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	<b>248.2</b>
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	<b>246.9</b>
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	<b>293.3</b>
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	<b>285.3</b>
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	<b>307.3</b>
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	<b>252.0</b>
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	<b>261.1</b>

※ 2014. 3. ~ 2017.2. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 무효 처리됨.

○ 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	<b>145.1</b>
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	<b>181.0</b>
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	<b>204.8</b>
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	<b>231.6</b>
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	<b>217.0</b>
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	<b>218.6</b>
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	<b>198.1</b>

○ 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	<b>194.0</b>
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	<b>171.7</b>
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	<b>186.0</b>
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	<b>181.0</b>

□ 질소산화물(NOx) [단위: ppb]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2004	12.8	8.8	8.8	7.6	7.7	13.7	5.4	7.7	10.7	16.3	14.1	13.3	<b>10.6</b>
2005	10.5	11.7	8.4	5.8	7.0	6.8	5.7	4.7	17.0	23.9	10.4	9.2	<b>10.1</b>
2006	10.9	9.0	9.7	8.0	5.0	12.1	6.1	6.9	7.8	7.5	9.0	10.2	<b>8.5</b>
2007	11.2	9.5	7.1	6.5	7.2	5.6	4.0	3.1	5.1	6.9	9.9	12.2	<b>7.4</b>
2008	13.4	5.5	9.9	9.3	8.5	7.1	3.3	7.0	7.8	10.1	10.1	7.3	<b>8.3</b>
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	<b>7.8</b>
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	<b>7.7</b>
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	<b>8.7</b>
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	<b>7.0</b>
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	<b>6.3</b>
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	<b>5.7</b>
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	<b>5.8</b>

※ 2014. 3. ~ 2017.2. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 무효 처리됨.

○ 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	<b>3.2</b>
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	<b>3.6</b>
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	<b>3.5</b>
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	<b>4.0</b>
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	<b>3.7</b>
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	<b>3.3</b>
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	<b>3.7</b>

## □ 이산화황(SO<sub>2</sub>) [단위: ppb]

### ○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2004	5.2	4.3	3.7	1.4	1.4	1.0	-	0.6	0.7	1.5	2.5	2.1	<b>2.2</b>
2005	3.0	2.9	2.2	1.9	3.3	1.5	2.2	1.5	2.3	3.9	5.2	4.6	<b>2.9</b>
2006	4.8	3.9	4.4	0.9	1.6	0.8	-	2.2	2.3	2.8	3.9	6.0	<b>3.1</b>
2007	7.0	4.6	3.0	2.0	2.4	1.4	1.1	1.2	1.3	2.7	6.0	6.9	<b>3.3</b>
2008	5.6	5.2	4.1	3.9	2.6	1.4	0.9	1.8	2.6	2.9	4.4	3.9	<b>3.3</b>
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	<b>2.5</b>
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	<b>2.5</b>
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	<b>3.1</b>
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	<b>2.5</b>
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	<b>2.5</b>
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	<b>1.5</b>
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	<b>1.5</b>

※ 2014. 3. ~ 2017.2. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 무효 처리됨.

### ○ 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	<b>0.5</b>
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	<b>0.5</b>
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	<b>0.5</b>
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	<b>0.5</b>
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	<b>0.5</b>
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	<b>0.5</b>
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	<b>0.8</b>

### 1.3 에어로졸

#### □ PM10 (부유분진측정기, β-선 흡수법) [단위: μg/m³]

##### ○ 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

##### ○ 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	28	42	24	25	28	27	23	28	36	29	29

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

□ 크기별 부피농도(0.5-20  $\mu\text{m}$ ) [단위:  $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ ]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2007	34.2	40.2	34.2	50.7	-	31.9	66.6	33.6	20.0	22.4	31.1	38.3	<b>36.7</b>
2008	25.7	25.7	37.5	32.9	26.7	28.1	30.9	29.8	33.2	43.8	29.1	30.5	<b>31.2</b>
2009	26.8	58.4	31.2	36.3	-	-	24.4	22.9	20.8	19.6	18.1	27.7	<b>28.6</b>
2010	21.4	20.3	26.8	22.6	20.2	27.2	18.0	18.4	14.6	16.6	26.6	26.2	<b>21.6</b>
2011	16.1	43.2	32.9	26.3	36.2	18.9	16.2	19.2	14.5	19.8	22.7	16.1	<b>23.5</b>
2012	30.2	19.2	20.1	23.3	41.3	15.8	-	-	-	-	19.9	24.5	<b>24.3</b>
2013	48.4	33.6	35.1	38.8	38.9	50.9	90.5	36.9	24.9	17.2	28.5	27.1	<b>39.2</b>
2014	31.3	45.6	39.0	43.2	51.9	53.0	43.6	22.7	18.9	21.1	34.3	32.5	<b>36.4</b>
2015	40.4	44.4	47.6	36.0	36.2	48.2	43.3	47.9	15.7	40.0	41.7	56.4	<b>41.5</b>
2016	51.9	50.3	71.6	94.4	69.0	66.3	28.9	-	-	-	-	-	<b>61.8</b>
2017	37.5	30.4	38.9	44.4	45.5	17.9	12.4	10.9	15.5	12.3	23.2	20.3	<b>25.8</b>
2018	26.5	26.2	19.0	18.1	19.2	17.7	-	-	-	-	-	-	<b>23.1</b>

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	-	-	-	-	31.0	33.5	33.9	33.6	25.5	36.8	19.9	32.3	<b>30.9</b>
2010	32.1	21.1	44	27	37.3	30.8	38.3	37.5	17.8	21	45.6	28.7	<b>33.6</b>
2011	14.0	35.2	28.2	30.8	54.4	29.1	22.6	18.6	16.0	17.8	16.2	12.5	<b>24.5</b>
2012	19.9	15.6	24.5	23.4	25.6	14.6	17.9	16.2	12.7	14.7	20.0	12.1	<b>18.1</b>
2013	23.9	19.9	46.1	29.9	40.2	20.5	32.0	23.1	14.2	21.7	29.9	17.2	<b>28.3</b>
2014	35.3	29.7	31.6	28.6	33.8	37.8	25.5	25.3	21.4	18.2	18.3	23.5	<b>26.8</b>
2015	27.7	33.1	29.1	23.9	19.6	25.8	-	-	-	-	-	21.5	<b>25.9</b>
2016	22.5	25.3	22.8	26.3	26.4	20.7	12.4	13.8	15.9	13.5	17.6	14.4	<b>19.2</b>
2017	15.5	15.2	19	24.8	21	25.7	30.0	24.2	-	-	-	-	<b>22.0</b>
2018	-	39.1	35.3	-	-	12.5	-	-	18.2	18.7	30.9	24.3	<b>26.0</b>

※ 2013년 12월부터 수월봉(슈퍼사이트)에서 관측

2017년 10월부터 수월봉(통합관측실)로 관측위치 변경

□ 미세입자 크기별 수농도 [단위: 개/cm<sup>3</sup>]

○ 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	<b>5078</b>
2006	6902	4073	4384	3914	4240	3441	3383	3181	3131	2410	4503	3528	<b>3970</b>
2007	4308	3939	3764	3653	4841	4635	3724	3478	3985	4834	6069	4459	<b>4233</b>
2008	6063	3459	3435	3591	3563	3882	2342	2315	5472	4763	4437	4283	<b>3973</b>
2009	4240	3065	3606	3564	-	2013	2041	3890	4270	3595	2718	3313	<b>3400</b>
2010	3857	4098	3704	4194	3859	3466	2722	2567	3494	3838	3234	3039	<b>3501</b>
2011	4048	4020	4646	3581	4154	2528	2975	3264	3414	3402	-	3467	<b>3577</b>
2012	-	4405	3790	4105	3511	2899	2662	4209	4306	-	5281	5255	<b>4124</b>
2013	4677	4905	4685	4788	3804	4367	2484	3260	5148	4872	4178	3646	<b>4242</b>
2014	4384	4485	3924	4940	3822	3375	3695	1649	4434	-	-	4482	<b>3857</b>
2015	4541	3926	2135	3826	4494	4984	4820	3864	4741	4786	3283	3878	<b>4107</b>
2016	5660	7238	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-	3406	4081	4845	4764	4565	4725	<b>4347</b>
2018	4324	4441	3459	3982	-	-	5004	4021	-	-	3734	-	<b>4179</b>

