

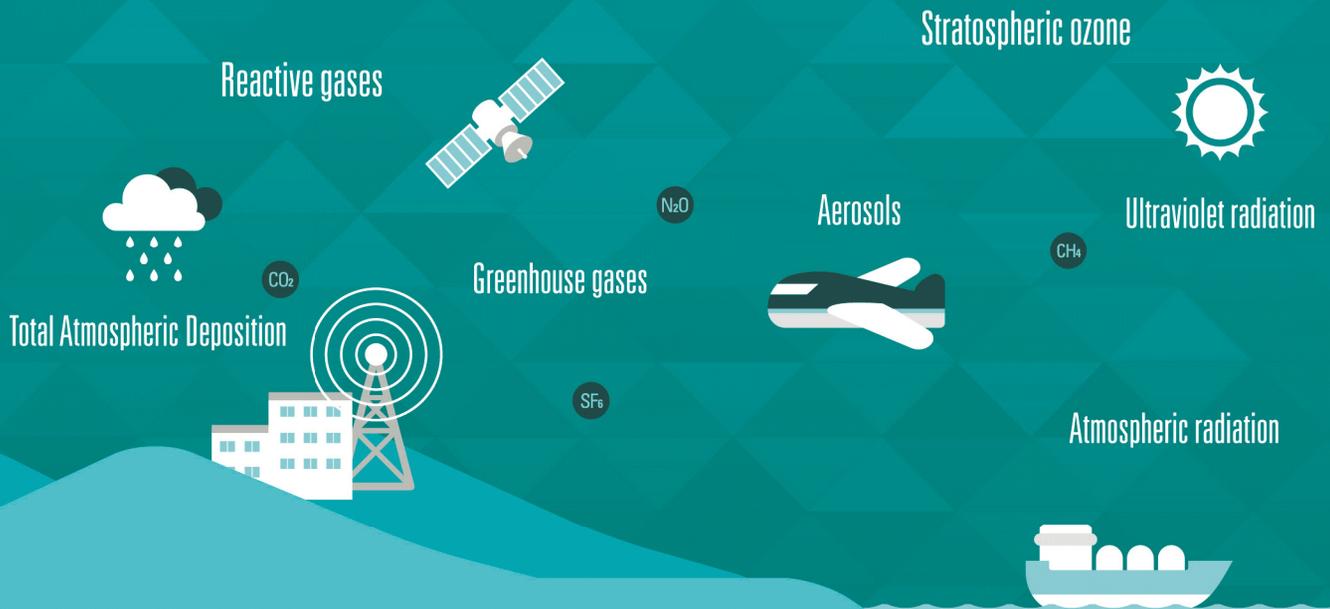
발간등록번호

11-1360000-000991-10

# 2017

# 지구대기감시 보고서

Report of Global Atmosphere Watch 2017



Environmental Meteorology Research Division



---

# 차 례

---

요약 .....	1
제1장 머리말 .....	5
제2장 지구대기감시 현황 .....	7
2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램 .....	7
2.2 우리나라 기후변화감시소 현황 .....	9
제3장 분야별 관측·분석 결과 .....	25
3.1 온실가스 .....	25
3.1.1 이산화탄소 .....	26
3.1.2 메탄 .....	38
3.1.3 아산화질소 .....	40
3.1.4 육불화황 .....	42
3.1.5 염화불화탄소류 .....	44
3.1.6 품질관리를 위한 온실가스 관측자료 비교(플라스크 샘플링) .....	46
3.2 반응가스 .....	48
3.2.1 오존 .....	49
3.2.2 일산화탄소 .....	53
3.2.3 질소산화물 .....	57
3.2.4 이산화황 .....	61
3.3 에어로졸 .....	65
3.3.1 에어로졸 물리특성 .....	66
3.3.2 에어로졸 광학특성 .....	77
3.3.3 에어로졸 화학특성 .....	110
3.4 대기복사 .....	120
3.4.1 직달일사, 산란일사 .....	121
3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사 .....	123
3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사 .....	124
3.4.4 순복사 .....	125
3.5 성층권오존 .....	126
3.5.1 오존전량 .....	126
3.5.2 오존 연직분포 .....	137

3.5.3 남극 오존홀 .....	143
<b>3.6 자외선</b> .....	<b>147</b>
3.6.1 자외선A .....	147
3.6.2 자외선B .....	150
3.6.3 자외선 복사량 .....	152
<b>3.7 총대기침적</b> .....	<b>155</b>
3.7.1 2017년 강수특성 .....	156
3.7.2 산성도 .....	158
3.7.3 전기전도도 .....	160
3.7.4 강수이온성분 .....	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>184</b>
4.1 온실가스 .....	184
4.2 반응가스 .....	188
4.3 에어로졸 .....	190
4.4 대기복사 .....	195
4.5 상층권오존 .....	197
4.6 자외선 .....	199
4.7 총대기침적 .....	201
<b>참고문헌</b> .....	<b>203</b>
<b>부록</b> .....	<b>208</b>
1. 지구대기감시 관측자료 .....	211
2. 기후변화감시 기술노트 목록 .....	250
3. 기후변화감시 관측자료 활용논문 목록 .....	251
4. 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황 .....	256
5. 지구대기감시 보고서 작성자 .....	257

# 요약

## □ 온실가스

2017년 안면도, 제주 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 412.2 ppm, 고산 411.8 ppm, 울릉도 409.7 ppm 순으로 높았으며, 꾸준히 증가추세에 있다. 한반도에서 가장 긴 실시간 CO<sub>2</sub> 관측자료를 가진 안면도는 2016년 대비 2.3 ppm이 증가해 10년 평균 증가값인 2.4 ppm/yr와 비슷했다. 미국해양대기청에서 발표한 2017년 전지구 농도는 405.0 ppm으로 한반도 농도가 약 7.2 ppm 높다. 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 5 ppb, N<sub>2</sub>O는 1.4 ppb, SF<sub>6</sub>는 0.1 ppt 증가하였다.

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

## □ 반응가스

2017년 안면도에서 관측한 반응가스의 연평균값은 최근 7년간(2007 ~ 2013년) 관측자료의 평균값과 비교하였을 때 오존(O<sub>3</sub>)은 높고, 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>)은 낮았다. 1차로 직접 배출되는 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>의 경우 2017년에 관측된 월별 최댓값이 최근 7년에 비해 낮았다. 연중 계절 변동은 오존(O<sub>3</sub>)은 봄과 가을에 높고 겨울과 여름에 낮았고, 그 외 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>는 여름에 낮고 겨울에 높았다. CO는 겨울에 남서풍이 불 때, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>는 봄과 겨울에 북동풍이 불 때 고농도가 관측되었다.

2017년 고산에서 관측한 반응가스의 연평균값은 최근 5년간(2012 ~ 2016년) 관측자료의 평균값과 비교하였을 때 NO<sub>x</sub>는 높고, O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub>는 1.1 ~ 3배 낮았다. 연중 계절 변동은 오존(O<sub>3</sub>)과 일산화탄소(CO)는 안면도와 비슷한 계절변동을 보였다. 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>)은 봄에 높고 여름에 낮았으나 안면도에 비해 계절 변동이 뚜렷하지 않았다.

CO는 모든 계절에서 서풍계열이 불 때 농도가 높았으며, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>는 봄, 가을, 겨울에 서풍 혹은 북동풍일 때 농도가 높았다.

## □ 에어로졸

2017년 안면도에서 부유분진측정기(베타선흘수법)로 측정한 PM10 질량농도 연평균은  $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2004년 이래로 가장 낮았으며, 연평균은 대체로 감소하는 추세를 보이고 있다. 고산에서 같은 모델의 장비로 측정한 PM10 질량농도 연평균도  $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 2015년부터 3년 연속 같은 값이다. 안면도에서 운영되고 있는 저용량 미세먼지채취기(중량법)의 PM10 질량농도와 비교하면 2017년 부유분진측정기 자료는 등가성기준을 만족하였다.

안면도와 고산의 연평균 입경별 부피농도는 미세입자 영역( $1 \mu\text{m}$  이하)과 조대입자 영역에 피크가 관측되는 이산형 분포(bimodal)를 보였으며, 지점별로 월별 크기분포 경향이 달랐는데 1 ~ 6월에는 안면도에서, 7 ~ 8월에는 고산에서 부피농도가 더 높았다. 안면도의 초미세먼지 입자크기별 수농도분포 자료를 보면 직경  $0.1 \mu\text{m}$  부근에서 입자 수농도의 최대치가 관측되었고,  $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$  사이인 에이트켄 모드가 축적모드( $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ )보다 우세하며, 여름보다 가을철에 입자 수농도가 높아 이 기간에 입자 생성이 활발하였을 것으로 추정한다.

안면도의 2017년 광산란계수 평균은  $80 \text{Mm}^{-1}$ 으로 최근 10년과 비교할 때 2016년과 비슷하게 낮았고, 3월을 제외하고 모두 과거 10년보다 낮게 관측되었다. 옹스트롬 지수는 1.57으로 가장 낮았는데, 이는 높게 관측되는 시기의 자료가 없기 때문으로 사료된다. 2017년 광흡수계수 평균은  $6.5 \text{Mm}^{-1}$ 로 최근 10년과 비교하여 가장 낮았고, 광산란계수와 같이 3월을 제외하고 과거 10년보다 낮은 농도를 보였다.

안면도와 울릉도에서는 정밀필터복사계의 기기교정으로 인해 공백이 있었으나, 고산에서는 공백 없이 관측을 수행하였다. 고산에서 관측된 에어로졸 광학깊이(AOD)는 대체로 봄철과 여름철에 큰 값을 보였고 가을철과 겨울철에 적은 값을 보였다. 옹스트롬 지수는 주로 큰 입자로 구성된 황사의 영향을 받은 봄철에 적은 값을 보였고, 여름철과 가을철에 대체로 큰 값을 보였다.

PM10 에어로졸에서 이차오염물질  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  중  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 의 농도는 2017년  $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 9년간 평균( $6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 보다 높게 나타났다.  $\text{NO}_3^-$ 는 2017년도는  $8.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 9년간의 평균( $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 보다 높았으며,  $\text{NH}_4^+$  성분은 2017년  $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 9년간의 평균( $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 비슷한 값을 보였다. 토양성분인  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 의 2017년 평균은  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 9년간 평균( $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 보다 약 30% 낮게 나타났다.

## □ 대기복사

안면도 기후변화감시소의 2017년 직달일사 월평균 최대는 5월에 263.9 W/m<sup>2</sup>, 최소는 12월에 102.2 W/m<sup>2</sup>로 나타났다. 서산의 일조시간 최댓값은 5월이었으며, 서산의 5월 강수량은 평년대비 73% 이상 감소하였다. 고산 기후변화감시소의 2017년 월평균 최대는 직달일사가 8월에 164.9 W/m<sup>2</sup>, 산란일사는 7월에 127.3 W/m<sup>2</sup>이며 최소는 직달일사가 12월에 65.4 W/m<sup>2</sup>, 산란일사는 12월에 51.6 W/m<sup>2</sup>이다.

태양복사의 월평균은 계절변동으로 봄철에 증가하고 겨울로 갈수록 감소하나 여름철에는 구름과 강수로 인해 오히려 값이 낮아진다. 2017년 월평균 최대는 5월에 55.3 W/m<sup>2</sup> (태양상향복사), 293.6 W/m<sup>2</sup> (태양하향복사), 최소는 12월에 25.2 W/m<sup>2</sup> (태양상향복사), 12월에 79.1 W/m<sup>2</sup> (태양하향복사)로 관측되었다.

지구복사는 기온, 습도의 연직분포, 운량, 구름물리성분, 지면온도의 영향을 받아 겨울에 낮고 여름에 높은 계절변동 특성이 나타난다. 2017년 월평균 지구상향복사의 최대는 8월에 424.4 W/m<sup>2</sup>, 최소는 2월에 311.4 W/m<sup>2</sup>이며, 지구하향복사의 최대는 8월에 367.8 W/m<sup>2</sup>, 최소는 2월에 238.0 W/m<sup>2</sup>으로 나타났다.

## □ 성층권오존/자외선

2017년 오존전량은 안면도 329 DU, 고산 297 DU, 서울 333 DU로 나타났다. 세 지점 모두 2016년 보다 증가하였다. 안면도 월평균 최댓값은 4월(373 DU), 최솟값은 10월(269 DU), 고산 최댓값은 4월(335 DU), 최솟값은 10월(263 DU)에 나타나 봄철에 높고, 가을철에 낮은 계절변동이 잘 나타났다. 또한 최댓값과 최솟값의 차이가 안면도는 104 DU, 고산은 72 DU로 연평균 오존전량 기준으로 안면도는 32%, 고산은 24%의 변동 폭을 보였다. 서울의 오존전량 월별 변동성은 7월에 최대 증가 6.6%를 보이고, 1월에 -7.1%로 최대 감소를 보였다. 2017년의 연교차는 3월의 376 DU와 10월의 281 DU로 95 DU의 연교차를 보이고 있다.

2017년 지역별 자외선A 일누적 복사량의 최댓값은 강릉 1.63 MJ/m<sup>2</sup>(6월 5일), 서울 1.52 MJ/m<sup>2</sup>(5월 14일) 울릉도 1.43 MJ/m<sup>2</sup>(6월 5일), 안면도 1.64 MJ/m<sup>2</sup>(6월 4일), 포항 1.53 MJ/m<sup>2</sup>(5월 25일), 목포 1.57 MJ/m<sup>2</sup>(5월 26일), 고산 1.66 MJ/m<sup>2</sup>(5월 26일)로 나타났다. 주로 5월, 6월에 최댓값이 나타났다. 자외선은 태양천정각과 일조시간 등에 영향을 받기 때문에 자외선 고산 값은 하

지를 기준으로 남중고도가 높고, 낮 길이가 긴 5월 ~ 6월 사이 높게 나타날 수 있고, 7월 ~ 8월의 경우는 장마의 영향으로 누적 복사량이 낮아지는 경향이 있다. 2017년 각 지역별 자외선B 고산 최댓값은 강릉 6월 5일 4.04 kJ/m<sup>2</sup>, 서울 6월 3일 3.58 kJ/m<sup>2</sup>, 울릉도 7월 26일 5.67 kJ/m<sup>2</sup>, 안면도 6월 4일 5.06 kJ/m<sup>2</sup>, 포항 7월 27일 5.43 kJ/m<sup>2</sup>, 목포 6월 4일 4.09 kJ/m<sup>2</sup>, 고산 7월 22일 5.86 kJ/m<sup>2</sup> 이다. 주로 6월, 7월에 최댓값을 보였다.

## □ 총대기침적

2007년부터 2016년까지의 10년간의 평균강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 923.9, 1151.6, 1368.2 mm이며, 2017년 세지역의 강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 471.5, 893.9, 1008.9 mm로 평년의 약 51.0%, 77.6%, 73.7% 수준으로 전체적으로 평년보다는 낮은 강수량을 보였다.

2007년부터 2016년까지 약 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 산성도는 각각 4.63, 4.86, 4.76이며, 2017년도의 부피가중평균 산성도는 안면도 4.70, 고산 4.88, 울릉도 4.88로 나타났다.

안면도에서 채취한 2007 ~ 2017년 건성 및 습성 침적량은 2013년 이후 대체로 감소하는 경향을 보였으며, 2017년도의 전체 침적량은 8,828 mg/m<sup>2</sup>이다. 또한 2007년부터 2017년까지 건성 침적량이 차지하는 비율은 약 19.3% ~ 45.5%를 차지하였으며, 2007년에 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℃ 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 국제사회 노력의 일환으로 진행되어 왔다. 특히 지난 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℃보다 상당히 낮은 수준으로 유지'하고, '1.5℃ 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 대기 조성 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

1) IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

2) UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

분석·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, 울릉도독도의 3개 기후변화감시 기본관측소와 포항, 목포 등 3개 보조관측소, 그리고 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.

2011년에는 대표적 온실가스 중 하나로 대기 중 극히 미량으로 존재하는 육불화황(SF<sub>6</sub>)의 측정 기술을 인정받아 WMO로부터 육불화황 세계표준센터(World Calibration Centre)로 지정되었으며, 2015년에는 강수화학 국제비교 실험과 온실가스 관측기술 적합성 평가 등에서 세계 최고 수준의 기술을 보유하고 있는 것으로 평가 받았다. 2016년에는 신뢰도 높은 자료 생산과 더불어 다양한 정보를 제공하기 위해 온실가스의 품질관리 기법을 개선하고 한미기상협력의 일환으로 수행된 NOAA의 온실가스 플라스크 관측·분석결과를 추가하였으며, 연직오존자료의 고도별 분석 자료를 새롭게 제시하였다.

2017년에는 온실가스과 반응가스의 관측환경, 장비운영, 자료공유와 관련하여 세계표준센터(WCC-Empa)로부터 적합성평가에서 좋은 결과를 얻어 자료의 생산과 품질처리에 신뢰도를 더하게 되었으며, 그 결과는 WMO/GAW 홈페이지에 게시되었다([www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/other\\_pub.html](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/other_pub.html)).

2017년 보고서에는 온실가스의 경우 울릉도와 고산의 육불화황 관측자료를 추가 분석하였으며, 반응가스는 울릉도의 CO 자료를 추가하였다. 4장 지구대기감시 자료 통계 방법에는 같은 해 발간한 지구대기감시 업무매뉴얼을 바탕으로 자료 전반에 걸쳐 GAW 기준에 맞는 새로운 품질관리 기준을 적용하였고, 특히, 에어로졸 자료품질관리 기준을 지난해보다 상세히 제시하였다.

# 제2장 지구대기감시 현황

## 2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램

세계기상기구(WMO)는 세계의 기상관측체계 수립, 기상관측의 표준화, 기상정보의 국제 교환, 다른 분야에 대한 기상학의 응용을 추진하기 위해 1950년에 설립된 국제연합(UN)의 특별기구이다. 우리나라는 1956년에 이 기구에 가입하여 활동하고 있다.

세계기상기구 과학기술 프로그램 중의 하나인 지구대기감시 프로그램(GAW)은 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비 등과 같은 환경 문제에 대처하기 위해 1989년에 전지구오존관측망(GO<sub>3</sub>OS)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) 31개소, 지역급 관측소(regional station) 400여 개소, 그리고 협력 관측소(contributing station) 100여 개소가 운영되고 있다.

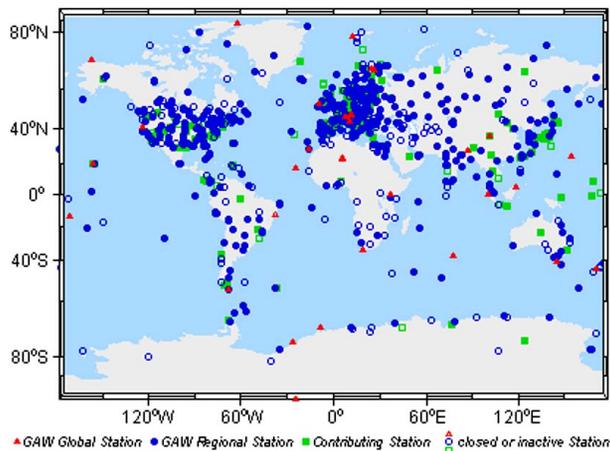


그림 2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 관측소 현황.

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

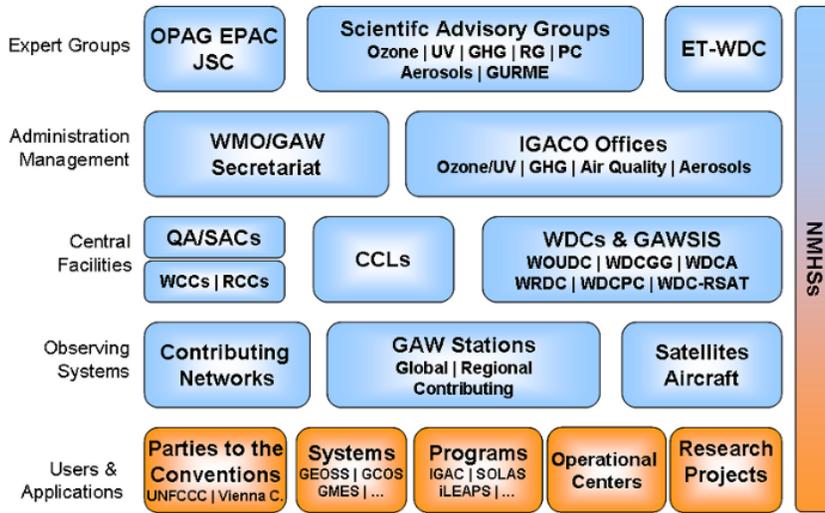


그림 2.2 세계기상기구 지구대기감시(GAW) 프로그램의 운영 구조.

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://wdcpg.org">http://wdcpg.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 소백산기상관측소에서 출발하였다. 이곳에서 대기질, 산성비, 대기복사 등이 관측되었다.

1990년부터 기상연구소(현 국립기상과학원)는 제주 고산에서 플라스크 샘플링 방법으로 온실가스를 관측하기도 하였다. 이후에 기후변화 유발물질의 감시 필요성이 대두되면서 1992년부터 무안기상대에서 온실가스를 관측하기 시작하였고, 1994년부터 포항기상대에서 성층권 오존과 자외선 관측도 시작되었다.

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

1999년에 안면도 배경대기관측소는 세계기상기구(GAW)에 지역급 관측소로 등록되었고, 2000년 8월에 지구대기감시관측소로 명칭이 변경되었다. 이때까지 국립기상연구소(현 국립기상과학원) 소속이었던 지구대기감시관측소는 2008년 3월에 기상청 기후변화감시센터로 소속과 명칭을 변경하였다.

이후 한반도에서 기후변화 유발물질의 유·출입을 감시하기 위하여 우리나라 중부 서해안의 안면도 기후변화감시소를 GAW 관측지침에 맞게 관측환경을 구축하는 한편, 남부 서해안 제주도에 고산기후변화감시소를 설립하고(2011년), 기후변화 원인물질의 유출 지역에 해당하는 최동단인 독도에서 온실가스 관측을 시작하였으며(2011년) 울릉도에 울릉도독도 기후변화감시소를 신설하였다(2013년). 이로써 기후변화감시소는 한반도를 삼각형으로 감시하는 관측망으로 구축되었다(그림 2.3). 이 중 고산 기후변화감시소는 안면도 기후변화감시소와 마찬가지로 GAW에 지역급 관측소로 등록되었다.

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

2017년 현재 안면도, 고산, 울릉도독도의 기후변화감시 기본관측소 3소, 독도 무인기후변화감시소와 포항, 목포, 강릉의 보조관측소 3소, 대학, 관련기관 등 위탁관측소 7소가 운영되고 있다.

표 2.2 한반도 기후변화감시 관측망(기본, 보조 관측소) 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)	기본관측소 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)	기본관측소 WMO GAW 지역급 관측소 (2013, JGS)
	33.29°N 126.16°E	71.0 m	온실가스(2012), 반응가스(2012) 에어로졸(2014)	
울릉도독도 기후변화감시소 (울릉도)	37.48°N 130.90°E	220.9 m	온실가스(2012), 반응가스(2015) 에어로졸(2012), 총대기침적(1997) 자외선(2012)	기본관측소
독도 무인 기후변화감시소(독도)	37.23°N 131.86°E	24.0 m	온실가스(2011)	기본관측소
포항관측소 (포항)	36.02°N 129.37°E	2.5 m	성층권 오존(1994), 자외선(1999)	보조관측소 WMO GAW 지역급 관측소 (1994, POH)
목포기상대 (목포)	34.80°N 126.37°E	37.4 m	자외선(2001)	보조관측소
강원지방기상청 (강릉)	37.80°N 128.85°E	79.0 m	자외선(2001)	보조관측소

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°W	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.

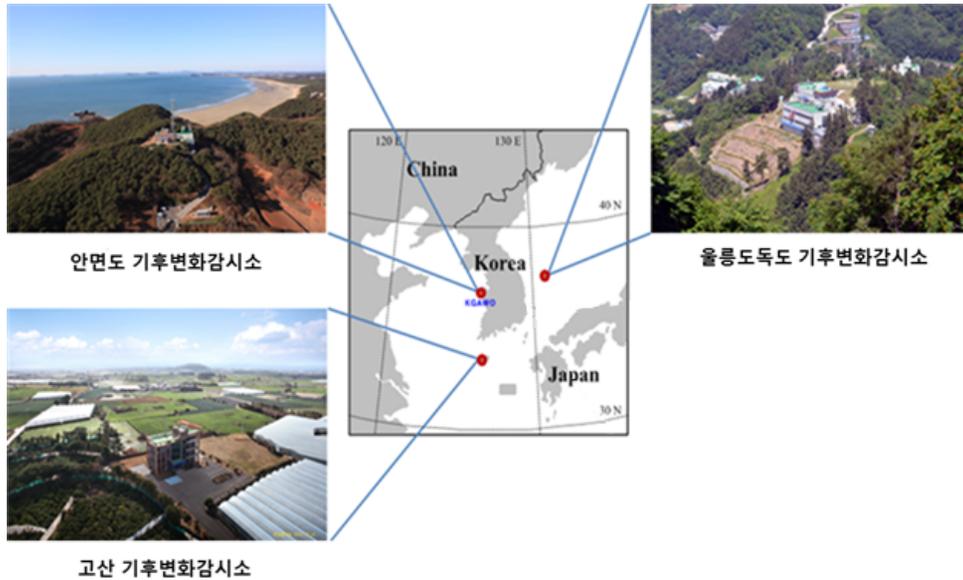


그림 2.3 한반도 기후변화감시망의 구성.

## 2.2.1 기후변화감시소 기상특성

각 감시소에서는 자동기상관측 장비(AWS, Automatic Weather System)으로 기상요소를 관측하고 있다. 2017년의 풍향, 풍속, 기온을 지난 9년(2008 ~ 2016년)의 풍속, 기온과 함께 분석하였다.

### 가. 풍향

각 감시소의 2017년 계절별 풍향과 풍속을 바람장미로 그림 2.4에 나타내었다. 바람장미는 방위별 풍향의 출현빈도와 풍향별 풍속계급 빈도를 나타낸다.

안면도에서는 봄에 북서계열과 남서 계열의 바람이 주로 불었고, 여름에는 다른 방향에 비해 남서-남풍계열이 우세하였다. 가을에는 북풍이 주로 불었고, 북동계열의 바람도 잦았으며, 겨울에는 북서-북풍 바람이 우세하였다.

고산에서는 봄에 주로 북서풍이 불었고 남동계열의 바람도 잦았다. 여름에 남동계열의 바람이 주로 불었으며, 가을에는 북-북동풍이 많이 불었고 겨울에는 주로 북서풍이 강하게 불었다.

울릉도에서는 모든 계절에서 북동풍과 남서풍이 우세하였다.

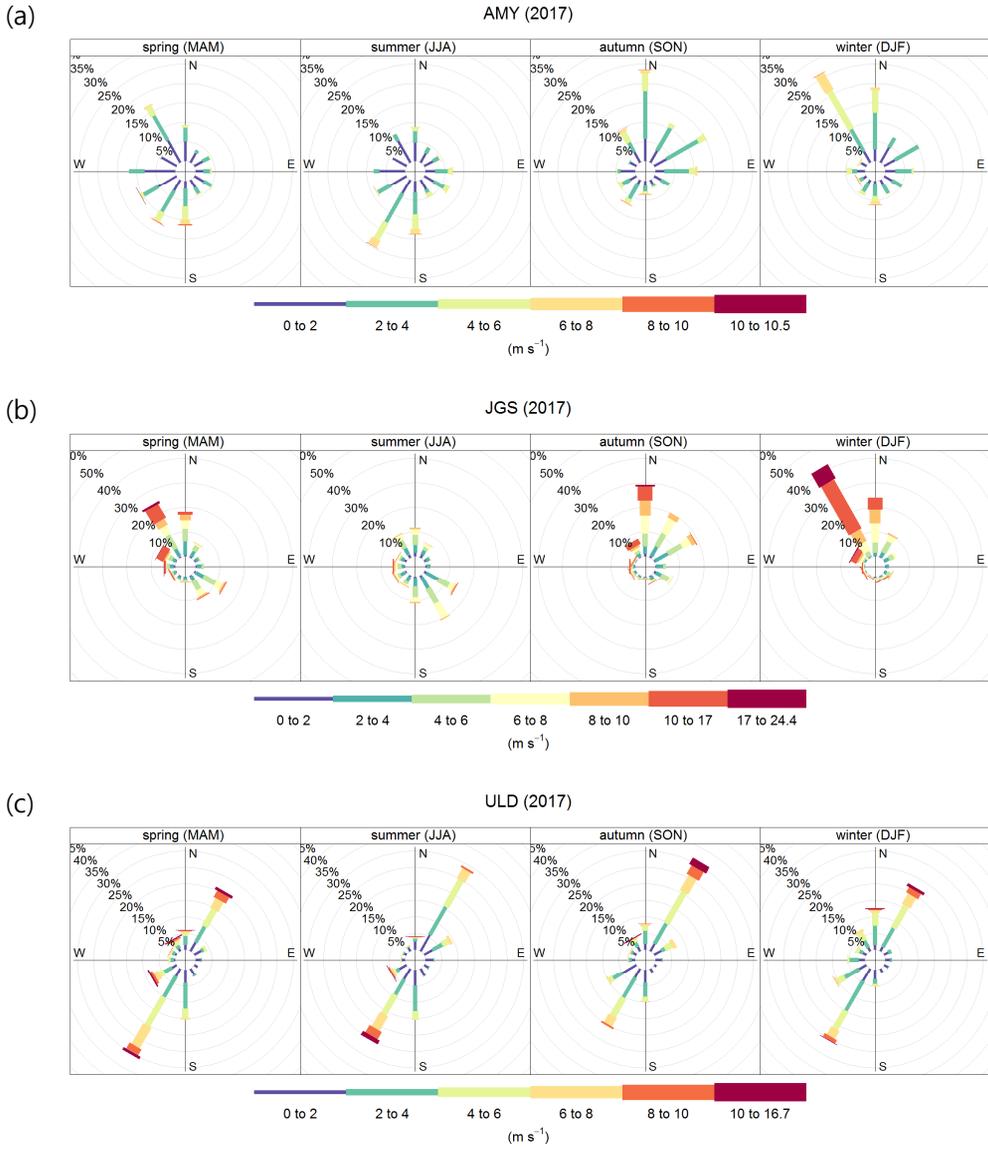


그림 2.4 (a) 안면도, (b) 고산, (c) 울릉도 기후변화감시소의 2017년 계절별 풍향.

## 나. 풍속

각 감시소의 2017년 평균 풍속과 계절별 풍속의 일변화를 2008 ~ 2016년 평균값과 비교하였고 2008년부터 2017년까지의 연변화와 함께 그림 2.5, 2.6, 2.7에 나타내었다. 일변화에는 시간평균값을 사용하였고, 연변화에는 일평균값을 사용하였다.

안면도에서 풍속의 2017년 평균 일변화를 보면 주로 아침 8시부터 증가하였다가 정오에 최고로 세게 불며 18시까지 감소하였다. 2017년은 지난 9년에 비해 전체적으로 풍속이 낮았다. 계절별로 풍속을 살펴보면 봄과 여름에 낮 동안 풍속이 세게 나타나는 일변화가 뚜렷하였고 가을과 여름에는 일변화가 두드러지지 않았다. 여름철 풍속은 다른 계절에 비해 낮시간을 제외한 새벽과 저녁에 가장 바람이 약했고, 겨울철에 가장 바람이 강했다. 2017년이 지난 9년보다 풍속이 봄과 여름에 낮았고, 가을과 봄에는 높았다. 2008 ~ 2017년 동안의 연변화를 보면 다른 해에 비해 2010년에 풍속이 낮았고 2012년 이후 지금까지 풍속은 평균, 최소, 최대값에서 모두 비슷한 수준으로 나타났다.

고산에서 풍속의 2017년 평균 일변화는 주로 아침 9시부터 18시까지의 낮 동안 조금 증가하였고, 2017년은 지난 9년에 비해 전체적으로 풍속이 조금 낮았다. 계절별로 풍속을 살펴보면 2017년의 겨울철 풍속이 9 ~ 10 m/s로 가장 높고, 봄과 가을에 5 ~ 7 m/s였고, 여름에 4 ~ 5 m/s로 가장 낮았다. 2017년 봄의 풍속이 지난 9년에 비해 모든 시간대에서 약 0.5 m/s 가량 낮았지만, 다른 계절에서는 2017년 풍속과 지난 9년의 풍속이 비슷하였다. 2008 ~ 2017년 동안의 연변화를 보면 풍속은 평균, 최소, 최대값에서 모두 비슷한 수준으로 나타났다.

울릉도에서 풍속의 2017년 평균 일변화는 대체로 4 m/s로 고르게 나타났고, 다른 시간대에 비해 아침 7 ~ 8시와 16 ~ 17시에 0.5 m/s 가량 낮았다. 2017년은 지난 9년에 비해 전체적으로 풍속이 조금 높았다. 여름철 풍속이 다른 계절에 비해 낮시간을 제외한 새벽과 저녁에 바람이 가장 강하였고, 봄에 부는 바람이 가장 약하였다. 겨울철에는 다른 계절에 비해 일변화가 뚜렷하여 풍속이 아침 8시부터 증가하여 낮 12시에 최대였고 이후 18시까지 감소하였다. 2017년 봄에는 풍속이 지난 9년보다 낮았고, 여름에는 높았으며, 겨울에는 낮 시간동안 높았다. 2008 ~ 2017년 동안의 연변화를 보면 풍속은 평균, 최소, 최대값에서 모두 비슷한 수준으로 나타났다.

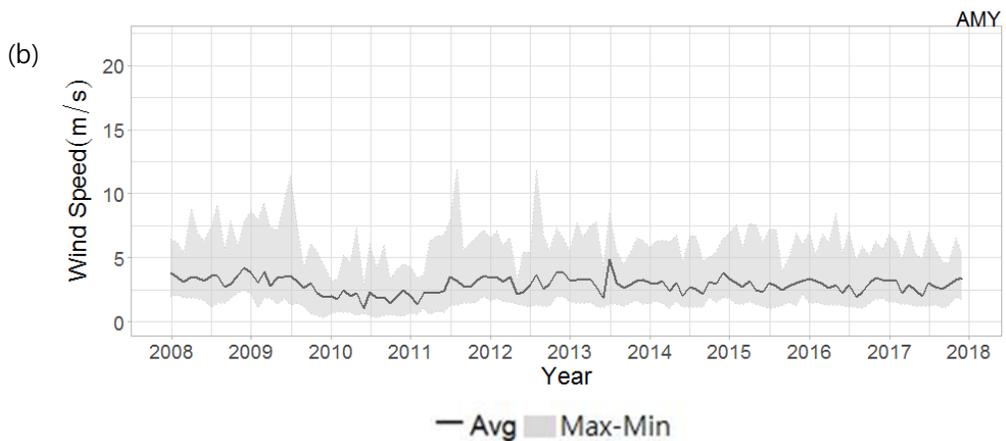
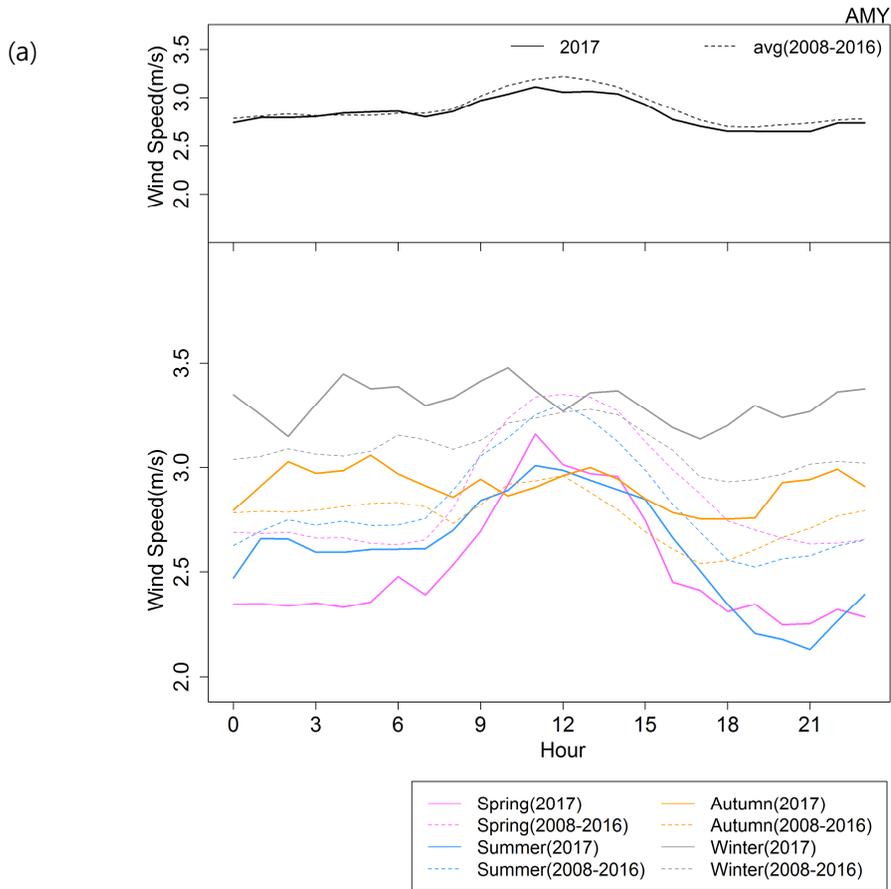


그림 2.5 안면도에서 관측한 풍속의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화 (2008 ~ 2017년).

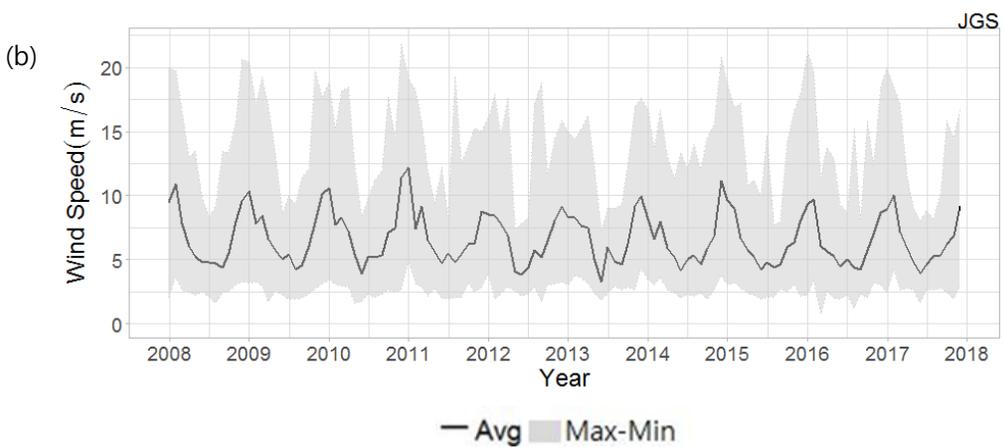
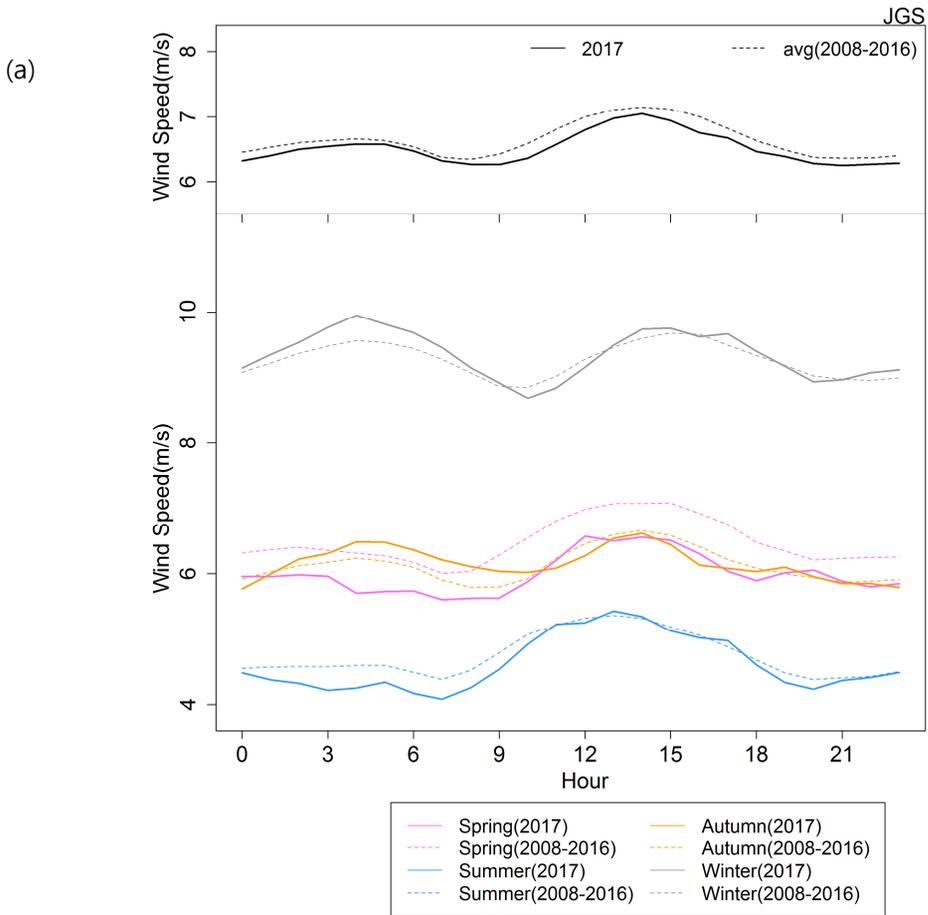


그림 2.6 고산에서 관측한 풍속의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화(2008 ~ 2017년).

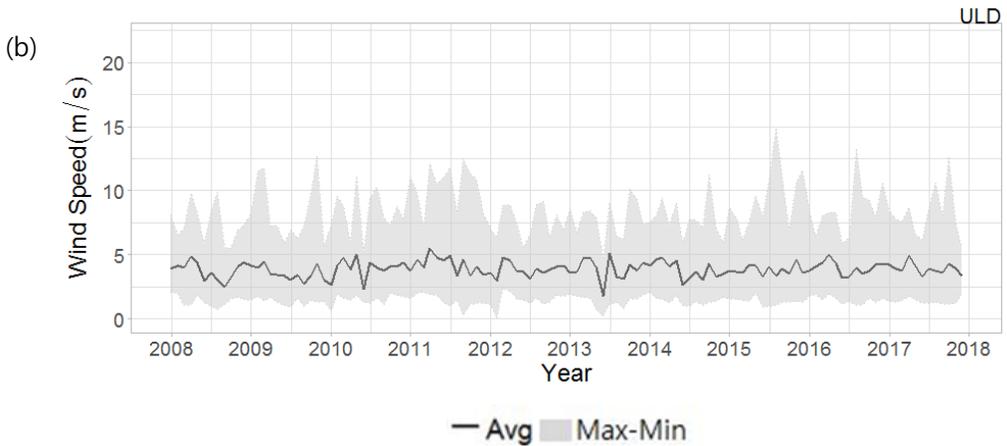
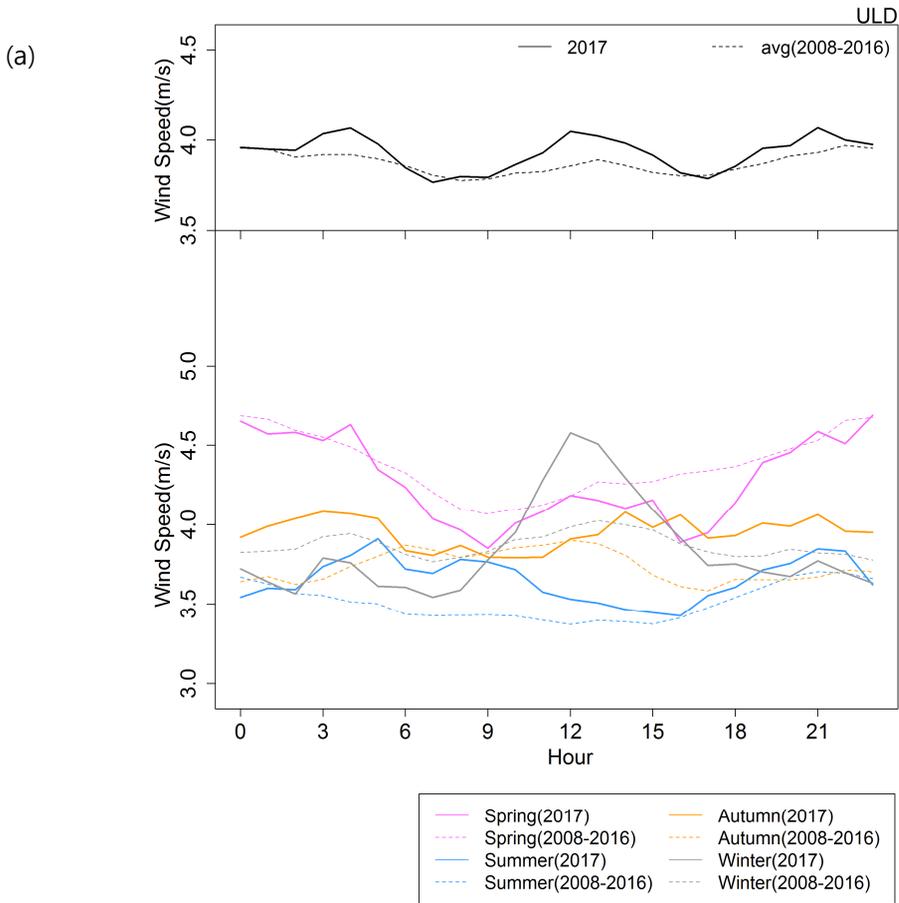


그림 2.7 울릉도에서 관측한 풍속의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화 (2008 ~ 2017년).

## 다. 기온

각 감시소의 2017년 평균 기온과 계절별 기온의 일변화를 2008 ~ 2016년 평균값과 비교하였고 2008년부터 2017년까지의 연변화와 함께 그림 2.8, 2.9, 2.10에 나타내었다. 일변화에는 시간평균값을 사용하였고, 연변화에는 일평균값을 사용하였다.

2017년 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 2017년 평균 일변화는 지난 9년 평균 일변화보다 모든 시간대에서 0.5 ~ 1℃ 이내로 높았다.

2017년 기온의 계절별 평균값은 모든 감시소에서 여름 > 봄 > 가을 > 겨울의 순서로 높았고, 봄철을 제외하고 모든 계절이 지난 9년의 평균 일변화보다 높았다.

안면도와 울릉도는 비슷한 위도대에 위치하여 연평균 기온이 비슷하고 연변화경향 또한 2008년부터 2012년까지 점차 낮아졌다가 2015 ~ 2016년까지 높아진 후 2017년이 전년도에 비해 낮은 경향이 같았다. 제주도는 두 감시소에 비해 더 남쪽에 위치하여 두 감시소보다 연평균 기온이 높고 변화 경향도 달랐다.