※ 2005 ~ 2016년(0.01 ~ 0.5 μm), 2017 ~ 2018년(0.01 ~ 1.0 μm)

□ 응결핵 수농도(0.01 ~ 3 μm) [단위: 개/cm<sup>3</sup>]

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2010	-	-	-	-	-	-	-	6683	10881	11386	11023	7464	<b>9718</b>
2011	5281	7689	9539	7071	7907	6562	6305	9533	11812	11203	8257	5476	<b>8051</b>
2012	4337	5164	6298	5261	3559	3002	3283	3578	4781	4710	3466	2452	<b>4153</b>
2013	2404	3149	3117	3136	2700	2906	2747	2856	-	-	5768	4838	<b>3448</b>
2014	4947	3744	4434	5039	6321	4665	5208	4945	5497	4876	4125	3167	<b>4749</b>
2015	3027	2866	3601	3765	4732	3855	4760	3735	4065	-	-	2874	<b>3736</b>
2016	2368	3672	3344	4012	4644	3786	2574	3413	3497	4760	3645	2182	<b>3488</b>
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6386	3973	2926	-
2018	2811	3992	3547	4999	4832	4727	4383	5071	-	-	5249	3668	<b>3266</b>

※ 2013년 12월부터 수월봉(슈퍼사이트)에서 관측

2017년 10월부터 수월봉(통합관측실)로 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	<b>192.7</b>
2004	149.4	118.4	126.7	114.6	169.6	164.2	84.0	110.4	-	-	-	-	<b>131.7</b>
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	<b>171.5</b>
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	<b>159.5</b>
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	<b>144.4</b>
2008	104.7	91.2	156.3	192.2	103.0	118.5	103.1	99.2	-	120.1	112.0	-	<b>120.3</b>
2009	-	-	106.4	180.5	114.1	144.2	100.7	-	89.8	97.3	74.6	120.3	<b>114.5</b>
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	<b>101.6</b>
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	<b>108.9</b>
2012	169.1	119.0	113.5	79.4	-	109.7	-	-	-	-	68.0	109.8	<b>117.1</b>
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	<b>112.8</b>
2014	133.3	178.8	128.3	153.0	148.6	171.9	129.1	104.5	84.3	-	-	-	<b>134.3</b>
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	<b>124.3</b>
2016	102.8	73.9	99.2	103.2	58.2	88.6	49.6	74.3	76.0	51.9	57.5	-	<b>77.2</b>
2017	-	85.0	131.9	90.1	73.4	80.2	74.6	57.5	78.3	54.3	70.0	85.1	<b>80.0</b>
2018	115.5	83.8	110.7	71.9	74.8	106.9	54.1	55.3	29.8	39.8	105.0	71.1	<b>76.2</b>

□ 지상 에어로졸 산란 용스트롬 지수 (450-700 nm)

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	1.50	1.60	1.57	1.61	1.57	1.43	1.24	1.31	-	1.65	1.63	1.44	<b>1.51</b>
2004	1.51	1.39	1.25	1.58	1.76	1.93	1.88	2.00	-	-	-	-	<b>1.65</b>
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	<b>1.47</b>
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	<b>1.45</b>
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	<b>1.57</b>
2008	1.51	1.50	1.59	1.69	1.75	1.62	1.64	1.85	-	1.89	1.88	-	<b>1.68</b>
2009	-	-	1.53	1.79	1.77	1.49	1.30	-	1.82	1.59	1.54	1.42	<b>1.59</b>
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	<b>1.62</b>
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	<b>1.66</b>
2012	1.41	1.47	1.54	1.66	-	1.72	-	-	-	-	1.76	1.50	<b>1.57</b>
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	<b>1.63</b>
2014	1.44	1.61	1.63	1.70	1.68	1.57	1.78	1.91	2.06	-	-	-	<b>1.72</b>
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	<b>1.78</b>
2016	1.67	1.70	1.83	1.74	1.66	1.71	1.84	1.88	1.94	1.77	1.80	-	<b>1.79</b>
2017	-	1.41	1.73	1.49	1.47	1.60	1.48	-	-	-	-	1.49	<b>1.52</b>
2018	1.15	1.18	1.38	1.51	1.37	1.37	1.39	1.43	1.45	1.38	1.22	1.23	<b>1.34</b>

□ 550 nm 에어로졸 광흡수계수 [단위:  $Mm^{-1}$ ]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2001	-	-	-	11.7	10.4	11.0	5.5	11.2	11.1	20.9	15.7	11.3	<b>12.2</b>
2002	18.9	13.6	-	17.6	16.0	16.6	10.6	10.7	-	-	-	-	<b>15.1</b>
2003	18.3	21.7	22.1	19.9	28.7	22.7	18.2	13.0	22.6	17.2	23.7	25.4	<b>21.1</b>
2004	20.2	10.4	10.8	11.1	15.2	15.6	7.2	14.8	15.8	18.6	16.0	13.3	<b>14.1</b>
2005	12.4	9.5	11.4	11.7	9.1	-	-	-	-	-	-	9.8	<b>10.7</b>
2006	13.1	17.8	12.3	10.7	13.6	10.9	5.7	10.1	13.0	14.3	9.7	-	<b>11.7</b>
2007	16.7	15.6	10.4	12.1	9.1	-	9.2	4.6	10.7	12.5	13.1	16.0	<b>12</b>
2008	10.4	7.9	12.8	16.9	10.1	9.5	7.1	9.5	12.1	13.7	11.3	5.1	<b>10.5</b>
2009	5.6	3.6	8.5	14.1	10.7	11.5	9.4	8.2	14.7	10.9	8.7	13.0	<b>9.9</b>
2010	11.0	10.9	9.0	10.6	10.2	13.4	7.5	7.8	5.9	8.8	10.5	8.2	<b>9.4</b>
2011	5.2	11.3	5.4	7.0	6.9	7.5	4.7	6.5	8.1	11.9	10.8	8.4	<b>7.8</b>
2012	12.3	9.5	8.1	6.6	-	-	-	-	8.8	8.6	7.9	12.3	<b>9.4</b>
2013	14.0	10.2	10.4	9.9	10.1	8.5	4.5	6.6	8.7	9.2	8.8	11.1	<b>9.3</b>
2014	11.8	13.3	10.9	12.3	10.8	7.8	6.1	6.0	7.2	7.5	8.1	7.1	<b>9.0</b>
2015	9.7	9.7	10.0	7.3	6.6	6.5	5.7	5.4	4.6	-	9.1	11.0	<b>7.9</b>
2016	9.8	7.5	8.8	8.8	9.0	7.5	4.4	7.1	8.9	8.5	9.1	9.0	<b>8.2</b>
2017	8.2	7.0	10.0	7.2	4.5	4.1	1.7	-	-	6.3	5.7	6.9	<b>6.5</b>
2018	8.3	7.1	5.4	4.5	4.5	4.1	3.0	3.7	3.6	-	-	6.5	<b>5.4</b>

※ 2001년 1월 ~ 2010년 8월은 880 nm의 광흡수계수로부터 흡수 옹스트롬 지수(1.56)를 이용해 계산한 값임.

[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 ~ )

## 1.4 대기복사

### □ 직달일사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

#### ○ 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	<b>139.6</b>
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	<b>139.0</b>
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	<b>118.0</b>
2004	102.3	168.4	170.9	179.5	156.2	111.3	60.8	152.4	156.3	209.6	-	115.4	<b>143.9</b>
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	<b>125.5</b>
2006	101.1	-	164.5	119.1	119.3	93.1	39.0	176.3	153.0	144.9	90.1	73.3	<b>115.8</b>
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	<b>138.1</b>
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	<b>153.9</b>
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	<b>148.5</b>
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	<b>161.3</b>

※ 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	<b>116.1</b>
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	<b>104.0</b>
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	<b>120.7</b>
2013	69.4	111.0	138.8	-	-	80.8	101.5	173.2	171.0	180.7	99.4	83.0	<b>120.9</b>
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	<b>126.4</b>
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	<b>125.6</b>
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	<b>103.5</b>
2017	59.0	96.4	102.0	117.1	119.1	102.0	85.7	175.6	-	147.8	126.6	65.0	<b>108.8</b>
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	<b>135.8</b>

□ 산란일사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 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	<b>96.5</b>
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	<b>85.7</b>
2001	52.1	65.4	83.4	107.2	106.7	119.9	120.4	102.3	-	65.3	49.8	43.2	<b>83.2</b>
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	<b>81.1</b>
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	<b>82.8</b>
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	<b>80.0</b>
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	<b>82.6</b>
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	<b>86.1</b>
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	<b>85.8</b>
2009	37.6	55.9	83.5	100.3	-	110.5	117.4	95.0	78.3	68.2	53.3	45.1	<b>76.8</b>
2010	50.7	51.2	80.3	96.1	110.4	121.1	113.8	89.8	-	-	68.4	62.1	<b>84.4</b>
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	<b>72.5</b>
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	<b>73.7</b>
2013	48.9	57.2	93.9	81.8	99.6	119.8	103.6	12.4	-	22.6	21.8	-	<b>60.1</b>
2014	-	-	76.2	102.6	113.1	143.0	125.6	108.0	79.5	50.0	46.8	45.1	<b>89.0</b>
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	<b>79.9</b>
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	-

○ 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	<b>83.9</b>
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	<b>86.5</b>
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	<b>86.7</b>
2013	53.4	62.4	94.8	-	-	128.8	125.1	105.8	81.0	74.0	60.4	46.4	<b>83.2</b>
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	<b>87.9</b>
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	<b>84.5</b>
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	<b>84.1</b>
2017	55.5	65.1	86.9	104.1	114.7	121.7	129.4	101.1	-	63.9	59.4	51.2	<b>86.6</b>
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	<b>82.4</b>

□ 태양상향복사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 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	<b>32.8</b>
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	<b>30.5</b>
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	<b>28.7</b>
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	<b>32.0</b>
2005	23.7	28.3	38.2	40.3	45.1	29.9	30.9	34.5	30.0	30.8	23.8	-	<b>32.3</b>
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	<b>31.0</b>
2010	31.4	20.9	25.6	38.4	41.2	42.1	37.3	34.8	-	-	26.1	22.3	<b>32.0</b>
2011	26.6	27.1	40.3	43.8	-	36.6	26.5	30.0	38.7	32.1	20.3	18.6	<b>31.0</b>
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	<b>33.6</b>
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	<b>33.4</b>
2015	19.8	23.6	39.2	35.7	50.9	-	33.5	40.3	38.9	30.3	13.2	15.5	<b>31.0</b>
2016	25.1	25.1	37.2	36.5	46.6	39.7	35.7	41.9	37.2	-	-	20.0	<b>34.5</b>
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	<b>40.2</b>
2018	29.5	38.7	37.7	43.2	42.2	47.4	49.9	-	40.2	41.5	-	22.2	<b>39.2</b>

□ 태양하향복사(전천일사) [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 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	<b>169.1</b>
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	<b>163.7</b>
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	<b>153.0</b>
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	<b>164.2</b>
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	<b>160.3</b>
2006	92.4	-	189.8	192.2	207.4	210.1	138.2	238.8	187.5	145.8	93.9	74.6	<b>161.0</b>
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	<b>166.8</b>
2009	99.4	113.5	195.5	229.4	-	243.0	203.2	207.2	163.0	154.9	80.0	76.0	<b>160.4</b>
2010	93.7	105.0	144.6	215.7	231.9	236.3	216.4	203.3	-	-	122.0	95.1	<b>166.4</b>
2011	98.8	135.4	206.8	239.4	-	227.3	156.2	158.1	191.0	151.2	97.8	85.3	<b>158.8</b>
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	<b>169.5</b>
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	<b>176.8</b>
2015	92.2	116.0	193.3	191.0	268.4	-	193.8	218.8	204.1	151.3	68.4	79.2	<b>161.5</b>
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	-

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83.5	78.0	-
2009	73.0	107.3	159.2	213.9	248.1	208.8	177.0	212.0	180.8	175.8	93.9	69.0	<b>159.9</b>
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	<b>153.3</b>
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	<b>163.1</b>
2013	83.8	119.8	186.5	-	-	188.0	206.3	228.5	188.1	174.8	108.6	83.0	<b>156.7</b>
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	<b>165.7</b>
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	<b>164.4</b>
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	<b>153.1</b>
2017	86.3	121.4	155.7	180.0	205.8	204.7	199.5	225.5	-	142.2	120.0	79.1	<b>156.4</b>
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	<b>167.2</b>

□ 지구상향복사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 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	<b>424.9</b>
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	<b>382.1</b>
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	<b>379.6</b>
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	<b>376.5</b>
2005	289.6	302.0	327.5	378.4	395.8	427.7	442.4	440.5	430.2	-	355.4	291.2	<b>371.0</b>
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	<b>370.4</b>
2007	305.6	303.6	336.2	338.1	368.1	419.0	434.7	447.7	416.7	374.5	350.3	-	<b>372.2</b>
2008	291.7	294.4	352.6	380.9	406.9	439.2	450.3	456.7	-	-	349.1	329.6	<b>375.1</b>
2009	307.4	322.9	340.3	372.2	-	439.7	444.9	446.4	412.8	389.4	342.8	308.9	<b>375.3</b>
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	<b>377.4</b>
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	<b>371.0</b>
2015	306.6	320.0	338.9	361.8	382.2	-	-	437.7	418.2	379.9	344.1	326.7	<b>361.6</b>
2016	311.5	317.5	344.8	372.9	399.2	414.1	438.9	448.9	433.1	-	-	323.8	<b>380.5</b>
2017	312.3	311.4	338.1	367.7	402.3	404.6	-	424.4	404.6	347.6	330.8	312.0	<b>359.6</b>
2018	293.0	301.8	353.0	375.1	393.2	396.7	432.1	-	405.8	355.6	-	317.4	<b>362.4</b>

□ 지구하향복사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 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	<b>364.8</b>
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	<b>325.2</b>
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	<b>323.4</b>
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	<b>316.7</b>
2005	246.3	252.1	260.6	308.8	324.3	389.0	410.5	407.9	391.0	-	286.7	256.7	<b>321.3</b>
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	<b>316.7</b>
2007	250.3	244.2	285.9	274.2	310.7	365.2	400.7	409.7	383.5	317.9	280.7	-	<b>320.3</b>
2008	240.7	226.2	275.7	309.7	342.0	388.9	413.9	393.4	-	-	286.7	271.5	<b>314.9</b>
2009	242.4	264.7	262.4	286.8	-	361.8	385.1	375.7	339.5	308.6	291.8	257.6	<b>306.9</b>
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	<b>309.0</b>
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	<b>295.2</b>
2015	245.1	258.4	252.7	289.8	295.5	-	-	371.8	329.4	300.0	299.7	264.7	<b>290.7</b>
2016	253.9	243.2	259.4	301.7	314.0	340.3	378.2	368.2	349.9	-	-	268.7	<b>307.7</b>
2017	251.6	238.0	250.3	282.3	310.5	314.2	-	367.8	330.4	269.7	260.3	256.8	<b>284.7</b>
2018	231.5	225.6	291.7	302.2	325.7	315.5	363.6	-	331.8	280.1	-	266.9	<b>293.5</b>

□ 순복사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 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	<b>78.8</b>
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	<b>74.8</b>
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	<b>68.8</b>
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	<b>71.9</b>
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	<b>70.5</b>
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	<b>70.6</b>
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	<b>63.3</b>
2008	11.9	35.6	72.9	99.2	115.4	125.2	110.2	139.7	-	-	23.4	12.6	<b>74.6</b>
2009	16.7	34.6	82.8	113.8	-	129.6	119.1	125.7	70.8	49.7	14.0	5.0	<b>69.3</b>
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	<b>74.8</b>
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	<b>79.9</b>
2015	15.2	37.0	78.1	99.3	142.6	-	-	130.1	92.6	55.8	18.0	8.5	<b>67.7</b>
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	<b>85.7</b>
2018	17.2	42.4	76.0	105.6	117.0	151.9	156.6	-	100.2	60.9	-	9.8	<b>83.8</b>

## 1.5 성층권 오존

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 등 한 달 관측일수 10일 미만으로 제거한 값임.