표 2.5 안면도, 고산, 울릉도 기후변화감시소의 연평균 기온(2008 ~ 2017년)

[단위:℃]

연도	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

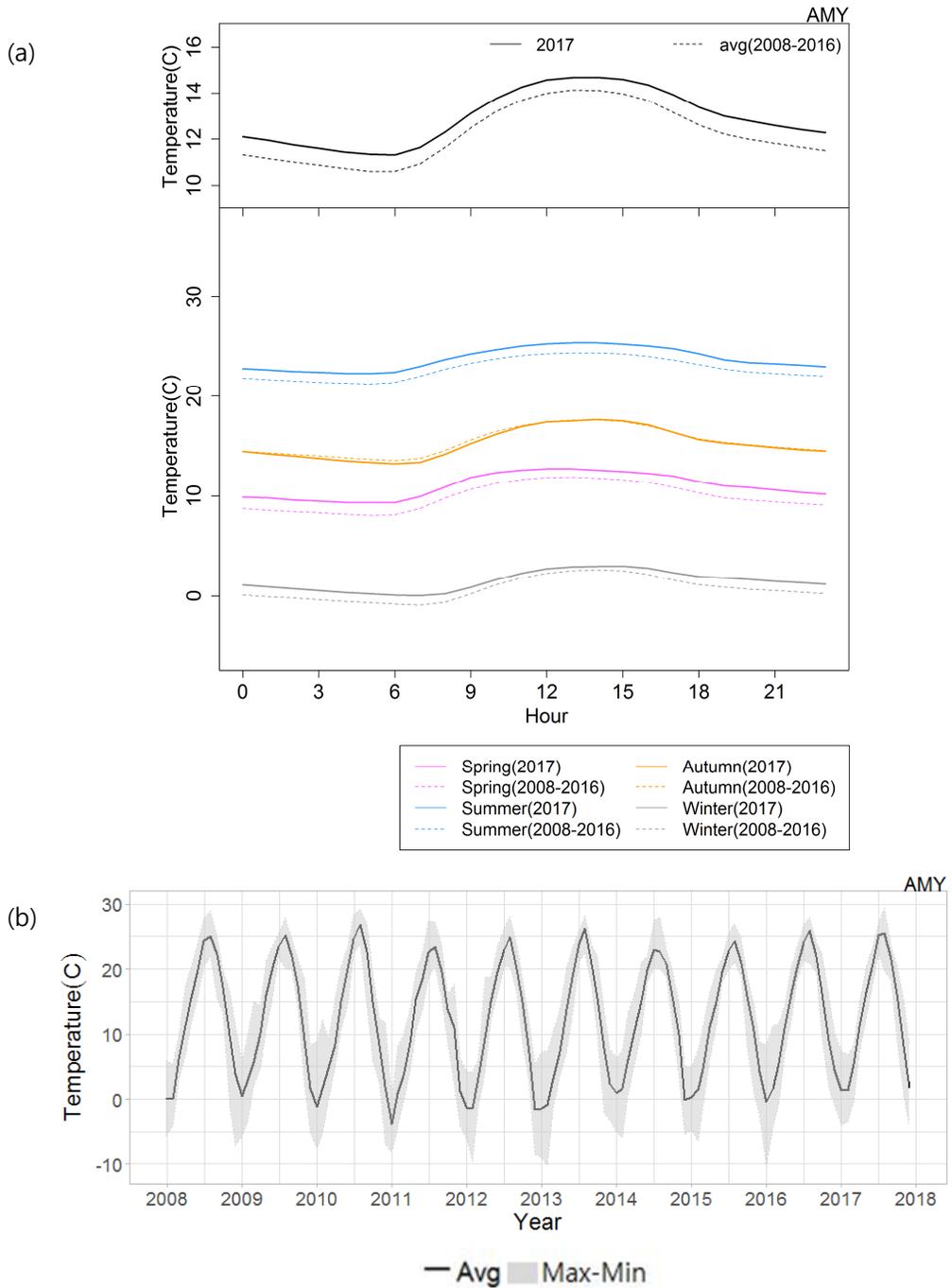


그림 2.8 안면도에서 관측한 기온의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화 (2008 ~ 2017년).

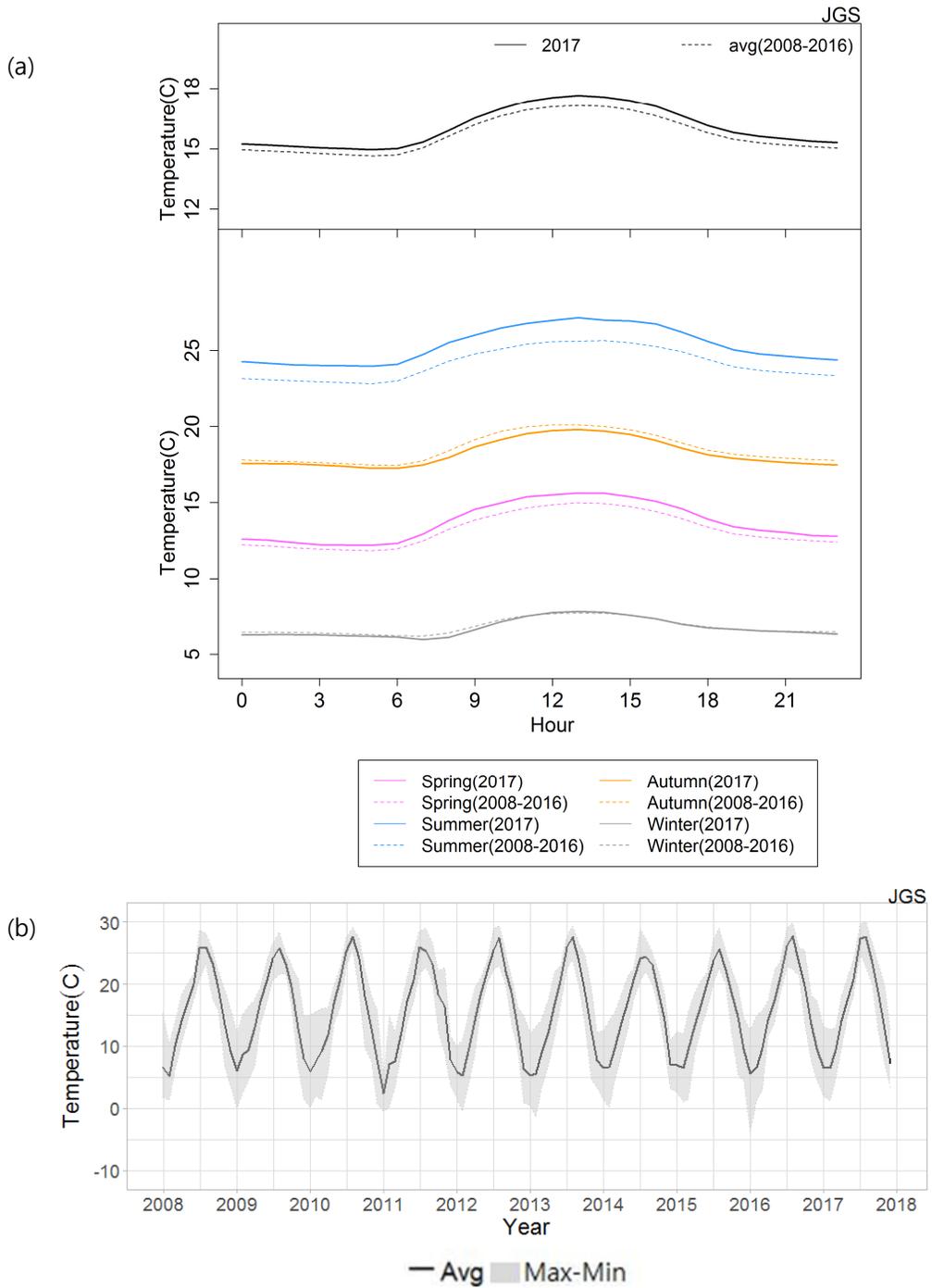


그림 2.9 고산에서 관측한 기온의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화(2008 ~ 2017년).

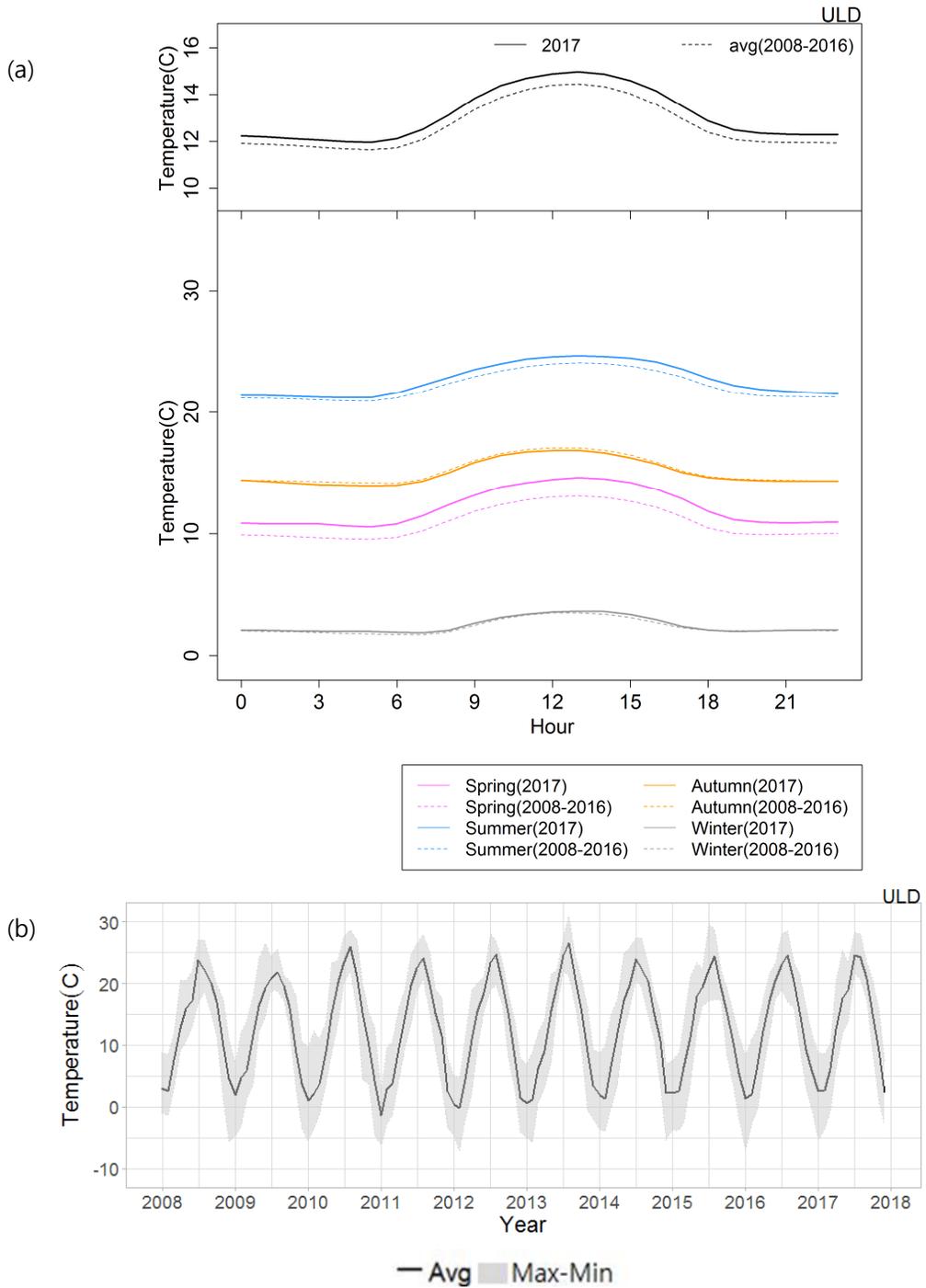


그림 2.10 울릉도에서 관측한 기온의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화 (2008 ~ 2017년).

## 라. 습도

각 감시소의 2017년 평균 습도와 계절별 습도의 일변화를 2008 ~ 2016년 평균값과 비교하였고 2008년부터 2017년까지의 연변화와 함께 그림 2.11, 2.12, 2.13에 나타내었다. 일변화에는 시간평균값을 사용하였고, 연변화에는 월평균값을 사용하였다.

2017년 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 2017년 평균 일변화값은 지난 9년 평균 일변화값보다 모든 시간대에서 3%정도 높았고, 고산의 경우는 2017년과 지난 9년이 비슷하였다.

2017년 습도의 계절별 평균값은 안면도에서 여름 > 봄 > 가을 > 겨울의 순서로 높았고, 감시소에서는 여름 > 가을 > 봄 > 겨울의 순서로 높았으며, 울릉도에서는 여름 > 가을 > 겨울 > 봄의 순서로 높았다. 안면도와 울릉도는 모든 계절에서 지난 9년의 평균 일변화보다 높았고 고산은 낮았다.

연변화 경향을 보면 안면도에서 습도가 2008년 연평균 74.6%에서 2014년 80.9%로 증가한 이후 2017년 73.6%로 다시 감소하였다. 고산에서는 2008년부터 습도가 대체로 증가하였으며 2017년 연평균은 77%로 전년도 78%에 보다 감소하였고, 울릉도는 2008년 연평균 72.3%에서 증가와 감소를 반복하다가 2017년 평균은 64.8%로 감소하였다.

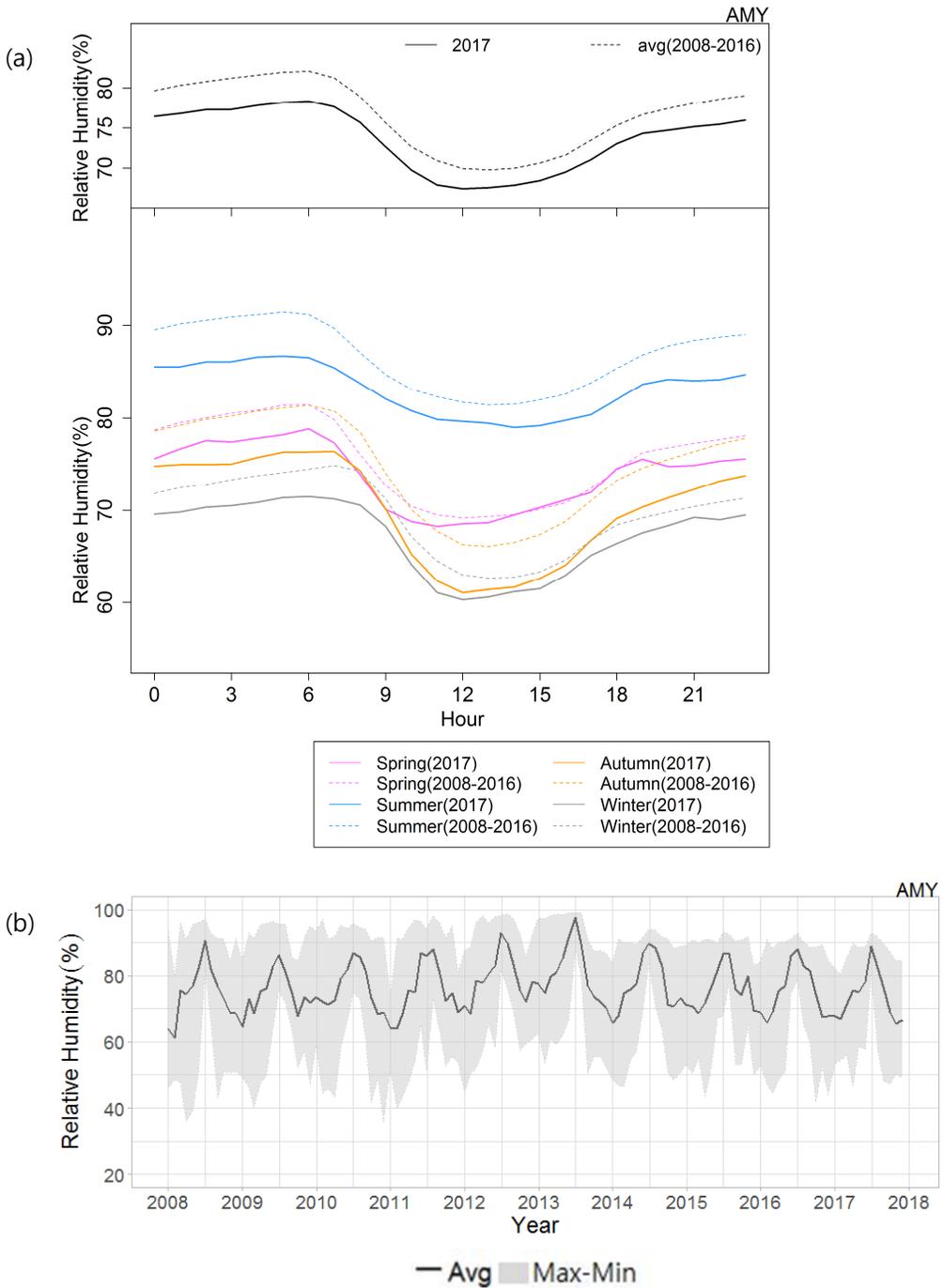


그림 2.11 안면도에서 관측한 습도의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화 (2008 ~ 2017년).

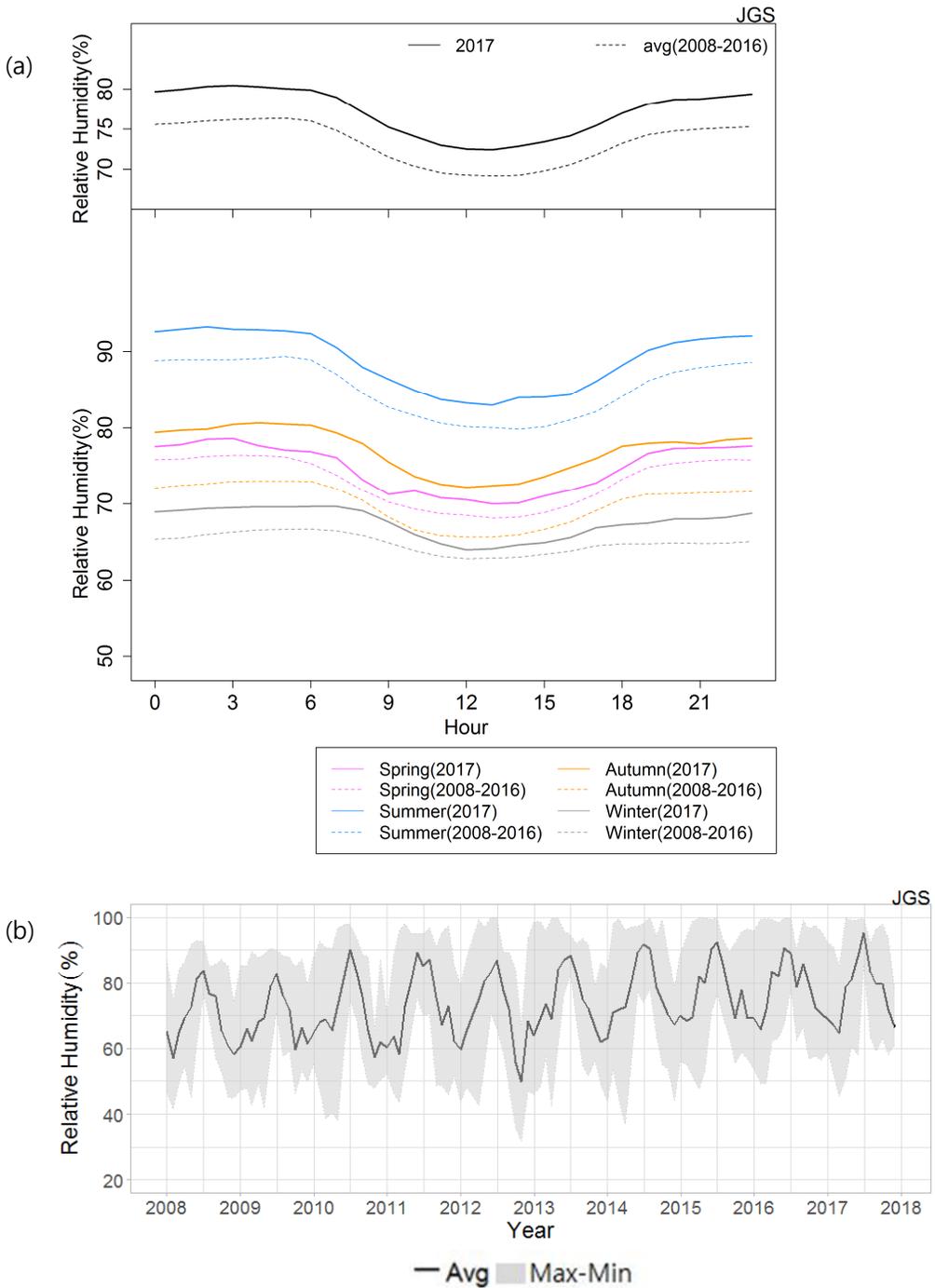


그림 2.12 고산에서 관측한 습도의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화 (2008 ~ 2017년).

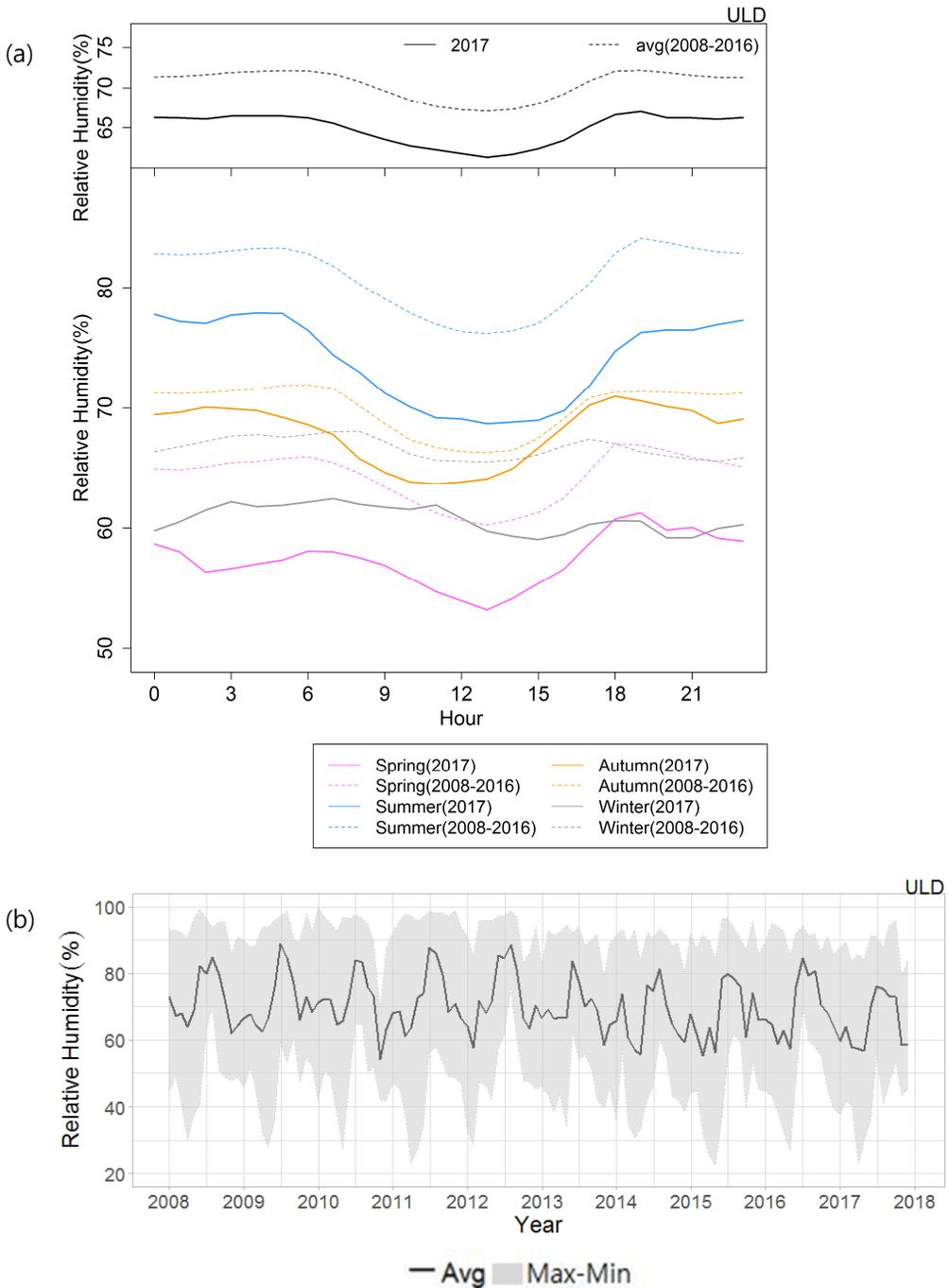


그림 2.13 울릉도에서 관측한 습도의 (a) 연간 일변화와 계절별 일변화, (b) 연변화 (2008 ~ 2017년).

## 제3장 분야별 관측·분석 결과

### 3.1 온실가스

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

2017년 10월 WMO는 2016년의 전지구 평균 온실가스 농도를 발표하였으며, 이 때 CO<sub>2</sub> 403.3 ppm, CH<sub>4</sub> 1853 ppb, N<sub>2</sub>O 328.9 ppb로 나타났다. 이들 온실가스는 산업화이전(1970년대 이전)보다 145%, 257% 그리고 122% 증가했다. 특히 최근 70년간 CO<sub>2</sub>의 증가율은 빙하기말 6300년 동안의 증가율과 같아 기간대비 약 100배의 빠른 증가속도를 보인다. 또한 현재 CO<sub>2</sub>의 농도 수준은 플라이오세 중기(3 ~ 5백만년전)과 비슷하며, 이 때 기온은 현재보다 2~ 3℃ 높았고, 해수면은 10 ~ 20 m 높았다고 알려져 현재 CO<sub>2</sub> 농도 수준이 기후에 영향을 줄 수 있음을 시사하였다(WMO, 2017).

기상청은 안면도(1999 ~ ), 고산(2012 ~ ), 울릉도독도(2014 ~ ) 기후변화감시소에서 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 세종기지에서도 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도를, 광릉수목원에서 산림 CO<sub>2</sub> 플럭스를 측정하고 있다. 기상청은 안면도 기후변화감시소의 관측을 기준으로 1999년부터 현재까지 총 19년간의 온실가스 배경대기농도 관측자료를 확보하고 있다.

기상청이 관측에 사용하는 온실가스의 척도는 CO<sub>2</sub>는 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 마우나로아에서 최초로 관측을 시작했을 때의 척도와 이어져 있다. 이 최초척도(Primary scale)는 현재 미국해양 대기청(NOAA/ESRL/GMD)으로 이관되어 유지되고 있으며, 전세계로 보급하고 있다. 현재 기상청은 본 척도를 기준하여 바탕대기가 자연대기인 표준가스를 제조하여 사용한다. 연화불화탄소류의 경우 한국표준과학연구원의 척도를 이용하며, 중량법으로 제조된 가스를 직접 주입하여 자료값 확정에 활용한다. 따라서 연화불화탄소류의 경우 표준가스의 서로 다른 척도로 인해 타 관측소와 비교 시 값의 차이가 있을 수 있다.

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 측정하기 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 정확하다.

### 3.1.1 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)

#### 가. 기후변화감시 기본관측소(안면도, 고산, 울릉도독도)

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

모든 온실가스의 전지구 복사강제력은 산업화이전 시기(1750년 이전)와 비교하여  $2.83 \text{ W/m}^2$ 에 이르며 이 중 이산화탄소가 차지하는 전지구 복사강제력은  $1.83 \text{ W/m}^2$  (64.3%)에 이르는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2013).

2017년 안면도에서 관측된 이산화탄소 연평균 배경대기 농도는 412.2 ppm이다. 안면도에서 처음 이산화탄소 농도를 관측한 1999년 연평균 농도 371.2 ppm과 비교하여 19년간 41 ppm 증가하였으며 1999년 농도 대비 111% 증가하였다. 산업화 이전인 1750년 이산화탄소 전지구 평균농도 278.0 ppm와 비교하면 148% 증가한 값이다.

안면도 이산화탄소는 전년도에 비해 2.3 ppm 증가하였으며, 지난 10년간 안면도에서 관측된 이산화탄소 연간 증가값의 평균인 2.4 ppm/yr와 비슷한 농도 수준이다. 미국해양대기청(NOAA)에서 발표한 2017년 전지구 이산화탄소 농도는 405 ppm으로 전년도에 비해 2.1 ppm 증가했으며, 지난 10년간의 연간 증가값의 평균인 2.2 ppm/yr과 비슷하다. 고산은 411.8 ppm으로 전년도보다 2.3 ppm 증가하였으며 지난 5년간의 평균값인 2.5 ppm/yr와 흡사하다. 울릉도는 409.7 ppm으로 전년도보다 2.2 ppm 증가하였다. 이산화탄소의 측정을 최초로 시작했던 마우나로아 또한 비슷한 증가값을 보였다. 안면도, 고산, 울릉도의 2017년 연평균 농도는 전지구 평균보다 약 7.2 ppm, 6.8 ppm, 4.7 ppm 정도 높다.

지난 2015년과 2016년 전례없던 엘니뇨의 영향으로 증가값이 평년수준보다 높았으나, 2017년엔 다시 10년 평균 수준의 증가를 보였다.

안면도와 지구상에서 가장 오래된 관측기록을 가진 미국 하와이 마우나로아(Mauna Loa,  $19.54^\circ \text{ N}$ ,  $155.58^\circ \text{ W}$ ), 그리고 NOAA에서 관측한 전지구 평균 이산화탄소 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 이산화탄소 농도가 증가하고 있으며, 그 증가 기울기가 유사하다.

표 3.1.1 2017년 안면도, 고산, 울릉도, 마우나로아, 전지구의 CO<sub>2</sub> 농도 (ppm)

	안면도	고산	울릉도	마우나로아 <sup>1</sup>	전지구 <sup>1</sup>
2017년 평균값	412.2	411.8	409.7	406.5	405.0
2016년 대비 절대 증가값 <sup>2</sup>	2.3	2.3	2.2	2.3	2.1
지난 10년간 절대 증가값 평균 (2008년 ~ 2017년)	2.4 ppm/yr	-	-	2.3 ppm/yr	2.2 ppm/yr

<sup>1</sup> 본 보고서에 명시된 전지구와 마우나로아 농도는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

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

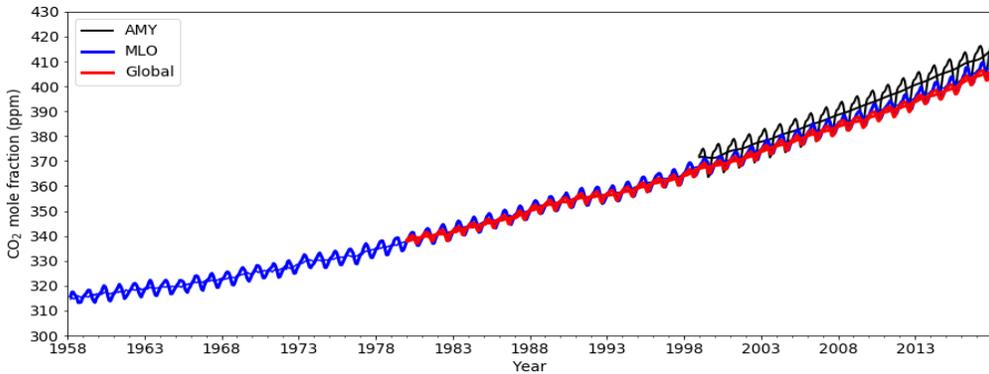


그림 3.1.1 안면도(검정색), 마우나로아(파란색), 전지구(붉은색)의 이산화탄소 농도.

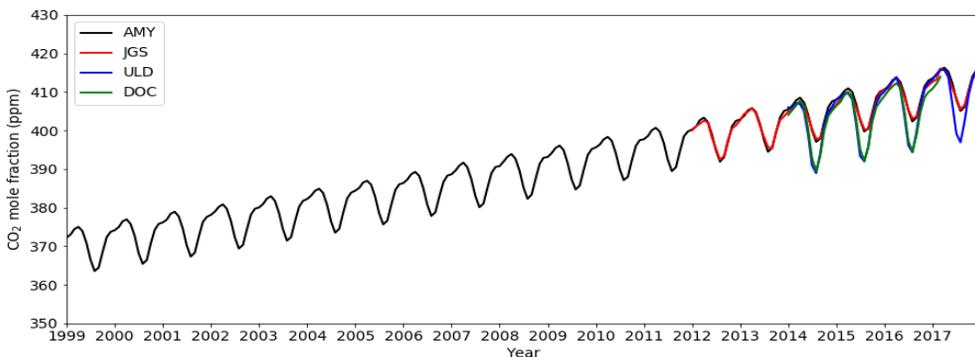


그림 3.1.2 1999년부터 2017년까지 안면도(검은색), 2012년부터 2017년까지 고산(붉은색), 2014년부터 2017년까지 울릉도(파란색), 독도(녹색)의 CO<sub>2</sub> 배경대기 농도.

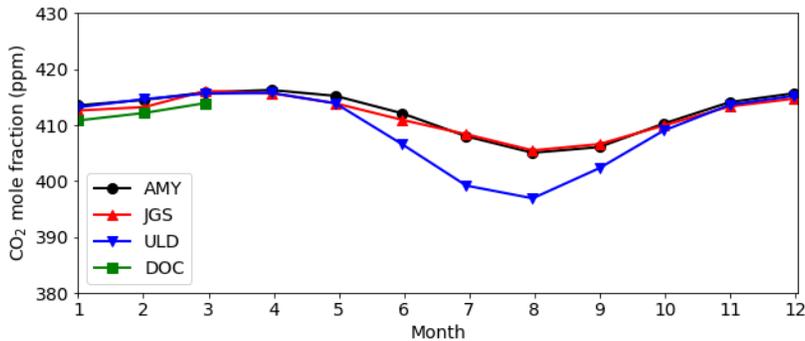


그림 3.1.3 2017년 안면도(검은색 원), 고산(붉은색 삼각형), 울릉도(파란색 역삼각형), 독도(녹색 사각형)의 CO<sub>2</sub> 계절변동.

그림 3.1.2은 1999년부터 2017년까지 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 이산화탄소 배경대기 농도 시계열이다. 안면도의 이산화탄소 농도는 1999년부터 꾸준히 증가하여 2012년에 처음으로 연평균 농도가 400 ppm (399.9 ppm)을 넘었다. 2015년까지 여름철에는 300 ppm 후반이 관측되었으나, 2016년부터는 월평균 전체가 400 ppm을 넘었고, 이는 제주도의 고산에서도 동일한 결과로 나타났다. 반면 현재까지 울릉도는 7월과 8월 여름철에 390 ppm 대의 농도를 보여 한반도 서쪽에 비해 농도가 낮다. 독도는 2017년 4월부터 측정장치의 문제 등으로 인하여 관측이 중단되어 공식기록을 제시 할 수 없으나, 3월까지의 월평균을 그림 3.1.2와 부록에 제시하였다.

2017년 안면도, 제주고산, 울릉도, 독도의 이산화탄소의 최댓값은 4월, 최솟값은 8월에 관측되어 평년과 비슷한 경향성을 나타냈다. 이러한 계절변동은 이산화탄소의 발생원과 흡수원, 주풍에 따른 이동에 의한 영향을 알 수 있는 지표가 된다. 안면도와 고산은 최댓값과 최솟값의 차이가 각각 11.2 ppm과 12.7 ppm으로 나타났으며 울릉도는 18.9 ppm을 나타냈다. 이들 값은 바다한가운데 있는 마우나로아 관측소의 최댓값과 최솟값의 차이인 약 6 ppm에 비해 두배 이상 크다. 최댓값과 최솟값의 차이는 이산화탄소의 발생원과 흡수원(식생 등)이 분포하고 있는 내륙에 가까울수록 큰 것으로 알려져 있다. 최댓값은 안면도 > 고산 > 울릉도 순으로 관측되었으며, 최솟값은 울릉도 > 고산 > 안면도 순으로 낮았다. 또한 최댓값들을 비교하였을 때 안면도와 울릉도의 차이는 0.5 ppm 이 나지만, 이들 관측소간 최솟값은 2 ppm의 차이를 보여 계절 변동 폭이 흡수원에 의해 크게 변할 수 있음을 나타냈다(그림 3.1.3).

## 나. 남극 장보고기지(위탁관측소)

남극장보고과학기지(74° 37.4' S, 164° 12.0' E, 이하 '장보고기지')는 동남극 북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 테라노바 만(Terra Nova Bay)에 위치한 한국의 두 번째 남극과학기지로 2014년 2월에 준공되었다. 장보고기지는 기상 관측, 라디오존데 및 오존존데를 이용한 고층 관측, 지상 온실기체 분석 등, 대기물리, 화학, 복사 등의 대기과학 전 분야에 걸친 연구 장비를 갖추고 있다.

장보고기지에서의 이산화탄소 관측은 본관동으로부터 북서쪽으로 약 1 km 떨어진 대기구성물질관측동에서 이루어지고 있다. 기지에서의 연중 주풍향은 북서풍 ~ 서풍으로 관측동은 기지의 풍상측에 위치하는 경우가 많다. 이산화탄소 농도 관측을 위하여 WS-CRDS (Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy) 방식의 CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O 분석기(G2301, Picarro, Inc., CA, USA)가 사용되며, 부속 장치로는 분석 시료로부터 수분을 제거하는 냉동 제습 장치, 기체 유입량과 주기적인 교정을 위한 유량 조절과 교정 장치가 설치되어 있다(그림 3.1.4). 관측동 옥상에 설치된 흡입구(지상으로부터 약 5 m)로부터 유입된 공기는 실내에 설치된 매니폴드(manifold)를 통해 냉동제습장치로 이동한다. 냉동제습장치는 -80 °C까지 냉각할 수 있는 콜드트랩을 이용하여 분석용 시료에 포함된 수분의 양을 0.001%이하로 낮춘다. 유량 조절 및 교정 장치는 기체분석기로 주입되는 유량을 일정하게 유지하며, 로터리밸브를 통해 주기적으로 교정가스를 주입한다. 2015년부터 2017년까지 한국표준과학연구원에서 제조한 세계의 교정용 표준가스를 3일 간격으로 주입하여, 기체분석기의 성능을 주기적으로 점검하였다. 2017년 세 농도의 교정가스가 이용되었으나, 레귤레이터에서 가스 유출(leak)이 발생하여 7월 21일부터 11월 20일까지 2개의 교정가스만 이용되었다. 11월 20일 이후 레귤레이터를 교체한 후 다시 세 농도의 교정가스가 이용되었다. 한편, 관측동 흡입구에 실내 공기가 유입되는 현상이 발견된 3월 6일부터 4월 5일까지의 관측 자료는 분석에서 제외하였다.

그림 3.1.5는 2017년 장보고기지의 기상현황을 나타낸 것이다. 월평균 풍속은 3.2 ~ 6.0 m/s이었고, 순간 최대 풍속은 4월에 기록된 37.2 m/s이었다. 연중 월평균 기온은 영하로, -1.2 ~ -23.7 °C 이며, 연평균 기온은 -15 °C이었다. 2017년 기지의 주풍향은 245 ~ 275 ° 로 25%를 차지했고, 기지 주변의 주요오염배출원인 발전동이 위치한 165 ~ 185 ° 의 풍향이 차지하는 비율은 1.4%였다. 분석을 위해 측정된 이산화탄소 농도는 크게 세 가지 조건 중 하나에

부합되면 제거되었다; 오염된 자료를 제거하기 위해 이산화탄소 분석기와 같은 곳에 측정된 블랙카본 농도를 풍향에 따라 분석에 기초하여 1) 관측된 블랙카본의 농도를 기준으로  $100 \text{ ng/m}$  이상인 경우, 2) 풍향이 주요오염원인 발전동이 위치한  $165 \sim 185^\circ$  인 경우, 그리고 3) 월동대원의 기록에 근거하여 관측동 주변의 오염이 의심되는 경우이다.

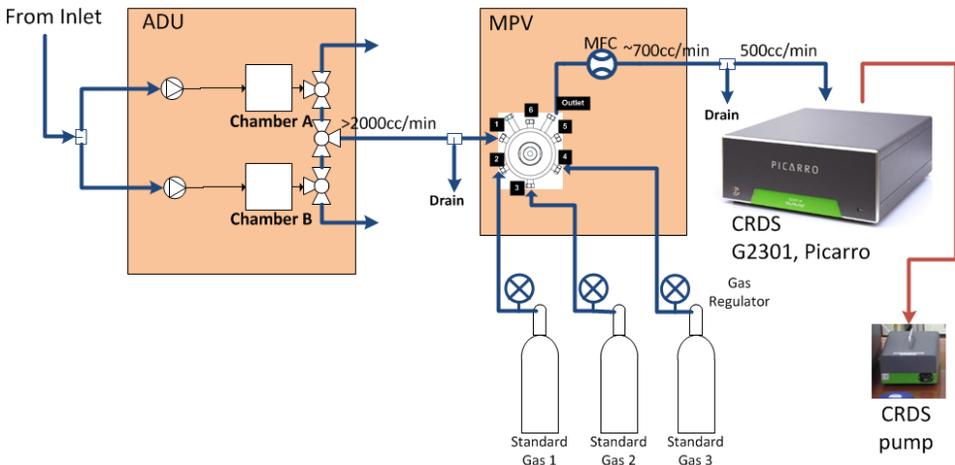


그림 3.1.4 분석 장비 개요도. (좌) ADU(Automatic Dehumidifying Unit, 냉동제습장치), (중) MPV (Multi-Positioning Valves, 유량조절), 교정 장치와 교정가스 그리고 (우) CRDS 가스분석기와 펌프.

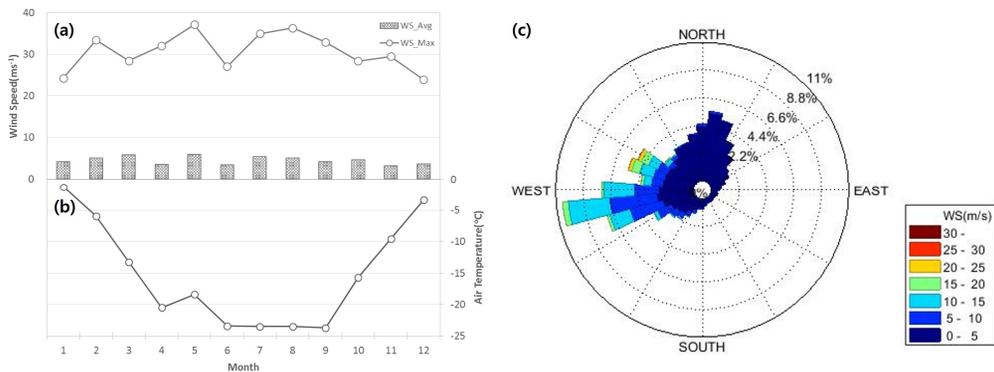


그림 3.1.5 2017년 장보고기지 기상 현황(기온 및 바람장미).

이산화탄소 농도 관측은 매 2 ~ 3초마다 이루어진다. 따라서 10분간 관측된 자료의 수는 약 200 ~ 210개이다. 우선, 10분 동안 통계값 산출 후 표준편차의 2배 이상을 벗어나는 자료를 제외한 후, 30초 자료 구간마다 중앙값(median) 20개로부터 산술평균을 구하여 10분 대푯값으로 정의하였다. 시간 평균으로부터 일평균을 산출 후, 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 추세를 산출하였다. 이후 절차는 기상청의 온실기체 자료 처리 방법에 따랐으나, 단주기성분 제거를 위한 저주파수 필터를 적용하지 않았다. 스펙트럼 분석을 통해 관측되는 자료의 주기 특성을 분석한 결과,  $0.2 \text{ day}^{-1}$  보다 짧은 주기에서는 뚜렷한 신호는 없었다. 남극에서 기존 연구 결과(Gillette et al., 1987)에 의하면 관측되는 자료는  $0.2 \text{ day}^{-1}$ 보다 짧은 신호는 국지적 오염의 가능성을 시사한다.

그림 3.1.6은 2017년에 장보고기지에서 관측된 일평균 이산화탄소 농도의 변동을 나타낸다. 2017년 일평균 이산화탄소는 400.6 ppm (2월 9일)에서 403.9 ppm (10월 21일)의 범위를 보여, 연중 400 ppm 이상을 유지하였다. 해양에 의한 이산화탄소 흡수가 우세한 여름철(1 ~ 2월)에 낮은 농도를 보이다가 겨울철로 가면서 높아지고, 여름이 도래하면서 다시 낮아지는 패턴을 보였다. 2017년 연평균 이산화탄소 농도는 402.5 ppm이었으며, 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 산정한 연증가율은 2.49 ppm/yr이었다. 이는 2017년 전 지구 평균 이산화탄소 농도 증가율, 2.34 ppm/yr보다 다소 큰 수준이었다([www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends)). 이 값은 앞서 제시한 절대증가값과는 다른 개념으로 산출된다.

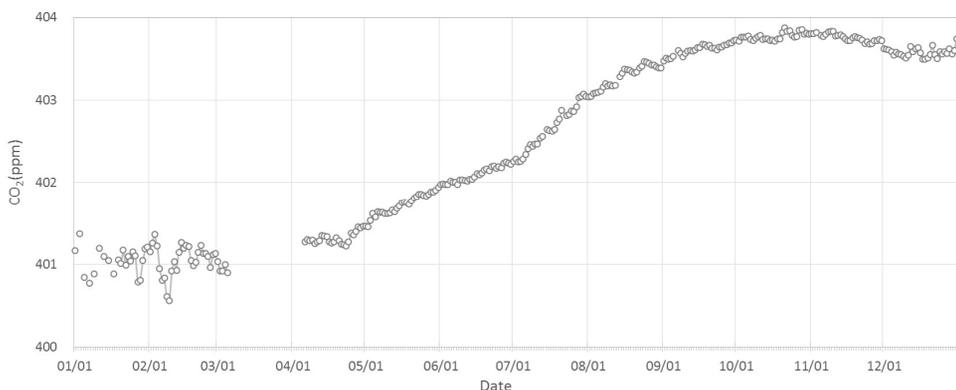


그림 3.1.6 남극장보고과학기지에서 측정된 2017년 일평균 이산화탄소 농도의 변동.

## 다. 산림생태계 이산화탄소(서울대학교(광릉), 위탁관측소)

광릉 관측지는 KoFlux (Korean Flux Monitoring Network; <http://ncam.kr/page/koflux/database/index.php>)의 주요 관측지로 한반도 중서부에 위치한 경기도 포천시 소재 국립수목원내 활엽수림 지역(37 ° 44' 56" N, 127 ° 8' 57" E, 252 m a.s.l.)에 위치한다. 광릉 산림은 500년간 훼손되지 않는 숲으로 국내에서 가장 잘 보존된 자연림으로 꼽힌다. 광릉 관측지는 80 ~ 200년 수령의 졸참나무(*Quercus serrata*)와 서어나무(*Carpinus laxiflora*)가 주종을 이룬다(Lee et al., 2007). 군락 높이(canopy height)는 평균 18 m이고 최대 엽면적지수(leaf area index)는 약 6으로 여름에 나타난다. 토양은 사양토(75%), 사질식양토(13%), 사토(12%)를 함유하고 있다.

이산화탄소 플럭스 관측을 위한 에디 공분산 시스템은 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(footprint), 접근성 등을 고려하여 플럭스 타워의 40m 높이에 설치되어 있다(그림 3.1.7). 에디 공분산 시스템은 삼차원 초음파 풍향풍속계(모델 CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 고속반응 폐회로 적외선 기체분석기(모델 EC155, Campbell Scientific Inc.)로 구성되어 있다. 삼차원 풍속과 이산화탄소 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 지면에서 군락 위의 대기 중 이산화탄소 농도의 변화를 관측하고 있다. 프로파일 시스템의 노후화로 2013년 7월부터 해당 관측이 중단되었으며, 2014년 10월에 새로운 시스템(모델 AP200, Campbell Scientific Inc.)을 설치하여 관측을 재개하였다. 새로운 프로파일 시스템에서는 폐회로 적외선 기체분석기(모델 LI-840, LI-COR Inc., USA)를 통해 이산화탄소 농도분석이 초당 2회씩 이뤄지고, 전체 높이 분석시간은 120초/회이며, 30분 평균자료를 집록기(모델 CR1000, Campbell Scientific Inc.)에 저장되고 있다.

기체분석기 보정은 에디 공분산 시스템의 경우 연 2회 장비를 현장으로부터 회수하여 실내에서 내외부 청소와 필터 및 화학물질 교체 등을 비롯한 기기 유지보수와 함께 수동 보정을 수행하며, 프로파일 시스템의 경우 일 1회(자정) 자동으로 이뤄지며, 추가로 격주마다 현장에 방문해 기체흡입구 청소와 필터 교체 등을 비롯한 기기 유지보수와 함께 수동 보정을 수행한다. 에디 공분산 시스템의 경우 이산화탄소 농도의 '분산'을, 프로파일 시스템의 경우 이산화탄소 농도의 '평균'을 정확히 관측하는 것을 목적으로 하기에, 본 보고서에는 에디 공분산

시스템에서 관측된 이산화탄소 플럭스와 프로파일 시스템에서 관측된 이산화탄소 농도를 보고하였다. 2017년도 에디 공분산 시스템에서 관측된 이산화탄소 플럭스의 품질관리 후 자료 수득률은 41%, 프로파일 시스템에서 관측된 이산화탄소 농도의 품질관리 후 자료 수득률은 99% 로 작년과 비슷한 수준이었다.

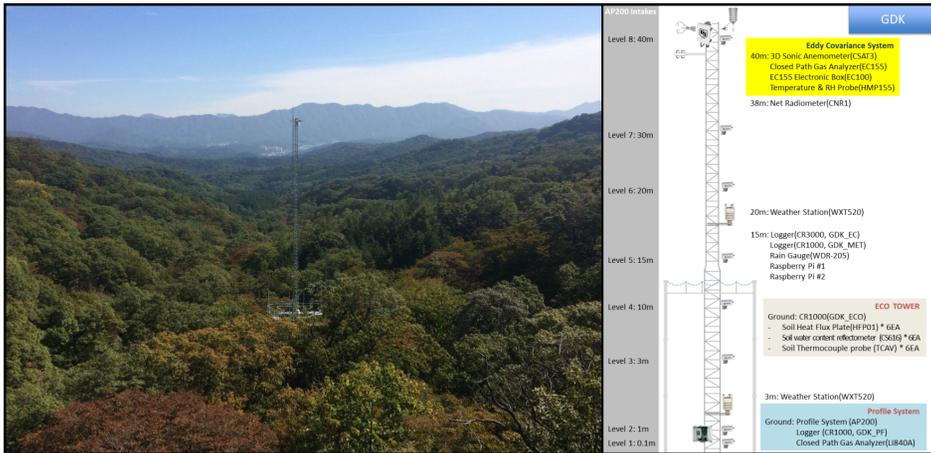


그림 3.1.7 광릉 활엽수림 타워의 모습(좌)과 관측장비 모식도(우).

그림 3.1.8은 에디 공분산 시스템에서 관측된 이산화탄소 플럭스의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 이산화탄소 플럭스는 40 m 높이에서 에디 공분산 시스템이 관측하는 발자국 영역(예를 들면 200 ~ 1000 m) 내를 대표하는 값이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5월 ~ 9월)동안 이산화탄소 플럭스는 밤에는 양의 값(이산화탄소 배출)을 갖고, 낮에는 음의 값(이산화탄소 흡수)을 갖는 뚜렷한 일 변동을 보였다.

그림 3.1.9는 프로파일 시스템으로 관측된 이산화탄소 농도의 월별 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 이산화탄소 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 이산화탄소 농도이다. 식생의 활동이 활발한 기간(5월 ~ 9월) 동안 이산화탄소 농도는 밤에는 증가하고, 낮에는 감소하는 뚜렷한 일 변동을 보였다. 이는 앞에서 확인한 밤에 식생 및 토양의 호흡으로 농도가 증가하고 낮에 광합성 작용으로 농도가 감소한 것에 기인한다.

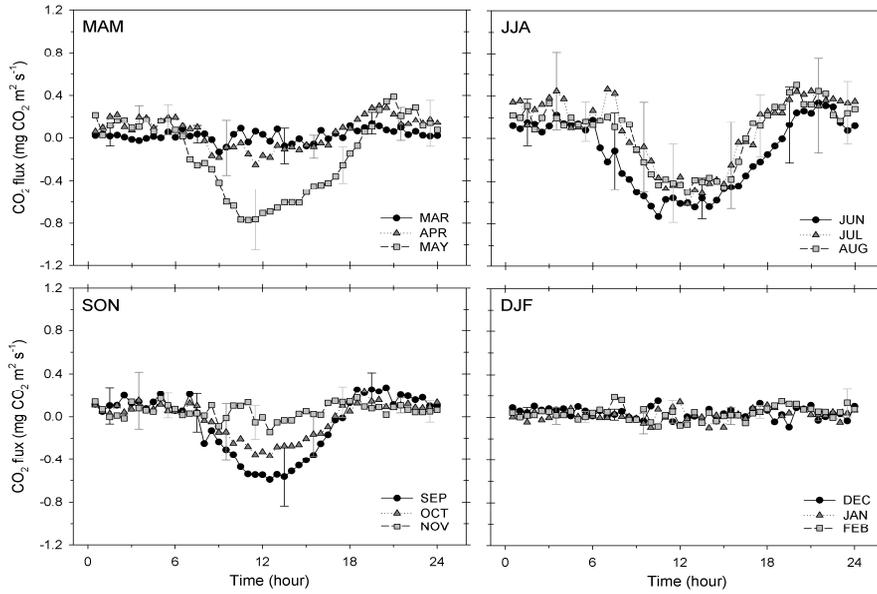


그림 3.18 광릉 활엽수림의 월별 이산화탄소 플럭스의 평균 일 변동.

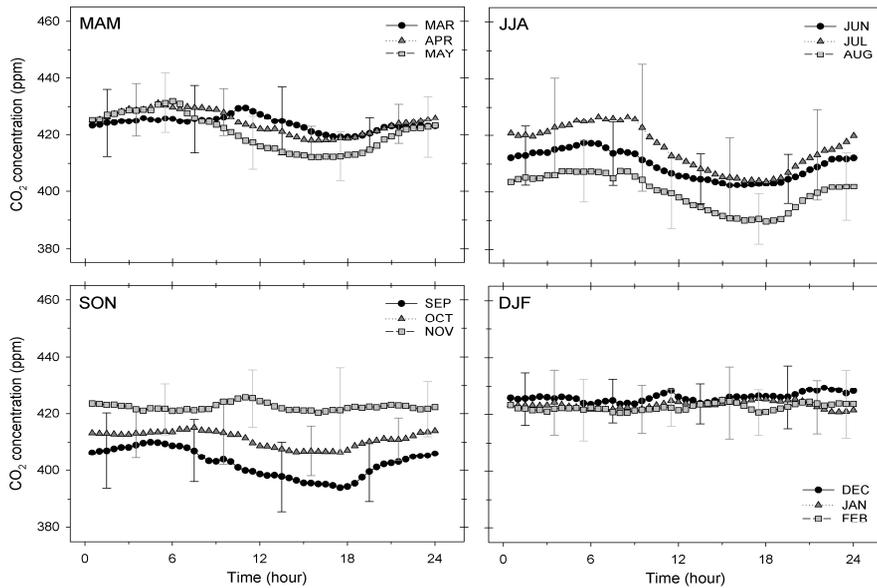


그림 3.19 광릉 활엽수림의 월별 이산화탄소 농도의 평균 일 변동.

일적산 이산화탄소 플럭스(야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료)는  $-5 \sim 6 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 의 변동 범위를 보였다. 개엽 후인 4월 말부터 이산화탄소 흡원으로 나타나다가 장마기간 이산화탄소 증립 또는 발원으로 변했다. 이후 다시 이산화탄소 흡원으로 나타나다가 낙엽이 지기 시작하면서 다시 탄소 발원으로 바뀌었다(그림 3.1.10).

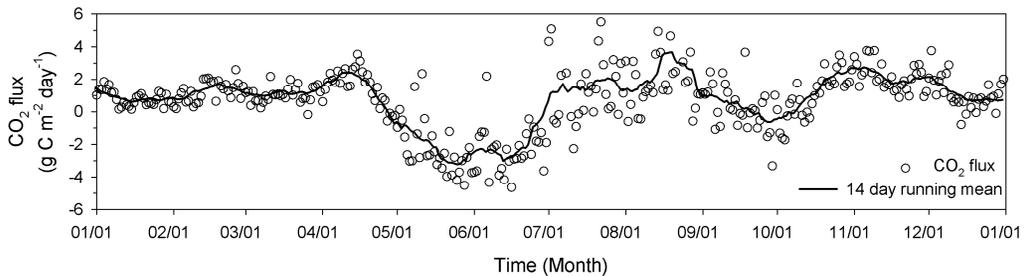


그림 3.1.10 광릉 활엽수림의 일적산 이산화탄소 플럭스 (야간 플럭스 자료 보정 및 결측 메우기 후 자료).

일평균 이산화탄소 농도는 380 ~ 450 ppm의 변동 범위를 보였으며, 개엽(4월 말)의 시작과 함께 꾸준히 감소하여, 식생의 활동이 최대인 8월 말에 최솟값을 보였다(그림 3.1.11). 이러한 이산화탄소 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 3.1.12). 2017년에는 개엽이 4월 말부터 시작하여 예년과 비슷했다.

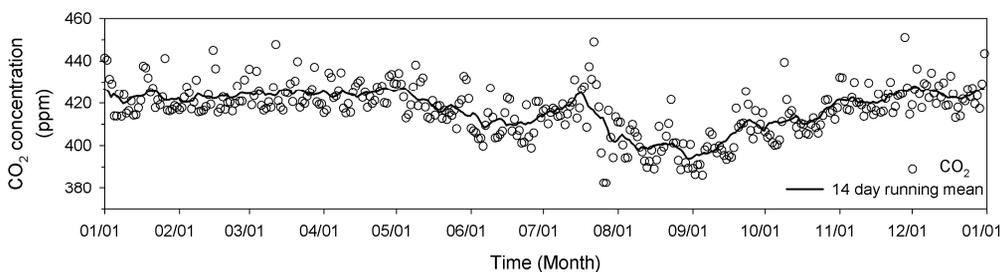


그림 3.1.11 광릉 활엽수림의 일평균 이산화탄소 농도.

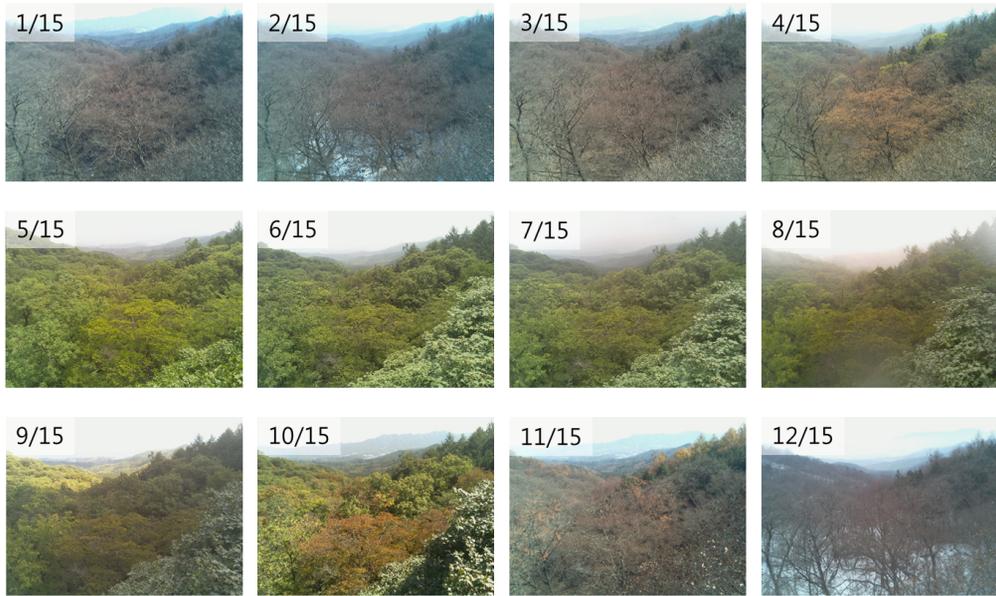


그림 3.1.12 활엽수림 타워에서 촬영한 타워 주변 경관(사진 좌측상단에 촬영 날짜 표기).

### 3.1.2 메탄(CH<sub>4</sub>)

메탄은 이산화탄소 다음으로 중요한 온실가스 중 하나로 ppb(part per billion, 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 아이스코어를 분석한 결과 현재 관측되고 있는 메탄의 농도는 지난 650,000년 동안 최고의 농도로 나타났다가(IPCC, 2013). 과거 1000 A.D.와 1800 A.D. 사이에 북반구와 남반구의 메탄 농도 차이는 약 24 ~ 58 ppb로 나타났으나, 1984년부터 2012년까지의 자료를 비교하였을 때 그 차이값이 135 ppb에 이르렀다. 이는 명백한 북반구의 인위적인 혹은 자연적인 배출량이 증가했기 때문이다(Etheridge et al., 1998). 메탄의 배출원은 습지, 바다, 대지의 사용, 쌀농사, 발효, 화석연료 등 다양한 인위적·자연적 요소가 다양하게 존재하는 반면, 소멸원은 주로 OH라디칼로 알려져 있다. 메탄은 한번 배출되면 약 9년 정도 대기 중에 체류하고, 다른 온실가스 중에 비해 체류시간이 짧기 때문에 정책적으로 배출량을 줄이면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다.

전세계적으로 메탄의 농도는 1999년부터 2006년까지 증가가 둔화되었다가 다시 2007년부터 꾸준히 증가하는 것으로 나타난다. 안면도도 결측된 기간이 많지만 이러한 경향성을 잘 반영한다(그림 3.1.13). 안면도는 1999년부터 2006년까지 평균 절대 증가값이 약 1 ppb/yr로 관측되었으나, 최근 10년 동안은 8 ppb/yr로 증가하였으며, 2016년과 2017년 사이의 증가값 5 ppb/yr은 과거 10년과 비슷하다. 전지구와 마우나로아 또한 1999년부터 2006년까지 거의 증가하지 않다가, 지난 10년간 7 ppb/yr의 수준으로 증가하였으며, 2016년도에 비해 2017년도는 전 지구는 8 ppb, 마우나로아는 6 ppb 증가한 것으로 나타났다.

표 3.1.2 2017년 안면도, 마우나로아, 전지구의 CH<sub>4</sub> 농도 (ppb)

	안면도	마우나로아 <sup>1</sup>	전지구 <sup>1</sup>
2017년 평균값	1970	1868	1850
2016년 대비 절대 증가값 <sup>2</sup>	5	6	8
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2008년 ~ 2017년)	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 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 향후 변경될 수 있음. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

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

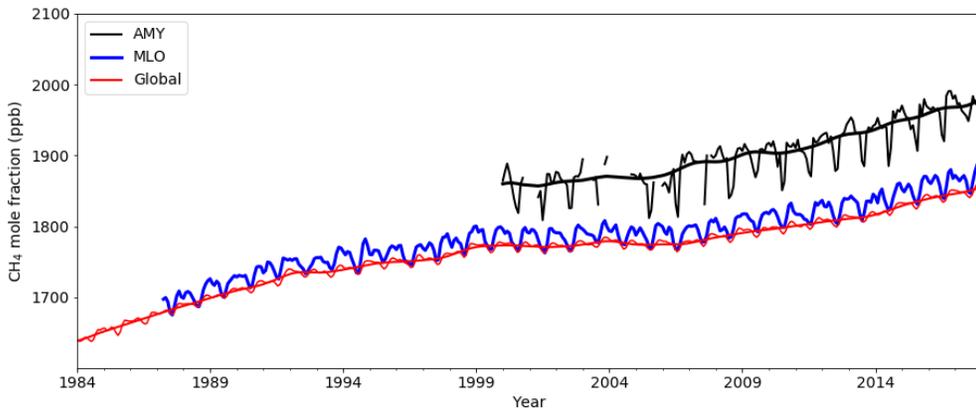


그림 3.1.13 안면도(검정색), 마우나로아(파란색), 전지구(붉은색)의 CH<sub>4</sub> 농도.

안면도의 2017년 연평균 농도는 1970 ppb로 전지구 평균인 1850 ppb보다 120 ppb 높고, 북반구 마우나로아의 평균인 1868 ppb보다 102 ppb 높다. 2017년 안면도의 메탄 농도는 최초 관측을 시작했던 1999년에 비해 109 ppb 증가하였으며, 산업화 이전의 농도를 700 ppb로 간주할 때 이 농도는 281% 증가한 값이다.

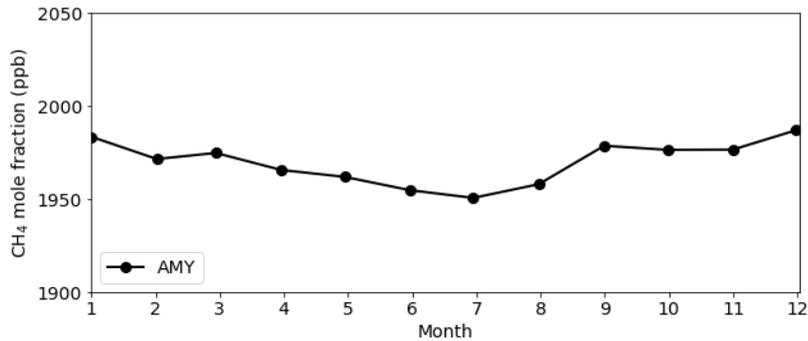


그림 3.1.14 안면도 감시소에서 관측한 CH<sub>4</sub> 의 계절변동.

메탄의 계절변동은 여러 배출원과 소멸원인 OH라디칼과 계절풍 등에 의해 일어난다. 특히 북반구에서 계절변동의 변동폭이 크며, 여름철 OH라디칼의 농도가 높아지면서 메탄과 반응하여 메탄의 농도는 낮아진다. 2017년 안면도는 7월에 가장 낮고 12월에 가장 높은 값을 보였다. 낮은 농도가 여름철에 나타나는 것은 거의 일정하지만, 높은 농도가 나타나는 것은 메탄의 기원인 습지나 생태소각등과도 관련이 높아 대기의 흐름에 따라 약간의 변동이 있을 수도 있다. 그러나 기본적으로 북반구의 전형적인 계절변동 특성은 여름철에 낮고 겨울철에 높은 값을 나타내며, 안면도도 이를 잘 반영한다(그림 3.1.14).

### 3.1.3 아산화질소(N<sub>2</sub>O)

아산화질소는 대기중 체류시간이 약 121년정도 되는 온실가스로 1750년부터 2012년사이 복사강제력이 전체 온실가스 중 6%를 차지하였다 (IPCC, 2013). 아산화질소는 인위적 온실가스 중 세 번째 높은 것으로 알려져 있으며, 산업화 이전에는 270 ppb 수준으로 존재하였다. 아산화질소의 자연기원은 해양, 토양 등이 있으며, 화석연료, 생태소각, 농업비료의 사용, 여러 산업공정에서 배출되는 인위적기원 등이 있다. 인위적 배출원과 자연적 배출원의 비율은 거의 같다. 아산화질소는 광분해에 의해 성층권에서 소멸되며 때론 오존층 파괴 과정에서 트리거로 사용되기도 한다. 그러나 아직도 아산화질소의 전체 순환에 대해서 이해하진 못했다.

표 3.1.3 2017년 안면도, 고산, 마우나로아, 전지구의 N<sub>2</sub>O 농도 (ppb)

	안면도	고산	마우나로아 <sup>1</sup>	전지구 <sup>1</sup>
2017년 평균값	331.4	331.0	330.5	330.0
2016년 대비 절대 증가값 <sup>2</sup>	1.4	0.9	1.1	1.1
최근 10년간 절대 증가값 평균 (2008년 ~ 2017년)	1 ppb/yr	-	0.9 ppb/yr	0.9 ppb/yr

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

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

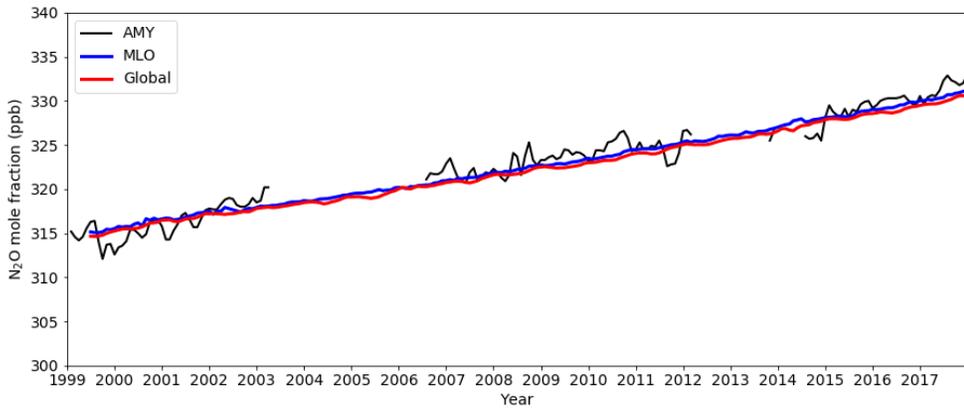


그림 3.1.15 안면도(검정색), 마우나로아(파란색), 전지구(붉은색)의 N<sub>2</sub>O 농도.

2017년 아산화질소의 농도는 안면도에서 331.4 ppb, 제주고산에서 331 ppb로 전년도에 비해 각각 1.4 ppb과 0.9 ppb 증가하였다. 지난 해 전지구 평균은 330 ppb, 마우나로아는 330.5 ppb로 안면도와 제주고산보다 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 1.1 ppb 증가했으며 지난 10년간 평균 절대 증가값인 0.9 ppb/yr와 비슷한 수준이다. 안면도 또한 지난 10년간 1 ppb/yr씩 증가한 것으로 관측되었다. 산업화 이전 아산화질소의 농도는 270 ppb 수준이었으며, 안면도는 산업화이전대비 122% 증가하였다.

1999년부터 2017년까지 안면도의 아산화질소의 농도를 마우나로아, 전지구

와 비교했을 때 그 기울기가 유사하게 나타났으나 변동폭이 컸다(그림 3.1.15). 보통 증가 기울기는 남반구(0.2 ppb/yr)에 비해 북반구가 높게 나타나며 그 이유는 북반구의 인구밀도가 높고 그로 인한 농업 등의 발달이 아산화질소의 증가율을 높인 것으로 알려졌다. 안면도와 고산 또한 주변 지역의 농업활동 등의 영향으로 마우나로아 보다 변동폭이 높게 나타났을 가능성이 있을 것으로 추측된다.

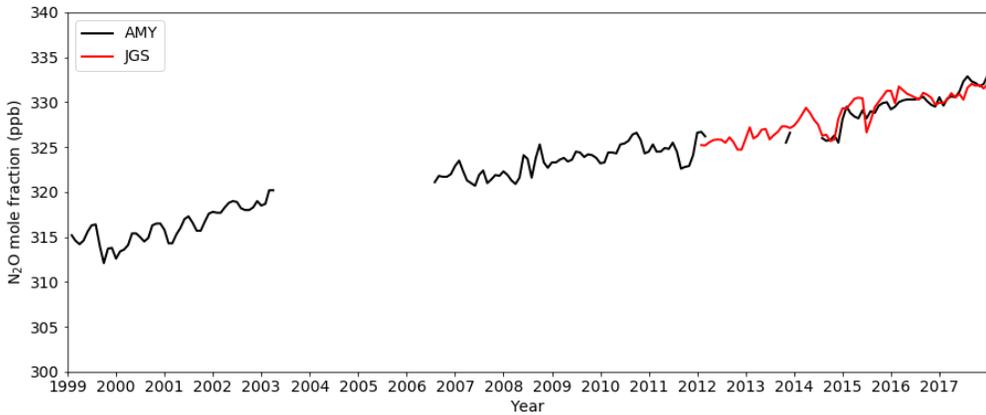


그림 3.1.16 안면도(검정색), 고산(붉은색)의 N<sub>2</sub>O 농도 비교.

### 3.1.4 육불화황(SF<sub>6</sub>)

육불화황은 ppt(part per trillion, 1조 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 100년을 기준으로 지구온난화지수가 이산화탄소보다 22,800배가 높아 향후 기후변화에 영향을 줄 수 있는 잠재력 높은 온실가스이다 (IPCC, 2013). 주로 전기의 절연체등으로 사용되며 적은 양이지만 마그네슘과 알루미늄 산업, 반도체 산업에서도 배출되어 대부분 산업에 기원한다. 대류권에는 소멸기작이 거의 없고 중간권에서 처음으로 분해가 시작되기 때문에 대류권에서 육불화황의 체류시간은 약 3200년으로 길며, 한번 대기로 배출되면 거의 선형으로 누적되어 빠르게 증가한다. 육불화황은 2007년 안면도를 시작으로 2016년 제주고산과 울릉도에 관측기기를 추가로 설치하여 2017년부터 공식적으로 관측을 시작하였다.

2017년 한반도의 육불화황 농도는 안면도 9.6 ppt, 고산 9.7 ppt, 울릉도 9.6 ppt 로 나타났으며, 관측소간 차이가 거의 없고(그림 3.1.17), 한반도의 값이 북

반구의 대표농도인 마우나로아 보다는 0.2 ~ 0.3 ppt 높다(그림 3.1.18). 반면, 전지구의 농도가 낮은 것은 북반구에 비해 활발하지 않은 산업활동으로 남반구에서의 육불화황 배출농도가 낮기 때문으로 추측한다. 안면도를 포함하여 전세계적으로 지난 10년간 0.3 ppt/yr 씩 증가했으며, 2016년과 2017년 사이 안면도는 0.1 ppt, 마우나로아와 전지구는 0.3 ppt 씩 증가하였다. 안면도의 경우 2016년 1달간 결측이 있어 그해 평균값에 영향을 주었을 가능성도 고려해야 한다.

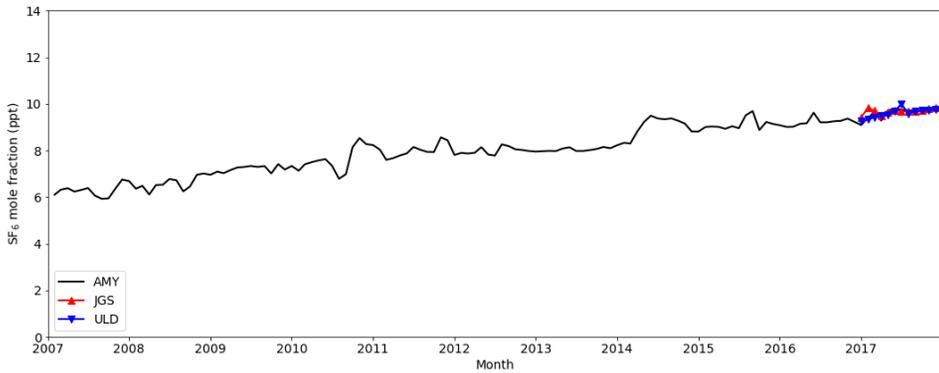


그림 3.1.17 안면도(검정색), 고산(붉은색), 울릉도(파란색)의 육불화황 월평균 농도.

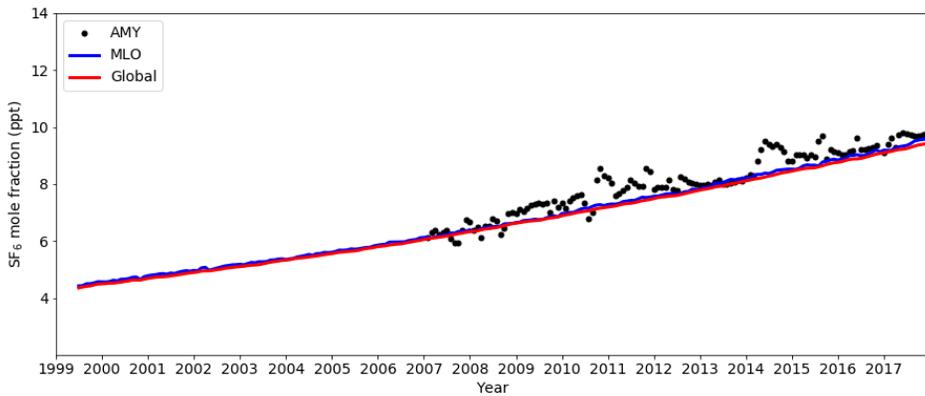


그림 3.1.18 안면도(검정색 점)과 마우나로아(파란색), 전지구(붉은색)의 육불화황 월평균 농도.

### 3.1.5 염화불화탄소류(CFCs)

염화불화탄소류는 주로 성층권에서 자외선에 의해 분해되며 대기 중 체류시간이 CFC-11은 50년, CFC-12는 110년으로, CFC-113은 85년으로 나타난다. 염화불화탄소류는 냉매제로 주로 사용되며, 성층권의 오존층을 파괴하는 염소와 브로민이 포함되어있어, 1990년대 몬트리얼 의정서를 채택하여 규제를 시작하였으며, 북반구의 관측소에서는 CFC-11은 1992년에 최고값을 보였다가 감소추세 나타내며, CFC-12는 2005년에 최고값을 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 염화불화탄소류는 감소하고 있다. CFC-11은 점차 감소해 관측을 시작한 1999년에 비해 약 36.9 ppt 감소하여 2017년 그 농도가 230.9 ppt이다. 2017년 마우나로아는 229.7, 전지구 평균은 228.8 ppt 로 나타나, 한반도의 농도는 마우나로아와 전지구 평균보다는 1.2 ~ 2.1 ppt 높다(그림 3.1.19, (a)). Montzka et al.,(2018)에 의하면 마우나로아 등 깨끗한 지역의 시료를 중심으로 분석하였을 때, 2012년 이후로 그 감소세가 50% 둔화되었다. 그 이유는 2006년 거의 0에 가까웠던 CFC-11의 배출량이 다시 증가세로 돌아서고 있기 때문으로 그 원인을 주로 동아시아로 보고 있다. 안면도에서는 이러한 둔화가 직접적으로 관측되지 않았으나 향후 이 경향성을 반영하는지에 대해 지켜볼 필요가 있으며 고농도 관측사례에 대한 추가 연구도 필요하다.

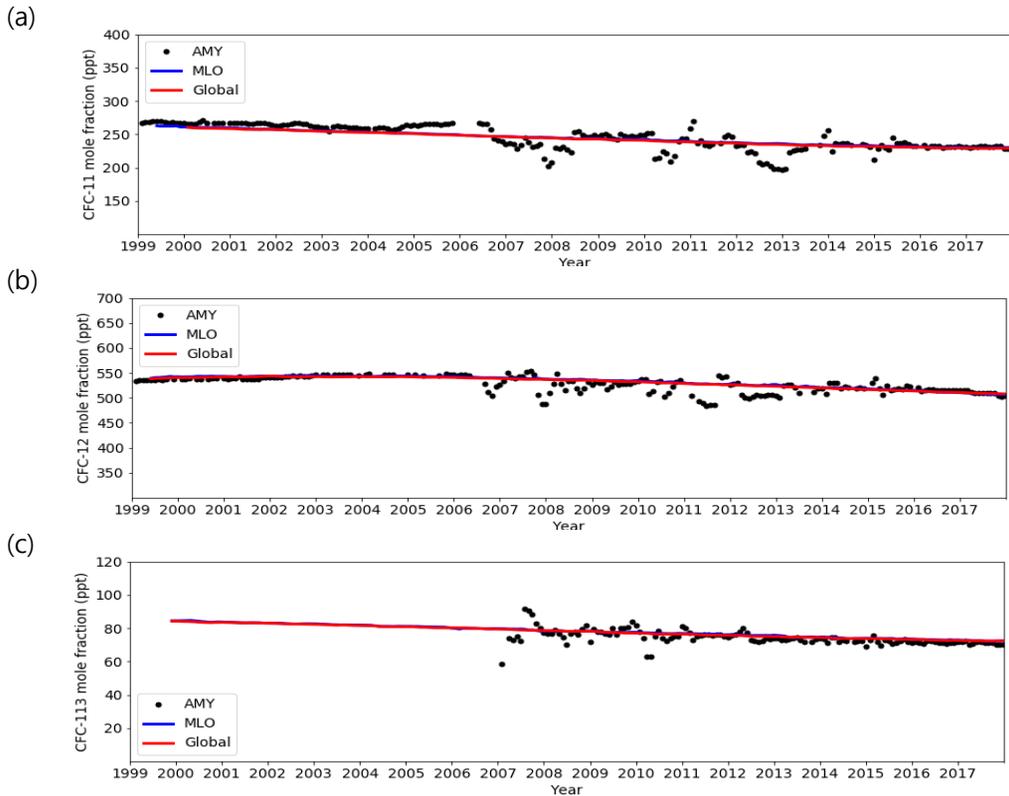


그림 3.1.19 안면도(검정색)과 마우나로아(파란색), 전지구(붉은색)의 (a) CFC-11, (b) CFC-12, (c) CFC-113의 월평균 농도.

CFC-12는 전세계 추세와 마찬가지로, 한반도 또한 2002 ~ 2005년에 최고점을 보였으며, 그 때보다 약 36.4 ppt 감소하여 2017년 510.2 ppt를 나타냈다.

같은 해 마우나로아는 508.1 ppt, 전 지구는 509.3 ppt로 관측되어 한반도는 이들보다 0.9 ~ 2.1 ppt 높다(그림 3.1.19, (b)).

마지막으로 CFC-113은 2007년부터 관측하였으며, 2017년 71.2 ppt로 관측초기와 비교하면 약 10.2 ppt 감소했다. 마우나로아는 72.5 ppt, 전 지구 평균 값은 72.4 ppt를 나타내 안면도보다는 높고 그 차이가 1.3 ~ 1.4 ppt를 나타낸다. 그러나 앞서 서두에서 언급했듯이 마우나로아와 전 지구 평균은 NOAA의 척도를 사용하였고, 한반도의 경우 한국표준과학연구원의 척도를 사용하여 척도에 의한 값의 차이가 있을 수 있다(그림 3.1.19, (c)).

세 요소 모두 다른 요소와 비교하면, 안면도, 마우나로아, 전 지구 평균이 비

슷한 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 중앙교정실험실(CCL, Central Calibration Laboratory)이 진행하였으며, 이 시설은 미국해양대기청에서 운영하고 있다. 플라스크 샘플링은 안면도에서 주1회 실시간 장비의 인렛과 동일한 높이에서 포집하고, 중앙교정실험실로 보내지며 분석 후 안면도의 1시간 평균자료와 비교한다. 2017년엔 총 20번의 플라스크 샘플링을 진행하였다.

안면도의 실시간 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>와 CCL에서 분석한 플라스크 샘플링 자료를 비교하였다. 같은 관측소에서 같은 항목을 다른 장비로 측정하는 경우 GAW에서 제시하는 호환성 범위는 CO<sub>2</sub> ± 0.2 ppm, CH<sub>4</sub> ± 5 ppb 로 알려져있다 (WMO, 2016).

CO<sub>2</sub> 는 실시간 자료와 플라스크 샘플링 자료에서 평균 -0.03 ± 0.56 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 -1.15 ± 6.9 ppb로 3사례를 제외하고는 모두 호환성 범위인 ± 5 ppb 안에 있었다.

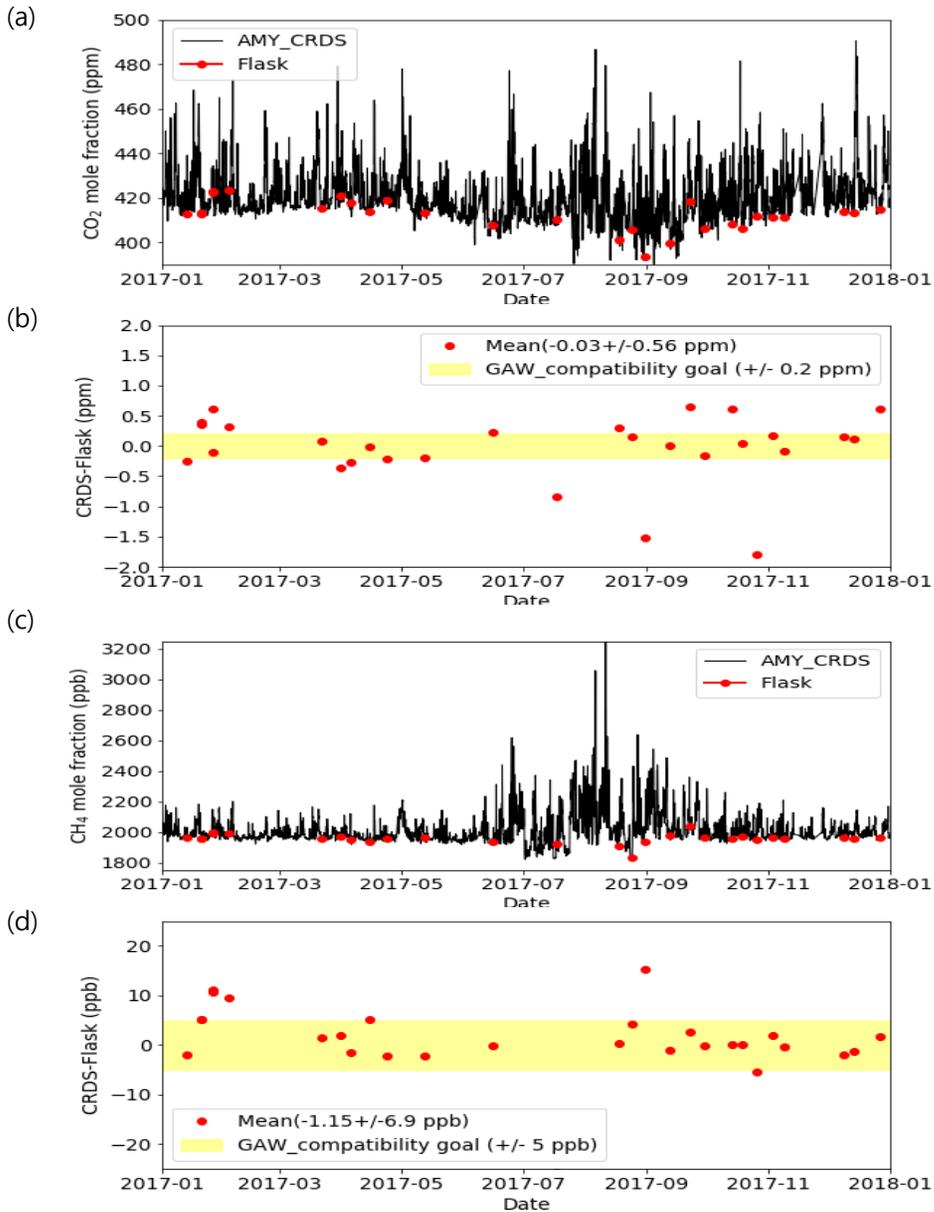


그림 3.1.20 안면도의 공동감쇠분광기(CRDS)과 주1회 NOAA 플라스크 분석자료.(a) 시간에 따른 CO<sub>2</sub>의 경향성 비교. (b) 시간에 따른 CO<sub>2</sub> 차이값 비교 (c) 시간에 따른 CH<sub>4</sub> 경향성 비교 (d) 시간에 따른 CH<sub>4</sub> 차이값 비교.

## 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, 오존의 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, 울릉도에서 2015년부터 CO자료를 확보하고 있다. 2017년부터 O<sub>3</sub>과 CO는 세계기상기구 지구대기감시(WMO GAW)에서 권고하는 관측 지침을 참고하고, NO<sub>x</sub>는 GAW와 EMEP<sup>3)</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 통계표에서 이 기간의 자료를 제시하지 않았다.

2017년 6월에 안면도와 고산 기후변화감시소의 O<sub>3</sub>과 CO는 세계표준센터(World Calibration Center for O<sub>3</sub> and CO)로부터 관측환경, 관측법, 교정법과 장비 비교실험 등에 대한 적합성 평가를 받았으며, 대부분의 항목에서 좋은 결과를 보였다. 그 결과는 GAW 홈페이지>Publications에서 확인할 수 있다.

3) 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 오존(O<sub>3</sub>)은 직접 배출원이 없고 대기 중에서 전구물질들의 광화학 반응에 의해 생성된다. 특히, 인위적인 배출로 인한 질소산화물(NO<sub>x</sub>)과 휘발성유기화합물(VOC)의 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, 화학반응 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 이산화탄소와 메탄 다음으로 큰 값이다(IPCC, 2013).

2010 ~ 2014년 동안 북반구 지상에서 관측하는 O<sub>3</sub>의 낮시간 농도는 겨울에 대부분 40 ppb( $\text{nmol mol}^{-1}$ ) 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( $\text{nmol mol}^{-1}$ ) 이상으로 관측되었다. 북반구 여름철 O<sub>3</sub>의 낮시간 평균값은 미국 서부, 유럽남부, 한국, 일본 등 주로 북반구 중위도에서 50 ppb( $\text{nmol mol}^{-1}$ ) 이상의 농도로 관측되었다(Gaudel et al, 2018).

지상에서 관측한 O<sub>3</sub>의 장기 변화경향은 1950년대부터 2000년까지 평균적으로  $1\% \text{ yr}^{-1}$ 로 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).

O<sub>3</sub>은 안면도와 제주도 고산에서 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다. 2017년에 각 감시소에서 측정한 O<sub>3</sub>의 월별 분포를 시간평균값을 사용하여 그림 3.2.1과 같이 나타내었다. 두 감시소에서 O<sub>3</sub>은 광화학 생성이 활발한 봄과 가을에 높게 분포하였고, 여름과 겨울에 낮게 분포하였다. 두 감시소 모두 O<sub>3</sub>의 중간값은 가을보다 봄에 더 높게 관측되었다.

안면도에서 O<sub>3</sub> 월평균값은 5월에 59.2 ppb로 가장 높았고, 12월에 30.5 ppb로 가장 낮게 나타났다(부록). 2017년의 월별 평균값은 그림에 나타내지 않았으나(부록) 월별 중간값과 비슷한 수준이며, 2017년 월별 중간값이 지난 2007 ~ 2013년의 평균값보다 대체로 높았다(그림 3.2.1).

고산에서 O<sub>3</sub> 농도의 월평균값은 4월에 66 ppb로 가장 높았고, 12월에 36.6 ppb로 가장 낮게 나타났다. 2017년의 월별 중간값은 월평균값과 비슷한 수준이

며 2017년 월평균값이 지난 5년(2012 ~ 2016년)의 평균값과 비슷하거나 조금 높았다.

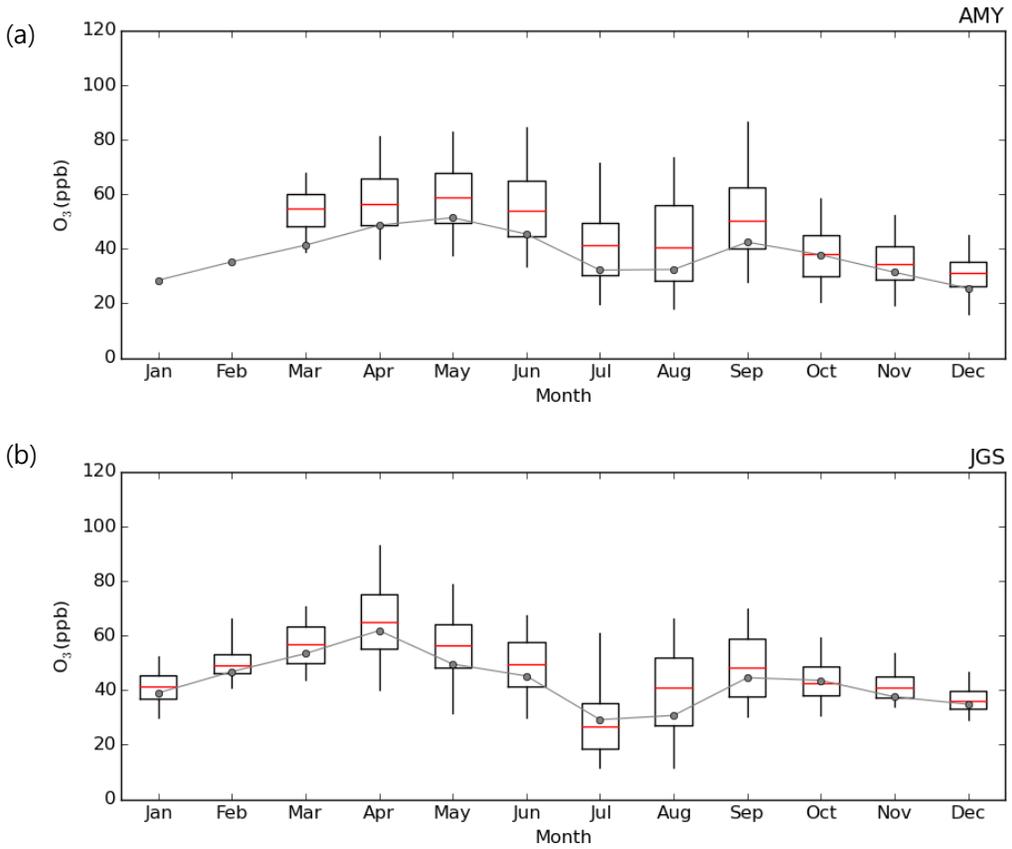


그림 3.2.1 2017년 (a) 안면도와 (b) 고산 O<sub>3</sub>의 월변화. 2017년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2013년(안면도), 2012 ~ 2016년(고산)의 평균(점-선).