### □ 성층권 오존 [단위: Dobson Unit (DU)]

#### ○ 포함

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	<b>304</b>
1995	297	330	339	323	327	323	279	272	273	273	292	317	<b>304</b>
1996	336	350	346	352	346	301	286	278	286	283	269	301	<b>311</b>
1997	326	320	318	324	327	320	291	275	284	285	288	297	<b>305</b>
1998	328	345	338	343	321	336	292	287	281	284	-	281	<b>312</b>
1999	296	336	297	349	358	319	300	284	281	309	315	333	<b>315</b>
2000	323	350	354	379	355	335	306	294	294	274	265	290	<b>318</b>
2001	364	342	389	365	384	354	-	305	293	284	315	306	<b>336</b>
2002	321	337	359	353	354	362	297	279	292	291	309	311	<b>322</b>
2003	345	333	344	319	320	318	-	275	271	274	253	278	<b>303</b>
2004	318	306	340	333	337	327	301	287	273	-	272	293	<b>308</b>
2005	321	331	346	369	349	333	311	294	281	282	289	318	<b>319</b>
2006	319	321	366	358	323	339	298	290	300	289	313	313	<b>319</b>
2007	332	340	359	376	359	336	313	295	291	281	281	307	<b>323</b>
2008	298	319	343	337	325	320	290	295	290	288	299	303	<b>309</b>
2009	319	304	354	356	336	330	310	283	286	289	287	323	<b>315</b>
2010	-	351	362	-	-	-	299	273	277	286	-	-	<b>308</b>
2011	324	356	369	359	327	317	291	287	290	287	289	310	<b>317</b>
2012	311	300	327	346	330	323	-	-	-	283	306	-	<b>316</b>
2013	-	318	343	349	335	324	303	298	-	273	306	328	<b>318</b>

○ 서울

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1985	334	344	336	353	334	330	291	280	276	281	308	334	<b>317</b>
1986	362	386	380	358	340	330	303	292	293	298	291	300	<b>328</b>
1987	334	360	369	362	344	335	307	301	290	280	288	315	<b>324</b>
1988	330	331	347	360	320	322	285	285	287	271	301	319	<b>313</b>
1989	316	325	350	344	354	321	301	286	288	285	292	320	<b>315</b>
1990	347	337	348	351	337	319	293	279	282	298	298	334	<b>319</b>
1991	335	337	333	343	325	309	299	298	295	295	300	312	<b>315</b>
1992	333	358	345	371	360	341	314	295	286	286	292	308	<b>324</b>
1993	315	318	337	341	326	324	313	293	293	297	293	321	<b>314</b>
1994	357	350	380	339	356	337	294	290	307	292	296	299	<b>325</b>
1995	332	349	361	344	361	338	297	283	286	283	305	323	<b>322</b>
1996	342	363	-	364	363	323	306	285	298	294	294	320	<b>323</b>
1997	343	350	340	334	344	338	308	287	296	307	302	319	<b>322</b>
1998	355	363	365	357	340	359	307	305	299	290	307	302	<b>329</b>
1999	318	349	324	372	373	330	320	307	302	313	318	327	<b>329</b>
2000	320	349	366	375	363	336	303	292	304	294	283	319	<b>325</b>
2001	364	330	381	353	354	338	299	297	284	284	301	312	<b>325</b>
2002	324	331	349	333	334	339	304	299	301	297	316	328	<b>321</b>
2003	366	366	372	348	344	342	310	297	283	291	282	297	<b>325</b>
2004	332	347	361	345	350	328	288	290	291	284	294	324	<b>320</b>
2005	357	361	376	368	354	347	316	297	282	277	311	327	<b>331</b>
2006	330	336	379	373	342	352	319	292	301	292	318	325	<b>330</b>
2007	342	349	382	381	351	333	313	294	286	281	299	324	<b>328</b>
2008	314	345	365	360	346	335	309	303	293	297	313	324	<b>325</b>
2009	343	322	372	376	343	349	321	298	293	297	301	337	<b>329</b>
2010	341	372	392	396	377	372	331	298	292	294	324	323	<b>343</b>
2011	343	361	391	(378)	(342)	(351)	(327)	(304)	(305)	299	296	320	<b>335</b>
2012	336	336	337	337	338	340	339	337	338	337	336	334	<b>337</b>
2013	335	336	350	376	343	327	301	302	293	272	316	350	<b>325</b>
2014	350	358	365	356	350	345	317	301	291	288	300	346	<b>331</b>
2015	342	389	382	358	350	348	320	316	306	300	313	323	<b>337</b>
2016	356	372	355	358	332	339	308	304	292	275	293	305	<b>324</b>
2017	315	355	376	368	367	352	328	305	306	281	310	339	<b>333</b>
2018	345	386	361	371	347	343	299	295	299	301	297	294	<b>328</b>

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

○ 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	<b>316</b>
2014	329	350	363	347	349	341	309	300	295	286	296	334	<b>325</b>
2015	331	380	382	362	344	341	310	306	309	299	308	319	<b>333</b>
2016	346	370	357	350	331	326	312	299	293	271	295	306	<b>321</b>
2017	318	342	365	373	360	352	305	297	304	269	-	-	<b>329</b>
2018	-	382	354	364	338	336	292	285	292	296	291	290	<b>320</b>

○ 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	<b>302</b>
2012	281	280	311	335	330	321	303	294	304	281	291	297	<b>302</b>
2013	288	287	318	350	344	336	307	294	290	273	285	308	<b>307</b>
2014	302	319	336	328	332	319	294	289	289	275	274	305	<b>305</b>
2015	296	340	347	341	326	327	306	305	307	287	-	284	<b>315</b>
2016	-	323	327	318	310	296	282	287	277	252	264	266	<b>291</b>
2017	277	300	323	335	331	-	-	281	283	263	275	299	<b>297</b>
2018	310	336	339	345	320	327	294	287	286	284	267	257	<b>304</b>

## 1.6 자외선

### □ 자외선A 일누적값 [단위: MJ/m<sup>2</sup>]

#### ○ 강릉

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	0.37	0.50	0.76	0.77	1.14	0.99	0.97	1.01	0.84	0.65	0.27	0.33	<b>0.72</b>
2016	0.41	0.54	0.64	0.91	1.13	1.09	0.88	1.04	0.64	0.47	0.40	0.33	<b>0.71</b>
2017	0.41	0.58	0.64	0.99	1.09	1.19	0.91	0.76	0.89	0.51	0.43	0.37	<b>0.73</b>
2018	0.42	0.56	0.68	0.89	0.97	1.11	1.06	0.88	0.77	0.59	0.38	0.34	<b>0.72</b>

#### ○ 서울

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	0.71	0.81	1.10	1.09	0.89	0.85	0.88	0.60	0.31	0.31	<b>0.75</b>
2016	0.37	0.46	0.69	0.84	1.09	1.01	0.84	0.92	0.72	0.56	0.37	0.30	<b>0.68</b>
2017	0.38	0.54	0.70	0.91	1.10	1.09	0.71	0.78	0.79	0.60	0.39	0.32	<b>0.69</b>
2018	0.37	0.50	0.66	0.82	0.92	1.08	1.00	0.90	0.81	0.59	0.37	0.32	<b>0.70</b>

#### ○ 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	-	<b>0.60</b>
2014	-	-	0.52	0.72	0.93	0.83	0.84	0.58	0.67	0.47	0.29	0.20	<b>0.61</b>
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	<b>0.59</b>
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	<b>0.62</b>
2017	0.28	0.36	0.55	0.84	1.01	1.08	0.83	-	0.85	0.53	0.39	0.28	<b>0.64</b>
2018	0.29	0.48	0.70	0.84	-	1.04	-	1.01	0.68	0.60	0.40	0.26	<b>0.63</b>

○ 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	<b>0.63</b>
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	<b>0.63</b>
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	<b>0.66</b>
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	<b>0.72</b>
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	<b>0.70</b>
2017	0.41	0.59	0.77	0.99	1.20	1.06	1.09	1.16	-	0.65	0.52	0.35	<b>0.80</b>
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	<b>0.81</b>

○ 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	<b>0.75</b>
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	<b>0.77</b>
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	<b>0.70</b>
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	<b>0.68</b>
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	<b>0.72</b>
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	<b>0.70</b>
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	<b>0.71</b>
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	<b>0.72</b>
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	<b>0.69</b>
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	<b>0.71</b>
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	<b>0.74</b>

○ 목포

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	0.39	0.49	0.74	0.82	1.14	0.97	0.94	0.99	0.92	0.69	0.32	0.34	<b>0.73</b>
2016	0.38	0.52	0.77	0.89	1.11	0.97	1.03	1.11	0.74	0.53	0.43	0.34	<b>0.74</b>
2017	0.42	0.57	0.78	0.99	1.15	1.12	0.99	1.10	0.86	0.62	0.47	0.37	<b>0.79</b>
2018	0.43	0.54	0.70	0.95	0.94	1.20	1.30	1.09	0.86	0.70	0.49	0.36	<b>0.80</b>

○ 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	<b>0.68</b>
2011	0.45	0.45	0.74	0.82	-	0.99	0.94	0.76	0.69	0.59	0.35	-	<b>0.68</b>
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	<b>0.61</b>
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	<b>0.60</b>
2014	0.33	0.31	-	0.76	1.07	0.80	0.95	0.70	0.77	0.57	0.41	0.38	<b>0.64</b>
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	<b>0.68</b>
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	<b>0.67</b>
2017	0.41	0.59	0.71	0.91	1.15	1.14	0.84	-	0.76	0.52	0.46	0.39	<b>0.72</b>
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	<b>0.71</b>

□ 자외선A 일 최댓값 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 강릉

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	20.19	26.38	34.73	35.61	46.91	44.00	45.91	47.73	41.94	30.83	15.89	19.05	<b>34.10</b>
2016	21.34	28.00	32.33	41.38	46.82	48.67	43.34	47.39	35.75	27.12	21.82	18.24	<b>34.35</b>
2017	21.43	29.25	31.42	42.94	46.48	50.85	42.71	39.65	40.06	28.19	23.17	19.85	<b>34.67</b>
2018	21.90	27.74	31.77	38.69	41.82	45.59	44.18	42.51	37.84	28.61	21.30	19.03	<b>33.41</b>

○ 서울

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	32.79	38.93	44.57	46.65	44.35	41.67	42.15	29.57	18.59	17.40	<b>35.67</b>
2016	19.46	23.45	32.41	38.76	45.79	47.13	41.59	45.76	37.03	29.20	20.42	17.12	<b>33.18</b>
2017	20.65	26.20	32.00	41.90	48.23	45.55	37.50	38.86	36.85	30.55	21.95	17.69	<b>33.16</b>
2018	20.08	24.52	31.27	36.96	41.18	47.79	44.79	43.81	38.95	30.28	20.42	17.56	<b>33.13</b>

○ 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	-	<b>30.48</b>
2014	-	-	26.56	32.56	41.31	39.00	39.81	29.65	32.92	24.14	17.74	13.97	<b>29.77</b>
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	<b>28.65</b>
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	<b>31.09</b>
2017	18.24	23.28	29.76	38.53	43.56	45.41	38.85	-	39.14	31.03	24.13	19.30	<b>31.93</b>
2018	20.79	26.48	31.81	35.64	-	45.95	-	45.66	37.03	32.12	23.04	18.01	<b>31.65</b>

○ 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	<b>32.08</b>
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	<b>31.52</b>
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	<b>33.43</b>
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	<b>36.09</b>
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	<b>35.66</b>
2017	25.61	31.05	36.82	44.17	52.08	47.34	50.99	54.99	-	35.89	29.39	22.73	<b>39.19</b>
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	<b>40.25</b>

○ 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	<b>36.73</b>
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	<b>36.96</b>
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	<b>34.82</b>
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	<b>33.56</b>
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	<b>34.67</b>
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	<b>33.14</b>
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	<b>33.81</b>
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	<b>33.74</b>
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	<b>32.38</b>
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	<b>33.13</b>
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	<b>33.63</b>

○ 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	<b>33.69</b>
2011	23.35	23.75	34.53	39.35	-	43.96	44.50	39.72	35.26	29.90	20.60	-	<b>33.49</b>
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	<b>30.22</b>
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	<b>29.16</b>
2014	17.74	18.74	-	35.96	44.37	37.69	46.05	37.03	37.96	28.83	22.19	20.45	<b>31.55</b>
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	<b>32.94</b>
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	<b>32.45</b>
2017	21.64	29.09	34.38	41.86	48.82	46.92	39.36	-	37.71	29.20	24.24	20.29	<b>33.96</b>
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	<b>33.40</b>

○ 목포

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	21.77	27.15	36.25	39.99	48.83	44.15	44.92	46.15	42.58	33.87	20.06	19.90	<b>35.47</b>
2016	21.72	27.86	36.58	40.37	50.27	44.03	46.40	49.23	38.24	31.10	24.41	20.19	<b>35.87</b>
2017	23.06	29.69	37.11	42.51	48.50	49.20	46.66	51.03	40.09	32.12	26.05	21.98	<b>37.33</b>
2018	23.94	27.78	33.00	43.28	44.58	52.52	56.45	50.38	43.49	34.78	25.94	21.17	<b>38.11</b>

□ 자외선B (홍반자외선) 일누적값 [단위: kJ/m<sup>2</sup>]

○ 강릉

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	0.56	1.02	1.46	2.26	2.49	2.68	3.51	-	2.48	1.57	0.87	0.56	<b>1.77</b>
2002	0.59	1.04	1.50	2.59	3.20	3.29	-	2.53	2.13	1.39	0.74	0.41	<b>1.76</b>
2003	0.52	0.76	-	2.09	2.27	-	2.50	-	1.88	1.43	0.67	-	-
2004	0.56	0.97	1.61	2.28	2.78	3.11	-	-	-	1.64	0.82	0.51	-
2005	0.59	0.88	1.49	2.21	2.74	2.84	3.07	3.07	2.00	1.47	0.86	0.53	<b>1.81</b>
2006	0.54	1.02	1.40	1.69	2.55	2.57	2.00	3.00	2.29	1.31	0.68	-	<b>1.73</b>
2007	0.56	0.88	1.27	1.73	2.66	3.13	2.59	2.74	1.57	1.51	0.84	0.52	<b>1.67</b>
2008	0.59	1.03	1.26	2.13	2.65	2.89	3.17	3.13	2.32	1.45	0.79	0.59	<b>1.83</b>
2009	0.68	1.04	1.51	2.51	2.81	2.61	2.80	2.71	2.24	1.50	0.57	0.41	<b>1.78</b>
2010	0.50	0.68	0.96	1.77	2.44	3.09	2.79	2.26	1.96	1.32	0.75	0.44	<b>1.58</b>
2011	0.58	0.81	1.39	1.81	2.00	2.81	2.22	2.66	1.97	1.31	0.58	0.45	<b>1.55</b>
2012	0.52	0.96	1.20	1.95	2.16	2.24	2.74	1.84	1.92	1.41	0.70	0.40	<b>1.50</b>
2013	0.50	0.94	1.47	1.79	2.49	2.72	2.47	2.90	1.74	1.29	0.71	0.42	<b>1.62</b>
2014	0.48	0.69	1.30	1.67	2.66	2.21	3.15	2.13	2.13	1.28	0.67	0.60	<b>1.58</b>
2015	0.68	0.97	1.77	2.16	3.40	3.02	3.32	3.13	2.40	1.61	0.54	0.52	<b>1.96</b>
2016	0.61	0.97	1.47	2.43	3.17	3.03	2.52	2.73	1.64	1.20	0.76	0.52	<b>1.75</b>
2017	0.68	1.07	1.34	2.19	2.41	2.68	2.17	1.79	1.84	1.02	0.69	-	<b>1.63</b>
2018	0.59	0.82	1.25	1.69	2.00	3.51	4.36	3.53	2.75	1.76	0.93	0.71	<b>1.99</b>

○ 서울

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	1.67	2.30	3.27	3.19	2.84	2.45	2.40	1.44	0.64	0.51	<b>2.07</b>
2016	0.57	0.82	1.58	2.19	2.99	2.51	2.21	2.18	1.72	1.38	0.74	0.50	<b>1.62</b>
2017	0.65	1.00	1.45	2.04	2.41	2.45	1.79	1.94	1.75	1.33	0.73	0.47	<b>1.50</b>
2018	0.59	0.78	1.37	1.74	2.17	3.44	3.72	3.78	3.24	2.12	0.94	0.85	<b>2.06</b>