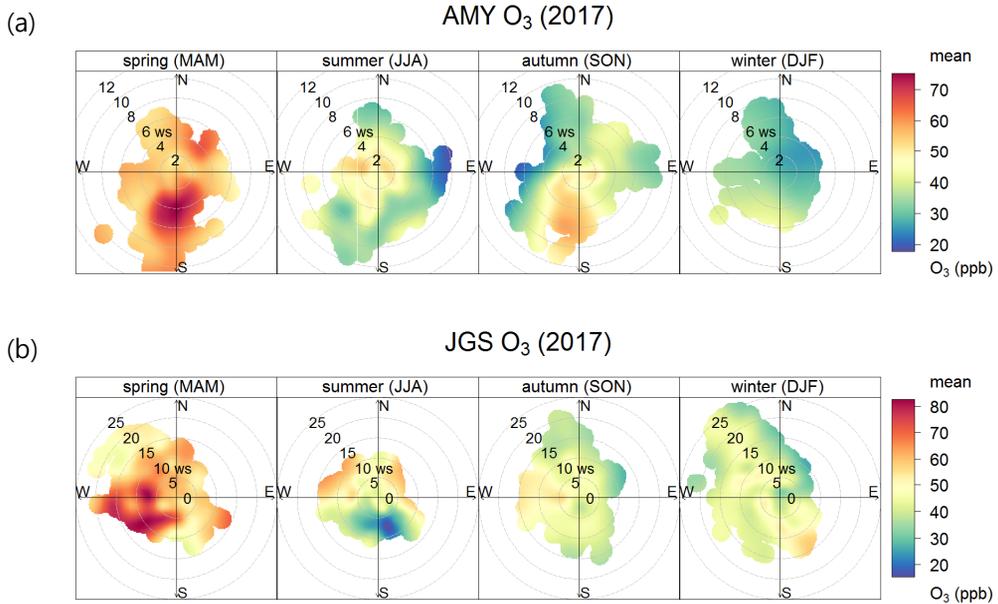


그림 3.2.2 (a) 안면도와 (b) 고산의 2017년 계절별 풍향 풍속에 따른 O<sub>3</sub> 농도분포.

대류권 하층에서 O<sub>3</sub>의 대기 내 수명이 여름철에는 5일 이내이고, 계절이나 기상 조건에 따라 20 ~ 30일 정도로 내륙에서의 이동 뿐만 아니라 대류권 상층에서 대륙간 장거리 이동되기에 충분하다. O<sub>3</sub>이 어떤 기상 조건에서 고농도 혹은 배경농도로 관측되는지 파악하기 위하여 계절별로 일정 간격의 풍향풍속에 따른 농도평균 분포를 그림 3.2.2에 나타내었다. O<sub>3</sub>과 기상자료는 2017년의 시간평균값을 사용하였고, 2017년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

안면도에서 O<sub>3</sub>은 봄에 2 ~ 6 m/s의 남풍이 불 때 70 ppb 이상의 고농도가 관측되었다. 가을과 겨울에도 봄철과 같이 남풍일 때 비교적 높은 농도로 분포하였다. 여름에는 풍속에 상관없이 4 m/s이하일 때 비교적 높은 농도를 보였고 6 m/s 이상의 강한 동풍이 불 때 30 ppb 이하로 낮은 농도가 관측되었다.

고산에서 O<sub>3</sub>은 봄에 5 ~ 20 m/s의 강한 서-남서 계열의 바람이 불 때 높은 농도로 분포하였다. 여름에 북풍계열이 불 때 고농도였고 남풍계열이 불 때 저농도로 풍향에 따른 농도차이가 뚜렷하였다. 가을에는 서쪽(바다)에서 풍속일 셀 수록 O<sub>3</sub>의 농도 높았고, 겨울에는 서쪽계열과 남동쪽에서 풍속이 셀수록 O<sub>3</sub>의 농도가 높았다.

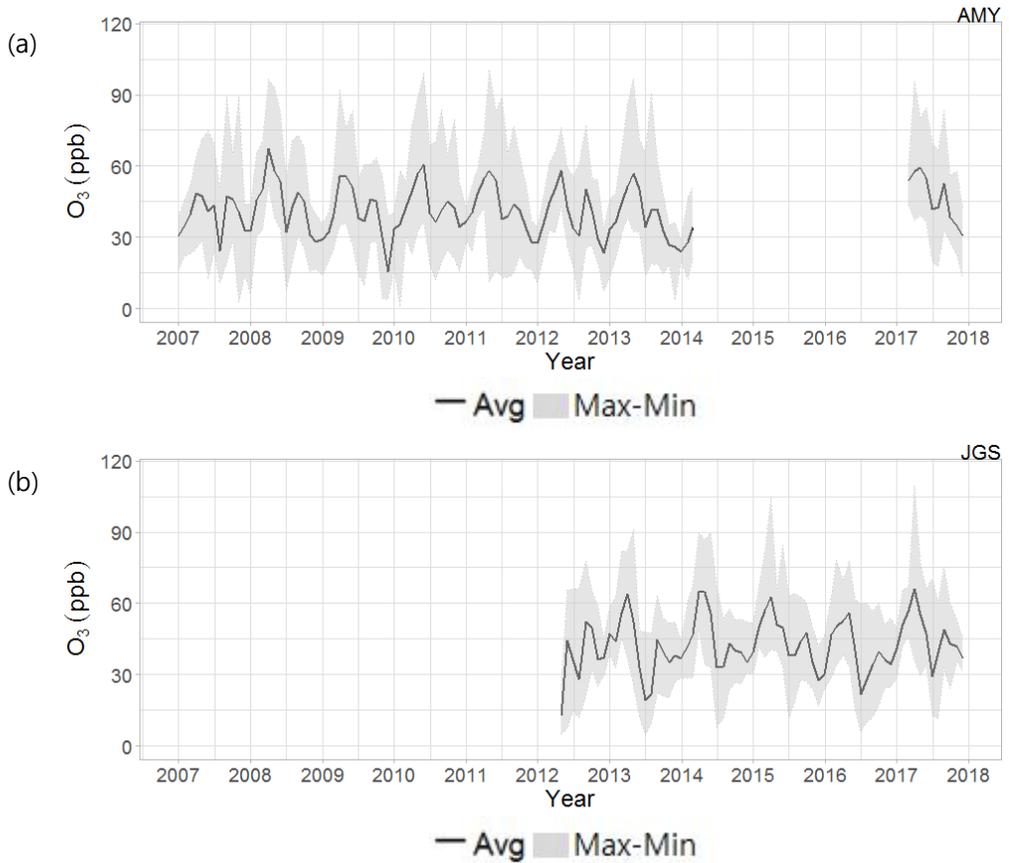


그림 3.2.3 (a) 안면도(2007 ~ 2017년)와 (b) 고산(2012 ~ 2017년)에서 장기간 관측한 O<sub>3</sub>의 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색음영은 월최댓값과 월최솟값의 차이를 나타냄).

일평균값으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.3에 나타내었다. 안면도에서 O<sub>3</sub>의 월평균, 최댓값, 최솟값의 농도수준은 2007년에서 2017년까지 증가하거나 감소하는 경향이 뚜렷하지 않으며, 매 해 봄철 월평균값, 최댓값, 최솟값이 다른 계절에 비해 높고 겨울철의 세 값이 가장 낮았다.

고산도 안면도와 같이 뚜렷한 증감 경향은 보이지 않았고, 봄철 월평균값, 최댓값, 최솟값이 다른 계절에 비해 높았다. 그러나 연중 O<sub>3</sub>의 최솟값이 안면도에서는 겨울철에 나타나는 반면, 고산에서는 여름철에 나타났다. 월평균값 또한 관측한 기간 동안 안면도에서는 여름보다 겨울에 더 낮게 나타났으나 고산에서는 2015년도를 제외하고 여름 평균값이 겨울보다 낮았다.

### 3.2.2 일산화탄소(CO)

일산화탄소(CO)는 OH 라디칼과의 반응으로 이산화탄소, 메탄 등 온실가스 농도를 변화시켜 지구온난화에 영향을 미친다(IPCC, 2013). 전세계 GAW 관측소에서 공유한 CO 농도로 계산한 2015년 전지구 평균값은  $91 \pm 2$  ppb이다(WDCGG No.41). CO 농도는 북반구의 인위적인 오염원 배출로 인해 남반구에 비해 북반구에 높게 분포하며, 계절 변화의 폭도 북반구가 크고 남반구는 계절 변화가 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, 울릉도 기후변화감시소에서 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다. 2017년에 각 감시소에서 측정한 O<sub>3</sub>의 월별 분포를 시간평균값을 사용하여 그림 3.2.4에 나타내었다.

CO 농도는 세 관측소 모두 여름(7 ~ 8월)에 낮고 겨울에 높게 분포하였다. CO 월평균값은 안면도에서 180.8 ~ 371.9 ppb였고 고산은 127.7 ~ 285.9 ppb, 울릉도는 97 ~ 247.3 ppb 로 나타나 안면도 > 고산 > 울릉도의 순서로 높았다. 또, 고산과 울릉도에 비해 안면도의 월별 농도분포 범위가 넓었다. 2017년 CO는 안면도에서 지난 10년(2007 ~ 2016년)의 월별 평균값보다 대체로 낮았고, 고산에서 지난 5년(2012 ~ 2016년)의 월별 평균값과 비슷하였다. 울릉도는 2015년부터 CO를 관측하여 과거 자료와의 비교를 하지 않았다.

CO가 어떤 조건에서 고농도나 배경농도로 관측되는지 파악하기 위하여 계절별로 일정 간격의 풍향풍속에 따른 농도평균 분포를 그림 3.2.5에 나타내었다. CO과 기상자료는 2017년의 시간평균값을 사용하였고, 2017년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

안면도에서 겨울에 남서풍이나 동풍이 4 m/s 이상으로 불거나 2 m/s 이하의 정체일 때 CO의 농도가 가장 높게 분포하였고, 가을에도 남서풍일 때 CO 농도가 비교적 높았다. 여름에는 남서풍이나 동풍일 때 100 ppb이하로 가장 농도가 낮았다. 고산은 여름을 제외한 모든 계절에서 서풍 계열일 때 CO 농도가 250 ~ 400 ppb의 범위로 높게 분포하였다. 울릉도는 여름에 CO 농도가 가장 계절별로 농도분포 수준은 다르지만 남서풍이 불 때 CO의 농도가 높았다.

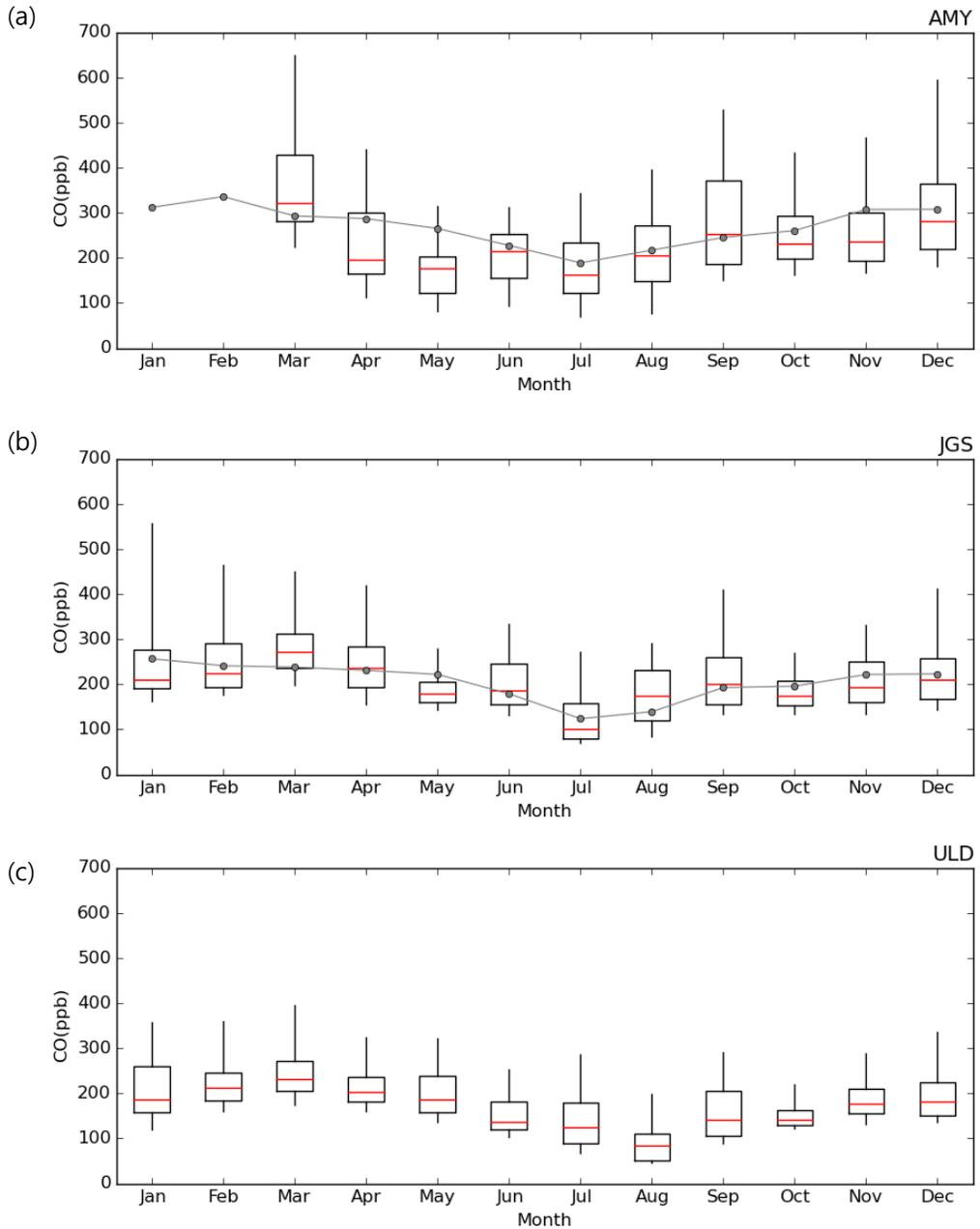


그림 3.2.4 2017년 (a) 안면도, (b) 고산, (c) 울릉도 CO의 월변화. 2017년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2013년(안면도), 2012 ~ 2016년(고산)의 평균(점-선).

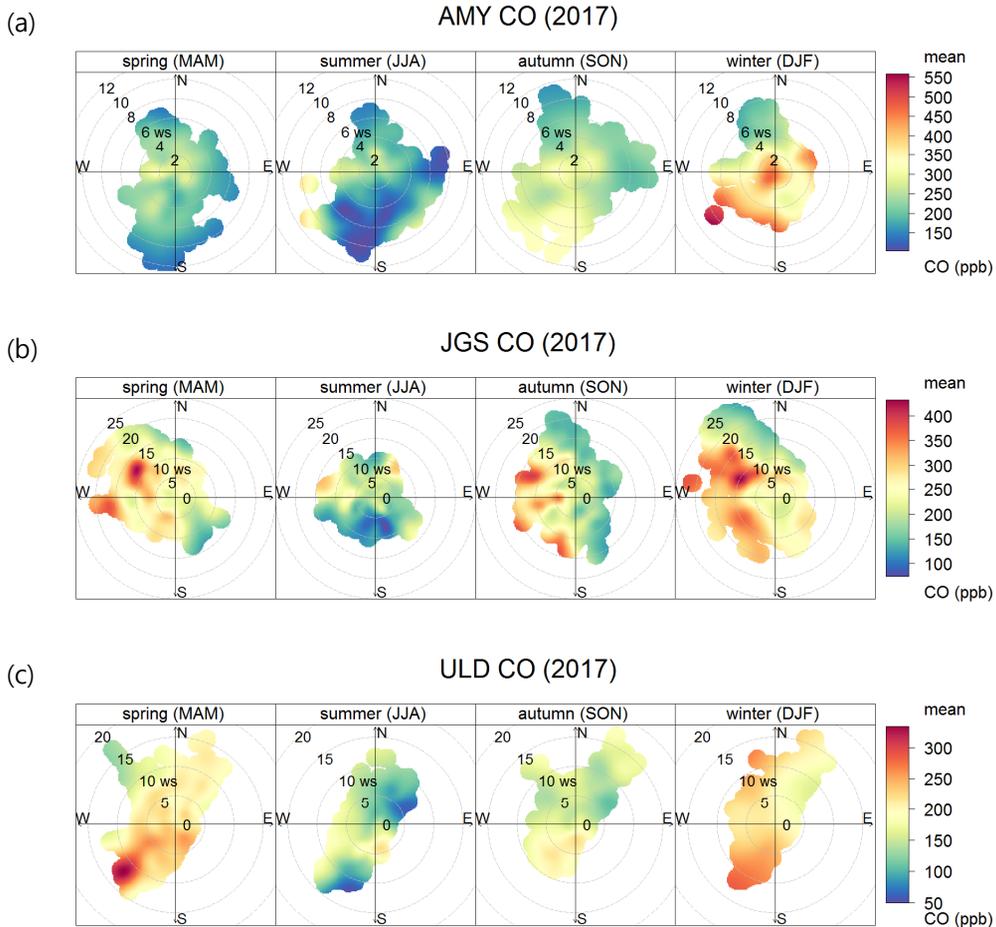


그림 3.2.5 (a) 안면도, (b) 고산, (c) 울릉도의 2017년 계절별 풍향 풍속에 따른 CO 농도분포.

울릉도에서 특히, 봄에 남서풍이 10 m/s 이상으로 불 때 CO의 농도가 높게 관측되었다.

일평균값으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.6에 나타내었다. 세 감시소 모두 연변화의 증감이 뚜렷하지 않고 2017년 CO 농도는 과거 자료들과 비교하였을 때 비슷한 수준이었다. 안면도는 월평균값, 최댓값, 최솟값 모두 고산과 울릉도보다 높았고, 월평균값과 최댓값의 차이가 다른 두 감시소보다 크게 나타났다.



그림 3.2.6 (a) 안면도(2007 ~ 2017년)와 (b) 고산(2012 ~ 2017년)에서 장기간 관측한 CO의 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색음영은 월최댓값과 월최솟값의 차이를 나타냄).

### 3.2.3 질소산화물(NO<sub>x</sub>)

질소산화물(NO<sub>x</sub>)은 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 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 100 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 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다. 2017년에 각 감시소에서 측정한 NO<sub>x</sub>의 월별 분포를 시간평균값을 사용하여 그림 3.2.7과 같이 나타내었다. NO<sub>x</sub>의 월별 중간값은 안면도에서 5 ~ 8월을 제외하고 5 ppb 이상인데 비해 고산에서는 연중 5 ppb 이하로 내륙에 더 가까운 안면도에서 NO<sub>x</sub> 농도가 더 높게 나타났다. 7월에는 두 감시소의 평균값이 비슷하였다. 2017년의 월별 평균값은 월별 중간값과 비슷한 수준이며, 2017년 월중간값은 안면도에서 3, 4월을 제외하고 지난 2007 ~ 2013년의 평균값보다 낮았고, 고산에서 4월을 제외하고 지난 2012 ~ 2016년의 평균값보다 낮았다. 월별 분포 범위를 보면 월별 하위 10%와 상위 10%가 안면도에서 대략 15 ppb로 넓었고 고산에서는 7 ~ 8 ppb 이내로 좁아, 안면도가 고산보다 내륙의 영향을 더 많이 받는 것을 알 수 있다.

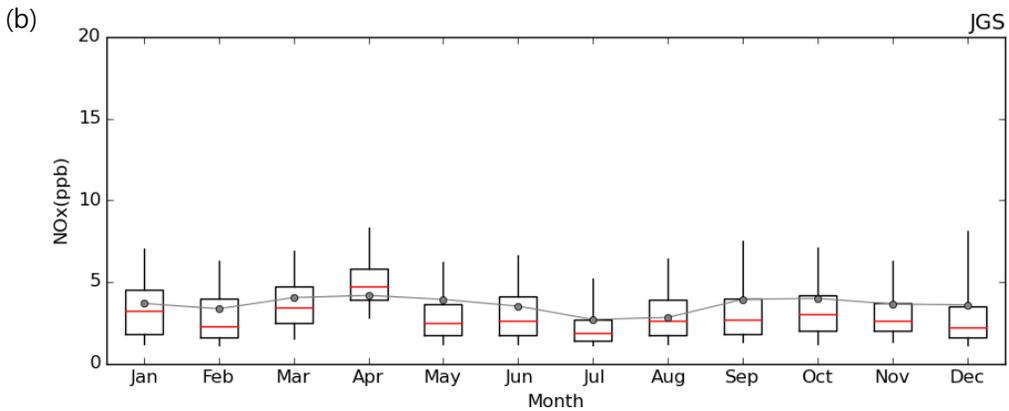
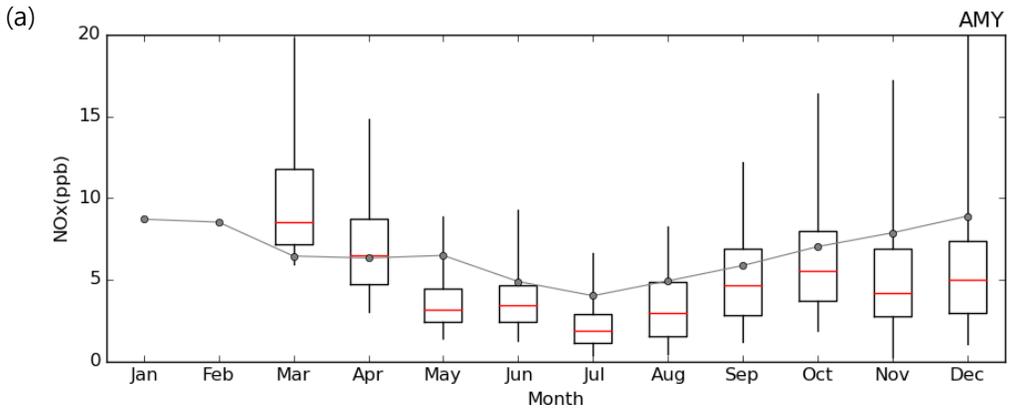


그림 3.2.7 2017년 (a) 안면도와 (b) 고산 NO<sub>x</sub>의 월변화. 2017년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2013년(안면도), 2012 ~ 2016년(고산)의 평균(점-선).

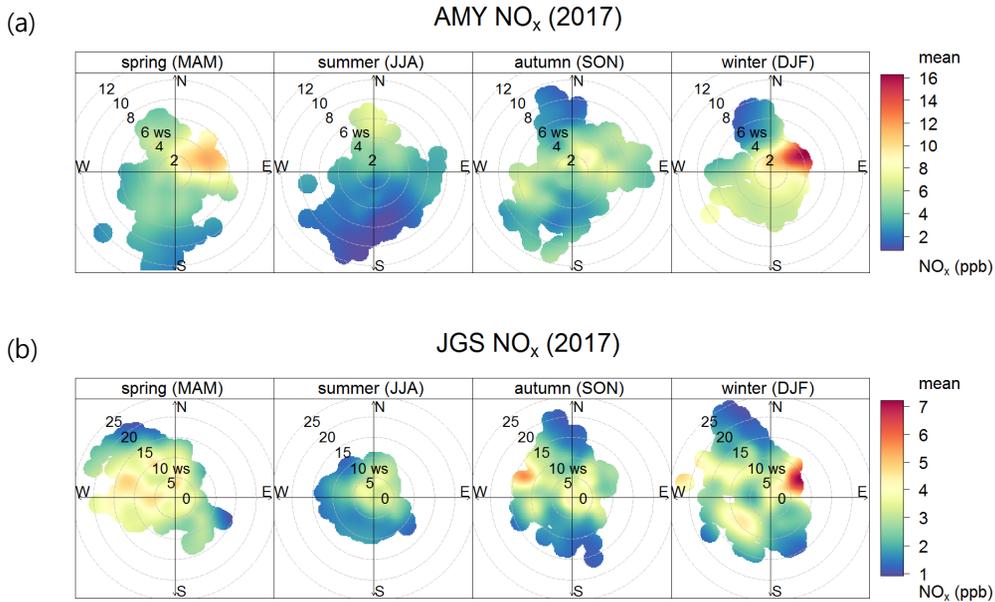


그림 3.2.8 (a) 안면도와 (b) 고산의 2017년 계절별 풍향 풍속에 따른 NO<sub>x</sub> 농도분포.

NO<sub>x</sub>는 대기 내 수명이 여름에는 수 시간, 겨울에는 1 ~ 2일로 짧아 관측지역의 인위적인 오염을 파악하는데 좋은 지시자이다. NO<sub>x</sub>가 어떤 기상조건에서 고농도나 배경농도로 관측되는지 파악하기 위하여 일정 간격의 풍향풍속의 조건에 포함되는 모든 관측값의 평균을 계절별로 나누어 그림 3.2.8에 나타내었다. 따라서 이러한 그림은 관측값을 그대로 반영하지 않으나 고농도 영향을 받는 방향과 기상조건을 쉽게 파악할 수 있다. NO<sub>x</sub>와 기상자료는 2017년의 시간평균값을 사용하였고, 2017년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

안면도에서 NO<sub>x</sub>는 봄과 겨울에 2m/s 이상에서 북동풍이 내륙에서 불 때 고농도로 나타났다. NO<sub>x</sub>농도는 여름에 특히 남풍이 불 때 평균 2 ppb 이하로 가장 낮았고, 가을에는 2 m/s이하일 때 NO<sub>x</sub>가 비교적 높게 분포하였다.

고산에서 NO<sub>x</sub>는 봄에 바다 방향인 서풍계열이고 풍속 5 m/s이상일 때 평균 4 ppb이상으로 나타났다. 겨울에 북동방향에서 고농도 사례가 있었던 것을 제외하면 여름, 가을, 겨울에 NO<sub>x</sub>는 제주도 내륙과 바다에서 고르게 NO<sub>x</sub>의 영향을 받았으며, 농도수준이 평균적으로 안면도에 비해 두 배가량 낮았다. 또, 풍향에 관계없이 10 ~ 15m/s 이상의 강한 바람이 불 때 NO<sub>x</sub>의 농도가 매우 낮게 분포하였다.

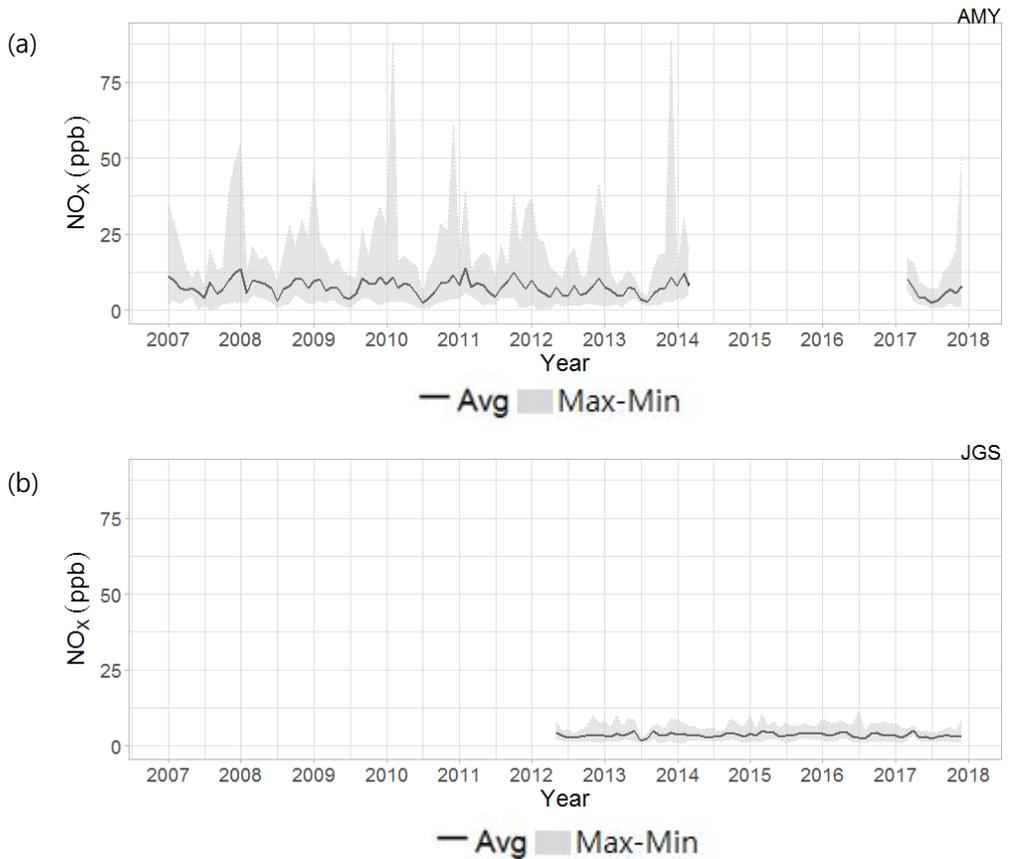


그림 3.2.9 (a) 안면도(2007 ~ 2017년)와 (b) 고산(2012 ~ 2017년)에서 장기간 관측한 NO<sub>x</sub>의 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색음영은 월최댓값과 월최솟값의 차이를 나타냄).

일평균값으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.9에 나타내었다. 안면도에서 NO<sub>x</sub>의 월평균, 최댓값, 최솟값의 농도수준은 2007년에서 2017년까지 증가하거나 감소하는 경향이 뚜렷하지 않으며, NO<sub>x</sub>의 월평균값, 최댓값, 최솟값이 매 해 봄과 겨울에 높고, 여름에는 가장 낮았다. NO<sub>x</sub>의 월 최댓값은 봄에 비해 겨울에 특히 높았다.

고산은 NO<sub>x</sub> 농도가 여름에 낮고, 봄과 겨울철에 높지만, 안면도에 비해 NO<sub>x</sub>의 최댓값이 전기간 15 ppb 이하로 매우 낮아 인위적인 오염의 영향을 안면도에 비해 적게 받음을 알 수 있다.

### 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 북아메리카에서 대기오염 측정 네트워크와 배경대기 지역에서 관측되었다. 유럽, 북아메리카는 환경정책으로 SO<sub>2</sub> 배출을 규제하여 농도가 감소하였고 더 이상 산성비가 주요 이슈가 아니다. 우리나라에서도 1990년대 이후 황저감 정책으로 SO<sub>2</sub>의 농도수준이 감소하여 2016년 전국 평균 0.004 ppm 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. 또, 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 측정하고 있으며, 관측법과 관측기간은 4장에 소개되었다. 2017년에 각 감시소에서 측정한 SO<sub>2</sub>의 월별 분포를 시간평균값을 사용하여 그림 3.2.10과 같이 나타내었다. 안면도에서 SO<sub>2</sub>는 봄과 겨울에 농도가 높고 농도분포 범위가 0.5 ~ 6 ppb로 넓었고, 여름에 낮게 분포하였고 농도 분포 범위가 7월의 경우 1.5 ppb 이하로 좁았다. 2017년 SO<sub>2</sub>의 월중간값들은 지난 2007 ~ 2013년의 월별 평균보다 낮게 분포하였다.

고산에서 관측한 SO<sub>2</sub>의 월평균농도는 연중 1.5 ppb 이하로 분포하였고, 4월과 5월에만 약 2.5 ppb이상으로 높았다. 2017년 SO<sub>2</sub>의 중간값들은 지난 2012 ~ 2016년의 월별 평균과 비교하였을 때, 겨울철에는 낮았고, 봄철에는 높았으며 그 외 비슷한 수준을 보였다.

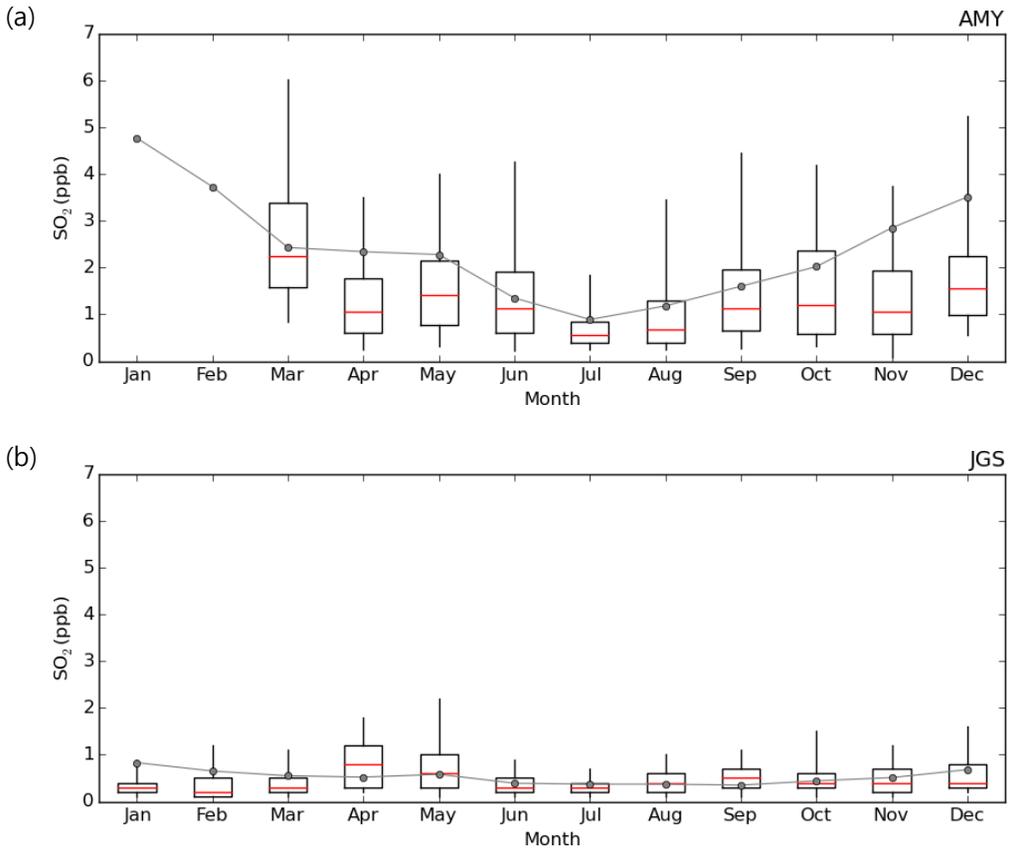


그림 3.2.10 2017년 (a) 안면도와 (b) 고산 SO<sub>2</sub>의 월변화. 2017년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2013년(안면도), 2012 ~ 2016년(고산)의 평균(점선).

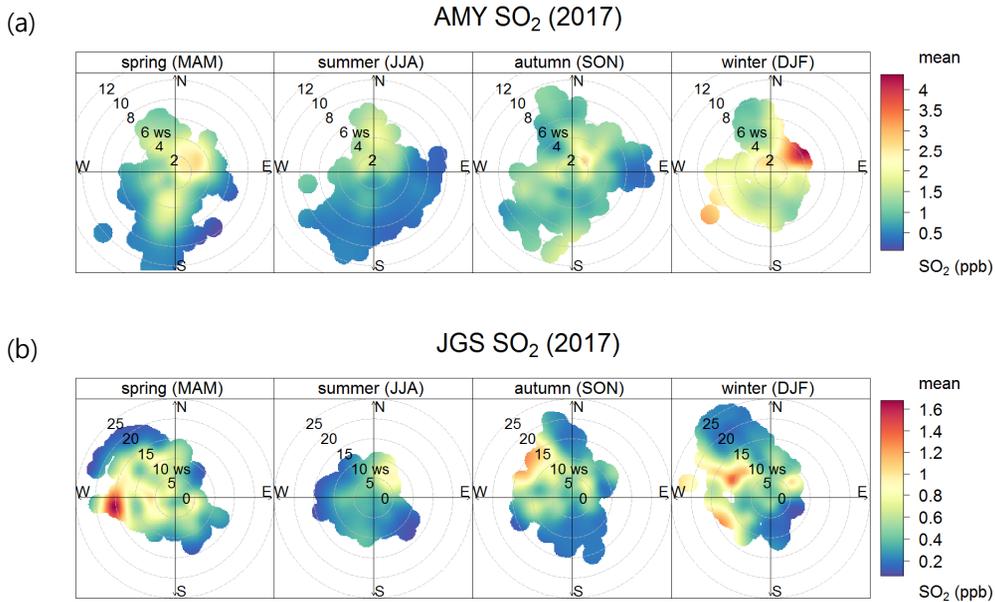


그림 3.2.11 (a) 안면도, (b) 고산, (c) 울릉도의 2017년 계절별 풍향 풍속에 따른 SO<sub>2</sub> 농도분포.

SO<sub>2</sub>가 어떤 기상조건에서 고농도나 배경농도로 관측되는지 파악하기 위하여 일정 간격의 풍향풍속의 조건에 포함되는 모든 관측값의 평균을 계절별로 나누어 그림 3.2.11에 나타내었다. 따라서 이러한 그림은 관측값을 그대로 반영하지 않으나 고농도 영향을 받는 방향과 기상조건을 쉽게 파악할 수 있다. SO<sub>2</sub>와 기상자료는 2017년의 시간평균값을 사용하였고, 2017년 1, 2월과 12월을 겨울로 표현하였다.

안면도에서 SO<sub>2</sub>는 봄과 겨울에 2 m/s 이상에서 북동풍이 내륙에서 불 때 고농도로 나타났다. SO<sub>2</sub> 농도는 여름에 특히 남풍이 불 때 가장 낮은 농도로 분포하였고, 가을에는 2 m/s이하의 약한 바람일 때 SO<sub>2</sub>가 비교적 높게 분포하였다.

고산에서 SO<sub>2</sub>는 봄에 바다 방향인 서풍계열이고 풍속 5 m/s이상일 때 높게 나타났다. 여름에는 제주도 내륙 방향인 북동쪽의 풍향일 때를 제외하고 SO<sub>2</sub>가 낮게 분포했다. 가을과 겨울에 바다 방향인 서풍계열일 때 풍속이 5 m/s이상일 때 SO<sub>2</sub>가 비교적 높게 분포하였다.

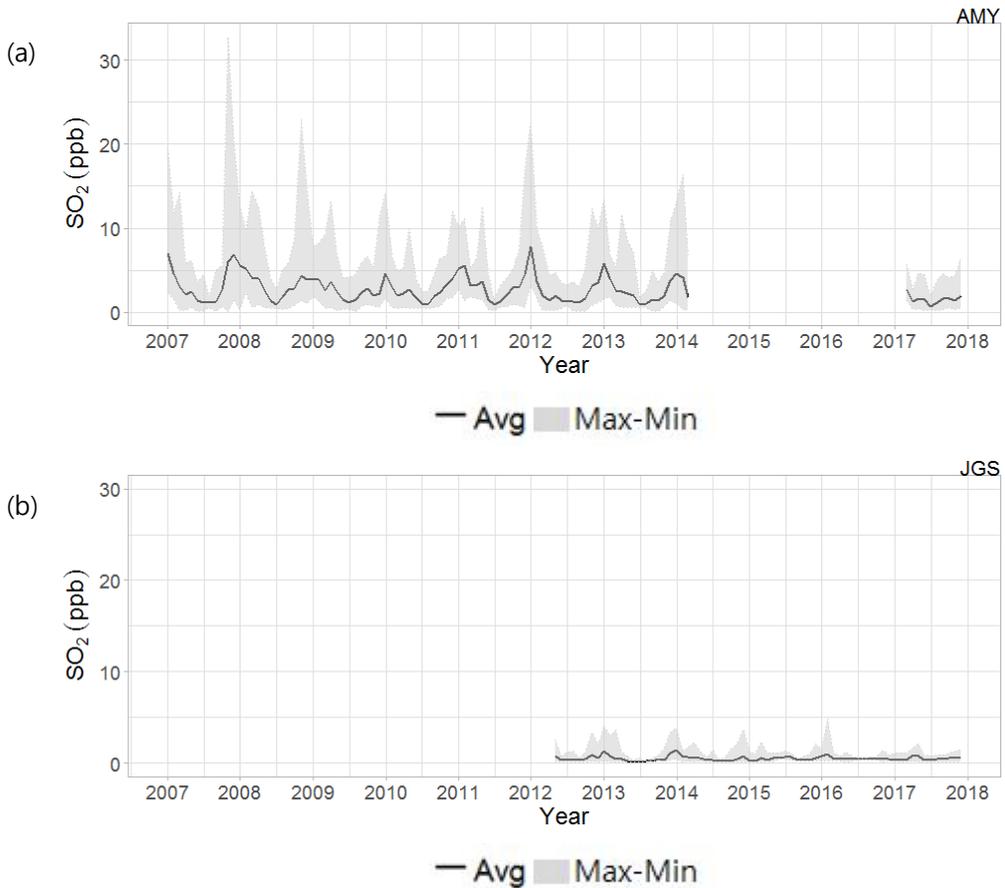


그림 3.2.12 (a) 안면도(2007 ~ 2017년)와 (b) 고산(2012 ~ 2017년)에서 장기간 관측한 SO<sub>2</sub> 연평균 변화경향(검은선은 월평균, 회색음영은 월최댓값과 월최솟값의 차이를 나타냄).

일평균값으로 계산한 월평균, 최댓값, 최솟값의 장기간 변화를 그림 3.2.12에 나타내었다. 안면도에서 SO<sub>2</sub>의 월평균, 최댓값, 최솟값의 농도수준은 2007년에서 2013년 동안 겨울에 높고 여름에 낮은 계절 변동이 뚜렷하였다. 2017년에도 SO<sub>2</sub>는 비슷한 계절 변동을 보였으나 최댓값의 농도수준이 약 7 ppb이하로 2014년 1월 최댓값이 약 16 ppb인 것과 비교하여 두 배 이상 낮았다.

고산은 SO<sub>2</sub>의 월 최댓값은 겨울에 높으며, 2012년부터 2016년까지 약 3 ~ 5 ppb였으나 2017년에는 전 기간 3 ppb 이하로 분포하였다.

### 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 대기 질은 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 운동역학과 광학 특성이 서로 다르며, 배출 후 대기 중에 머무르는 시간은 수 일에서 수 주 정도로 온실기체에 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. 핵화모드는 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  $-0.9$  ( $-1.9 \sim -0.1$ )  $\text{W/m}^2$  (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.

에어로졸이 기후에 미치는 영향에 대해서는 온실가스의 기후 영향에 비해 과학적 이해도가 매우 낮고 시간적, 공간적 다양성이 크기 때문에 미래의 지구 온도 상승을 예측하는 데 있어 에어로졸은 큰 불확실도를 제공하는 요소 중 하나이다. 따라서, 에어로졸과 기후 상호작용을 이해하고 기후변화를 예측하기 위해

서는 지정된 장소에서 종합적인 에어로졸의 장기 관측이 필요하다.

기상청은 세계기상기구(WMO) 지구대기감시프로그램(GAW)의 권고에 따라 안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시소에서 PM10 질량농도, 이온성분, 광산란계수 등 에어로졸 분야 11종을 관측하고 있으며, 위탁관측소인 연세대학교에서 에어로졸 광학깊이를, 광주과학기술원에서 에어로졸 광학깊이와 연직분포를 관측하고 있다.

### 3.3.1 에어로졸 물리특성

한반도 배경대기 에어로졸 물리특성 감시를 위해 에어로졸 질량농도와 수농도를 측정하여 분석한다. 질량농도는 부유분진측정기(이하  $\beta$ -ray PM10)로 관측하며 이 장비는 국내 황사관측망의 기본 관측장비로 운영되고 있다. 광학입자계수기(OPC)로도 질량농도를 관측하고 있으나, 이 장비는 습도가 높은 환경에서는 충분한 제습이 어려워 같은 장소에서 운영되는 부유분진측정기나 공기역학입자계수기의 품질 관리와 상대적인 입자 크기 분포의 정합성 확인에 활용되고 있다. 에어로졸 총수농도는 응결핵계수기(CPC), 에어로졸 입경별 수농도는 공기역학입자계수기(APS)와 전자기유도입자계수기(SMPS)를 이용하여 관측된다.

#### 가. PM10 질량농도

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

$$m_R = F_{cal} \times \ln \frac{R_0}{R}$$

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

$$F_{cal} = \frac{A}{\mu/\rho} = \frac{2}{0.3} \times mg \approx 6600\mu g$$

여기서 A는 필터 스폿(spot)의 면적(cm<sup>2</sup>)이며,  $\mu/\rho$ 는 <sup>14</sup>C의 질량감쇠계수(cm<sup>2</sup>/mg)이다.

2017년 안면도에서 측정한 PM10 질량농도의 월평균은 19 ~ 46  $\mu g/m^3$  사이에 분포하며 지난 10년간(2007 ~ 2016년) 월별 평균과 비교했을 때 대체로 낮았다. 3 ~ 5월의 월평균이 42 ~ 46  $\mu g/m^3$ 으로 연중 가장 높았고, 8월의 월평균 농도가 가장 낮았는데(19  $\mu g/m^3$ ), 이는 지난 10년과 비슷한 경향이다(그림 3.3.1(a)). 안면도 PM10 질량농도 연평균은 2004년 이후로 꾸준히 감소하는 추세이며, 지난 10년(2007 ~ 2016년) 평균은 39  $\mu g/m^3$ 이고, 2017년의 연평균은 31  $\mu g/m^3$ 로 지난 10년보다 약 21% 낮았다(그림 3.3.2).

고산 기후변화감시소에서는 2011년에 안면도 기후변화감시소와 같은 모델의  $\beta$ -ray PM10 연속측정장비를 도입하여 PM10 질량농도를 실시간 감시하고 있다. 도입 당시부터 현재의 환경분석센터에서 운영하다가 2017년 9월 22일부터는 고산 수월봉(구, 고산기상대) 통합운영실로 이전하여 운영하고 있다. 2017년의 고산 PM10 질량농도 월평균은 25 ~ 42  $\mu g/m^3$  사이에 분포하며 지난 6년간 월별 평균과 비교할 때 1, 2, 5월은 과거보다 높고, 나머지는 대체로 비슷했다(그림 3.3.1(b)). 월별 변동은 봄철에 가장 높고, 여름과 가을에 낮아 안면도와 유사한 양상을 보였다. 고산의 2017년 PM10 질량농도 연평균은 31  $\mu g/m^3$ 로 지난 안면도의 PM10 질량농도 연평균과 같았고, 2012년을 제외하고는 유사한 수준을 보이고 있다(그림 3.3.2).

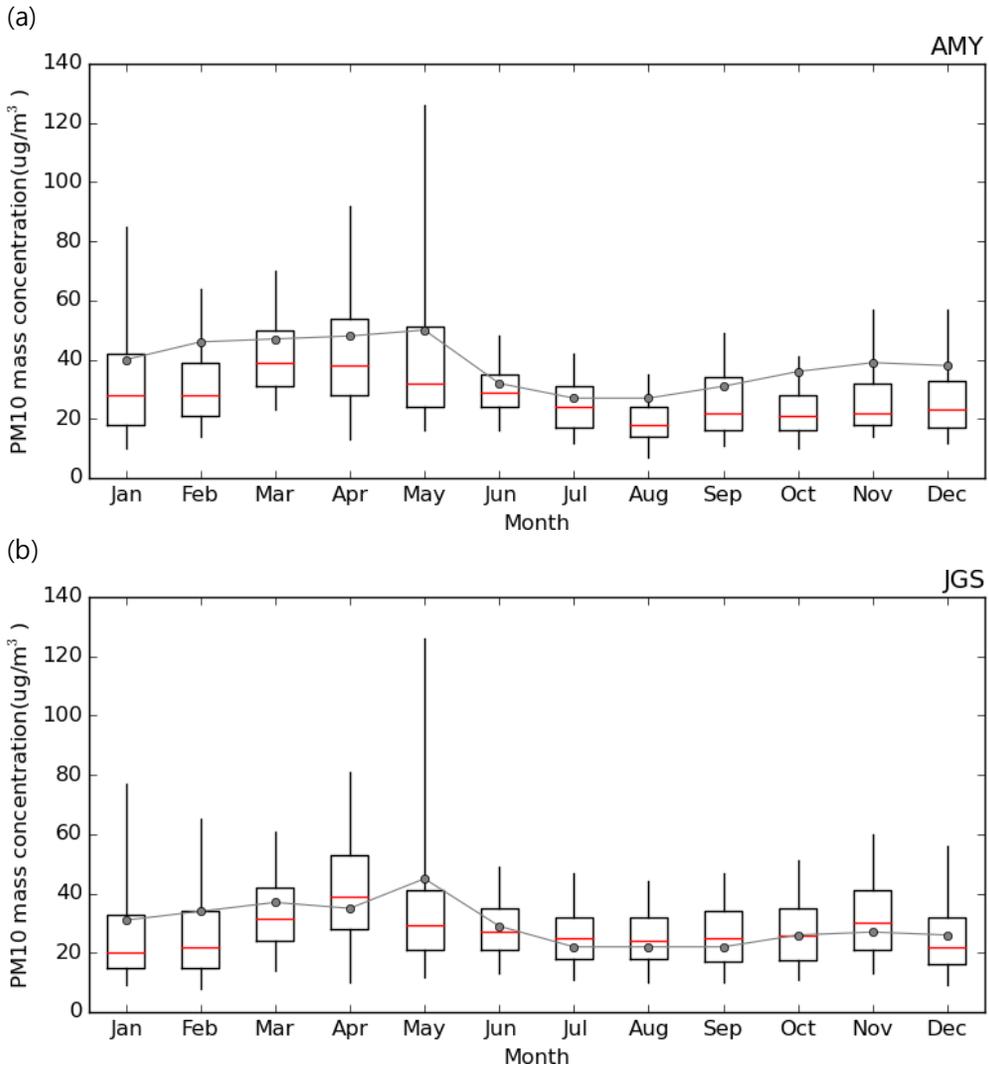


그림 3.3.1 (a) 안면도와 (b) 고산의 2017년 PM10 질량농도 월변화( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 2017년 월별분포(상자의 세로실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2016년(안면도), 2011 ~ 2016년(고산) 평균(점-선).

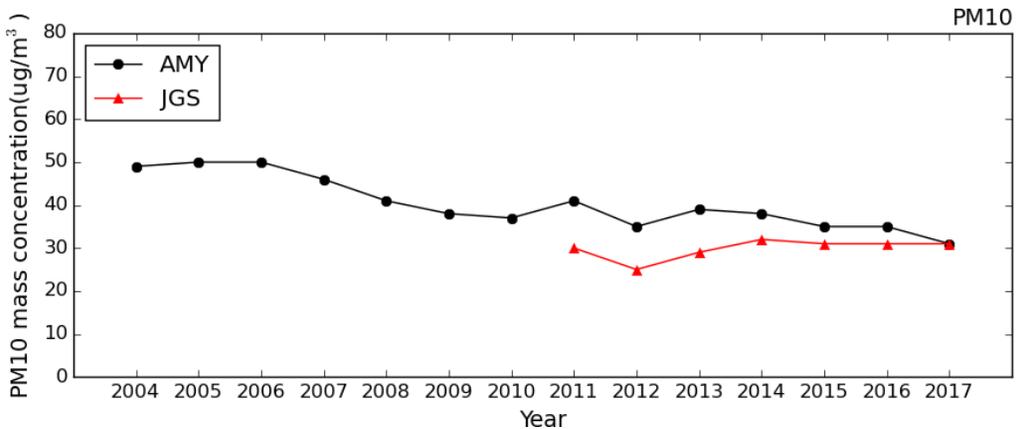


그림 3.3.2 안면도와 고산 PM10 질량농도의 최근 연평균 변화(ug/m³).

안면도 기후변화감시소에서는 PM10과 PM2.5의 화학 성분 분석을 위해 저용량 미세먼지채취기를 주1회 운영하고 있으며, 이 채취기들로부터 PM10과 PM2.5의 질량농도를 산출할 수 있다. 저용량 미세먼지채취기에서 포집된 에어로졸의 질량농도는 포집 전후의 필터 무게의 차이와 평균 유량을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

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

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. 본 보고서에는 세계기상기구 지구대기감시프로그램 권고(WMO/GAW Report No.227)에 따라 직경 47 mm filter와 저용량 미세먼지 채취기를 활용한 2008년 이후 자료부터 제시하기로 한다. 저용량 미세먼지채취기의 PM10 입경분리를 위해 2008년부터 2017년 3월까지의 cyclone, 2017년 4월부터는 impactor 방식을 채용한 장비를 운영 중이다.

저용량 미세먼지채취기 자료로 산출한 PM10 질량농도를 부유분진측정기( $\beta$ 선 흡수법 PM10) 자료와 비교하여 그림 3.3.3에 보였다. PM10과 PM2.5 질량농도, 화학성분의 총합과 질량농도 차이 비교 등 품질관리 절차를 거쳐 최종 확정된 중량농도법 자료(저용량 미세먼지채취기)의 수는 총 29개이며, 부유분진측정기 자료와 비교한 결과, 기울기 0.90, 절편은 0.046으로 자동측정기(부유분진측정기) 등가성 기준(기울기 0.90 ~ 1.1, 절편 -5.0 ~ 5.0)을 만족하였다.

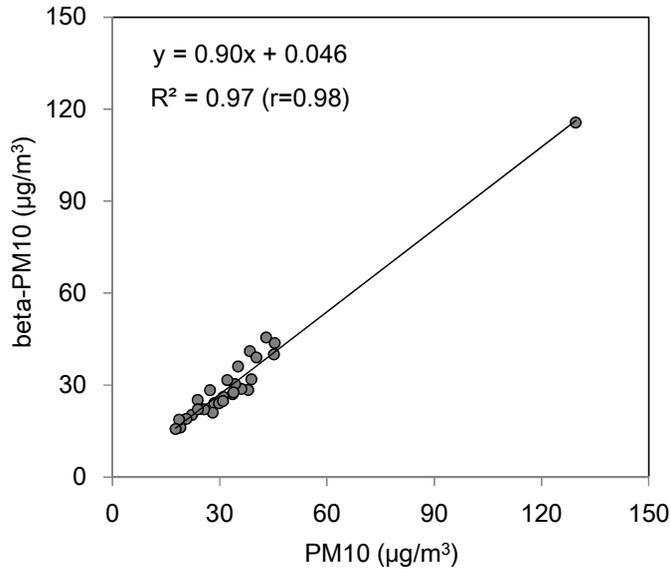


그림 3.3.3 2017년 안면도에서 측정한 부유분진측정기(베타선흠수법의 자동측정기) PM10 질량농도의 증가성 확인.

그림 3.3.4는 2017년에 저용량 미세먼지채취기에서 산출한 유효 PM10, PM2.5 질량농도와 부유분진측정기의 PM10 질량농도를 비교한 것이다. 저용량 미세먼지채취기와 부유분진측정기의 PM10 질량농도는 서로 비슷한 경향을 보이고 있으며, 해당 자료(29개)의 평균은 각각  $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 그림 3.3.3에서와 같이 부유분진측정기가 약 10% 낮고, 상관계수는 0.98로 좋은 상관성을 보여주었다. 저용량 미세먼지채취기 PM10, PM2.5 질량농도의 계절별 분포는 그림 3.3.5와 같으며, PM10 질량농도는 겨울을 제외하고 지난 9년(2008 ~ 2016년)의 계절별 평균과 유사하고, PM2.5 질량농도는 겨울과 봄에 과거보다 낮은 농도를 보였다.

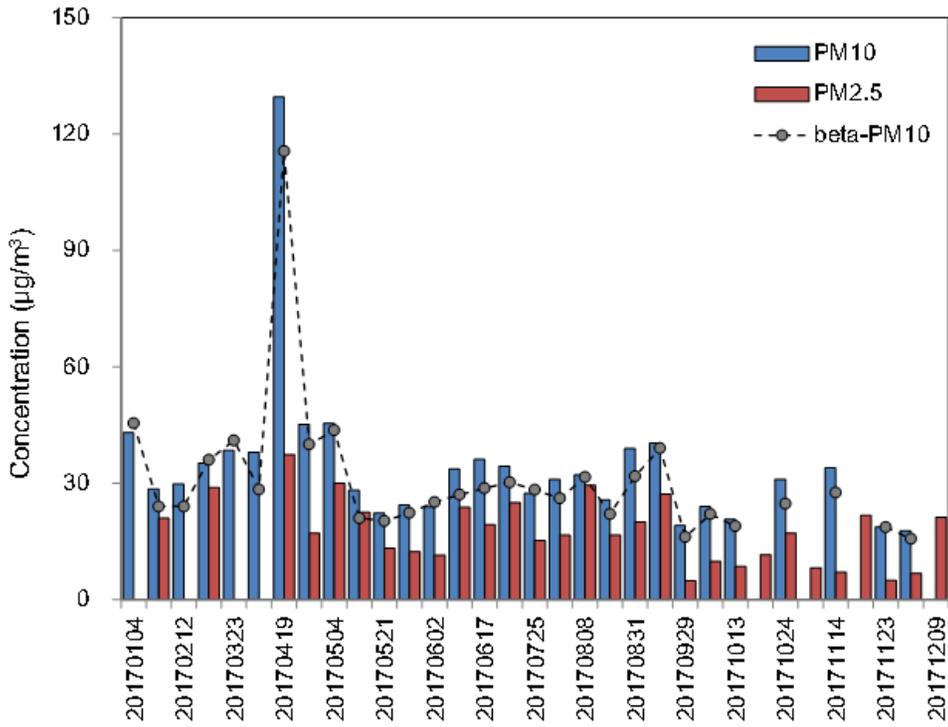


그림 3.3.4 2017년 안면도에서 측정된 PM10, PM2.5 질량농도 분포(저용량 미세먼지 채취기와 부유분진측정기 자료).

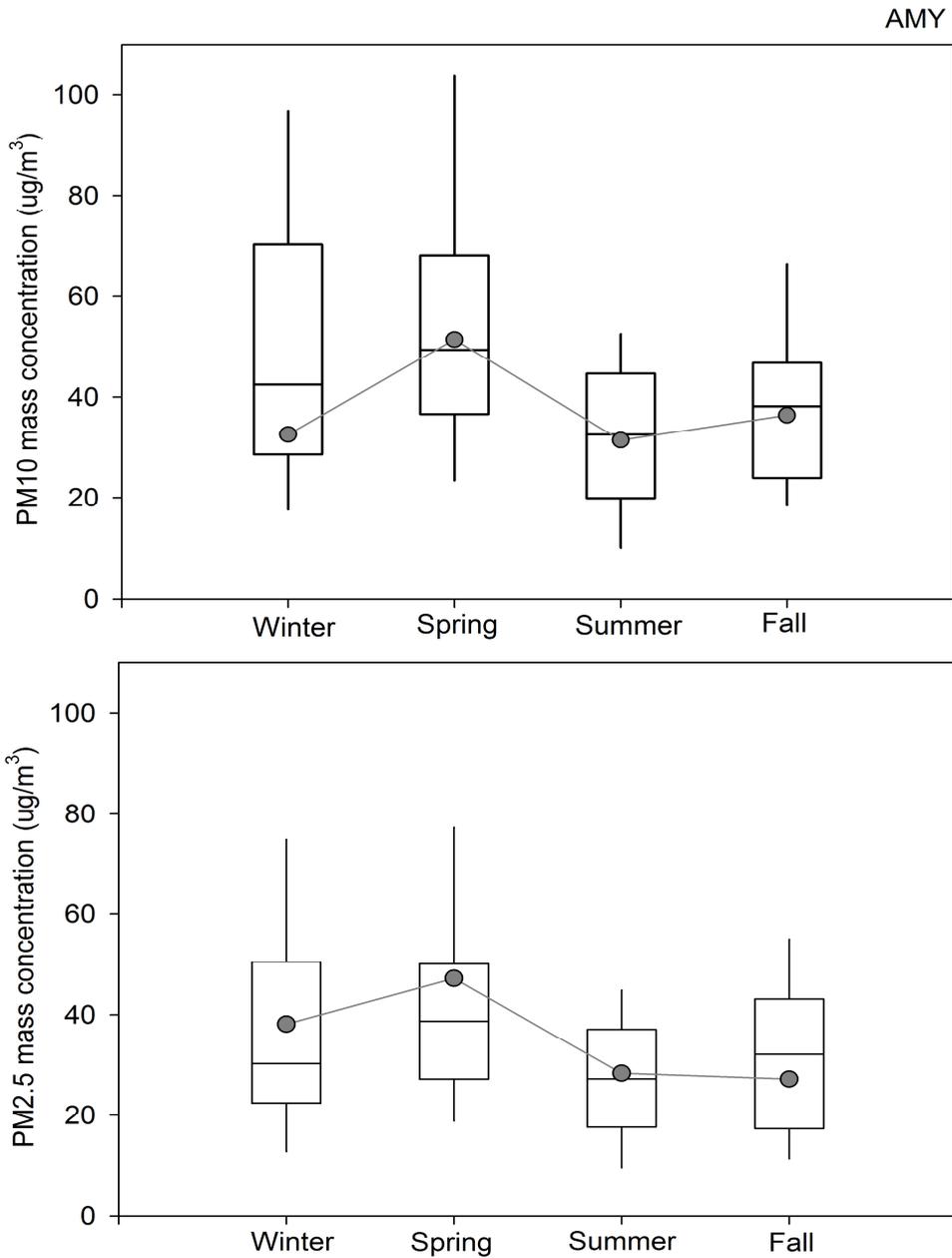


그림 3.3.5 안면도 2017년 저용량 미세먼지채취기 (위) PM10과 (아래) PM2.5 질량농도의 계절변화( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 계절별 분포(상자의 세로실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2008 ~ 2016년 평균(점-선).

## 나. 에어로졸 수농도

에어로졸 수농도 분포는 모든 에어로졸 과정에 있어 가장 기본이 되는 정보이다. 안면도에서는 2006년부터 공기역학입자계수기(APS)와 2005년부터 전자기유도입자계수기(SMPS)로 직경이 0.5 ~ 20  $\mu\text{m}$ 인 에어로졸과 직경이 0.01 ~ 0.5  $\mu\text{m}$ 인 에어로졸의 수농도를 각각 측정해 왔다. 2017년 7월부터 0.01 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  범위의 크기별 수농도를 측정하는 전자기유도입자계수기가 운영되고 있다. 고산에서는 공기역학입자계수기와 함께 응결핵계수기(condensation particle counter, CPC)를 운영하고 있으며, 응결핵계수기는 0.01 ~ 3.0  $\mu\text{m}$  구간의 에어로졸 총수농도( $\#/cm^3$ )를 측정한다.

공기역학계수기는 다음과 같은 원리로 52개 입자크기별 에어로졸 수농도를 측정한다. 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 측정하여 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.

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

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

WMO GAW 프로그램에서 에어로졸 농도는 표준대기상태(273.15 K, 1 기압)로 제시하도록 권고하고 있어, 2017년 보고서에서 제시하는 자료는 이 보정을 적용하였다.

2017년 안면도와 고산 기후변화감시소에서 측정한 2017년도 에어로졸의 입경별 부피농도의 분포는 그림 3.3.6와 같다. 2017년 9월부터는 장비 점검 또는 제작사 교정 기간이거나 대체 장비를 사용하였으므로, 보고서 본문에는 8월까지의 자료만 제시하였다. 두 지점 모두 미세입자 영역(1  $\mu\text{m}$  이하)과 조대입자 영역에 피크가 관측되는 이산형(bi-modal) 분포를 보였으며, 이 기간 동안에는 안면도의 농도가 고산보다 평균적으로 높았다. 그러나 그림 3.3.7에서

보는 바와 같이, 1월 ~ 6월 동안에는 안면도에서, 7월과 8월에는 고산에서 대부분 입자 크기 영역에 더 높은 부피농도가 관측되었다.

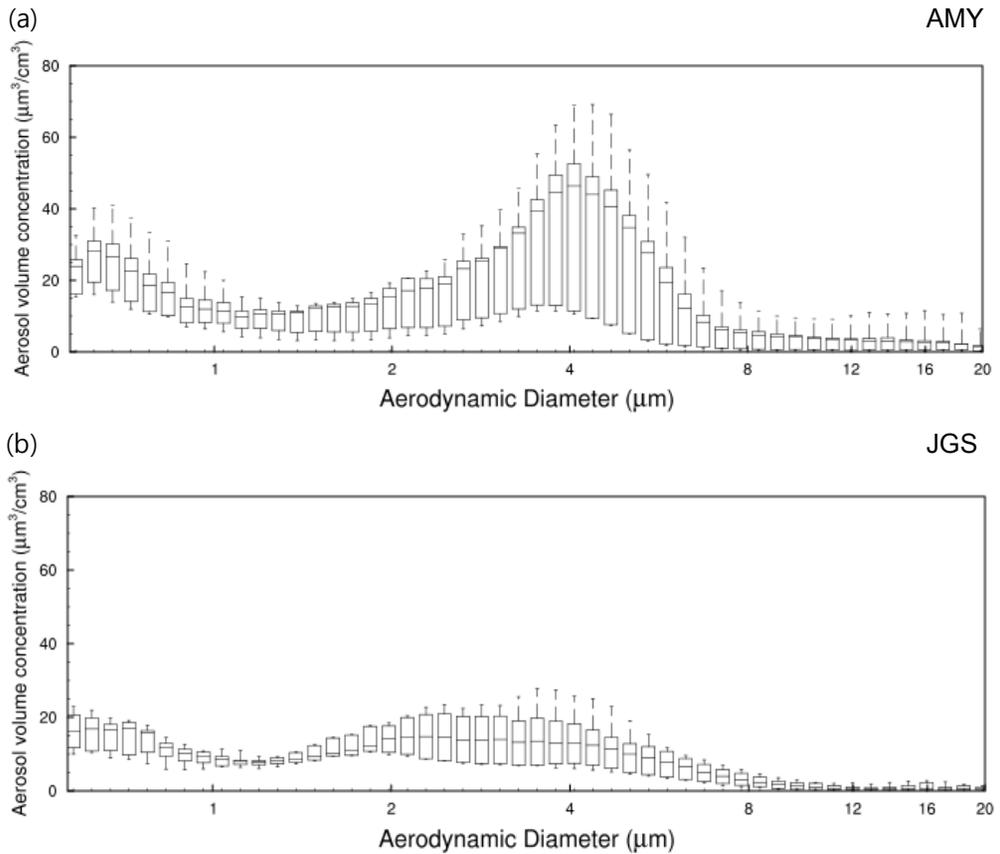


그림 3.3.6 (a) 안면도와 (b)고산에서 측정된 크기별 에어로졸( $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$ , 52 채널) 부피농도 박스플롯(2017년 1월 ~ 8월). 세로실선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값.

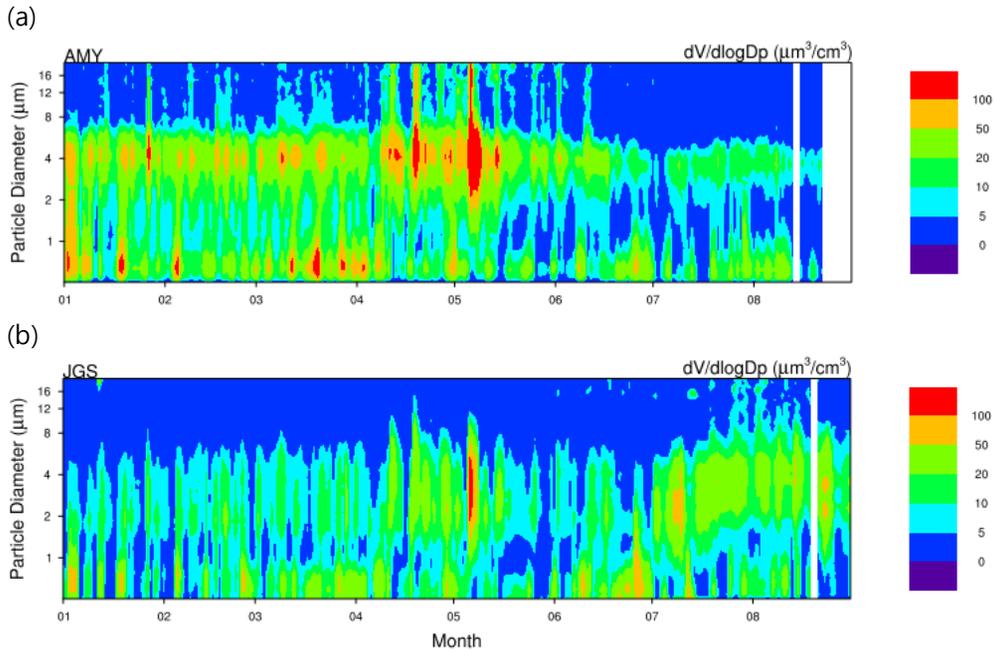


그림 3.3.7 안면도 (a)와 고산 (b)에서 측정한 2017년(1월 ~ 8월) 크기별 에어로졸(0.5 ~ 20  $\mu\text{m}$ , 52 채널) 부피농도( $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$ ) 분포.

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(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 측정할 수 있는 크기로 성장시킨 후에 수농도를 측정한다.

2017년 안면도에서 SMPS로 측정한 초미세먼지 입자크기별 수농도(7월 ~ 12월)는 그림 3.3.8과 같다. 직경 0.1  $\mu\text{m}$  부근에서 입자 수농도의 최대치가 관측되었고, 0.01 ~ 0.1  $\mu\text{m}$  사이인 에이트켄 모드가 축적모드(0.1 ~ 1  $\mu\text{m}$ )보다 우세하며, 여름보다 가을철에 입자 수농도가 높아 이 기간에 입자 생성이 활발하였을 것으로 추정한다. 2017년도에 도입한 SMPS의 축적모드 일부(0.5 ~ 1  $\mu\text{m}$ )가 APS 입자크기 영역의 일부와 중복되어 이 구간의 두 장비 수농도가 일치

하는지 주기적으로 점검하였다. 이 때, SMPS의 전기적 이동도입경(electrical mobility diameter)을 공기역학적입경(aerodynamic diameter)으로 변환하여 비교하였다. 그림 3.3.9과 같이 SMPS 운영 초기에 중복되는 구간의 입자 수농도가 잘 일치하였으나 8월 25일 자료부터 일치하지 않아 두 장비를 점검한 결과 APS에 장애가 생긴 것을 발견하여 제작사에 수리 의뢰하였다.

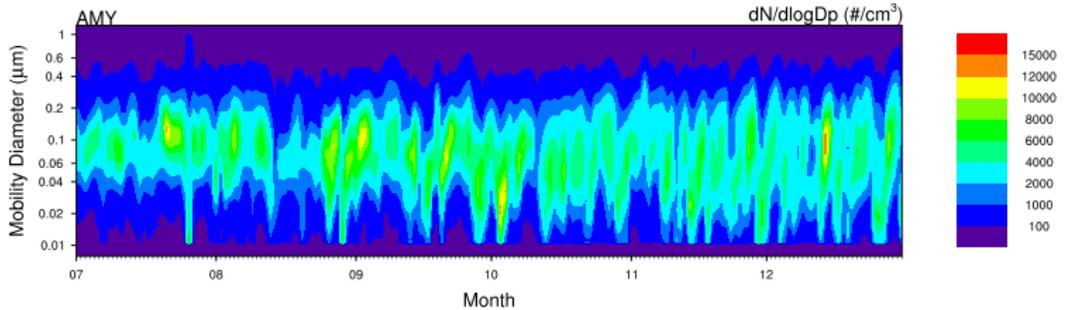


그림 3.3.8 2017년 안면도 미세입자 크기별 수농도 분포(개/cm³).

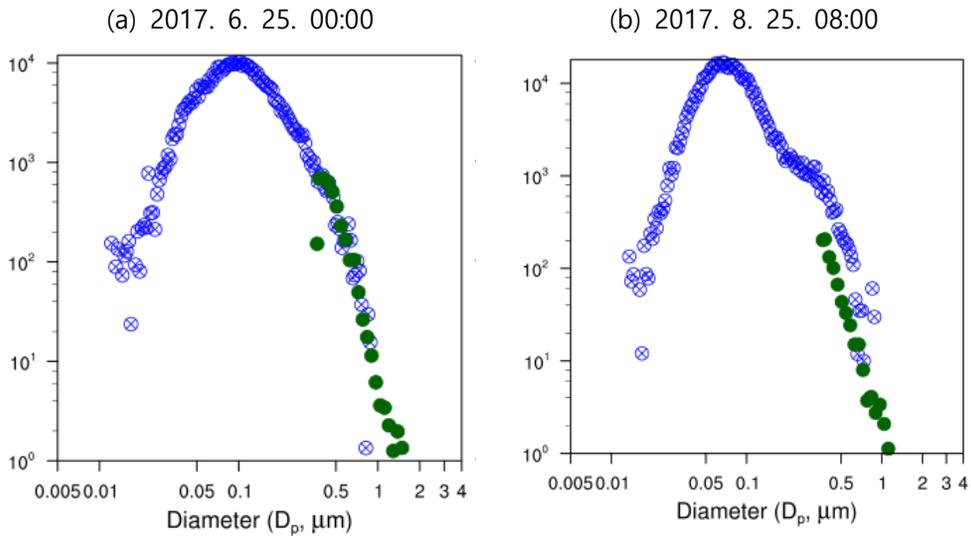


그림 3.3.9 안면도 APS와 SMPS 중복 입자 구간의 수농도 비교 예시.

고산 기후변화감시소에서 운영하고 있는 응결핵계수기는 광학적인 방법으로 측정이 불가능한 작은 크기의 입자를 열역학적 특성을 이용해 광학적으로 측정 가능한 크기로 성장시켜 입자의 수농도를 측정한다. 2017년 고산에서 운영 중인 응결핵계수기를 제작사에 교정 의뢰하였는데, 제작사 점검 결과 수농도가 매우 낮게 측정되고 있다는 의견을 받았다. 따라서 교정이 완료된 10월 이후의 자료만 유효하다고 판단하여 보고서 부록에 제시하였다.

### 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 측정하고, 나머지 5분은 HEPA 필터를 통해 에어로졸이 제거된 공기의 산란계수를 측정하여 에어로졸의 광산란계수를 산출한다. 산란부는 할로겐 램프, 후방산란셔터, 참조변환기로 구성되며, 흡입된 공기를 할로겐 램프로 산란시키고, 후방산란셔터로 광산란계수와 후방광산란계수로 구별한다.

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

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

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 이산화탄소( $CO_2$ )의 광자수를 측정하여  $K_2$ 를 구하여 기기에 대한 검·교정을 실시한다. 2017년은 매월 1회 스펠 체크를 하였고, 필요 시 교정하였다.

광산란계수는 표준대기상태와 기기 보정이 필요하며, 2017년 보고서부터 이

보정을 적용하였다. 표준대기상태(273.15K, 1013.25 hPa) 보정은 관측기기에서 측정하는 온도와 압력을 이용하여 계산하였으며, 보정식은 아래와 같다 (Anderson and Ogren, 1998).

$$\sigma(T, P) = \sigma(STP) \frac{273.15}{T} \frac{P}{1013.25}$$

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.

2017년 1월의 광산란계수 자료는 검·교정의 문제로 사용하지 않았다. 8월 2일부터 11월 29일까지 광산란계수측정기 고장으로 대체 장비로 관측하였다. 이 기간 대체 장비는 700 nm 파장에서 이상을 보여, 700 nm 광산란계수를 이용하여 계산하는 옹스트롬 지수의 경우 이 기간 자료를 제외하였다.

2017년 안면도 기후변화감시소에서 관측한 550 nm의 월평균 에어로졸 광산란계수를 그림 3.3.10에 나타내었다. 2017년 안면도 에어로졸의 월평균 광산란계수는 54.4-131.6  $\text{Mm}^{-1}$ 을 보였으며, 월평균 최댓값과 최솟값은 각각 3월과 10월이었다. 3월을 제외하고 모든 월에서 과거평균(2007 ~ 2016년)보다 4 ~ 46% 낮았고, 특히 10월에는 과거의 약 50%로 매우 낮았다. 3월은 과거보다 7% 높았다.

2007 ~ 2016년 동안 에어로졸 광산란계수는 2007년에 최대(144.5  $\text{Mm}^{-1}$ ), 2016년에 최소(77.2  $\text{Mm}^{-1}$ )였다. 2017년 연평균 에어로졸 광산란계수는 80.0  $\text{Mm}^{-1}$ 으로 2016년 다음으로 낮았다. (그림 3.3.11).

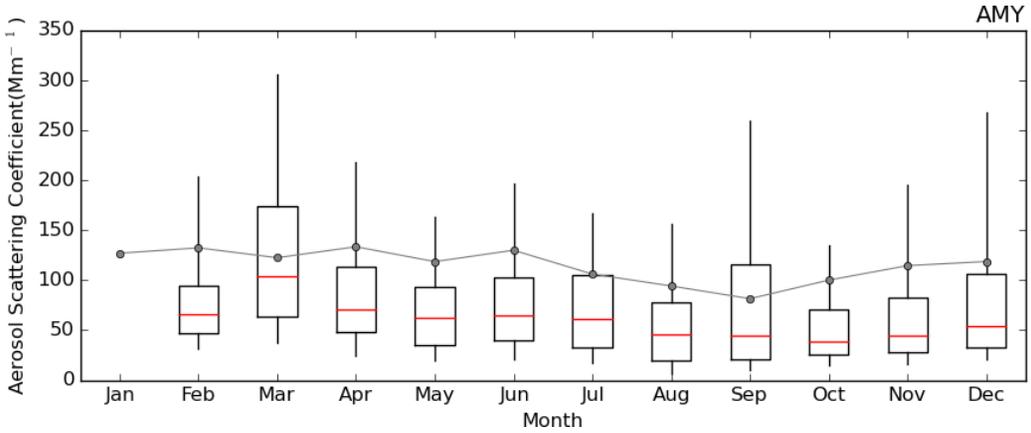


그림 3.3.10 2017년 안면도의 550 nm 광산란계수 월변화(Mm<sup>-1</sup>). 2017년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2016년 평균(점-선).

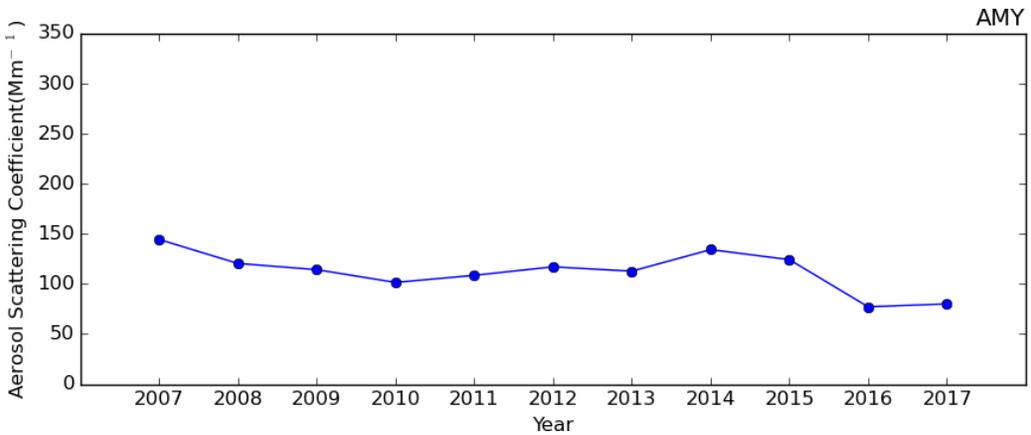


그림 3.3.11 안면도 550 nm 광산란계수(Mm<sup>-1</sup>)의 최근 연평균 변화.

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

$$\sigma_{sp} \propto C\lambda^{-\text{\AA}}$$

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.

$$\text{\AA} = \frac{\log \sigma_{sp}(\lambda_1) - \log \sigma_{sp}(\lambda_2)}{\log \lambda_2 - \log \lambda_1}$$

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

2017년 안면도에서 측정한 월평균 에어로졸 옹스트롬 지수를 그림 3.3.12에 보였다. 2017년에 에어로졸 옹스트롬 지수의 월평균은 1.41 ~ 1.73로 나타났고, 최댓값은 3월, 최솟값은 2월에 관측되었다. 과거 10년 평균과 비교할 때 2, 4 ~ 7월은 6 ~ 15% 낮았고, 3월은 7% 높았으며, 12월은 같았다.

2007 ~ 2016년 동안 산란 옹스트롬 지수는 2015년과 2016년에 최대(1.79), 2007년과 2012년에 최소(1.57)였다. 2017년의 연평균 산란 옹스트롬 지수는 1.53으로 2007년 이래로 가장 낮았다(그림 3.3.13). 이는 높게 관측되는 8, 9월의 관측 자료가 반영되지 않았기 때문으로 사료된다.

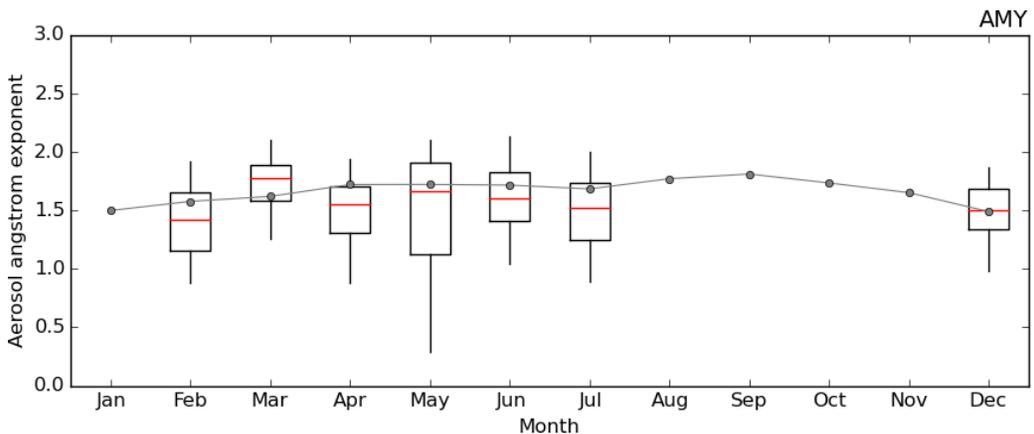


그림 3.3.12 2017년 안면도의 450 ~ 700 nm 옹스트롬지수 월변화. 2017년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2016년 평균(점-선).

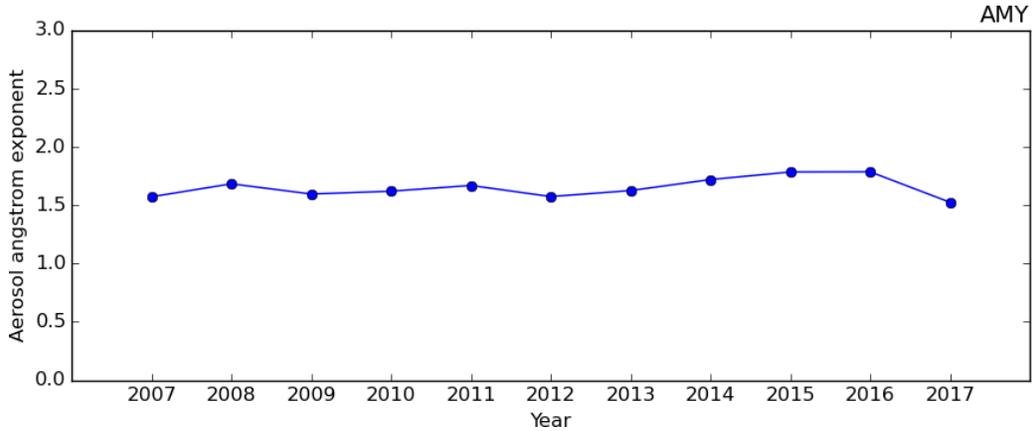


그림 3.3.13 안면도 산란 용스트롬 지수(470 ~ 700 nm)의 최근 연평균 변화.

#### 나. 에어로졸 광흡수계수

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

$$ATN = 100 \ln \left( \frac{I_0}{I} \right)$$

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, 감쇄계수( $\sigma_{ATN}$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_{ATN} = \frac{A}{100Q} \frac{\Delta ATN}{\Delta t}$$

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

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

안면도 기후변화감시소에서는 2001년부터 검댕의 농도를 측정해오고 있다. 2001년 1월부터 2010년 8월까지의 1개 파장의 검댕을 측정하였고(aethalometer, Magee Sci., AE-16), 2010년 9월부터 현재까지는 7파장의 검댕을 측정하는 장비(aethalometer, Magee Sci., AE-31)를 운영하고 있다.

본 보고서부터는 광흡수계수도 표준대기상태로 보정하여 자료를 제시하였다. 광흡수계수측정기는 20℃, 1013.25 hPa의 일정 유량으로 관측되고 있으므로 온도만 표준대기 상태(273.15K)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.

$$\sigma_{ap} = b_{ATN}/C_0$$

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

광흡수계수측정기가 산출하는 검댕의 농도는 기기의 특성 상 실내 온도와 습도 변화에 민감하게 반응한다. 이를 확인하기 위한 실험이 2017년 5월 29일부터 6월 20일까지 있었다. 광흡수계수측정기를 연구동 옥상에서 관측(기존에 사용하던 싸이클론(PM10) 없이 TSP로 관측, 실리카겔 제습)했으며, 검댕의 농도가 변동이 없는 것을 확인하였다. 이후 실내 온습도 변화로 인한 검댕 농도 변화를 최소화하기 위해 광흡수계수측정기 선반에 문을 설치하였다.

7월 13일부터 10월 5일에는 2년마다 시행되는 제작사 정기 교정으로 결측되었다.

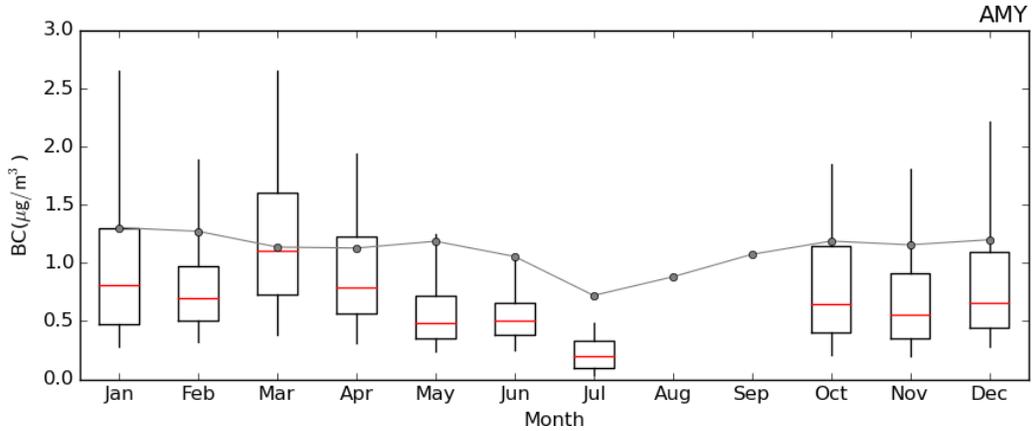


그림 3.3.14 2017년 안면도의 880 nm 검댕 월변화( $Mm^{-1}$ ). 2017년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2016년 평균(점-선).

2017년 안면도 기후변화감시소에서 측정한 880 nm 검댕 농도를 그림 3.3.14에 나타내었다. 2017년 검댕농도 월평균은 0.2(7월) ~ 1.3(3월)  $\mu g/m^3$ 으로 관측되었다. 3월을 제외하고 과거(2007 ~ 2016년) 평균보다 17 ~ 70% 낮았고, 3월에는 최근 10년보다 11% 높았다(그림 3.3.14). 광흡수계수(550 nm) 월평균은 1.7(7월) ~ 10.0(3월)  $Mm^{-1}$ 으로 관측되었다. 3월을 제외하고 과거(2011 ~ 2016년) 평균보다 17 ~ 67% 낮았고, 3월에는 12% 높았다(그림 3.3.15).

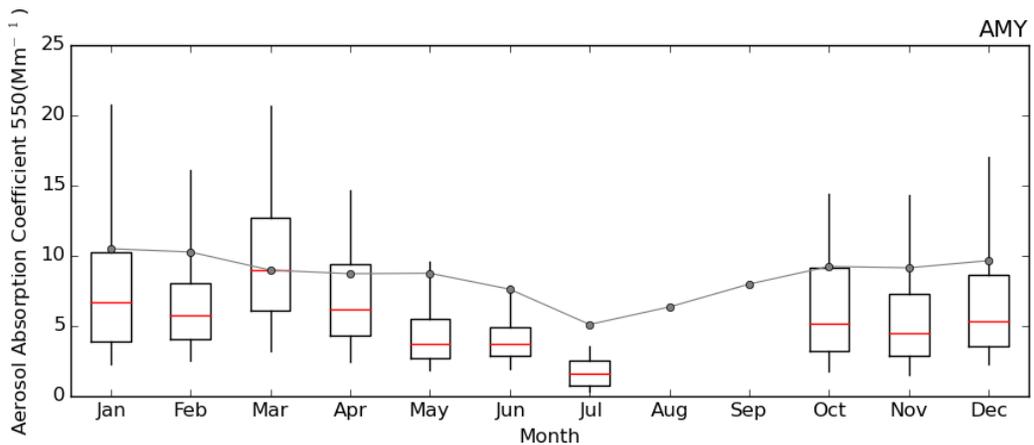


그림 3.3.15 2017년 안면도의 550 nm 광흡수계수 월변화( $Mm^{-1}$ ). 2017년 월별분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2011 ~ 2016년 평균(점-선).

2007 ~ 2016년 동안 검댕의 농도는 2007년과 2013년에  $1.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대였고, 2009년과 2011년에  $1.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최소였다(그림 3.3.16). 에어로졸 광흡수계수(550 nm)는 2012년에 최대( $9.4 \text{ Mm}^{-1}$ ), 2011년에 최소( $7.8 \text{ Mm}^{-1}$ )였다(그림 3.3.17). 2017년의 연평균 검댕 농도와 에어로졸 광흡수계수는 각각  $0.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $6.5 \text{ Mm}^{-1}$ 로 최근 10년과 비교하여 가장 낮았다.

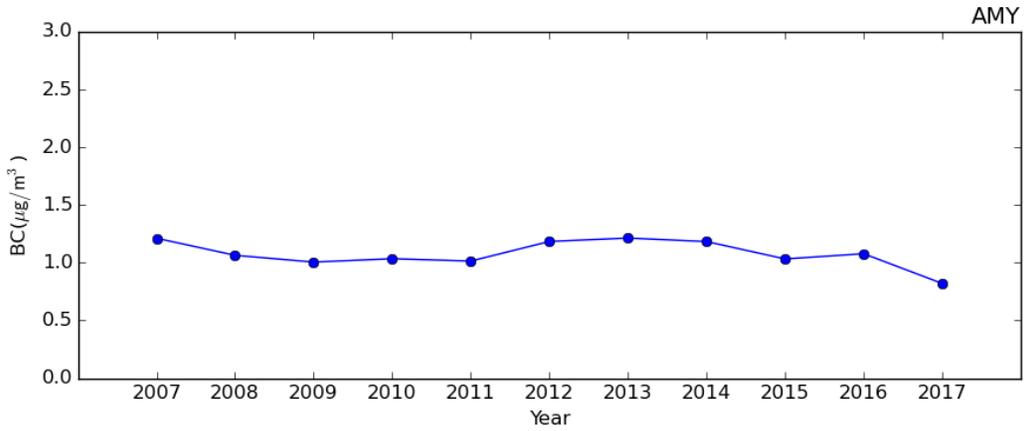


그림 3.3.16 안면도 880 nm 검댕의 최근 연평균 변화.

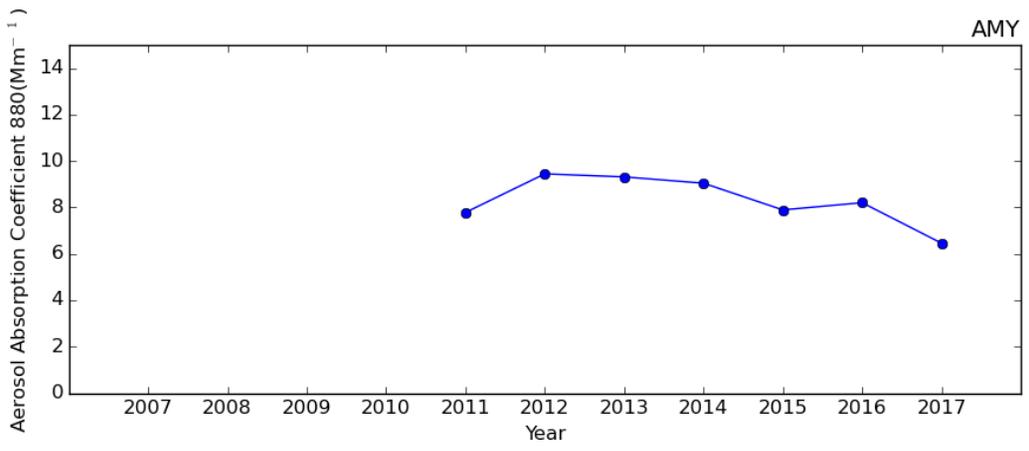


그림 3.3.17 안면도 550 nm 광흡수계수의 최근 연평균 변화.

## 다. 에어로졸 광학깊이(AOD)

### 1) 안면도, 고산, 울릉도

에어로졸 광학깊이(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.

안면도 기후변화감시소에서는 AOD 산출을 위하여 2010년 11월에 GAW-PFR(Precision Filter Radiometer, 스위스 PMOD)로 장비를 설치하였고, 또한 2011년 12월에 제주 고산과 울릉도에 추가 설치하였다. 2017년 안면도와 울릉도의 관측장비는 검교정으로 각각 4 ~ 8월, 1 ~ 8월 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(WORCC: World Optical depth Research and Calibration Centre)에서 제공한 알고리즘을 적용하여 대기의 에어로졸 광학깊이를 산출한다. WORCC의 AOD는 아래와 같은 WMO(1996) 권고사항에 따라 계산된다.

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

이 공식에서  $S$ 는 측정된 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 2017년 안면도, 제주 고산, 울릉도에서 관측된 에어로졸 광학깊이, 옹스트롬지수를 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 2017년까지 관측한 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬지수를 보여주며, 그림 3.3.19과 3.3.21은 2017년 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬지수의 월변동성을 보여준다.