○ 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	<b>2.43</b>
2000	0.60	1.09	1.72	2.40	2.65	3.50	4.14	3.74	2.62	-	1.00	0.70	<b>2.20</b>
2001	0.62	1.20	1.60	2.64	3.07	-	3.53	3.79	3.27	1.70	0.89	0.63	<b>2.09</b>
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	<b>2.05</b>
2003	0.58	0.96	1.56	-	2.96	2.62	2.77	2.71	2.42	1.78	0.89	0.60	<b>1.80</b>
2004	0.70	1.18	1.83	2.62	2.84	3.19	3.03	3.82	2.61	1.85	0.82	-	<b>2.23</b>
2005	-	1.17	1.94	2.61	3.66	3.25	3.41	3.64	3.12	1.98	1.06	0.58	<b>2.40</b>
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	<b>2.08</b>
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	<b>1.89</b>
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	<b>1.90</b>
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	<b>1.84</b>
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	<b>2.25</b>
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	<b>2.08</b>
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	<b>1.84</b>
2015	0.69	0.92	1.86	2.33	3.56	3.57	3.33	-	2.74	1.67	0.68	0.56	<b>1.99</b>
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	<b>2.23</b>
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	<b>2.22</b>
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	<b>2.58</b>

○ 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	<b>2.26</b>
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	<b>2.33</b>
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	<b>2.12</b>
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	<b>2.13</b>
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	<b>2.15</b>
2017	1.10	1.60	2.18	2.91	3.74	3.51	4.07	4.18	-	2.07	1.38	0.74	<b>2.50</b>
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	<b>2.58</b>

○ 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	<b>2.05</b>
2002	0.72	1.30	1.85	-	-	3.37	3.33	2.83	2.42	1.65	1.03	0.60	<b>1.91</b>
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	<b>1.78</b>
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	<b>2.02</b>
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	<b>1.96</b>
2008	0.73	-	1.66	2.55	3.02	2.82	3.77	3.63	2.54	1.82	0.93	0.68	<b>2.20</b>
2009	0.74	1.09	1.71	2.44	3.00	3.13	2.82	3.06	2.55	1.84	0.93	-	<b>2.12</b>
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	<b>1.75</b>
2011	0.76	0.82	1.59	2.09	-	3.08	3.34	3.18	2.87	2.10	1.01	-	<b>2.08</b>
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	<b>2.40</b>
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	<b>2.14</b>
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	<b>1.81</b>
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	<b>1.87</b>
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	<b>1.86</b>
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	<b>2.11</b>
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	<b>1.96</b>

○ 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	<b>1.71</b>
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	<b>1.95</b>
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	<b>1.91</b>
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	<b>1.99</b>
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	<b>2.05</b>
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	<b>2.19</b>

○ 목포

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	2.82	1.62	1.01	0.65	-
2002	0.72	1.24	1.60	2.23	-	3.13	3.08	2.80	-	1.55	-	0.60	-
2003	0.67	0.99	1.57	2.11	2.52	2.62	2.20	2.69	2.43	1.74	0.93	0.68	<b>1.76</b>
2004	0.77	-	1.84	2.36	2.50	2.76	3.40	3.34	2.16	1.86	0.98	0.64	<b>2.06</b>
2005	0.70	1.07	1.78	2.49	3.01	2.82	2.95	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.94	0.66	-
2007	0.71	1.26	1.71	2.52	3.23	3.05	3.47	3.67	2.35	2.08	1.20	0.63	<b>2.16</b>
2008	0.76	1.47	1.96	2.91	3.21	3.07	3.63	3.65	2.53	1.84	1.04	0.72	<b>2.23</b>
2009	0.83	1.27	1.99	2.59	3.38	3.06	2.84	3.16	2.69	1.83	0.99	0.61	<b>2.10</b>
2010	0.73	0.86	1.18	2.01	2.59	2.61	3.01	-	2.61	1.71	0.98	0.65	<b>1.72</b>
2011	0.87	1.05	1.79	2.38	2.79	2.57	2.96	1.94	2.08	1.51	0.76	0.56	<b>1.77</b>
2012	0.69	1.09	1.47	2.01	2.36	2.21	2.22	2.30	1.73	1.33	0.76	-	<b>1.65</b>
2013	-	-	-	1.73	2.10	2.12	2.37	2.56	1.82	1.35	0.73	0.50	-
2014	0.67	1.06	1.56	2.28	3.25	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	0.98	1.25	2.12	2.63	4.17	3.51	3.53	3.45	2.95	2.16	0.86	0.79	<b>2.37</b>
2016	0.83	1.26	2.26	2.89	3.72	3.12	3.42	3.29	1.98	1.44	0.99	0.69	<b>2.16</b>
2017	0.83	1.21	1.79	2.36	2.84	2.79	2.55	2.68	1.94	1.99	1.18	0.75	<b>1.91</b>
2018	0.92	1.18	1.89	2.69	2.98	3.96	5.01	4.15	2.91	2.05	1.24	0.84	<b>2.49</b>

□ 자외선B (홍반자외선) 일 최댓값 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 강릉

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	0.037	0.064	0.088	0.126	0.137	0.152	0.210	-	0.154	0.104	0.055	0.037	<b>0.106</b>
2002	0.039	0.065	0.090	0.142	0.170	0.180	-	0.158	0.131	0.086	0.047	0.029	<b>0.103</b>
2003	0.035	0.049	-	0.125	0.126	-	0.160	-	0.118	0.086	0.045	-	-
2004	0.035	0.059	0.092	0.121	0.154	0.171	-	-	-	0.102	0.052	0.034	-
2005	0.037	0.055	0.089	0.121	0.148	0.158	0.169	0.180	0.124	0.095	0.056	0.034	<b>0.105</b>
2006	0.036	0.064	0.082	0.101	0.146	0.143	0.131	0.179	0.137	0.082	0.045	-	<b>0.104</b>
2007	0.037	0.055	0.080	0.106	0.149	0.167	0.154	0.171	0.102	0.100	0.053	0.034	<b>0.101</b>
2008	0.039	0.065	0.084	0.120	0.144	0.156	0.180	0.182	0.141	0.091	0.053	0.040	<b>0.108</b>
2009	0.044	0.069	0.094	0.139	0.159	0.149	0.163	0.158	0.136	0.090	0.038	0.028	<b>0.106</b>
2010	0.032	0.043	0.064	0.102	0.129	0.155	0.160	0.144	0.124	0.087	0.046	0.029	<b>0.093</b>
2011	0.037	0.051	0.084	0.104	0.109	0.147	0.136	0.156	0.116	0.080	0.040	0.030	<b>0.091</b>
2012	0.035	0.059	0.073	0.109	0.118	0.131	0.153	0.115	0.121	0.087	0.046	0.028	<b>0.090</b>
2013	0.033	0.059	0.084	0.106	0.138	0.155	0.153	0.172	0.113	0.089	0.047	0.027	<b>0.098</b>
2014	0.033	0.044	0.082	0.097	0.148	0.131	0.183	0.132	0.131	0.080	0.043	0.039	<b>0.095</b>
2015	0.044	0.061	0.098	0.121	0.172	0.162	0.189	0.177	0.146	0.093	0.038	0.037	<b>0.112</b>
2016	0.039	0.061	0.091	0.137	0.163	0.166	0.151	0.150	0.108	0.079	0.050	0.035	<b>0.102</b>
2017	0.043	0.067	0.080	0.117	0.126	0.137	0.122	0.110	0.099	0.067	0.043	-	<b>0.092</b>
2018	0.038	0.050	0.071	0.090	0.104	0.175	0.220	0.205	0.164	0.103	0.062	0.047	<b>0.111</b>

○ 서울

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	0.093	0.132	0.162	0.169	0.171	0.146	0.139	0.088	0.045	0.034	<b>0.118</b>
2016	0.037	0.051	0.093	0.124	0.155	0.144	0.132	0.137	0.104	0.087	0.048	0.034	<b>0.095</b>
2017	0.042	0.061	0.082	0.116	0.128	0.125	0.113	0.117	0.099	0.080	0.049	0.031	<b>0.087</b>
2018	0.038	0.047	0.078	0.094	0.117	0.181	0.200	0.218	0.181	0.125	0.059	0.054	<b>0.116</b>