2017년 4월 ~ 9월 사이에 기기 교정으로 인한 공백이 있었다. 2013년 1월 ~ 2014년 4월의 관측결과는 WORCC에서 품질관리가 완성된 자료(○모양)이며, 2014년 5월 ~ 2017년은 자체 분석자료(●모양)이다. 그림 3.3.19와 3.3.21은 안면도의 2017년 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬지수의 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, 옹스트롬지수는 에어로졸의 크기와 반비례 관계를 나타낸다. 즉, 3월에는 에어로졸 광학깊이가 비교적 크고, 옹스트롬지수가 작게 나타나는데 큰 입자로 구성된 황사의 영향을 받은 것으로 사료된다. 한편, 옹스트롬지수가 크고 에어로졸 광학깊이가 비교적 작은 11월 ~ 12월에는 에어로졸의 영향이 약한 가운데 주로 작은 에어로졸의 영향을 받았다.

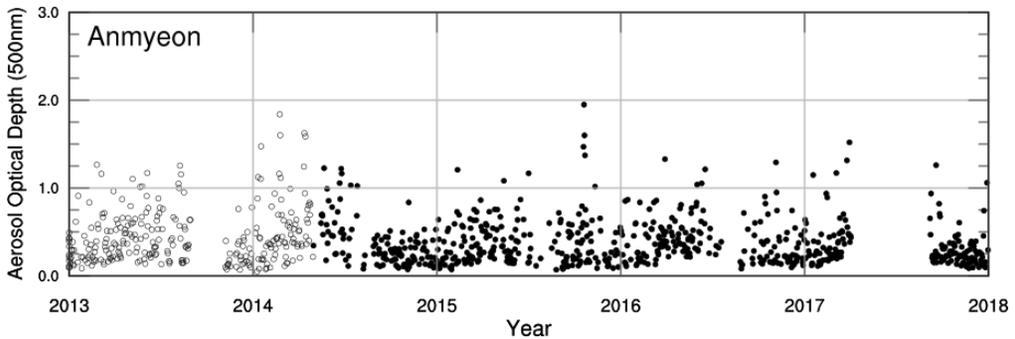


그림 3.3.18 안면도의 에어로졸 광학깊이(2013 ~ 2017년).

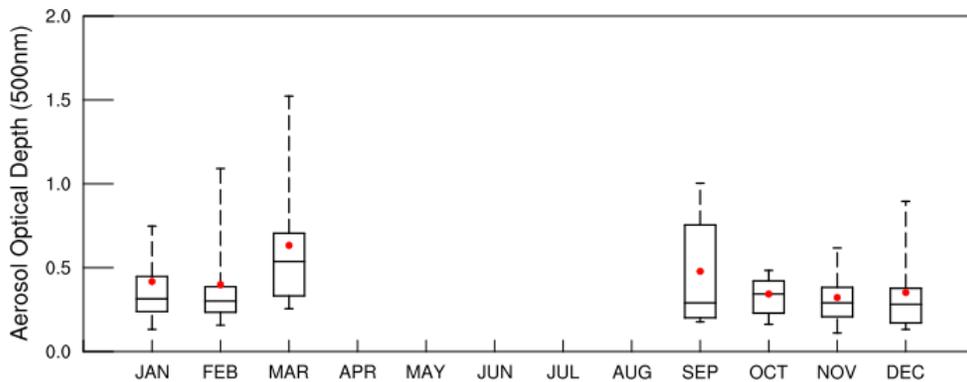


그림 3.3.19 2017년 안면도의 에어로졸 광학깊이 월 변동성(선의 양끝: 5, 95%, 상자 양끝: 25, 75%, 상자가운데 선: 중간값, 붉은 점: 월 평균값).

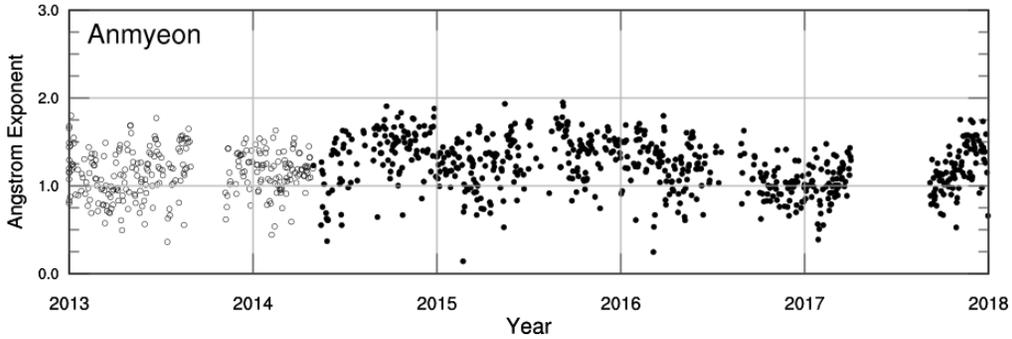


그림 3.3.20 안면도의 에어로졸 옹스트롬지수(2013 ~ 2017년).

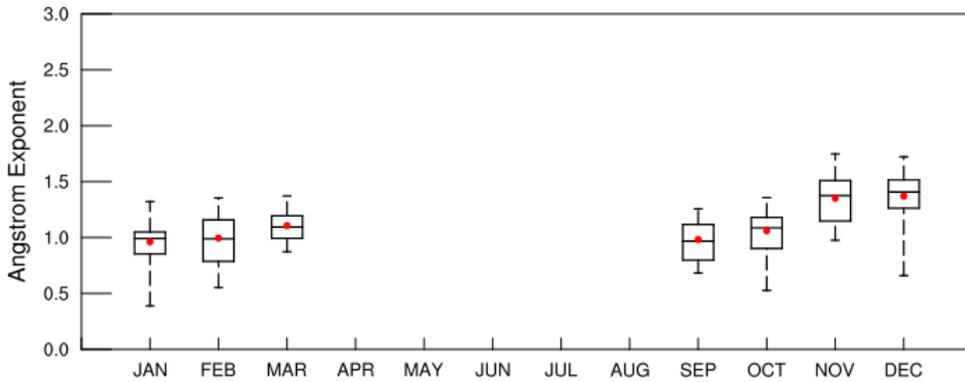


그림 3.3.21 2017년 안면도의 에어로졸 옹스트롬지수 월 변동성.

그림 3.3.22은 고산에서 2013년부터 2017년까지 관측한 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이를 보여준다. 그림 3.3.23은 고산에서 2017년에 관측한 에어로졸 광학깊이의 월변동성을 나타낸 것이다. 2017년 고산의 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이 최댓값은 7월 29일 1.71이었다. 이 그림에서 대체로 봄철과 여름철에 에어로졸 광학깊이의 값이 높은 경향을 보이고, 가을철에서 겨울철에는 작은 경향을 보인다. 봄철에는 황사의 영향으로, 여름철에는 흡습성장하는 에어로졸의 영향으로 인해 에어로졸 광학깊이가 높은 것으로 사료된다. 월평균 최댓값은 0.80(7월), 최솟값은 0.25(10월)로 나타났다.

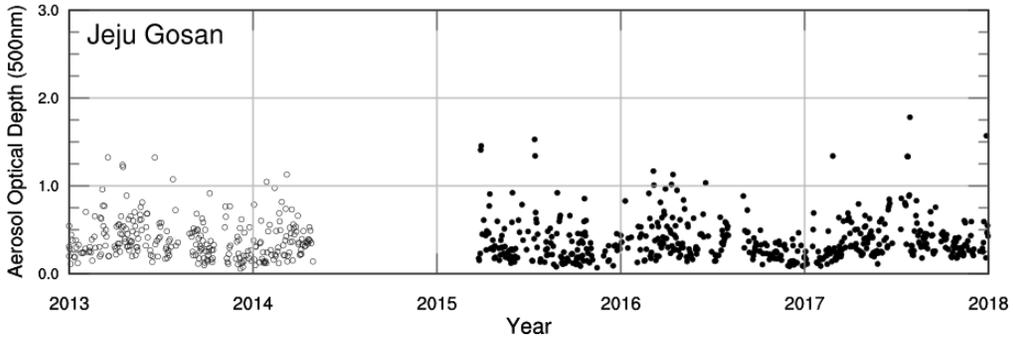


그림 3.3.22 고산의 에어로졸 광학깊이(2013 ~ 2017년).

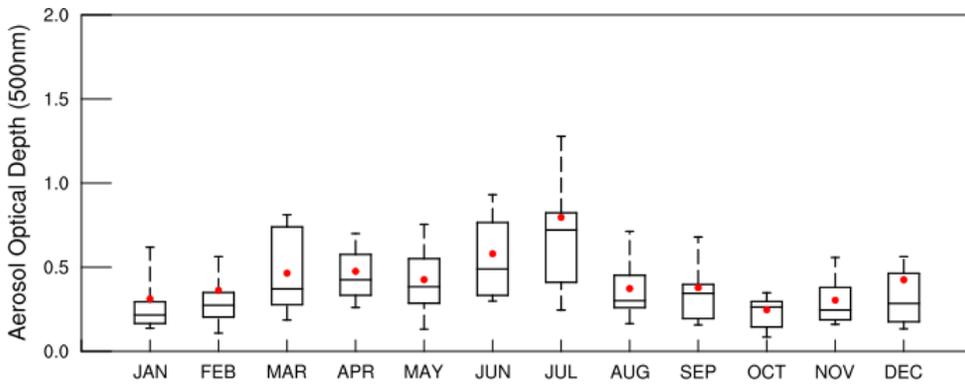


그림 3.3.23 2017 고산의 에어로졸 광학깊이 월 변동성.

그림 3.3.24는 고산에서 2013년부터 2017년까지 관측한 용스트롬지수를 보여준다. 안면도와 같이 용스트롬지수는 대체로 봄철에 낮고 가을, 겨울철에 높게 나타났다. 특히 2017년의 8월 ~ 9월은 2.0 이상으로 높은 값이 나타난 날이 많았다. 2017년 고산의 용스트롬지수의 월변동성을 보면 최댓값은 1.78(8월), 최솟값은 1.21(5월)이었다.(그림 3.3.25). 황사와 같은 조대입자의 영향으로 봄철에 가장 낮은 값을 보인 것으로 사료된다.

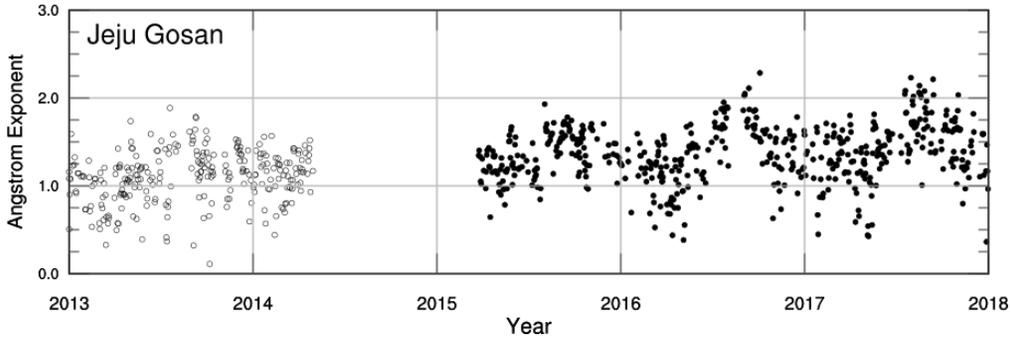


그림 3.3.24 고산의 에어로졸 옹스트롬지수(2013 ~ 2017년).

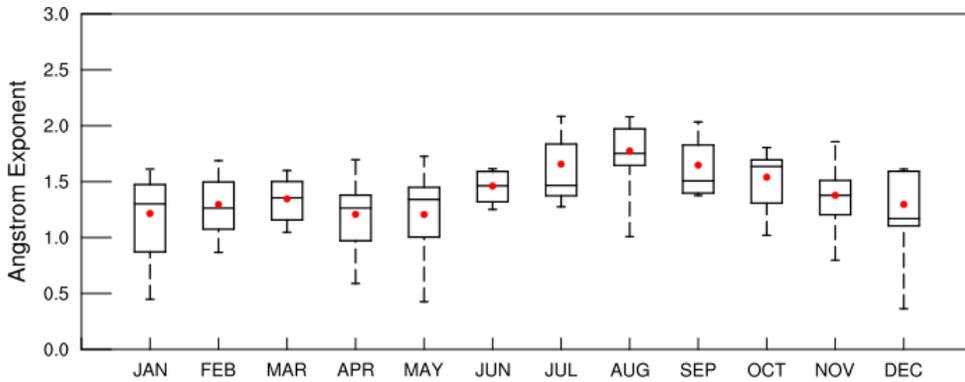


그림 3.3.25 2017년 고산의 에어로졸 옹스트롬지수 월 변동성.

그림 3.3.26과 3.3.28은 울릉도의 2013년부터 2017년까지의 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬지수를 보여준다. 2016년 8월 ~ 2017년 9월 사이에 기기 교정으로 인한 공백이 있었다. 관측기간동안 평균 에어로졸 광학깊이는 0.19 로서 상당히 낮았고, 같은 기간 옹스트롬지수는 1.47 로서 비교적 높은 값을 보이고 있어 작은 에어로졸의 영향을 받은 것으로 나타났다. 2017년에 울릉도에서 기기 교정으로 인한 공백이 있었으나, 그 외 기간동안 관측한 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬지수의 월변동성을 그림 3.3.27과 3.3.29에 표현하였다.

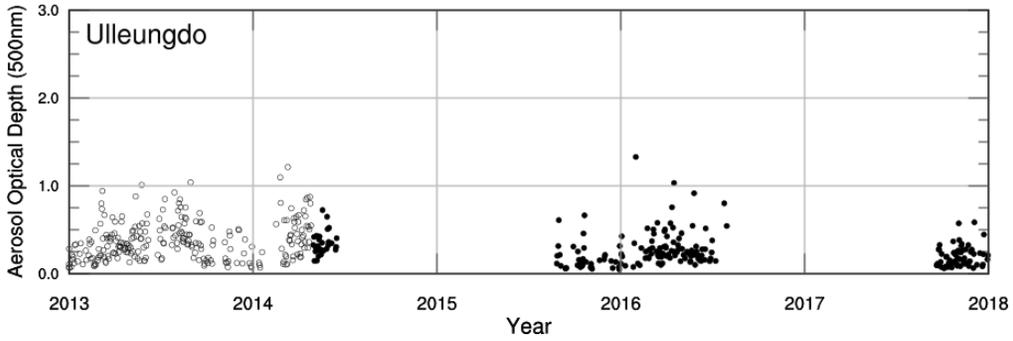


그림 3.3.26 울릉도의 에어로졸 광학깊이(2013 ~ 2017년).

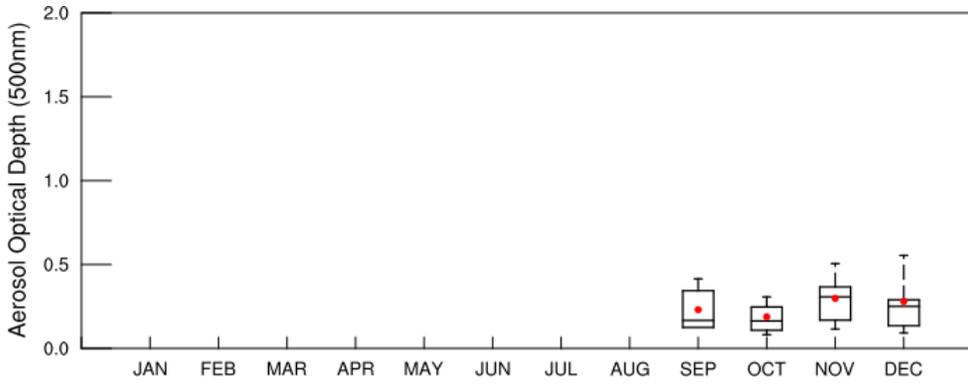


그림 3.3.27 2017년 울릉도의 에어로졸 광학깊이 월 변동성.

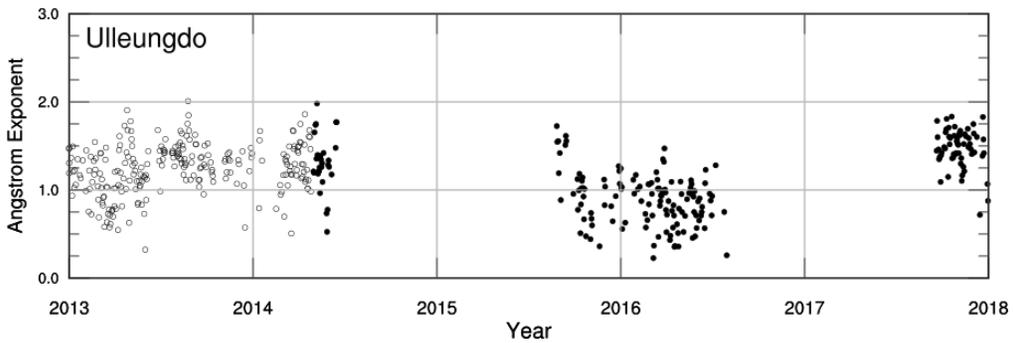


그림 3.3.28 울릉도의 에어로졸 옹스트롬지수(2013 ~ 2017년).

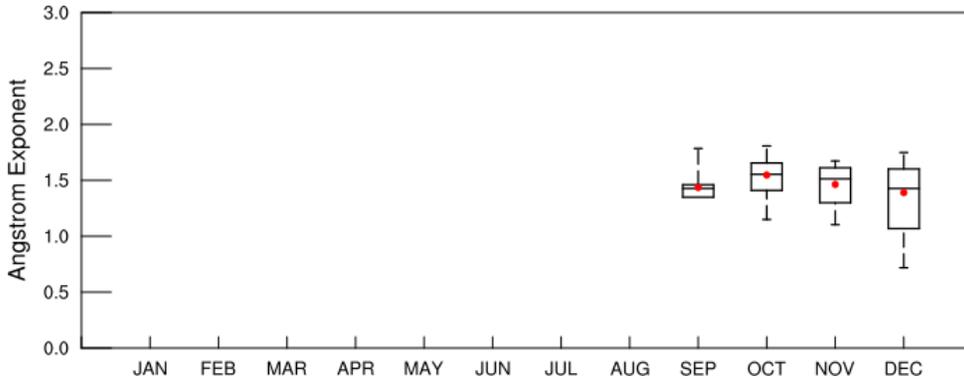


그림 3.3.29 2017년 울릉도의 에어로졸 옹스트롬지수 월 변동성.

## 2) 서울

연세대학교 서울 위탁관측소는 2004년부터 현재까지 Brewer 분광광도계 (SCI-TEC #148)를 이용하여 에어로졸 광학두께(Aerosol optical depth; AOD)를 관측하고 있다. Brewer 분광광도계는 290.5 nm부터 363.0 nm까지 관측하고 있고, 그 중에서 직달관측을 통한 320.1 nm의 파장을 이용하여 에어로졸 광학 두께를 산출하고 있다. 브루어 분광광도계는 일별로 계산된 태양 천정각을 따라서 관측을 수행하기 때문에, 강수가 있는 날에는 직달 관측을 수행할 수 없고, 천정 관측만 수행이 가능하다. 2017년도의 관측가능일은 상반기(2017년 1월 1일 ~ 2017년 6월 31일)는 169일, 하반기(2017년 7월 1일 ~ 2017년 12월 31일)는 165일이다. 2017년은 Brewer 분광광도계가 자동적인 수은램프의 수행 실패로 태양을 제대로 따라가지 못하는 문제가 8월에 가장 많이 나타났으며 (12일), 겨울철에(1 ~ 2월) 통신 케이블의 잦은 끊어짐으로 관측이 수행되지 못하여, 전체 관측일은 334일이다.

그림 3.3.30은 2004년 3월부터 2017년 12월까지의 일평균 AOD를 시계열로 나타내었고, 그림 3.3.31은 장기 월평균(2004 ~ 2016년) AOD와 2017년의 월평균 값을 표시하였다. 장기 월평균의 월 변화는 여름철에 최대, 겨울철에 최소를 보인다. 이는 여름철 습도가 높기 때문에 흡습성장으로 AOD의 농도가 높아짐을 유추할 수 있다. 하지만 2017년은 12월에 최소(0.26), 3월에 최대(1.34)로 나타났으며, 3월의 에어로졸은 2014년도 이후로 가장 높은 값이 관측되었다.

그림 3.3.32는 2004년부터 2017년까지의 연평균 AOD의 경년변화를 나타낸 그림이다. 2017년의 연평균 AOD는 1.05로 전 기간의 평균 AOD인 1.15보다 낮게 나타났으며, 2005년도의 연평균 값과 비슷한 추세를 보였다.

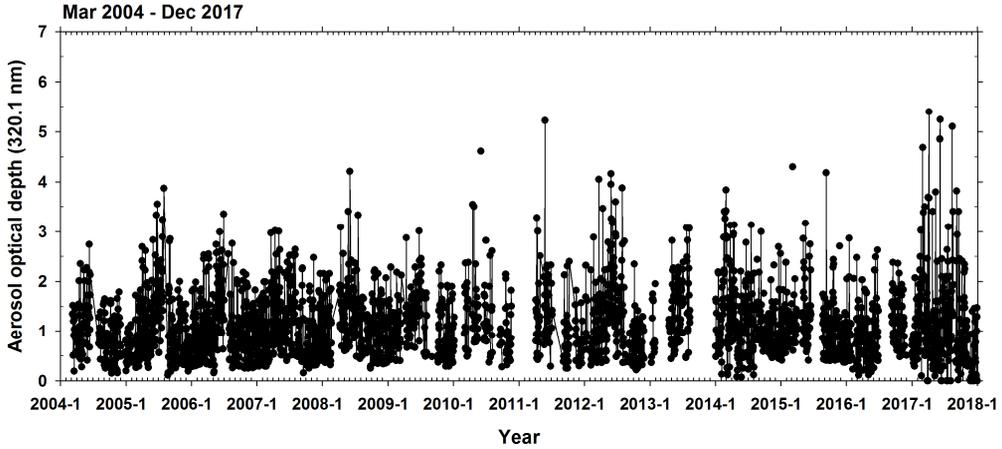


그림 3.3.30 일평균 AOD (320.1 nm)의 시계열(2004.3. ~ 2017.12.).

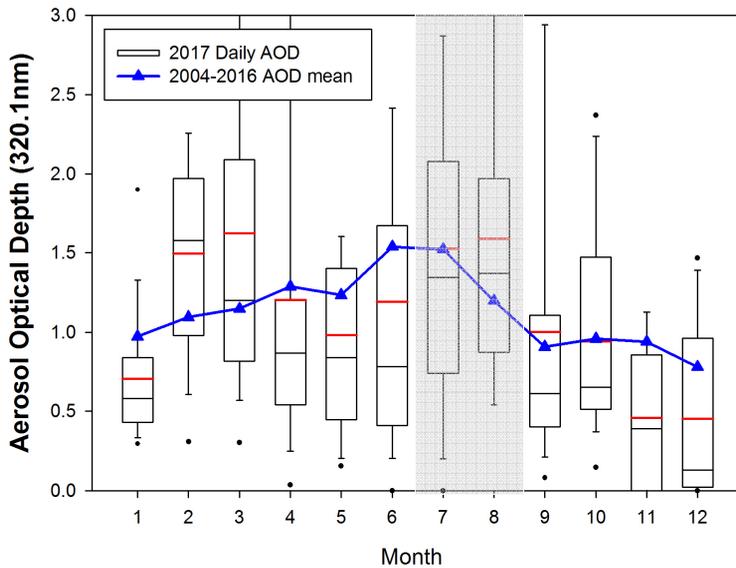


그림 3.3.31 서울 상공 AOD의 2017년 연 변화(상자 그림: 2017년의 AOD, 선의 양 끝: 10, 90%, 상자 양끝: 25, 75%, 상자가운데 붉은 선: 월 평균값, 검은 선: 중간 값, 상자 양끝의 검은 점: 최댓값 및 최솟값)와 2004년부터 2016년도의 월평균(2017년의 7월 및 8월은 평균값에 사용된 데이터의 수가 월 15개 미만으로 신뢰도가 낮음).

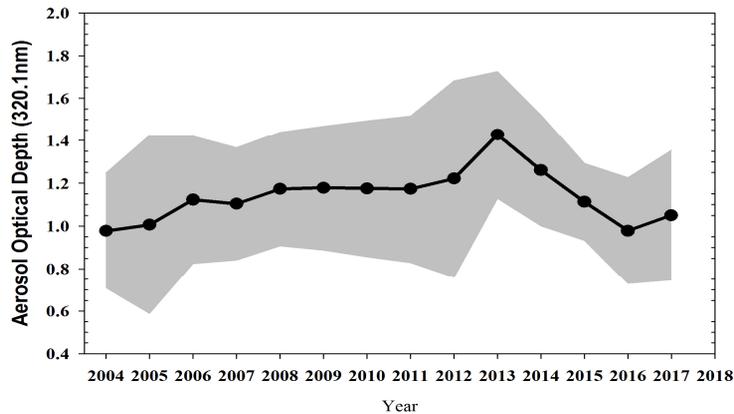


그림 3.3.32 서울 상공 AOD의 2004년부터 2017년까지의 연 변화(점선은 연평균 값, 음영부분은 연평균 값의 표준편차).

### 3) 광주

광주과학기술원은 지난 2004년부터 CIMEL사의 태양 파장별 일사계(Sun/sky radiometer 또는 Sunphotometer)를 이용하여 광주광역시에 위치한 광주과학기술원 내 다산빌딩 옥상(35.22° N, 126.84° E)에 설치되어 현재까지 운영 중이다(그림 3.3.33). 본 장비는 대기 중 구름이 없는 태양광을 이용하여 에어로졸 광학적 깊이(Aerosol Optical Depth; AOD)를 측정하고 역산 알고리즘(Inversion algorithm)을 통해 앙스트롬지수(Angstrom Exponent:  $\alpha$ ), 에어로졸 입자의 크기 분포(Aerosol volume size distribution), 단산란 알베도(Single scattering albedo; SSA) 등의 에어로졸 광학적 특성을 산출해 오고 있다(Duvobik과 King, 2002). 현재 광주과학기술원의 태양 파장별 일사계는 전 지구적 에어로졸의 광학적 특성 산출 및 인공위성의 에어로졸 광학적 깊이의 검보정에 활용에 이용하고 있다. 미항공우주국(NASA)의 에어로졸 로봇 네트워크(AErosol RObotic NETwork; AERONET)에 소속되어 있어 AERONET 사이트(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)를 통해 실시간으로 자료가 업데이트되고 있어 사용자에게 편의를 제공하고 있다. 태양 파장별 일사계의 관측 파장은 자외선 영역인 340 nm 파장과 가시광선 영역의 380 nm, 440 nm, 500 nm, 675 nm, 870 nm의 5개 파장과 적외선 영역인 1020 nm 파장에서의 태양 광도를 측정한다. 특히 중국으로부터 유입되는 황사의 영향 연구를 위해 1640 nm 파장 채널을 추가 설치하여 관측을 진행 중에 있다. 본 장비는 에어로졸의 광학적 특성을 바탕으로 정량적 분석이 가능하다.

광주과학기술원의 다파장 라만 라이다(Multiwavelength Raman lidar)는 2002년부터 광주과학기술원에 설치 운용 중이며, 한반도로 유입되는 대기 에어로졸의 수직적 분포 및 미세 물리적 특성을 파악하는데 중요한 역할을 하고 있다. 2002년 처음 광주과학기술원에 설치된 다파장 라만 라이다는 지속적으로 개발 및 성능을 향상시켰으며, 현재는 11개 채널(탄성산란 채널 2, 라만산란 채널 2, 수증기 채널 1, 편광소멸도 관측 채널 4, 석영관측 채널 2)과 일부 스펙트로미터를 포함하고 있다. 2017년에는 새로운 스펙트로미터를 위탁관측소 지원을 받아 설치하고 다양한 파장영역의 관측이 가능하도록 테스트하고 있으며, 2018년에는 스펙트로미터를 통해 관측 파장영역을 확대하여 관측할 예정이다.

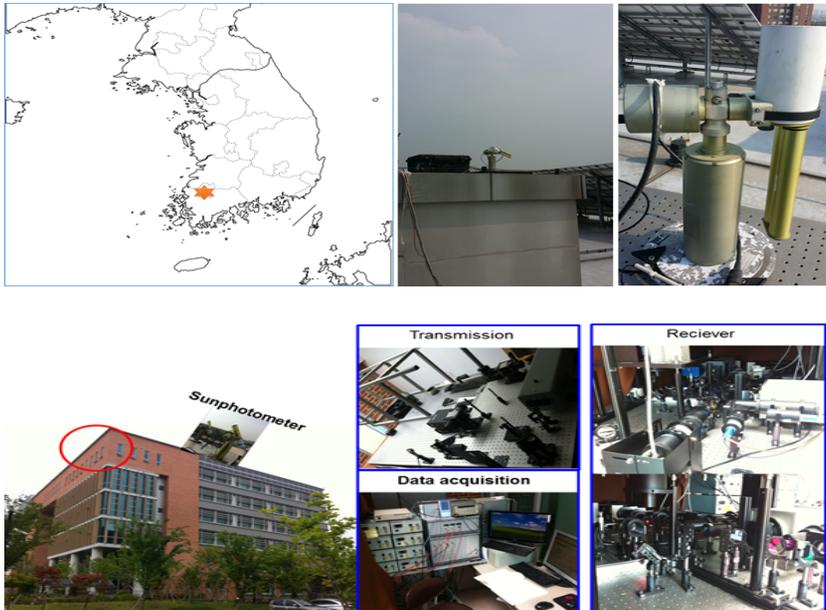


그림 3.3.33 광주과학기술원에 태양 파장별 일사계 및 라만라이다 위치 및 설치현황.

광주 지역에 설치된 태양 파장별 일사계는 광주 북쪽 외곽지역에 설치되어 광주 중심가에 비해 인위적 오염 에어로졸이 적게 발생하지만 주변에 일부 공장 지대와 농경지가 근접해 있어 공장으로 발생하는 인위적 오염물질과 농경지에서 발생하는 생체소각(Biomass)의 영향으로 다양한 종류의 지역적 에어로졸이 발생한다. 중국으로 발생하는 황사와 연무 같은 장거리 수송 에어로졸도 종종 발생한다.

표 3.3.1은 2017년 월별 관측일수 및 관측 횟수를 표시한다. 2017년에는 7월부터 12월까지 장비의 수리 및 관측의 검보정 작업으로 인해 관측을 수행하지 않았다. 2016년에는 관측이 가능한 날(맑은 날)에 지속적으로 관측이 수행되어 총 148일 관측에 672회의 관측이 수행되었고, 2017년에는 한미대기질합동연구(KORUS-AQ) 예비 관측과 본 관측을 위해 기존에 약 15분에 1번씩 관측하는 관측횟수를 약 5분에 한번 관측하여 횟수를 증가 시켰다. 관측일수는 검보정 작업으로 인해 109일로 감소하였지만 관측횟수는 5,302로 증가 되었다.

표 3.3.1. 2017년 태양 파장별 일사계 월별 관측일수 및 관측 횟수

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	총
관측일수	22	10	6	20	20	20	1	0	0	0	10	0	109
관측횟수	1331	752	73	1026	1222	897	1	0	0	0	0	0	5,302

그림 3.3.34는 태양 파장별 일사계로 측정된 2015년 월별에 따른 수증기량 (a), 440 ~ 870 nm 두 개의 파장에서 옹스트롬지수 (b), 440 nm 파장에서 에어로졸 광학적 두께 (c) 자료를 2004년부터 2014년까지의 관측 결과의 평균 자료와 비교하여 나타낸 그림이다. 옹스트롬지수는 대기 중 부유하는 에어로졸의 크기분포를 나타내는 척도로 황사처럼 입자의 크기가 큰 에어로졸이 관측되어 있을 때 0에 가까운 낮은 값을 보이고 입자가 미세한 에어로졸일수록 2에 가까운 큰 값을 갖는다. 에어로졸의 광학적 두께는 대기 중에 존재하는 에어로졸에 의해 빛이 산란과 흡수를 통해 소산되는 양을 측정된 것으로 대기 중에 많은 에어로졸이 분포하면 값이 높아진다. 2017년 관측 데이터는 구름에 의한 영향이 제거되어 바로 산출된 Level 1.5 자료를 사용하였으며, 2004년부터 2016년까지의 데이터는 검증된 Level 2.0 자료를 적용하였다. Level 2.0 자료는 연속적으로 관측된 값들 중에 큰 변동성을 갖는 자료를 제거하고 일 변동에서 표준편차를 적용하여 만족하지 않는 자료를 제거하는 방법을 사용한다.

그림 3.3.34에서 2004년 ~ 2016년 평균 에어로졸 광학적 두께는 0.44이고 2017년 평균 에어로졸 광학적 두께는 0.64로 높아졌다. 2017년 8월 ~ 12월을 제외한 평균 에어로졸 광학적 두께이지만 3월의 평균 에어로졸의 광학적 두께가 1.49로 2004년 관측 이래 월평균 에어로졸 광학적 두께가 가장 높았다. 2004년 ~ 2016년 에어로졸 광학적 두께 월별 평균값의 범위는 0.23 ~ 0.74이고, 1월에 최저값을 보이고 6월에 가장 높았다. 2017년 에어로졸 광학적 두께의 월별

평균값의 범위는 0.27에서 1.49이다. 3월과 7월에는 1.0을 초과하였다.

2017년도의 파장별 먹지수 값은 관측일수가 적은 7월과 3월, 4월을 제외하고 1.0이 넘는 높은 값을 보이고 있어 광주지역에 발생하는 에어로졸의 입자의 크기는 작은 것으로 나타났다(그림 3.3.34(b)). 2017년 3월과 4월의 경우 과거에 비해 파장별 먹지수 값이 현저하게 낮은 값을 보이는데 이는 입자가 큰 에어로졸(황사 등)이 장거리 수송되어 대기 중에 영향을 미친 것으로 판단된다.

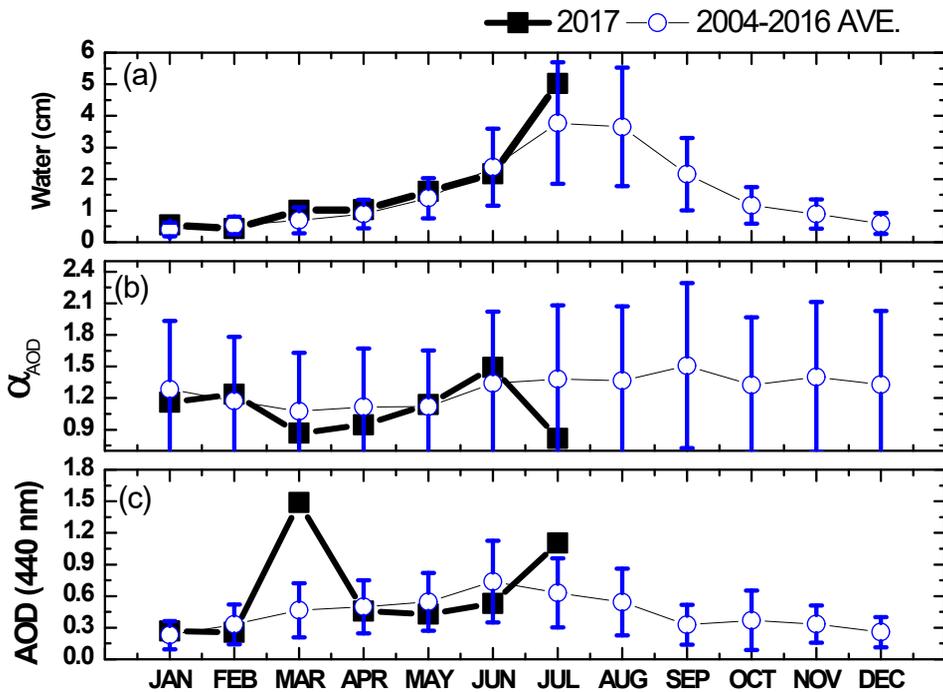


그림 3.3.34 (a) 광주지역 광흡수 용스트롬지수, (b) 광소산 용스트롬지수, (c) 440 nm에서의 에어로졸 광학적 두께. 사각형은 2017년 관측 결과, 원형은 2004년부터 2016년까지 관측 결과.

그림 3.3.35는 2017년에 1월에서 12월까지 관측된 월별 대기 에어로졸의 입자 크기 분포를 보여주고 있다. 입자 크기 분포는 관측된 입자의 입경이 1  $\mu\text{m}$  이상인 조대입자와 이하인 미세입자로 표현되며, 그림에서 표현되는 조대입자와 미세입자의 봉우리 높이와 폭으로부터 각각의 입자 분포를 파악할 수 있다.

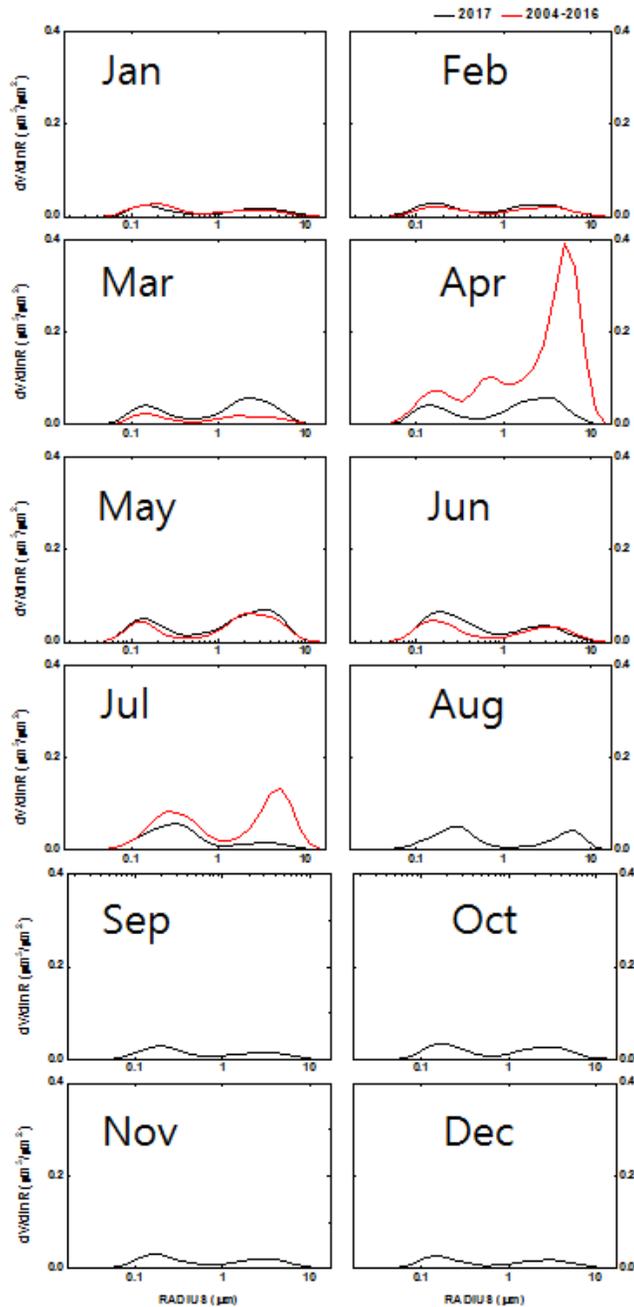


그림 3.3.35 2017년(검정)과 2004년 ~ 2016년(빨강) 월별 평균 입자크기 분포.

그림 3.3.35는 2017년 월별 평균 입자크기 분포와 2004년 ~ 2016년 월별 평균 입자크기 분포를 비교하였다. 2004 ~ 2016년 동안 평균 입자크기 분포의 경우에는 3월 ~ 5월을 제외하고 미세먼지 중 조대입자에 비해 미세입자의 비율이 높은 분포를 보이거나 같았다. 2017년 4월의 경우 장거리 수송된 황사의 영향으로 판단된다. 일반적으로 미세먼지와 조대입자가 쌍봉형태를 보이는데 이 경우에는 조대입자 중 5 ~ 10  $\mu\text{m}$  입자의 비율이 높아진 형태를 보였다.

그림 3.3.36은 2016년 4개 파장(440, 675, 870, 1020 nm)에서의 월별 평균 단산란 알베도의 변화를 보여준다. 단산란 알베도는 대기 중에 존재하는 에어로졸이 태양광을 흡수하는 특성을 나타내는 지표로서 0에서 1 사이의 값으로 나타내어 1에 가까운 값일수록 광흡수 특성이 없고 1보다 낮은 값을 보일수록 광흡수 특성이 높음을 의미한다. 또한 단산란 알베도는 파장에 따른 값의 변화로부터 에어로졸의 종류를 유추할 수 있게 한다. 연무와 같은 인위적 오염 물질이나 산불 등에 의하여 발생된 바이오메스 에어로졸의 경우 파장이 증가함에 따라 단산란 알베도 값이 감소하는 경향을 보이거나, 황사의 경우 파장이 증가함에 따라 단산란 알베도가 증가하는 경향을 보인다. 특히 2017년 3월과 4월의 경우 440 nm에서의 단산란 알베도가 감소하는 경향을 보이는데 이는 비산하는 황사 입자의 특징이다. 황사의 주요 성분인 산화철이 자외선 영역대와 낮은 파장대의 가시광선 영역대에서 높은 광흡수 특성을 가지는데 파장이 낮을수록 낮은 단산란 알베도를 보인다. 그림 3.3.35의 입자의 크기 분포 자료에서 4월에 조대 입자에 비해 미세입자의 비율이 현저히 높은 것으로 확인되었고 그림 3.3.36의 2017년 4월에 440 nm에서 단산란 알베도가 다른 파장의 단산란 알베도에 비해 낮아지는 도양입자로 기인한 미세먼지의 광학적 특성이 보였다. 2004년부터 2016년 평균 자료에 의하면 파장이 길어질수록 단산란 알베도가 낮아지는 경향을 보이는데 이는 인위적 배출 에어로졸의 일반적인 광학적 특성이다. 2017년 7월의 경우 데이터수가 적어 평균 단산란 알베도값이 낮았다.

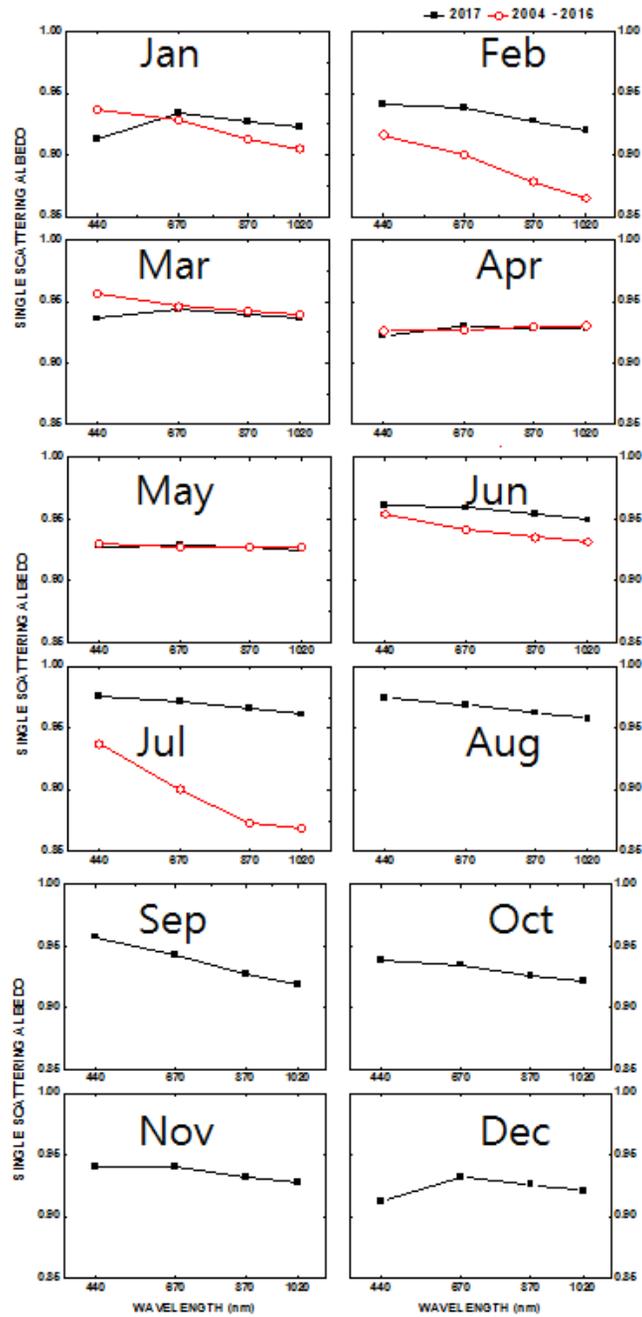


그림 3.3.36 2017년(검정)과 2004 ~ 2016년도(빨강)의 월별 평균 단산란 알베도.

## 마. 에어로졸 연직분포

### 1) 안면도

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

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 3.3.37). 관측된 신호로부터 비편광도와 후방산란비 등 다양한 요소들로 재산출되며 이러한 2차 산출자료들은 황사와 연무의 판별과 에어로졸의 연직 광학특성 분석 등에 활용된다. 안면도 기후변화감시소의 다파장 편광라이다의 세부 규격은 표 3.3.2와 같다.

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)

(a)



(b)

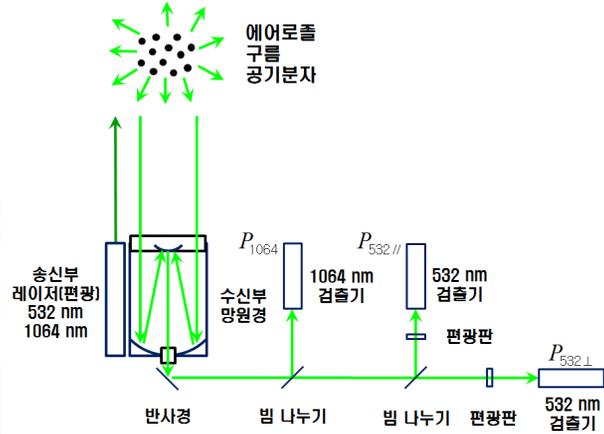


그림 3.3.37 안면도 기후변화감시소 에어로졸 라이다(MPoLAR 2020; Multi-wavelength Polarization Lidar for Atmospheric Research 2020)와 (b) 라이다 관측원리 모식도.

2017년 안면도 기후변화감시소 에어로졸 라이다의 자료생산율은 71% 수준이며 주원인은 장비고장수리(64.9%), 우천(35.9%), 프로그램장애(4.3%), 장비점검(0.65%) 순이다. 특히, 2017년 2월 19일부터 4월 25일 사이는 장비 노후화 때문에 레이저 발진장치 장애의 수리관계로 장비운영이 중지되었다. 그 밖에 여름철 우천 시에 장비보호를 위한 예방차원의 관측중지가 많았다.

그림 3.3.38은 2017년 동안 안면도 에어로졸 라이다에서 생산된 원시자료로 그린 후방산란강도, 편광소멸도, 후방산란비의 연직 일평균 시계열이다. 빨간 삼각형은 우리나라에서 2017년에 황사가 관측된 날을 표기하였다. 2017년에 총 10회의 황사가 유입되었으며 황사가 관측된 일수는 총 14일이다. (a) 라이다 후방산란강도 그림은 대기 중에 부유물질이 많을 경우에 후방산란강도 값이 크게 나타난다. 2017년의 후방산란강도 연직변화는 11월을 포함하여 북서풍이 강하게 부는 겨울과 봄에 상대적으로 높게 측정되었다. 다른 계절과 비교해 상대적으로 대류경계층보다 높은 1km 이상까지 후방산란강도 값이 크게 나타나는 날이 빈번했다. 반대로 남서풍이 들어오는 여름과 일부 가을철(9월, 10월)에는 상대적으로 지표면 주변으로 후방산란강도가 높은 특징을 보였다. (b) 라이다 비편광도는 비구형 부유분진 입자들이 많을수록 값이 높아진다. 대체로 빙정 상태의 구름이나,

황사와 지표면 부유분진의 탐지에 유용하다. 2017년에 관측된 라이다 비편광도의 연직분포는 황사, 부유분진의 영향이 큰 3 km 이하에서 큰 값이 자주 측정되지만, 빙정을 포함한 구름의 영향으로 대류권 중층에서도 비편광도가 높게 관측된 경우도 빈번했다. (c) 라이다 후방산란비는 1064 nm의 후방산란신호와 534 nm의 후방산란신호의 비를 나타내며 큰 입자가 많을수록 값은 커진다. 대기 중에서 대체로 큰 입자직경을 가지는 에어로졸(황사, 지표면 비산먼지)이나 수적(구름, 안개)이 많을수록 값이 커지게 된다. 2017년 가장 고농도 황사로 기록된 5월 초에 후방산란비가 높게 관측되었으며, 황사 외에도 구름, 안개 등의 영향으로 다양한 시기와 고도에서 후방산란비가 높았다.

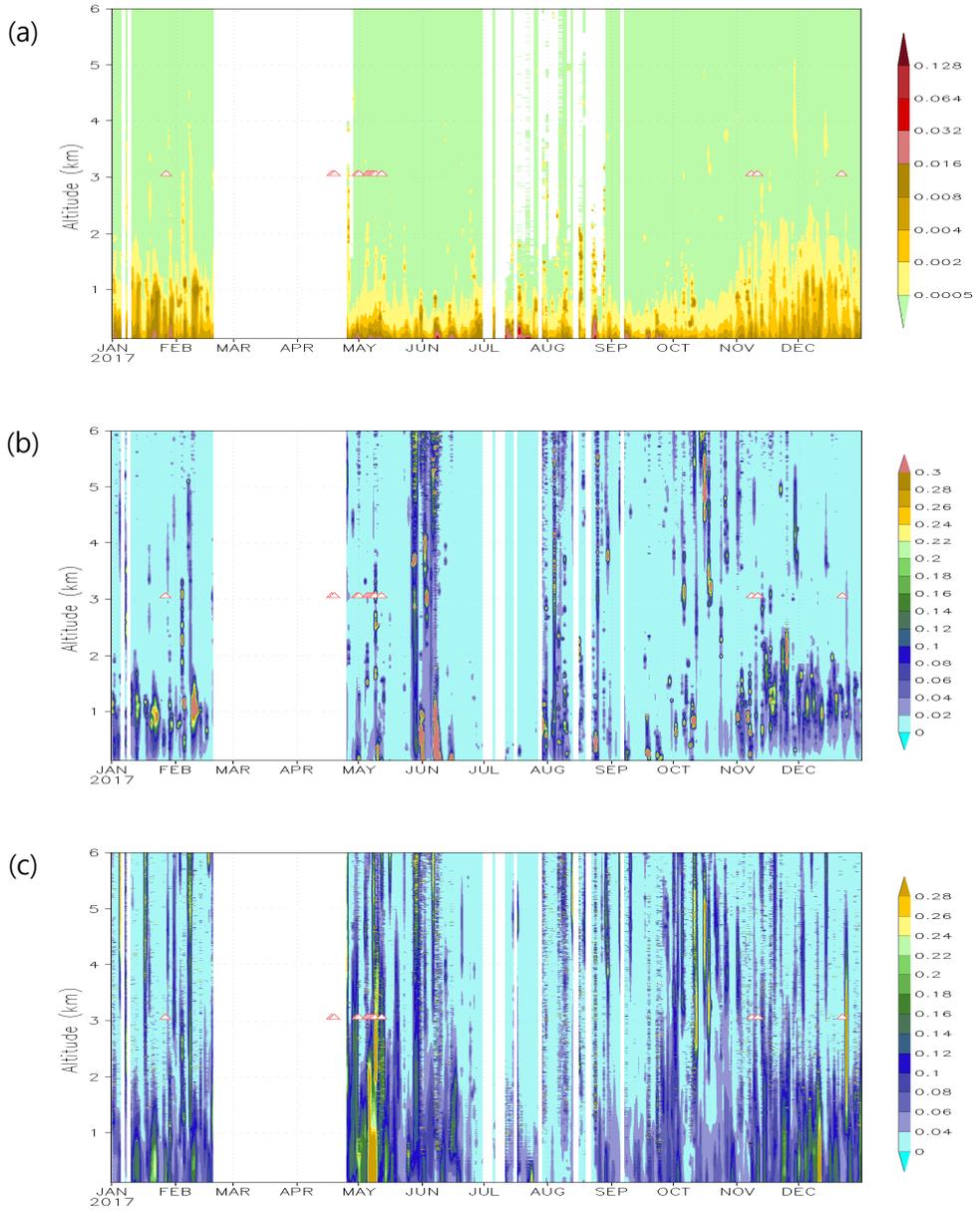
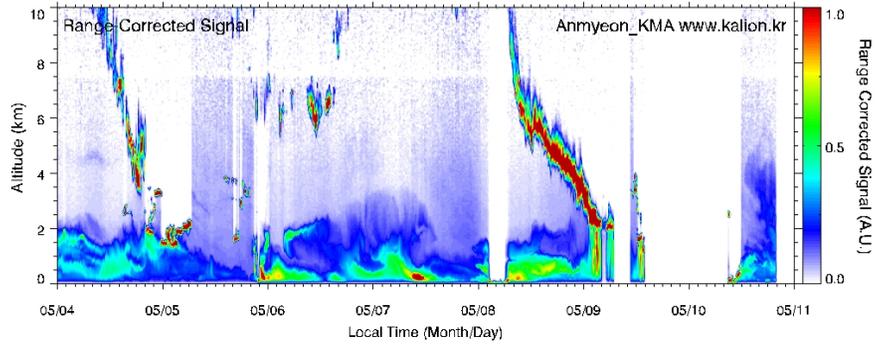


그림 3.3.38 2017년 안면도 기후변화감시소에서 측정된 에어로졸 라이다 원시자료 (a) 후방산란강도, (b) 편광소멸도, (c) 후방산란비, 빨간 삼각형(Δ)은 2017년 황사발생일.

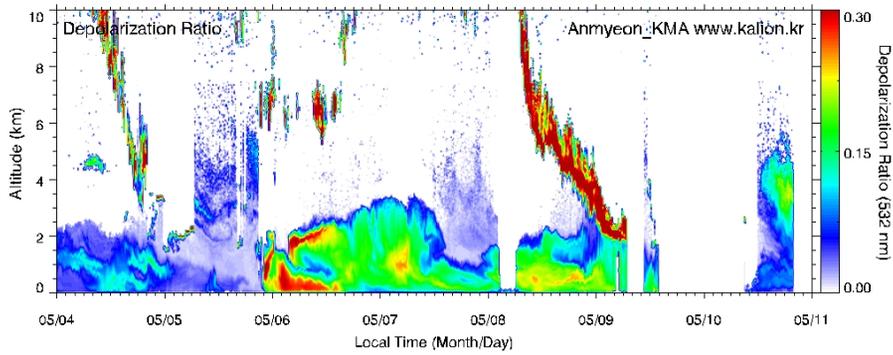
안면도 라이다에서 관측된 대기 중 부유물질의 연직 광학특징으로부터 화산, 산불, 황사, 연무 등을 구분하고 이들이 이동하는 고도와 두께를 실험 감시하는 목적으로도 라이다를 활용하고 있다. 실제 2010년 아이슬란드 화산활동 때문에 유럽 상공의 모든 항공기 운항이 전면 금지되었을 때, 유럽 라이다 네트워크(EARLINET, European Aerosol Research Lidar Network)에서 화산재의 고도와 두께 정보를 실험으로 제공하여 항공운항 대란 해소와 항공사고 예방에 크게 기여하였다. 기상청도 한반도의 황사, 연무, 산불, 화산 등에 신속히 대응하고자 라이다 네트워크(KALION, Korea Aerosol LIDAR Observation Network)를 결성하였고 국내 학·연·관에서 관측되는 라이다 자료를 수집하여 정보공개를 하고 있다. 또한 라이다에서 관측된 자료로부터 황사·연무의 판별, 연직 질량농도 산출, 대류경계층 고도 등 보다 유용한 2차 정보를 산출하여 KALION 홈페이지(<http://www.kalion.kr>)에 상시 표출하고 있다.

그림 3.3.39은 2017년 우리나라에 관측된 총 10회의 황사사례 중에 가장 높은 농도가 기록된(420  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 백령도) 황사 관측기간 동안 KALION에서 제공한 안면도 라이다 자료를 활용한 황사·연무 판별 결과이다. (a)는 후방산란강도, (b)는 비편광도, (c)는 황사연무 판별결과를 각각 나타낸다. 5월 5일부터 9일까지 이어지는 지표면에서 3 km까지의 후방산란강도 값이 크고 그 기간 비편광도 값이 커서 실시간으로 황사·연무 판별결과 황사(황색)임을 판별하고 그 결과를 제공하였다. 또한 5월 4일과 5월 8일에 각각 대기 중층에서 시간에 따라 대기 하층으로 내려오는 신호는 판별결과 구름으로 청록색으로 채색되었다. 2017년 관측된 황사 중 가장 고농도로 기록된 이 황사사례는 지면에 접하여 한반도로 밀려들어 들어온 경우로 지상에서 3 km 고도까지 황사입자가 분포하였다. 황사가 저기압후면에서 구름과 강수를 동반한 현상이기 때문에 에어로졸 라이다는 분광법으로 관측하는 다른 탐지장비와 비교하여 황사의 실험 감시에 매우 유용한 장비라고 할 수 있다.

(a)



(b)



(c)

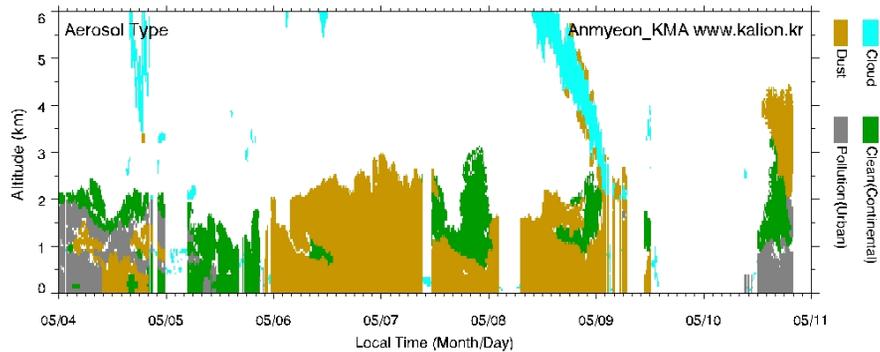


그림 3.3.39 안면도 기후변화감시소 에어로졸 라이다로 관측한 2017년 5월 5일부터 5월 9일 사이 발생한 황사사례의 (a) 후방산란강도, (b) 편광소멸도, (c) 황사연무 판별 결과

## 2) 광주

광주과학기술원의 다파장 라만 라이더는 광원으로 Nd:YAG 레이저를 사용하여, 레이저 빛은 355 nm, 532 nm, 1064 nm의 파장으로 각각 140 mJ, 154 mJ, 640 mJ의 출력으로 대기로 방출된다. 대기 에어로졸의 후방산란으로 인해 돌아온 신호는 Schmidt-Cassegrain 망원경으로 수집되며, 수집된 빛은 빔분리기(Beam splitter)와 파장 간섭 필터(Interference filter)에 의해 각각의 수신 채널로 나뉜다. 355 nm, 532 nm와 1064 nm 채널의 신호는 탄성산란(elastic scattering) 신호이며, 387 nm 와 607 nm에서 N<sub>2</sub> 라만 산란(Raman scattering 또는 inelastic scattering) 신호 획득할 수 있다. 일반적으로 라이더 시스템은 대부분 탄성산란 신호만을 측정하는 장비로서, 라이더 비(Lidar ratio)를 가정하여, 에어로졸의 광학적 특성들을 산출하기 때문에 산출 값에 있어 많은 오차를 유발한다. 하지만 광주과학기술원 다파장 라만 라이더는 라만 산란 검출 채널을 이용하여 에어로졸의 연직 분포 및 특성들을 가정 없이 해석할 수 있어, 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 407 nm 채널로부터 수증기(water vapor)에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 361 nm 와 546 nm 채널로부터 대기 중 석영 물질(quartz material)에 대한 정보를 얻을 수 있다. 532 nm와 355 nm의 편광채널은 각각 파장에서의 편광 수직 성분과 수평 성분을 획득하여, 그 비(편광소멸도)를 산출하고, 이는 대기 에어로졸의 형태(particle shape)에 대한 정보를 얻을 수 있다(그림 3.3.40). 이는 황사와 같은 비구형성 에어로졸의 관측에 이용된다. 다파장 라만 라이더로부터 에어로졸의 광학적 특성뿐만 아니라, 미세물리적 특성의 연직분포의 산출이 가능하다. 다파장 라만 라이더로부터 얻어지는 신호로부터 에어로졸에 의한 후방산란계수(backscatter coefficient)와 소멸계수(extinction coefficient)의 연직 분포를 산출할 수 있으며, 이는 에어로졸의 분포 고도와 양에 대한 정보를 제공한다. 장비에 대한 세부 정보는 그림 3.3.41에 나타내었다.

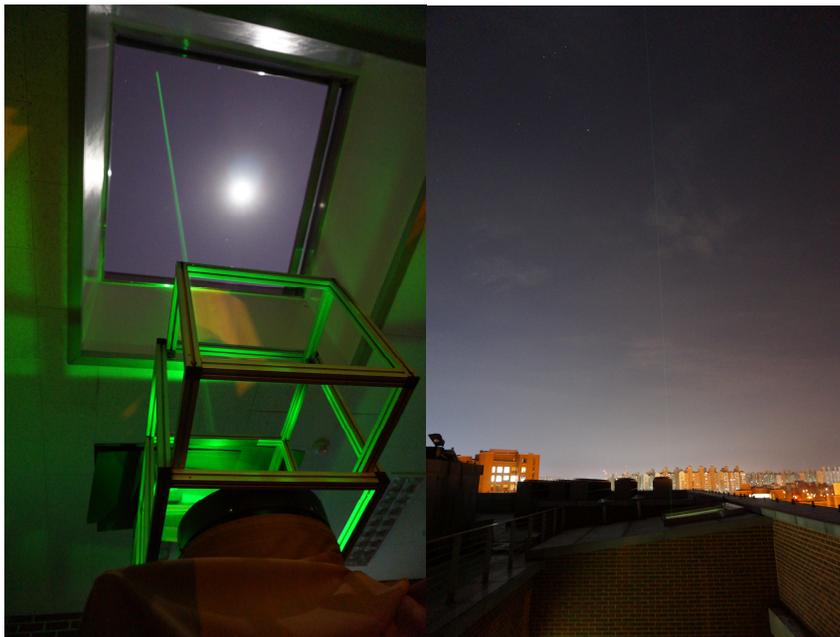
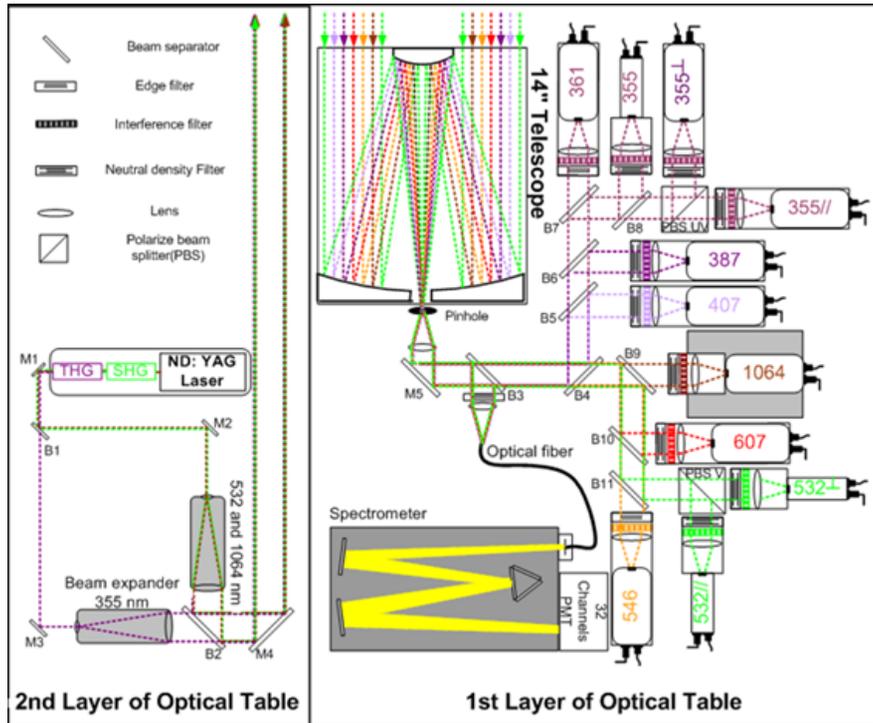


그림 3.3.40 광주과학기술원 다파장 라이다의 모식도 및 관측 사진.

System Specifications		
Laser	Type	Nd:YAG Laser Continuum Surelite III-10
	Wavelength and Pulse energy	140 mJ (at 355 nm), 154 mJ (at 532 nm) and 640 mJ (at 1064 nm)
	Beam Divergence	0.2 mrad after 5X beam expansion(Optional)
	Repetition rate	10Hz
	Pulse duration	<10 ns
Receiver optics	Optical design	Schmidt-Cassegrain telescope 14-inch
	Focal length	3910 mm (14 inch telescope)
	Field of view	0.5–4.0 mrad (variable)
Dispersion system	Wavelength (nm)	355 parallel, 355vertical, 360, 387, 407, 532parallel, 532vertical, 546, 607, 1064
	Bandwidth (nm) of interference filter	355 parallel, 355vertical, 360, 387, 407, 532parallel, 532vertical, 546, 607, 1064 5, 5, 3, 0.72, 0.97, 1, 1, 3, 0.45, 1
Data acquisition system	Detector	HAMAMATSU R3234-01 for 355 parallel, 355vertical, 360, 387, 407, 546 nm channel; R7400-20 for 532parallel, 532vertical, 607 nm channel; R3236 for 1064 nm channel
	DAQ	MCS PCI Photon counting Licel Transient Record(AD, Phtoncounting)

그림 3.3.41 광주과학기술원 다파장 라만라이다의 장비 세부정보.

그림 3.3.42는 2017년 4월 19일과 동월 26일에 광주 과학기술원에서 라만라이다로 측정된 1064 nm 파장에서 측정된 후방산란강도이다. 후방산란강도는 라이다 원시자료(raw data)로부터 거리와 기기 특정값을 보정한 자료로 고도별 에어로졸의 상대적인 분포를 파악할 수 있으며 에어로졸과 구름층을 구별이 가능하다. 그림 7에서 2017년 4월 19일 22:00 쯤에 상층부 대략 4 km ~ 7 km에서 높이 2 km 내외의 후방산란 강도가 급격하게 증가한 층이 나타났다. 이는 띠형태의 에어로졸 층이 관측되었다. 이날 기상청에 따르면 황사가 관측되었다. 4월 26일에는 권운(cirrus cloud)이 관측되는 것을 볼 수 있다.

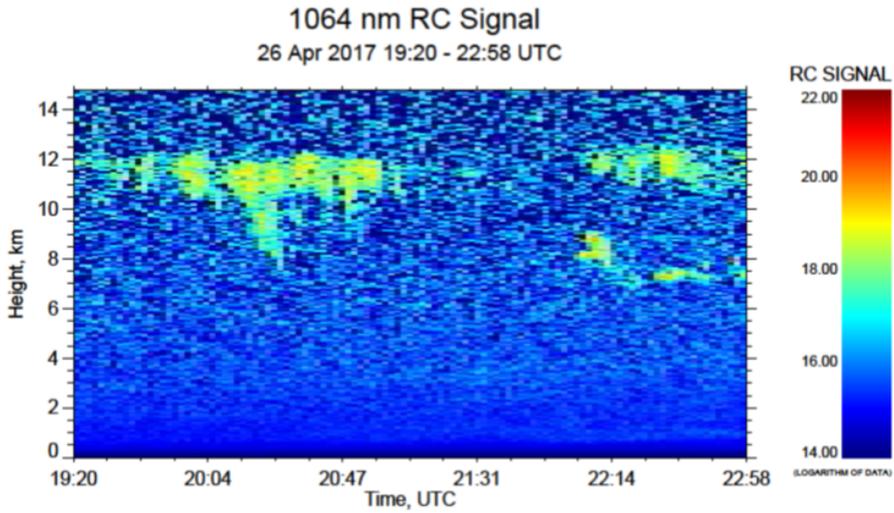
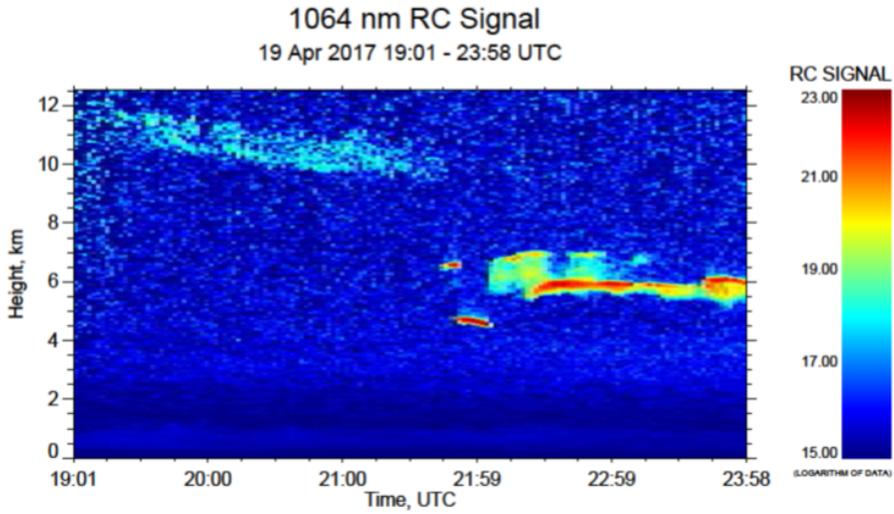


그림 3.3.42 (위) 2017년 4월 19일과 (아래) 4월 26일에 광주과학기술원 라만라이더의 1064 nm로 관측된 후방산란강도(Ranged Corrected signal).

### 3.3.3 에어로졸 화학특성

기상청 기후변화감시소는 안면도에서 매주 1회씩 24시간 동안 크기별로 직경이 10  $\mu\text{m}$  이하인 에어로졸(PM10), 직경 2.5  $\mu\text{m}$  이하인 에어로졸(PM2.5)을 포집하여 각각의 화학 특성을 분석한다. PM10은 1997년부터 고용량 포집기(High Volume Sampler), 1999년부터 PM2.5는 저용량 포집기(Low Volume Sampler)를 사용하였다. 2008년부터는 사이클론 방식의 포집기를 이용하여 PM10과 PM2.5를 채취하였다. 2016년도에 발간한 “WMO/GAW Report No.227”에 따르면, 저용량의 PM10, PM2.5을 매 6일 간격으로 24시간 동안 1회씩 채취하도록 권고하여 이를 준수하였다. 또한 2008년부터 사용한 사이클론 방식의 포집기에서 2017년 4월부터는 이온 및 질량농도 분석용으로 PM10과 PM2.5 모두 충돌판 방식의 저용량 포집기(Low Volume Sampler)를 사용하였으며, 2017년 11월부터 원소성분 분석용으로 PM10과 PM2.5를 설치하여 추가로 운영하였다. 따라서 안면도에서 실시한 에어로졸 포집에 대한 내용은 표 3.3.3과 같다.

표 3.3.3 에어로졸 채취기기 정보

방식	저용량		저용량	
	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5
장비 도입연도	2008년 ~ 2017년 3월	2008년 ~ 2017년 3월	2017년 4월~현재	2017년 4월~현재
관측요소	이온, 질량농도	이온, 질량농도	이온, 질량농도	이온, 질량농도
제조사/모델명	APM/2000A	APM/2000A	APM/PMS-104	APM/PMS-104
채취방식	싸이클론형	싸이클론형	충돌판형	충돌판형
기본 유량	16.7 L/min	16.7 L/min	16.7 L/min	16.7 L/min

2017년 1월부터 2017년 12월까지 안면도 기후변화감시소에서 PM10, PM2.5 에어로졸 시료를 채취하여 수용성 이온 9종( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )을 분석하였다. 이 중 PM10 질량농도와 PM2.5 질량농도를 비교하여, PM10 질량농도가 작은 경우 모든 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 살펴보았으며, 안면도에서 측정된 PM10, PM2.5 에어로졸의 이온성분에 대한 연평균 농도는 그림 3.3.43 ~ 그림 3.3.44와 같다.

에어로졸 화학성분은 저용량미세먼지 채취기의 입경분리 방식이 2008년부터 2017년 3월까지 싸이클론형(Cyclone), 2017년 4월부터 충돌판형(Impactor) 방식을 채용한 장비의 데이터를 사용하였다.

우선 수용성 이온성분 중  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 는 비해염(non-sea salt)  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도로, ‘ $[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Na}^+] \times 0.251$ ’의 식에 의해  $\text{SO}_4^{2-}$  총농도에서 해염으로부터 유입된  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도를 뺀 결과이다.  $\text{nss-Ca}^{2+}$  역시 비해염  $\text{Ca}^{2+}$ 의 농도로  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 과 유사하게 ‘ $[\text{nss-Ca}^{2+}] = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Na}^+] \times 0.04$ ’의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho et al, 2003).

PM10 에어로졸에서 이차오염물질  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  중  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 이 2008년부터 2016년까지 지난 9년간 평균농도는  $6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2017년은  $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지난 9년 평균 농도보다는 약간 높은 값을 보였다.  $\text{NO}_3^-$ 의 농도를 보면, 지난 9년 평균과, 2017년도는 각각  $8.2$ ,  $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분은 각각  $3.2$ ,  $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 지난 8년 평균 농도보다는 낮은 값을 보이거나 비슷하였다. 연도별로는  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$  성분은 2014년도에 가장 높고, 반면에  $\text{NO}_3^-$  성분은 2008년도에 가장 높은 경향을 보였다. 상대적으로  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 은 2012년,  $\text{NO}_3^-$ 은 2017년,  $\text{NH}_4^+$  성분은 2008년에 낮은 경향을 보였다. 토양성분인  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 은 지난 9년간 평균  $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2017년은  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 9년 평균 농도보다는 1.4배 낮았다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 상대적으로 2017년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외의  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  성분은 지난 9년간의 전체평균농도보다 2017년이 높은 농도를 보였고,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  성분은 지난 9년간 농도보다 2017년도에 감소하였다(그림 3.3.43(위)).

연도별 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과(그림 3.3.43(아래)), 2008년부터 2017년까지의 이차오염물질( $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )의 조성범위는 65.3

~ 86.0%이며, 2014년이 가장 높고, 2008년이 가장 낮은 조성비를 보였다. 지난 9년간과 2017년의 이차오염물질의 평균조성비는 각각 81.0%, 77.8%로 나타났다. 반면에 해염기원의 성분들( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )은 2008년부터 2017년까지의 조성범위는 9.6 ~ 27.2%이며, 이차오염물질과는 반대로 2008년이 가장 높고, 2014년이 가장 낮은 조성비를 보였다. 토양기원의  $\text{nss-Ca}^{2+}$  성분은 대체적은 2.0 ~ 4.7%를 보였다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 이온성분은 다른 성분들에 비해 이차오염물질의 조성비가 다른 성분들에 비해 높은 것으로 확인되었다.

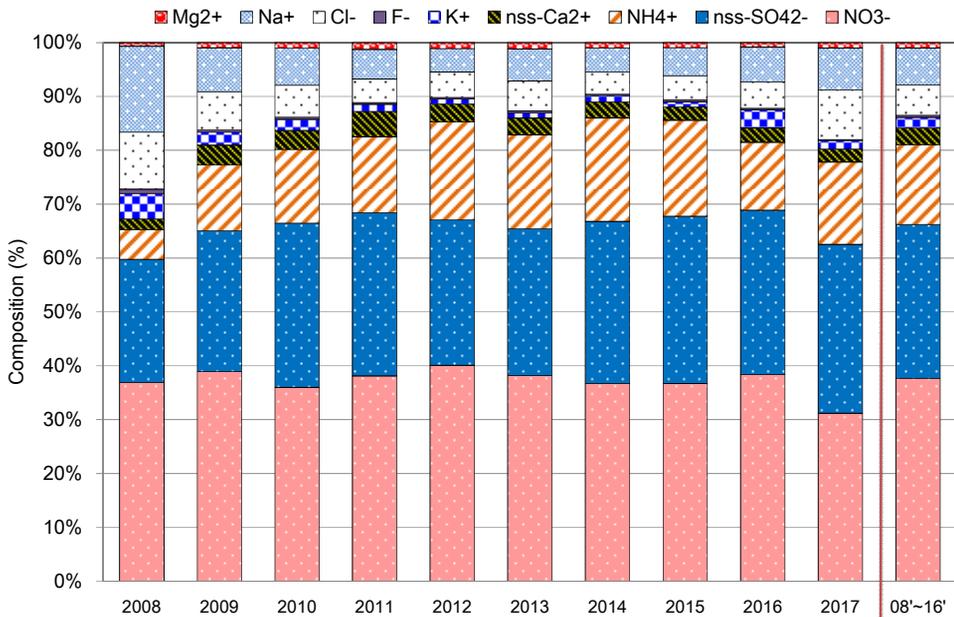
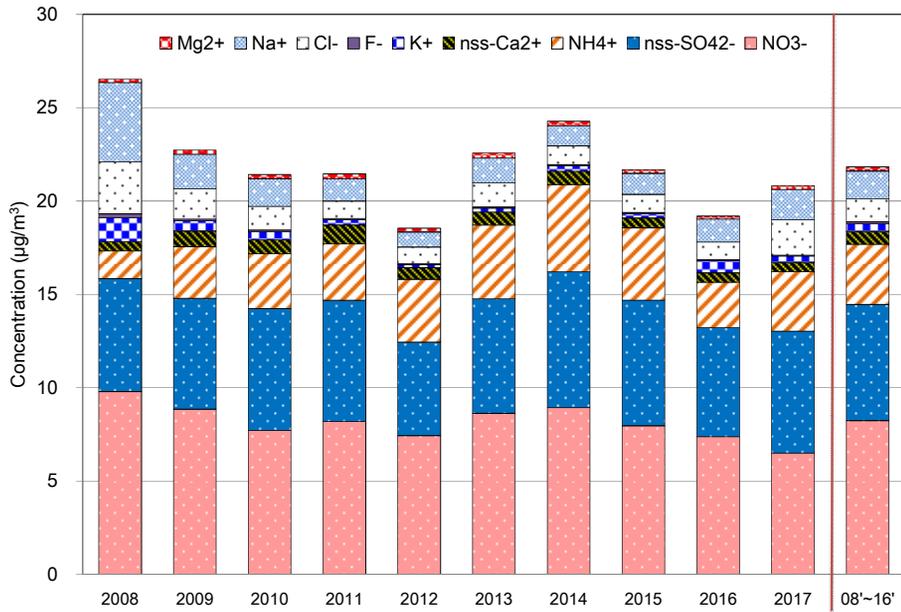


그림 3.3.43 2008 ~ 2016년 PM10 에어로졸 수용성 이온성분의 (위) 연평균 농도, (아래) 연평균 조성.

PM2.5 에어로졸에서 이차오염물질  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  중  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  이 2008년부터 2016년까지 지난 9년간 평균은  $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2017년은  $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  로 비슷한 농도를 보였다. 연도별로는 2011년이 가장 높고, 상대적으로 2012년에 낮은 경향을 보였다.  $\text{NO}_3^-$ 의 농도를 보면, 지난 9년간의 평균 농도가  $7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2017년은  $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지난 9년 평균 농도보다는 아주 낮은 농도를 보였다. 연도별로는 2008년에 가장 높고, 2017년에 낮은 값을 보이며, 이는 추후에 여러 가지 연구가 더 필요한 것으로 보인다.  $\text{NH}_4^+$  성분은 지난 9년간의 평균농도와 2017년은 각각  $3.5$ ,  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균농도보다 낮은 값을 보였다. 연도별로는 2014년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 경향을 보였다. 토양성분인  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 은 지난 9년간의 평균농도와 2017년은 각각  $0.4$ ,  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지난 9년 평균 농도보다 낮은 값을 보였다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 상대적으로 2017년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외의 성분은 2017년  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 성분이 9년간 전체 평균농도보다 낮은 값을 보였다(그림 3.3.44(위)).

연도별 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과(그림 3.3.44(아래)), 2008년부터 2017년까지의 이차오염물질( $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )의 조성범위는 73.0% ~ 93.1%이며, 2017년이 가장 높고, 2008년이 가장 낮은 조성비를 보였다. 지난 9년간과 2017년의 이차오염물질의 조성비는 각각 87.9%, 93.1%로 나타났다. 반면에 해양기원의 성분들( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )은 2008년부터 2017년까지의 조성범위는 4.9% ~ 20.0%이며, 이차오염물질과는 반대로 2008년 이 가장 높고, 2017년이 가장 낮은 조성비를 보였다. 토양기원의  $\text{nss-Ca}^{2+}$  성분은 대체적은 0.6% ~ 2.7%를 보였다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 이온성분은 다른 성분들에 비해 이차오염물질의 조성비가 다른 성분들에 비해 증가하는 것으로 확인되었다.



그림 3.3.44 2008 ~ 2016년 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분의 (위) 계절별 평균 농도, (아래) 계절별 평균 조성.

안면도에서 측정한 PM10, PM2.5의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 3.3.45 ~ 그림 3.3.46와 같다. 여기서 PM10, PM2.5 에어로졸 이온성분의 계절별 평균농도는 2008년부터 2016년까지 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해연도 1, 2월의 데이터를 평균하였고, 당해연도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

PM10 에어로졸에서 이차오염물질인  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 의 지난 9년(2008 ~ 2016년)간과 2017년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 3.3.45(위)),  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 성분의 겨울, 봄, 여름, 가을철 농도범위는 각각 4.2 ~ 7.8, 3.1 ~ 9.4, 0.9 ~ 3.8  $\mu g/m^3$ 로 조사되었다.  $nss-SO_4^{2-}$ 성분의 2017년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 4.8(n=7), 7.3(n=12), 7.7(n=9), 4.9(n=10)  $\mu g/m^3$ ,  $NO_3^-$ 의 2017년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 4.1(n=7), 8.0(n=12), 3.1(n=9), 5.6(n=10)  $\mu g/m^3$ ,  $NH_4^+$ 의 2017년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 0.9(n=7), 3.4(n=12), 3.1(n=9), 2.9(n=10)  $\mu g/m^3$ 로 나타났다.  $nss-SO_4^{2-}$ 성분은 여름철에 높은 농도를 보이며,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 성분은 봄철에 높은 것으로 조사되었다. 토양성분인  $nss-Ca^{2+}$ 은 지난 9년간과 2017년의 계절별 농도를 비교해 보면, 9년간의 계절별 농도 범위는 0.4 ~ 0.9  $\mu g/m^3$ , 2017년 계절별 농도 범위는 0.2~0.8  $\mu g/m^3$ 로 모두 봄철에 가장 높았다. 이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과(그림 3.3.45(아래)), 이차오염물질( $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ )의 조성비는 지난 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 77.2%, 81.5%, 88.3%, 79.5%로, 여름철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다. 또한 2017년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 57.2%, 81.9%, 89.5%, 75.2%로, 지난 9년간과 마찬가지로 여름철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다. 그리고 해양기원 성분들 성분( $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Mg^{2+}$ )들의 조성비는 지난 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 17.4%, 12.7%, 7.8%, 14.5%를 보였고, 2017년의 계절별 조성비는 각각 35.5%, 13.2%, 8.4%, 21.6%으로 나타나, 오히려 겨울철이 가장 높은 상반된 경향을 보였다. 마지막으로 토양기원의  $nss-Ca^{2+}$  조성비는 지난 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 2.9%, 3.6%, 2.3%, 3.2%, 2017년 조성비는 1.8%, 3.3%, 1.1%, 1.9%를 보여 봄철이 가장 높아 이는 황사와 같은 영향 때문인 것으로 판단된다.

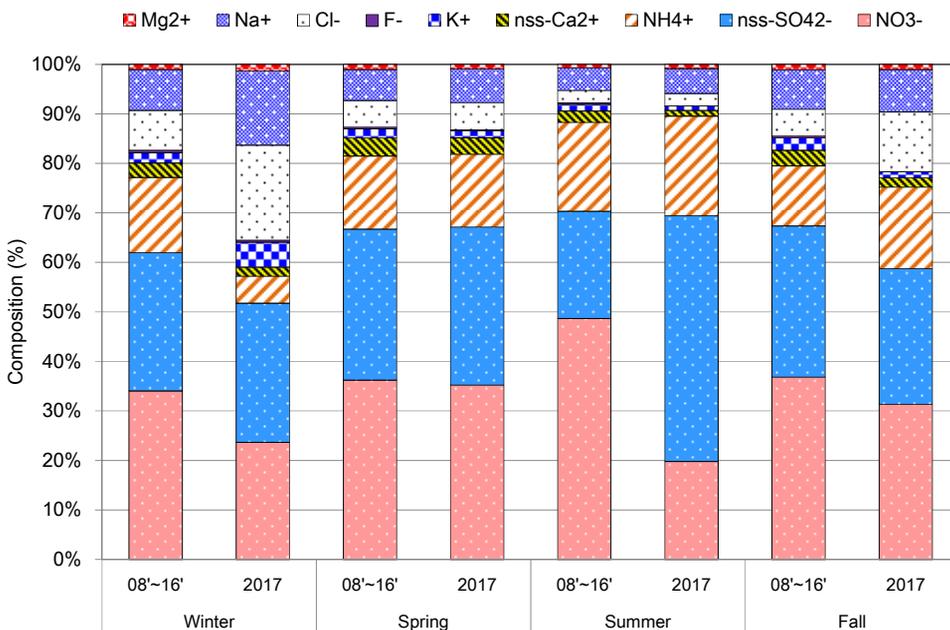
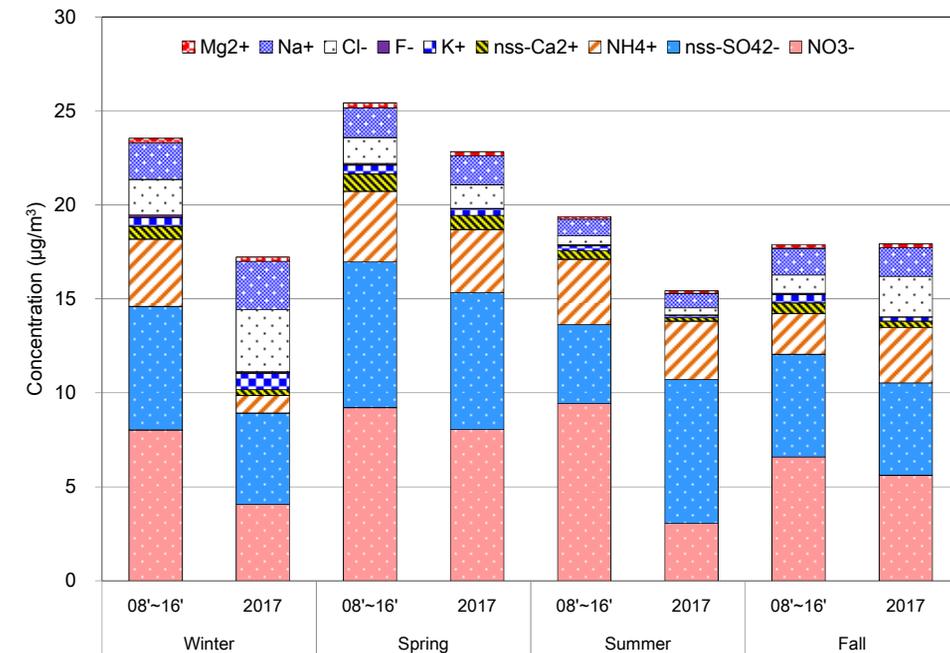


그림 3.3.45 2008 ~ 2017년 PM10 에어로졸 수용성 이온성분의 (위) 계절별 평균 농도, (아래) 계절별 평균 조성. (\*Winter인 경우: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임.)

PM2.5 에어로졸에서 이차오염물질  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ 의 지난 9년(2008 ~ 2016년)간과 2017년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 3.3.46 (위)), 지난 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도범위는 각각 3.7 ~ 6.4, 6.2 ~ 8.7, 2.6 ~ 3.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다.  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 성분의 2017년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 5.3(n=3), 6.6(n=9), 6.9(n=9), 3.8(n=12)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_3^-$ 의 2017년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 2.8(n=3), 3.5(n=9), 1.0(n=9), 2.6(n=12)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NH}_4^+$ 의 2016년 겨울, 봄, 여름, 가을철은 각각 1.2(n=3), 2.9(n=9), 2.7(n=9), 2.1(n=12)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. PM10과 마찬가지로,  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ 성분은 봄철에 높은 것으로 조사되었다. 토양성분인  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 은 지난 9년간과 2017년의 계절별 농도를 비교해 보면(그림 3.3.46 (아래)), 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.27 ~ 0.44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2017년 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.03 ~ 0.32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 지난 9년은 봄철에, 2017년에는 겨울철에 가장 높았다. 이온 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질( $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )의 조성비는 지난 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 83.9%, 88.6%, 93.1%, 87.9%로, 여름철에 높은 경향을 나타내었다. 또한 2017년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 71.2%, 91.9%, 96.0%, 95.4%로 나타내었다. 그리고 해양기원 성분들 성분( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ )들의 조성비는 지난 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 11.9%, 7.8%, 4.3%, 7.7%를 보였고, 2017년의 계절별 조성비는 각각 21.1%, 5.8%, 3.0%, 2.7%로 나타내었다. 그리고 토양기원의  $\text{nss-Ca}^{2+}$  조성비는 지난 9년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 1.9%, 2.1%, 1.6%, 2.0%, 2017년 조성비는 2.5%, 1.0%, 0.3%, 0.4%를 보였다.

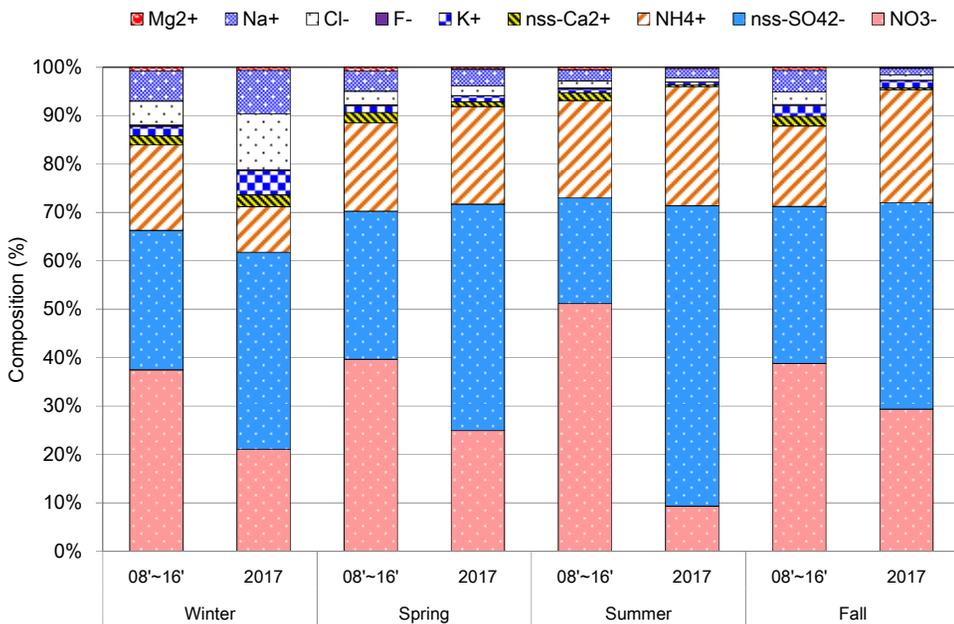
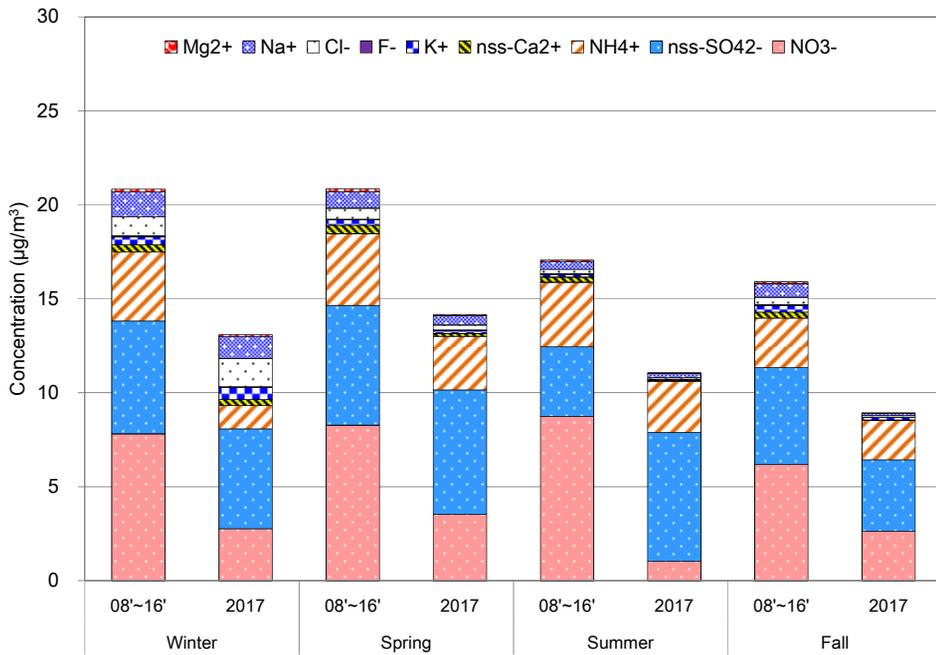


그림 3.3.46 2008 ~ 2016년 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분의 (위) 계절별 평균 농도, (아래) 계절별 평균 조성>(\*Winter인 경우: 전년도 12월과 당일년도 1, 2월의 평균값임).