○ 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	<b>0.137</b>
2000	0.041	0.067	0.101	0.130	0.149	0.189	0.228	0.210	0.158	-	0.066	0.045	<b>0.126</b>
2001	0.042	0.077	0.092	0.138	0.161	-	0.216	0.209	0.182	0.103	0.057	0.043	<b>0.120</b>
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	<b>0.119</b>
2003	0.039	0.060	0.093	-	0.157	0.141	0.170	0.164	0.143	0.108	0.061	0.041	<b>0.107</b>
2004	0.047	0.072	0.105	0.140	0.148	0.178	0.170	0.208	0.152	0.104	0.053	-	<b>0.125</b>
2005	-	0.071	0.113	0.147	0.196	0.182	0.192	0.212	0.179	0.121	0.068	0.041	<b>0.138</b>
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	<b>0.121</b>
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	<b>0.114</b>
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	<b>0.112</b>
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	<b>0.108</b>
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	<b>0.132</b>
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	<b>0.121</b>
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	<b>0.107</b>
2015	0.046	0.061	0.102	0.132	0.189	0.191	0.187	-	0.154	0.101	0.049	0.039	<b>0.114</b>
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	<b>0.126</b>
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	<b>0.127</b>
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	<b>0.142</b>

○ 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	<b>0.137</b>
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	<b>0.140</b>
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	<b>0.130</b>
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	<b>0.129</b>
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	<b>0.130</b>
2017	0.079	0.100	0.126	0.158	0.196	0.190	0.228	0.238	-	0.135	0.091	0.057	<b>0.145</b>
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	<b>0.150</b>

○ 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	<b>0.120</b>
2002	0.046	0.078	0.107	-	-	0.176	0.188	0.171	0.149	0.100	0.064	0.041	<b>0.112</b>
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	<b>0.108</b>
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	<b>0.120</b>
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	<b>0.118</b>
2008	0.050	-	0.102	0.139	0.163	0.161	0.207	0.211	0.155	0.109	0.062	0.046	<b>0.128</b>
2009	0.049	0.075	0.105	0.140	0.157	0.174	0.179	0.194	0.151	0.116	0.065	-	<b>0.128</b>
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	<b>0.104</b>
2011	0.048	0.053	0.092	0.123	-	0.169	0.193	0.196	0.174	0.131	0.071	-	<b>0.125</b>
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	<b>0.143</b>
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	<b>0.126</b>
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	<b>0.110</b>
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	<b>0.109</b>
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	<b>0.108</b>
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	<b>0.120</b>
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	<b>0.111</b>

○ 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	<b>0.106</b>
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	<b>0.114</b>
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	<b>0.109</b>
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	<b>0.119</b>
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	<b>0.121</b>
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	<b>0.125</b>

○ 목포

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	0.164	0.102	0.065	0.046	-
2002	0.050	0.077	0.097	0.128	-	0.155	0.181	0.171	-	0.097	-	0.042	-
2003	0.045	0.064	0.096	0.122	0.141	0.148	0.142	0.164	0.142	0.104	0.064	0.048	<b>0.107</b>
2004	0.052	-	0.107	0.132	0.138	0.153	0.192	0.195	0.140	0.110	0.064	0.043	<b>0.121</b>
2005	0.047	0.070	0.106	0.132	0.156	0.153	0.169	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.064	0.046	-
2007	0.049	0.079	0.106	0.143	0.181	0.184	0.205	0.228	0.145	0.130	0.080	0.049	<b>0.132</b>
2008	0.053	0.092	0.114	0.163	0.172	0.181	0.213	0.212	0.157	0.115	0.072	0.052	<b>0.133</b>
2009	0.059	0.084	0.121	0.148	0.177	0.170	0.179	0.196	0.159	0.112	0.066	0.043	<b>0.126</b>
2010	0.050	0.059	0.077	0.121	0.139	0.150	0.179	-	0.157	0.110	0.064	0.046	<b>0.105</b>
2011	0.059	0.067	0.111	0.136	0.156	0.148	0.170	0.123	0.120	0.088	0.052	0.040	<b>0.106</b>
2012	0.047	0.071	0.085	0.111	0.120	0.116	0.131	0.133	0.108	0.082	0.054	-	<b>0.096</b>
2013	-	-	-	0.101	0.113	0.116	0.143	0.142	0.107	0.082	0.051	0.035	-
2014	0.044	0.068	0.097	0.132	0.171	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	0.065	0.082	0.127	0.158	0.218	0.194	0.203	0.190	0.163	0.126	0.061	0.056	<b>0.137</b>
2016	0.056	0.081	0.132	0.157	0.203	0.169	0.184	0.176	0.119	0.097	0.064	0.046	<b>0.124</b>
2017	0.054	0.074	0.101	0.121	0.144	0.145	0.143	0.147	0.107	0.124	0.079	0.053	<b>0.108</b>
2018	0.061	0.075	0.109	0.153	0.174	0.208	0.262	0.226	0.176	0.123	0.078	0.058	<b>0.142</b>

## 1.7 총대기침적

### □ 부피가중평균

#### ○ 안면도

연도	개수	강수량	pH	EC	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
		(mm)											
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
<b>연평균</b>		<b>768.6</b>	<b>4.71</b>	<b>27.0</b>	<b>1.6</b>	<b>60.4</b>	<b>31.7</b>	<b>52.9</b>	<b>54.6</b>	<b>37.9</b>	<b>3.1</b>	<b>14.2</b>	<b>20.7</b>

계절	기간	개수	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	(μeq/L)								
					F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
겨울	2008~2017	120	4.36	71.6	2.3	222.3	84.1	116.4	193.6	82.3	8.5	49.2	48.2
	2018	9	5.12	73.6	1.7	428.7	70.1	106.9	351.8	46.4	9.5	78.3	56.6
봄	2008~2017	133	4.75	27.2	1.6	39.9	40.1	62.1	34.8	47.6	3.2	12.9	37.7
	2018	20	5.22	11.3	0.6	14.7	19.3	25.6	13.9	30.4	1.3	3.7	8.1
여름	2008~2017	224	4.68	22.6	1.0	41.9	25.3	41.6	35.3	38.9	1.7	9.6	9.8
	2018	15	5.32	8.5	0.4	15.8	13.2	15.6	13.0	24.0	0.9	3.2	3.0
가을	2008~2017	157	4.62	28.8	1.1	77.6	31.3	45.4	66.8	29.1	2.8	17.0	15.2
	2018	16	5.23	11.4	0.3	43.0	11.7	13.8	37.1	11.9	1.1	9.1	5.4

※ 겨울: 전년도 12월과 당해연도 1월, 2월 자료를 사용함.

○ 고산

연도	개수	강수량	pH	EC	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
		(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
<b>연평균</b>		<b>929.3</b>	<b>4.88</b>	<b>26.3</b>	<b>0.8</b>	<b>100.0</b>	<b>20.4</b>	<b>40.3</b>	<b>91.4</b>	<b>17.6</b>	<b>3.9</b>	<b>21.7</b>	<b>16.6</b>

계절	기간	개수	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	( $\mu\text{eq}/\text{L}$ )								
					F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
겨울	2008~2017	149	4.68	49.1	0.9	218.3	34.5	65.9	194.8	23.2	6.0	45.3	28.5
	2018	15	4.83	34.0	0.5	158.3	25.8	46.6	134.4	23.1	4.0	28.4	16.3
봄	2008~2017	172	4.85	21.3	0.8	60.6	21.5	39.5	52.1	22.6	3.2	14.3	18.4
	2018	18	4.80	15.1	0.8	21.8	16.4	25.0	18.7	21.4	1.1	4.4	5.0
여름	2008~2017	206	4.96	14.7	0.7	42.2	14.3	21.5	36.1	14.1	2.5	9.3	7.8
	2018	17	5.29	19.4	0.3	108.9	9.8	22.7	86.5	13.7	2.2	20.1	8.6
가을	2008~2017	167	4.90	29.4	0.4	134.7	18.3	35.4	118.2	13.3	4.0	27.0	14.1
	2018	17	5.08	11.4	0.4	32.1	13.8	15.4	27.8	16.7	1.2	6.3	3.5

※ 2012년 이전까지 (구)고산기상대에서, 2012년부터 환경분석센터(고산 기후변화감시소)로 이전하여 관측함

※ 2017년 7, 9월은 AWS고장으로 기상대 자료를 사용함.

※ 겨울: 전년도 12월과 당해연도 1월, 2월 자료를 사용함.

○ 울릉도

연도	개수	강수량	pH	EC	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
		(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
<b>연평균</b>		<b>1080.7</b>	<b>4.90</b>	<b>42.9</b>	<b>0.8</b>	<b>195.6</b>	<b>27.2</b>	<b>60.1</b>	<b>166.4</b>	<b>23.2</b>	<b>18.3</b>	<b>38.3</b>	<b>33.5</b>

계절	기간	개수	pH	EC	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
				(μS/cm)	(μeq/L)								
겨울	2008~2017	298	4.51	83.4	1.2	391.5	50.2	109.7	339.5	40.2	22.9	77.8	42.5
	2018	24	5.05	29.3	0.4	149.3	16.4	39.6	131.9	17.8	4.1	27.7	11.9
봄	2008~2017	143	4.93	42.2	1.2	163.7	33.1	72.9	132.6	35.9	25.3	33.1	46.9
	2018	19	4.94	28.5	0.5	121.7	17.4	44.1	104.7	19.6	3.9	22.1	11.0
여름	2008~2017	143	4.99	27.9	0.7	124.4	13.9	35.7	96.9	17.4	17.2	22.7	18.9
	2018	11	5.19	15.7	0.3	72.8	10.2	22.9	63.0	7.7	1.8	14.0	5.5
가을	2008~2017	192	4.86	45.6	0.6	219.2	22.4	55.2	182.3	17.2	20.6	42.3	34.0
	2018	18	4.98	23.8	0.4	108.6	17.1	30.0	96.5	11.0	2.9	22.2	9.3

※ 겨울: 전년도 12월과 당해연도 1월, 2월 자료를 사용함.

## 2. 기후변화감시 기술노트 목록

### ○ 발간 목록

- 기술노트 2014-01 통합지구대기화학관측(IGACO)의 오존 및 자외선 이행 계획
- 기술노트 2014-02 GC- $\mu$ ECD를 활용한 대기 농도 수준의 SF<sub>6</sub> 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<sub>6</sub> Using GC- $\mu$ ECD (WMO/GAW Report NO. 222)
- 기술노트 2015-04 강수화학(대기 침적) 측정 및 분석 매뉴얼
- 기술노트 2015-05 WMO Guideline 2014 Atmospheric Composition : MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC COMPOSITION
- 기술노트 2016-01 온실가스 관측업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-02 인체 비타민D 생성을 위한 태양자외선복사 노출시간 산정
- 기술노트 2016-03 국가승인기후변화감시통계 업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-04 에어로졸 관측업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-05 Calibration Methods of GC- $\mu$ ECD for Atmospheric SF<sub>6</sub> Measurements (WMO/GAW Report NO. 239)

- 기술노트 2017-01 WMO 육불화황 세계표준센터의 실무 매뉴얼
  - 기술노트 2017-02 The report of the result on SF<sub>6</sub> Inter-Comparison Experiment, 2016 ~ 2017
- ※ 기상청 기후정보포털([www.climate.go.kr](http://www.climate.go.kr))의 홍보·열린마당에서 열람 가능

### 3. 지구대기감시 매뉴얼 목록

#### ○ 발간 목록

- 지구대기감시 업무 매뉴얼(Ⅰ) 온실가스 및 반응가스
- 지구대기감시 업무 매뉴얼(Ⅱ) 에어로졸 및 총대기침적
- 지구대기감시 업무 매뉴얼(Ⅲ) 대기복사 성층권오존 및 자외선

## 4. 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<sub>2</sub> 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.
- 박기준, 최재천, 박상순, 오성남 2002: 안면도에서 측정한 온실가스(CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFCs)의 변동 특성 연구. 대기, 12, 502-505.
- 조경숙, 방소영, 최재천, 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 채취치구 높이 변경에 따른 CO<sub>2</sub> 및 CH<sub>4</sub> 관측 자료 비교 연구. 기상학회지, 41, 5, 851-859.
- 노영민, 김영민, 김영준, 최병철 2006: GIST / ADEMRC 다과장 라만 라이더 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이더 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: 다과장 라만 라이더를 이용한 발생지에 따른 안면도 지역 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성. 한국대기환경학회지, 26, 554-566.
- 유희정, 김정식, 이정순, 문동민, 이진복, 김종호, 김상훈, 이일용 2010: 기후변화

- 감시센터의 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.
- 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.
- Park, S. S., Kim, J., Cho, H. K., Lee, H., Lee, Y. 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 FLEPXART Lagrangian Particle dispersion model for atmospheric back-trajectory analysis. Atmosphere, 23, 93-102.
- Kim, W. H., H. J. Ko, C. G. Hu, S. 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.
- Kim, J., Cho, H. K., Mok, J., Yoo, H. D. and Cho, N. 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.

- Matsui, H., M. Koikel, N. Takegawa, Y. Kondol, A. Takami, T. Takamura, S. Yoon, S. W. Kim, H. C. Lim, and J. D. Fast, 2013: Spatial and temporal variations of new particle formation in East Asia using and NPF-explicit WRF-cham model: North-south contrast in new particle formation frequency. *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., Lee, H., Kim, J., and Lee Y.-G., 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., Kim, J., Park, S. S. and Cho, H.-K. 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 Kim, J. H. 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 Discussions*, 1–33.
- 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., Kim, J. H., Herman, J. R., Haffner, D. P. and Kim, J. 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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> advection on a hill slope using information. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232. 265–278.
- Lee, H., S.-O. Han, S.-B. Ryoo, J.-S. Lee, and G.-W. Lee 2019: The measurement of atmospheric CO<sub>2</sub> at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 2149–2163.

## 5. 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 1014996720000호 표준 에어로졸 샘플링 시스템  
(출원일 : 2014.04.29. / 등록일 : 2015.03.02.)
- 제 1016097400000 에어로졸 질량농도의 연직분포 산출방법  
(출원일 : 2015.08.24. / 등록일 : 2016.03.31.)

## 6. 지구대기감시 보고서 작성자

### ○ 작성자

1장	머리말	환경기상연구과	기상연구사	유 희 정	
2장	지구대기감시 현황 및 기상특성	환경기상연구과	기상연구사	유 희 정	
3장	3.1 온실가스	환경기상연구과 서울대학교 극지연구소	기상연구사 교 수 선임연구원	이 해 영 김 준 진 최 태 진	
	3.2 반응가스	환경기상연구과	기상연구사	김 수 민	
	3.3 에어로졸	환경기상연구과	기상연구관	이 상 삼	
		"	기상연구사	김 정 은	
		"	기상연구사	고 희 정	
	3장	3.4 대기복사	연세대학교	연구원	오 세 호
			광주과학기술원 (부경대학교)	교 수	김 준 민 노 영 민
		3.5 성층권오존	환경기상연구과	기상연구관	이 상 삼
			"	연구원	송 승 대
		3.6 자외선	환경기상연구과	연구원	송 승 대
"			연구원	송 승 대	
3.7 총대기침적		환경기상연구과	연구원	송 승 대	
		연세대학교	교 수	김 준	
3.8 기타	환경기상연구과	기상연구사	고 희 정		
4장	지구대기감시 자료 통계 방법	숙명여자대학교	교 수	오 정 진	
		제주대학교	교 수	강 창 희	

### ○ 작성 지원

환경기상연구과 기상연구관	이영곤	기상주사	유제규	연구원	고미영 이 단 정지영 최흥우	김은실 이동현 최남원 함지영	문세영 이세표 최은영
------------------	-----	------	-----	-----	--------------------------	--------------------------	-------------------

---

## 2018 지구대기감시 보고서

---

발 행 일 : 2019년 6월

발 행 처 : 국립기상과학원 환경기상연구과

63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로

33 국립기상과학원

홈페이지 : 기후정보포털([www.climate.go.kr](http://www.climate.go.kr))

---