### 3.4 대기복사

지구 대기에 유입되는 에너지의 대부분은 태양에서 근원한 빛 에너지다. 이 태양에너지는 대기를 통과하면서 일부는 구성 성분에 의하여 산란 및 반사되거나 흡수되고 나머지는 대기를 통과하여 지표에 도달한다. 태양에너지를 흡수한 대기 성분은 내부에너지가 증가하면서 분자의 경우 원자로 분리되기도 한다. 결국 그 에너지는 공기를 가열하는데 사용되므로 태양에너지는 대기의 온도 구조를 결정하는데 중요한 역할로 지구대기를 움직이는 1차적 원동력이고 지구상의 모든 생명체를 위하여 필수적인 에너지원이다. 지상에서 연속적으로 관측하는 대기복사자료는 기후학적으로는 장기간 대기 복사량의 변화 파악에 기본자료가 되며, 위성에 의한 원격탐사자료나 기후모델, 대기복사 모델 등에 의해 계산된 결과와의 비교에 이용될 수 있다.

기상청은 태양복사에너지 및 그 변화를 감시하기 위해 안면도, 고산에서 대기복사 관측을 수행하고 있다. 복사자료는 태양복사와 지구복사로 구분되며, 각각의 상향·하향복사(4성분), 태양 하향복사의 두 성분인 직달일사와 산란일사, 지표면의 에너지 수지를 측정하는 순복사 등 7가지이다. 안면도 기후변화감시소는 7가지 요소 모두를 관측하고, 고산 기후변화감시소는 태양복사 3가지 요소(태양하향, 직달, 산란)를 관측하고 있다. 관측 자료는 1분 간격으로 생산되며 단위는  $W/m^2$ 이다. 자료 QC를 위해 BSRN(Baseline Surface Radiation Network)에서 권고하는 방법을 따랐다. QC방법은 3단계로 진행되며 QC1, QC2 단계는 Long and Dutton(2002)을 참고하였다. 2017년 대기복사 통계방법은 시간 평균값이 추가되었으며 자세한 내용은 자료통계 방법에 나타내었다. 2017년 고산 기후변화감시소는 9월 복사장비 관측대 시설 보수작업으로 관측값이 없다.

그림 3.4.1은 2017년 서산과 고산의 월 강수량과 일조시간을 월별로 나타낸 것이다. 복사자료는 구름, 강수량과 일조시간에 영향을 받기 때문에 월 강수량, 월평균 일조시간을 같이 분석하였다. 안면도 자료 분석을 위해 기후변화감시소에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129) 자료를 이용하였고, 고산 기후변화감시소는 약 4 km 떨어져 있는 고산(185) 자료를 이용하였다. 서산의 연 강수량은 830.4 mm이며, 고산은 881.3 mm 이다. 서산의 월 강수량은 7월 327.8 mm 로 가장 높았으며, 7월 강수일수는 18일이었다. 고산은 8월 279.7 mm로 가장 높았고, 8월 강수일수는 12일이었다. 여름의 일조시간은 강수의 영

향으로 낮아질 수 있다. 서산은 7, 8월 강수량이 높고, 강수일수가 15일 이상으로 일조시간에 영향을 준 것으로 사료된다.

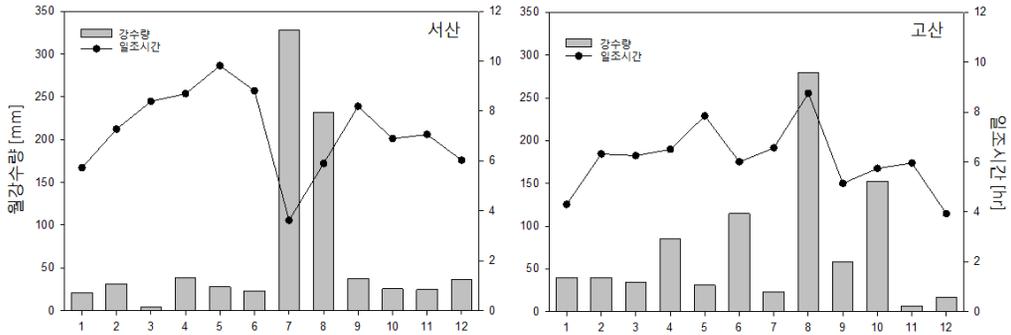


그림 3.4.1 2017년 서산, 고산의 월 강수량과 월평균 일조시간.

### 3.4.1 직달일사, 산란일사

직달일사는 대기 중에서 산란 또는 흡수되지 않고 태양으로부터 직접 입사되는 복사량을 말하며, 직달일사의 양과 강도는 일사계에 도달하는 직달 광선의 통로에 있는 공기분자와 구름, 황사, 안개, 먼지 등의 산란과 흡수에 의해 영향을 받는다. 산란일사는 차폐 판을 이용하여 직달일사성분을 차단하고 관측한 복사량을 말한다. 그림 3.4.2는 안면도, 고산의 2017년 직달일사, 산란일사 월평균을 지난 관측 평균(안면도 : 2007 ~ 2016년, 고산 : 2009 ~ 2016년)과 비교한 것이다. 안면도 기후변화감시소의 과거 직달일사는 태양추적장치 고장으로 전천일사에서 산란일사를 뺀 값[(전천일사-산란일사)/cos(solar zenith angle)]을 비교값으로 이용하였다. 안면도 기후변화감시소의 2017년 직달일사 월평균 최대는 5월에 263.9 W/m<sup>2</sup>이다. 서산의 5월 강수량은 평년값(2017년 기준 과거 30년)에 비해 73% 이상 낮았으며, 일조시간 또한 5월에 최댓값이 나타났다. 안면도 직달일사 최솟값은 12월에 102.2 W/m<sup>2</sup>로 나타났다. 안면도 2017년 직달일사 월평균 값은 과거자료보다 모두 증가하였다. 산란일사의 월평균 최댓값은 주로 6월에 나타나는데, 안면도는 품질관리 과정에서 데이터 손실이 많아 6월 월평균 값이 없다. 고산 기후변화감시소의 2017년 월평균 최대는 직달일사가 8월에 164.9 W/m<sup>2</sup>, 산란일사는 7월에 127.3 W/m<sup>2</sup>이며 최소는 직달일사가 12월에 65.4 W/m<sup>2</sup>, 산란일사는 12월에 51.6 W/m<sup>2</sup>이다. 고산의 2017년 직달일사 월 평균값은 과거자료와 비슷한 값을 보였다.

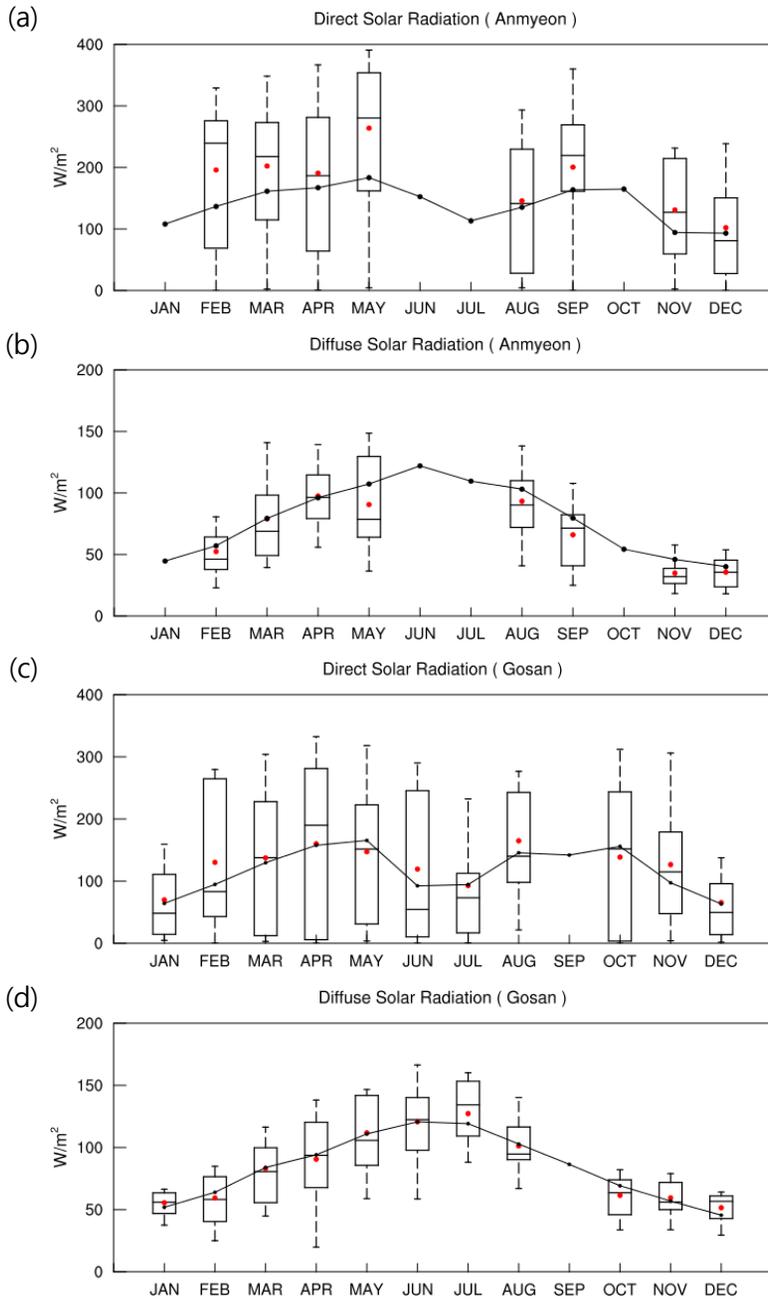


그림 3.4.2 2017년 안면도, 고산의 (a, c) 직달일사, (b, d) 산란일사의 월변화. 2017년 월분포(상자 선의 양끝은 5, 95%, 상자 양끝은 25, 75%값, 가운데 선 중간값, 빨간색 점 2017년 평균)와 2007 ~ 2016년(안면도), 2009 ~ 2016년(고산)의 평균(점-선).

### 3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)

그림 3.4.3은 안면도의 태양상향복사와 태양하향복사의 월평균과 고산의 태양하향복사의 월평균이다. 안면도의 2017년 월평균 최대는 5월에 55.3 W/m<sup>2</sup> (태양상향복사), 293.6 W/m<sup>2</sup> (태양하향복사), 최소는 12월에 25.2 W/m<sup>2</sup> (태양상향복사), 12월에 79.1 W/m<sup>2</sup> (태양하향복사)로 관측되었다. 고산에서의 2017년 전천일사 최대는 5월에 229.6 W/m<sup>2</sup>, 최소는 12월에 79.7 W/m<sup>2</sup> 이다. 태양복사의 월평균은 계절변동으로 봄철에 증가하고 겨울로 갈수록 감소하나 여름철에는 구름과 강수로 인해 오히려 값이 낮아진다.

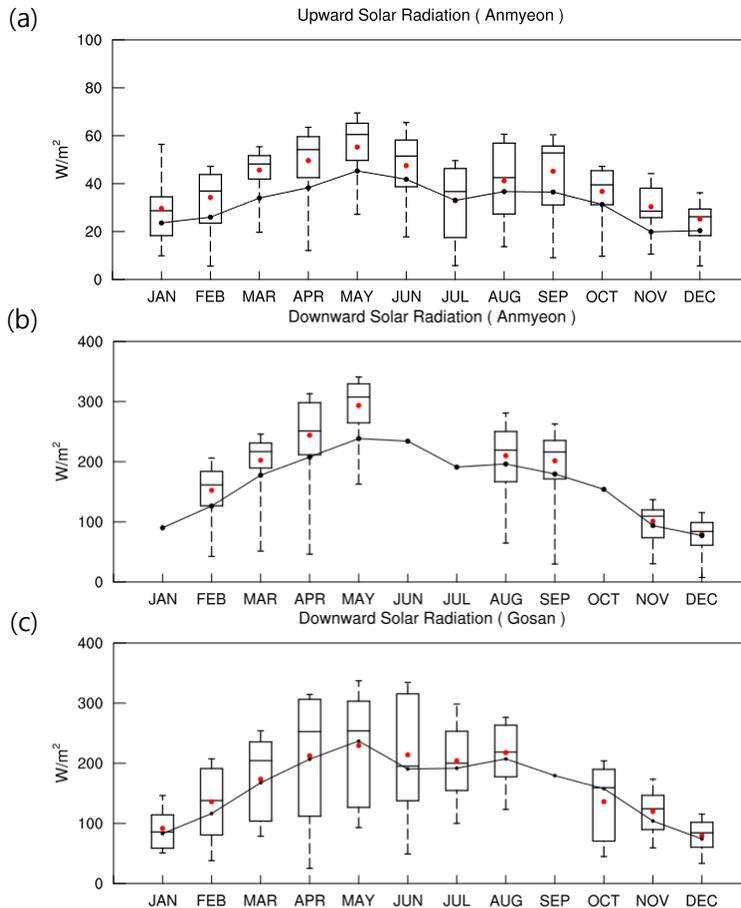


그림 3.4.3 2017년 안면도, 고산의 (a) 태양상향복사, (b,c) 태양하향복사의 월변화.

### 3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사

지구복사는 3 ~ 50  $\mu\text{m}$  파장대의 장파복사를 측정한다. 지구상향복사는 지표에 의해 방출되는 성분으로서 지면온도의 영향을 받는다. 지구하향복사는 대기에 의해 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 2017년에 약  $75 \text{ W/m}^2$  정도 지구상향복사 연평균이 지구하향복사 연평균보다 높았다. 2017년 월평균 지구상향복사의 최대는 8월에  $424.4 \text{ W/m}^2$ , 최소는 2월에  $311.4 \text{ W/m}^2$  이며, 지구하향복사의 최대는 8월에  $367.8 \text{ W/m}^2$ , 최소는 2월에  $238.0 \text{ W/m}^2$  이다(그림 3.4.4).

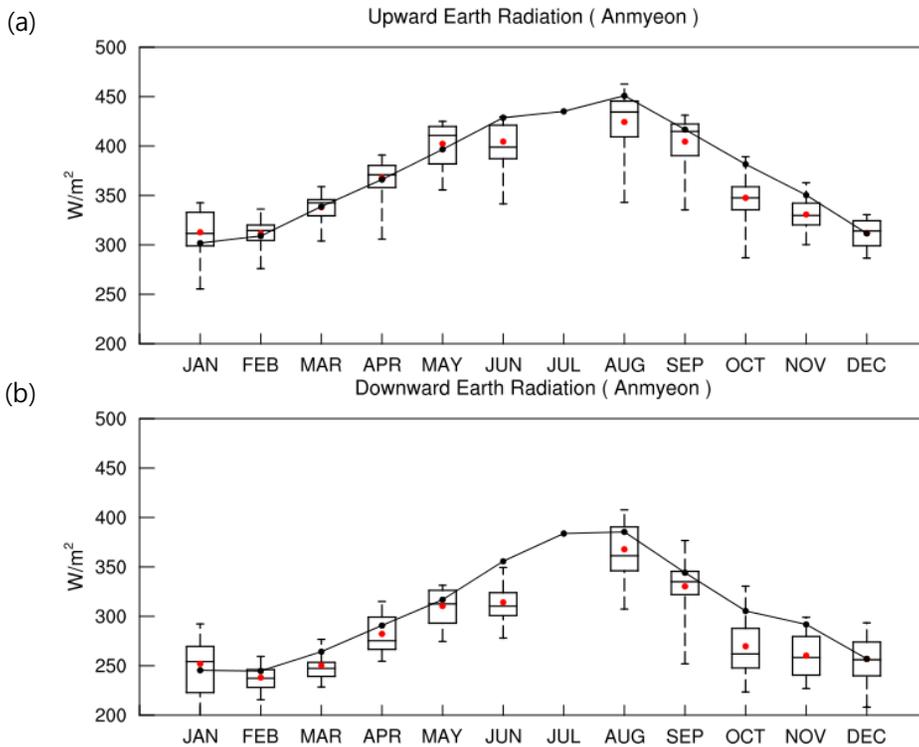


그림 3.4.4 2017년 안면도 (a) 지구상향복사, (b) 지구하향복사의 월변화.

### 3.4.4 순복사

순복사는 지표 에너지수지를 결정하는 중요한 요소이며, 태양과 지구사이의 복사에너지 수지로서 태양으로부터 들어오는 태양복사와 지구에서 방출하는 지구 복사의 관계식(산출 순복사 = 태양하향복사 - 태양상향 복사 + 지구하향 복사 - 지구상향복사)에 의해서 알 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. 2017년 월평균 최대는 6월에 158.8 W/m<sup>2</sup>, 최소는 12월에 11.4 W/m<sup>2</sup>으로 겨울철에 낮고 여름철에 높은 분포를 보였다.

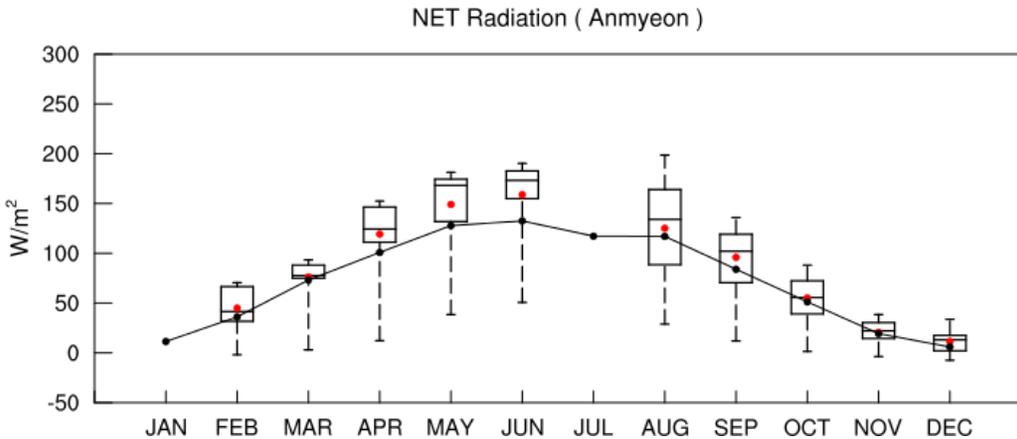


그림 3.4.5 2017년 안면도 순복사의 월변화.

## 3.5 성층권오존

산소 분자가 태양 자외복사(태양빛)와 화학반응을 일으켜 자연적으로 형성되는 오존은 성층권에 존재하며, 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 극지방에서 최댓값을 갖는다. 태양 자외선 복사에 의한 오존 생성 비율은 열대지방에서 평균적으로 최고치를 보이지만, 성층권 내 공기 대순환으로 열대 오존이 극지방으로 서서히 수송되기 때문에 오존은 중위도와 고위도에 축적되어 오존층 두께가 두꺼워지고, 반면 열대지방의 경우에는 오존층 두께가 얇아진다. 오존전량은 계절별로 달라지는데, 늦가을과 겨울 동안 열대지방에서 극지방으로의 오존 수송이 증가하여 오존전량은 봄철 고위도에서 최댓값을 갖게 된다.

### 3.5.1 오존전량

기상청에서는 안면도(2013년 ~ )와 고산(2011년 ~ )에서 오존분광도계(Brewer MkⅢ)를 이용하여 오존전량을 관측하고 있으며, 위탁관측소인 연세대학교 월봉(月峰) 오존관측소(서울)에서 Dobson 오존 분광광도계(Beck #124)를 도입하여 1984년부터 관측하고 있다. 안면도와 연세대학교 월봉관측소는 WMO/GAW 내의 세계 오존 및 자외선 자료센터(World Ozone and Ultraviolet Data Center, WOUDC)와 관측 자료를 공유하고 있다.

#### 가. 안면도, 고산의 오존농도 변화

그림 3.5.1은 포항, 안면도, 고산 연평균을 1994년부터 나타낸 것이다. 포항 관측소에서는 1994년부터 관측을 시작하였으며, 현재는 관측이 중단된 상태이다. 안면도와 같은 위도대인 포항자료를 비교하기 위해서 2013년 전후로 같이 나타내었다. 2017년 오존전량은 안면도 329 DU, 고산 297 DU로 두 지점 모두 2016년 보다 약 2% 증가 하였다.

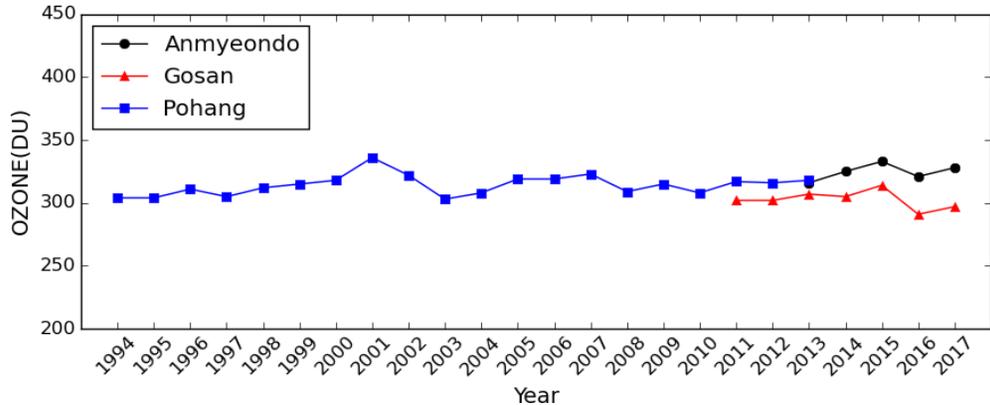


그림 3.5.1 안면도, 포항, 고산에서 측정된 연평균 오존전량 분포.

그림 3.5.2는 안면도, 고산에서 측정한 2017년 오존전량 월평균을 지난 관측 평균(포항+안면도 : 2007 ~ 2016년, 고산 : 2011 ~ 2016년)과 같이 비교한 것이다. 안면도, 고산의 관측 장비는 장비고장으로 각각 11 ~ 12월(안면도), 6 ~ 7월(고산) 값이 존재하지 않는다. 8월에는 안면도, 고산 관측기기 검교정을 진행하였다.

북반구 오존전량은 계절별로 달라지는데, 겨울동안 북극의 오존전량 값이 증가하다 봄에 뚜렷한 최댓값을 갖고 여름부터 가을까지 값이 낮아진다. 안면도와 고산의 월 변동성을 보면(그림 3.5.2), 안면도 월평균 최댓값은 4월(373 DU), 최솟값은 10월(269 DU), 고산 최댓값은 4월(335 DU), 최솟값은 10월(263 DU)에 나타나 봄철에 높고, 가을철에 낮은 계절변동이 잘 나타났다. 또한 최댓값과 최솟값의 차이가 안면도는 104 DU, 고산은 72 DU로 연평균 오존전량 기준으로 안면도는 32%, 고산은 24%의 변동 폭을 보였다.

그림 3.5.3(a),(c)는 안면도 고산의 일 오존전량을 시계열로 나타낸 것이다. 오존전량은 매년 규칙적인 계절변동을 나타내고 있다. 2017년 안면도와 고산의 오존전량 최댓값은 각각 455 DU(3월 27일), 395 DU(4월 2일)이며, 최솟값은 각각 245 DU(10월 27일), 245 DU(1월 4일) 이었다. 그림 3.5.3(b),(d)는 안면도 고산의 일일차 변화량을 나타낸 것이다. 일일차 변화율은 일일 자료를 근거로 당일과 바로 전 날짜의 일 오존전량 차이 값을 비율(%)로 나타낸 것이다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 주로 중관기상장의 일 변화에 의해서 나타난다. 2017년 안면도, 고산 지역의 전날에 대하여 당일 증가율의 최댓값은 각각 34%, 27%이고 감소율의 최댓값은 각각 16%, 11%로 증가하는 크기가 감소하는 크기보다 각각 18%, 16% 더 높다. 일 중관 기상장

의 변화가 오존전량의 증가 변화에 영향을 더 크게 미치고 있음을 알 수 있다.

오존전량의 일일차 증가율, 감소율 그리고 절댓값의 평균값을 표 3.5.1에 나타내었다. 2017년 안면도, 고산의 일일차 변화율의 절대 값은 2 ~ 5월에 약 5.0% 이상으로 높아 봄철에 변동성이 크고, 10월 ~ 11월은 약 3.5% 이하로 가을에는 비교적 안정한 편이었다. 일일차 증가율의 연평균 값은 안면도는 5.1%, 고산은 4.6%, 감소율은 안면도 -4.4%, 고산 -3.7%로 증가율이 좀더 우세한 것으로 나타났다. 과거(2013년 ~ 2016년)와 2017년 안면도와 고산의 일일차 변화율 절대값의 최댓값은 3,4월에 나타났다. 이는 봄철에 보이는 오존전량 급증 현상 중에 하나인 오존 2차 오존피크 등에도 영향이 있을 것으로 사료된다.

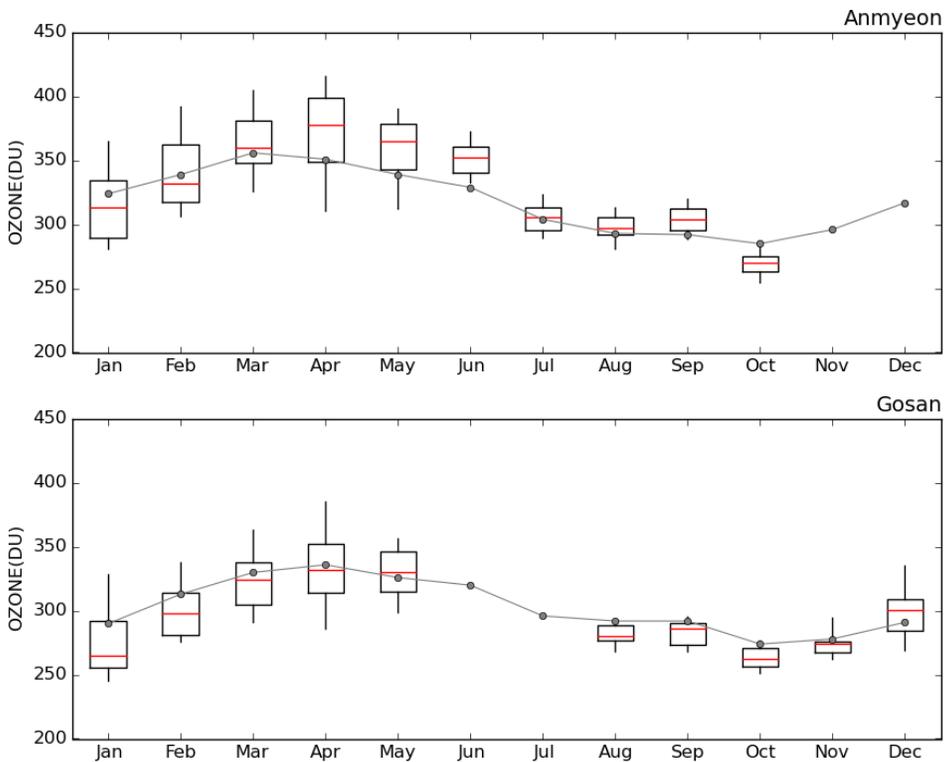


그림 3.5.2 2017년 월평균 (a) 안면도, (b) 고산 오존전량의 월변화. 2017년 월별분포 (상자의 세로 실선 양끝은 5, 95%, 상자 양끝은 25, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 2007 ~ 2016년(안면도), 2011 ~ 2016년(고산)의 평균 (점선).

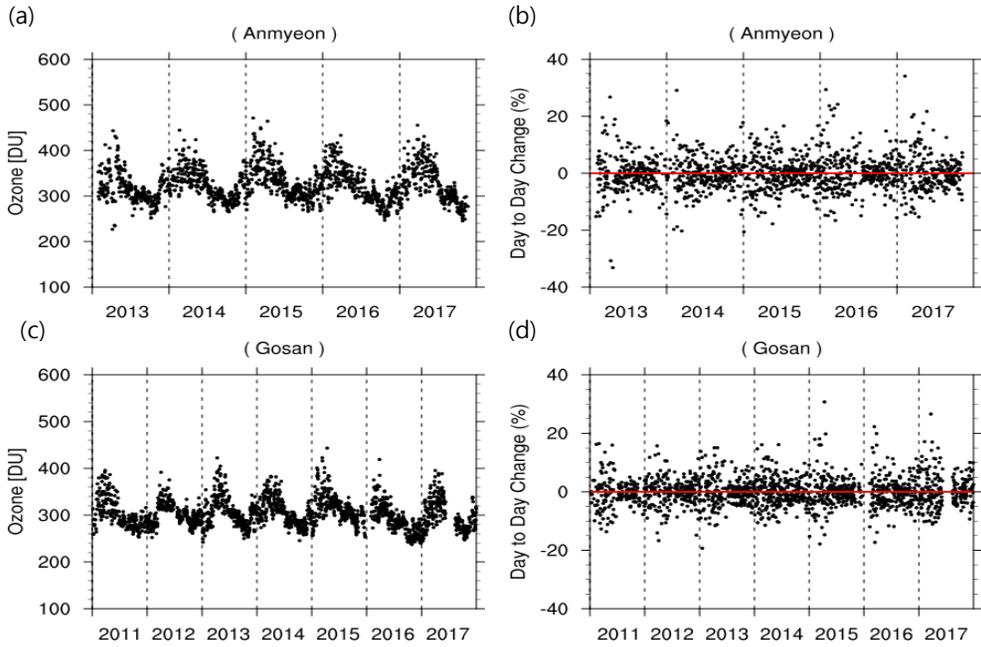


그림 3.5.3 안면도, 고산의 일 오존전량(a,c)과 일일차변화율(b,d)의 시계열.

표 3.5.1 안면도, 고산 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 월 평균값

Difference (%)		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual	
안 면 도	(2017) Absolute (Stddev)	4.5 (3.8)	8.3 (8.8)	7.4 (5.4)	6.5 (4.3)	5.0 (4.6)	4.4 (3.7)	2.5 (1.3)	3.6 (2.8)	2.4 (1.6)	2.7 (1.8)	-	-	4.7 (3.8)	
	(2013-2016) Absolute (Stddev.)	5.5 (6.0)	7.2 (5.4)	6.4 (5.2)	9.3 (8.5)	4.6 (3.6)	4.7 (3.3)	4.0 (3.6)	2.3 (2.0)	2.3 (1.9)	2.7 (2.2)	3.9 (3.0)	5.0 (4.6)	4.8 (4.1)	
	(2017) Increase	4.3	9.6	7.8	6.9	6.2	5.7	2.2	3.5	2.6	2.4	-	-	5.1	
	(2017) Decrease	-4.7	-7.1	-7.0	-6.1	-4.1	-3.8	-2.7	-3.7	-2.2	-3.1	-	-	-4.4	
	고 산	(2017) Absolute (Stddev)	4.2 (3.4)	5.1 (4.3)	5.1 (5.7)	6.2 (4.6)	5.1 (3.6)	-	-	2.9 (1.7)	3.4 (2.4)	2.2 (1.9)	2.4 (1.9)	4.4 (3.2)	4.1 (3.3)
		(2011-2016) Absolute (Stddev.)	4.6 (3.6)	4.8 (3.9)	5.8 (4.7)	5.0 (4.4)	4.0 (3.1)	4.0 (3.0)	2.2 (1.8)	2.2 (1.8)	2.2 (1.7)	2.2 (1.8)	2.7 (2.0)	3.8 (2.9)	3.6 (2.9)
		(2017) Increase	4.2	7.4	6.5	6.7	5.0	-	-	2.9	4.0	2.3	3.0	4.3	4.6
		(2017) Decrease	-4.2	-3.4	-4.1	-5.7	-5.1	-	-	-3.1	-3.0	-2.1	-1.7	-4.5	-3.7

## 나. 서울의 오존농도 변화(위탁 관측소)

연세대학교 오존 관측소는 2004년부터 오존 관측 시스템의 자동화를 통해 객관적인 관측 방법을 구축하여 보다 정확한 관측 자료를 생산하고 있으며, Brewer 분광도계 (SCI-TEC, #148)가 1997년부터 설치되어 자외선과 오존 전량을 동시에 관측하고 있으며, 2012년에 오존과 이산화질소를 중점으로 관측하는 Pandora가 설치되었다. 이들 자료는 Dobson 오존 분광도계에서 관측된 오존전량과의 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 성층권의 오존층에 분포되어 있으므로 오존전량의 변화는 오존층의 변화를 의미한다. 여기에서는 2017년도 한반도 상공의 오존층 변화를 과거 장기간 참조값(1985 ~ 2016년)과 비교분석하였다.

그림 3.5.4(a)는 2017년도 서울 상공의 일 오존전량의 시계열, 그림 3.5.4(b)는 서울 상공 오존전량의 장기평균 연변화(1985년 ~ 2017년)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 않았으며, 모든 관측이 과거 관측값의 영역 내에 존재하고 있었다. 2017년의 일 최댓값은 3월 27일에 478 DU, 일 최솟값은 10월 26일에 247 DU로 나타났으며, 2017년도에 관측된 일 최댓값 478 DU는 과거 극댓값인 518 DU(2011년 5월 11일)에 비해서 약 40 DU 적은 값이다. 최댓값은 3월에 관측되었고, 2 ~ 3월에는 평년보다 높은 오존값을 나타냈으며, 높은 오존값은 과거 자료와 마찬가지로 4 ~ 5월, 주로 봄철에 관측되었다.

오존전량의 연(계절) 변화를 보게 될 경우, 그림 3.5.4(b)와 표 3.5.2에서 보는 바와 같이 서울 상공의 1985년 ~ 2016년까지의 연평균 오존전량은 325 DU로 나타났으며, 3월에 최대인 361 DU, 10월에 최소인 290 DU로 월평균 기준으로 연교차가 71 DU로 연평균 오존전량 기준으로 22%의 변동폭을 보였다. 그리고 오존량의 변동은 2월에 표준편차가 17.7 DU로 가장 심하고, 9월에 7.7 DU로 가장 안정한 변동을 나타내었으며, 계절 변화의 폭이 3월을 중심으로 봄에 가장 많고, 9월을 중심으로 가을철에 적은 변화를 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 연변화에 대해서 6 ~ 7월에 걸쳐 여름에 오존의 감소가 급격히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

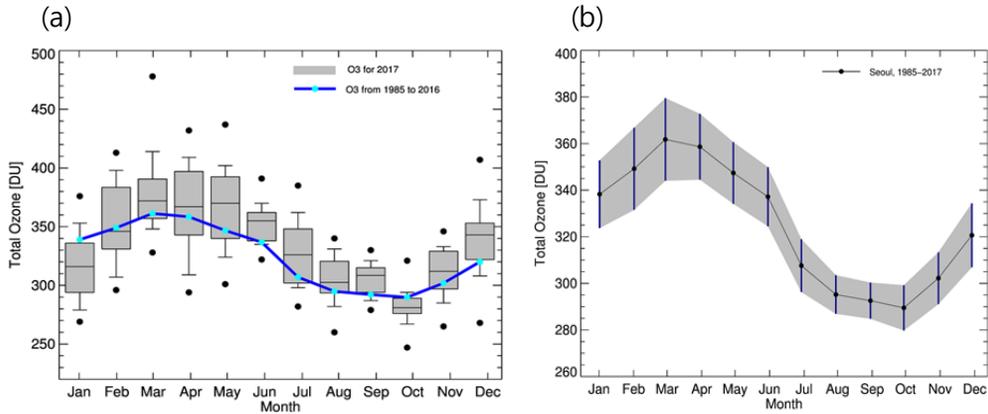


그림 3.5.4 서울 상공 오존전량의 (a) 2017년 연변화 (회색 박스 플롯 2017년의 오존 전량 ; 상자 선의 양끝 10, 90% 상자 양끝 25, 75% 상자가운데 선은 중간값 검은 점은 최댓값 및 최솟값) 및 (b)장기월평균 연변화 (1985 ~ 2017).

표 3.5.2 서울 상공의 장기 오존전량 및 참조값(1985 ~ 2016)과 2017년 값과의 비교, 장기기후 평균값(1985 ~ 2017) 및 극값(최대와 최소), (단위 : DU)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
참조값 (Ref. 85-16)	339	349	361	358	347	337	308	295	292	290	302	320	325
2017	315	355	376	368	367	352	328	305	306	281	310	339	333
Diff (%)	-7.1	1.7	4.1	2.7	5.8	4.5	6.6	3.4	4.7	-3.0	2.7	5.9	2.5
기후값 (Avg. 85-17)	338	349	362	359	347	337	307	295	292	290	302	321	325
Stdev	14.4	17.7	17.6	14.1	13.1	12.6	10.9	8.1	7.7	9.7	11.2	14.0	6.7
Max	451	498	499	516	518	449	479	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	275	225	240	232	231	242	241	225
(Date, YY/DD)	(02/ 12,15)	(99/25)	(97/1)	(02/5)	(88/9)	(90/23)	(04/29)	(04/1)	(07/19)	(07/12)	(86/14)	(03/1)	(04/ Jul/29)

2017년도의 월별 평균 오존전량은 그림 3.5.5와 표 3.5.2에서 보는 바와 같다. 2017년의 연평균 오존전량은 333 DU로 나타났다. 이는 과거 참조값(1985 ~ 2016년)의 325 DU에 비해서 약 2.5% 증가하였으며, 월별로는 7월에 최대 증가 6.6%를 보이고, 1월에 -7.1%로 최대 감소를 보였다. 2017년의 연교차는 3월의 376 DU와 10월의 281 DU로 95 DU의 연교차를 보이고 있다. 이는 과거 참조값의 연교차인 71 DU보다 높게 나타났다. 그림 3.5.5에 연세대학교에서 관측한 Pandora의 오존분포도를 추가하여 분석에 참고하였다. Pandora의 연평균 값은 312 DU로 2017년의 돕슨 월평균과 21 DU 차이가 났는데, 이는 1월과 2월에 결측이 되었기 때문인 것으로 추측된다. 돕슨의 과거 참조값에 비해 Pandora 오존은 대부분 감소하였고(평균 -3.1%), 10월에 -8.4%의 최대 감소를 보였다. 2017년 돕슨과 판도라의 차이를 비교하였을 때 -5.5%의 차이를 보였으며, 12월에 -9.3%로 가장 크게 나타났지만, 월별 경향성은 일치하는 것을 알 수 있다. 주된 차이의 원인으로 Pandora의 경우 10 ~ 15분에 한번씩 관측을 수행하지만 돕슨의 경우 일 대푯값을 이용하여 분석에 사용하였기 때문에 이러한 차이를 보이는 것으로 추측된다.

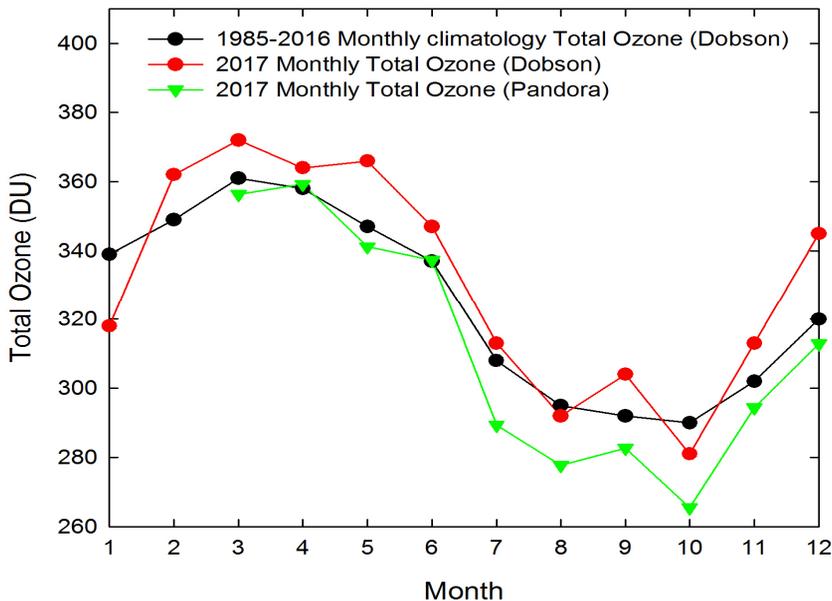


그림 3.5.5 평균 월 오존전량의 참조값(1985 ~ 2016년)과 2017년의 돕슨과 Pandora의 월평균 변화 비교.

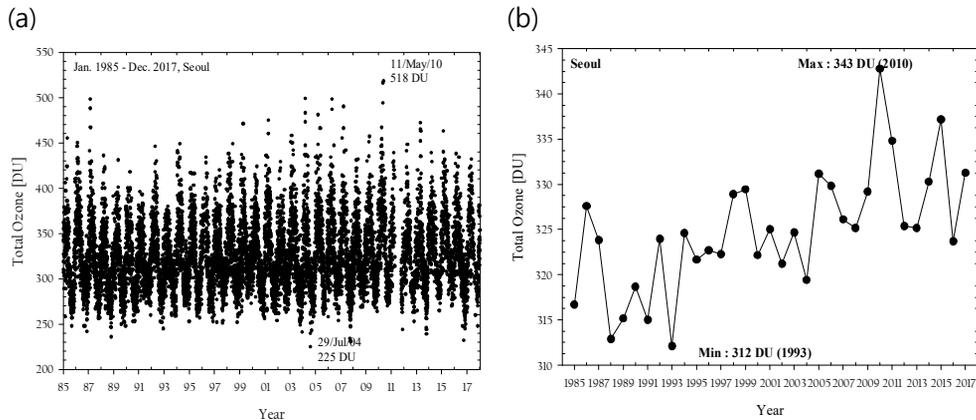


그림 3.5.6 1985년부터 2017년까지 (a) 일 오존전량의 장기 시계열 및 (b) 연평균 값의 경년 변화.

그림 3.5.6(a)는 1985년부터 2017년까지의 일 오존전량의 장기간의 시계열을 나타낸 그림이다. 서울 지역의 오존은 매년 규칙적인 계절변동이 나타나며, 최대극값은 2010년 5월 11일의 518 DU이며, 최소극값은 2004년 7월 29일의 225 DU로 나타나 그 차이는 293 DU로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일 변화는 주로 중관기상장의 변화에 의해서 나타나고 있으며, 연변화는 대기대순환의 영향을 받고 있다. 그림 3.5.6(b)의 연평균 오존전량의 경년변화에서 보게 되면, 과거 관측 기간(1985 ~ 2017)동안 연평균 오존전량이 가장 높았던 시기는 2010년도로 343 DU를 가졌으며, 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). 2017년 1월 평균 오존전량 (318 DU) 은 과거 참조값(339 DU) 보다 21 DU 차이로 가장 크게 나타났으나, 다른 월에서는 차이가 적게 나타났다.

그림 3.5.6(a)에서 보인 일 오존전량으로 일일차 변화율 (Day To Day Change, DTDC)을 그림 3.5.7에 나타내었다. DTDC는 전일 오존량에 대한 그 다음날 오존량의 차이에 대한 변화율로 정의하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 오존전량의 일일차 변화율은 -30.3% ~ 38.4%의 범위에서 나타났다. 오존전량은  $\pm 10\%$  이내에서 변화하는 것으로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 중관 기상장의 일변화에 기인한 것으로 생각된다. 표 3.5.3는 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.

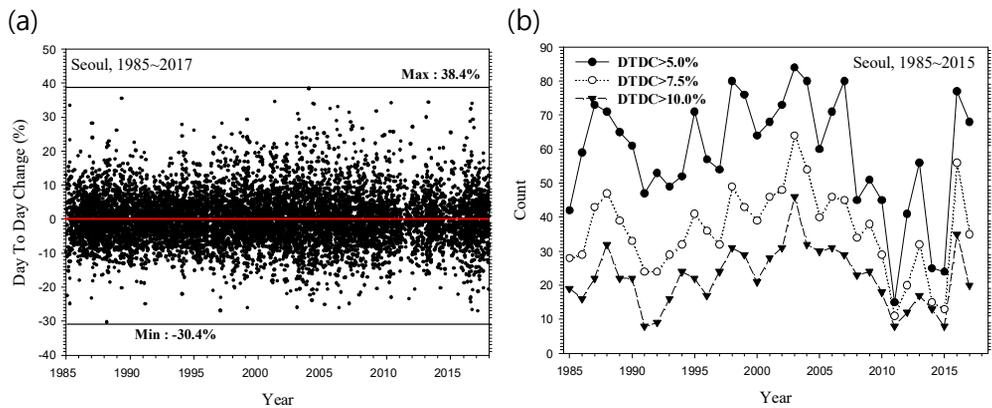


그림 3.5.7 서울 지역 오존전량의 일일차변화율의 (a) 시계열 및 (b) 증가 경향의 일일차 변화율에 대한 관측횟수.

표 3.5.3 서울 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 월평균 및 연평균(1985 ~ 2017)

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.	5.1	5.6	5.6	5.1	5.0	4.2	5.0	4.1	3.5	3.6	3.9	4.9	4.6
Increase	6.5	6.8	7.4	6.6	6.3	5.4	5.3	4.6	4.0	4.0	5.0	6.1	5.7
Stddev.	5.4	6.0	6.0	5.8	6.0	4.5	5.6	4.6	3.8	3.9	4.2	5.4	5.1
Decrease	-6.2	-6.4	-6.5	-5.8	-5.5	-5.0	-5.2	-4.3	-3.8	-3.9	-4.5	-5.4	-5.2
Stddev.	4.6	5.1	5.1	4.5	3.9	3.8	4.5	3.5	3.1	3.4	3.5	4.2	4.1

중관 규모 기상장은 매년 여러 자연 진동에 의해서 그 기상장의 패턴이 변화하게 되므로 오존전량의 변화에도 이러한 영향을 미치게 된다. 따라서 오존전량이 급변하는 경우에 대해서 경년 변화가 다르게 나타날 수 있으며, 이는 오존전량의 장기 변화경향을 분석하는 데에 영향을 미칠 수 있다. 특히 오존전량의 급증은 오존층의 시간적인 변화 뿐 아니라 오존층보다 하층에 위치한 고도에서의 오존량의 변화, 2차 오존피크 등에 의해서도 민감하게 변화하기 때문에 (Park *et al.*, 2008) 증가 경향을 보이는 일일차 변화율의 경년 변화는 오존전량의 경년 변화 및 장기 변화 경향을 파악하는 데 있어서 매우 중요한 분석이다. 그림 3.5.7(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. 2017년도의 경우, 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측횟수는 68회, 7.5% 이상 증가한 관측횟수는 35회, 10% 이상 증가한 관측횟수는 20회이다. 그림 3.5.6(b)의 오존전량의 연평균 경년변화와 비교할 경우, 오존전량의 증가를 나타내는 일일차 변화율의 관측횟수는 대체적으로 오존전량의 연평균 경년변화와 유사한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 오존전량의 연변화 경향은 오존층의 장기적인 회복경향의 영향 뿐 아니라 단기적인 오존량의 급변에도 영향을 일부 받는 것으로 보인다.

#### 다. 한반도(서울, 안면도, 고산)와 일본 상공과의 비교

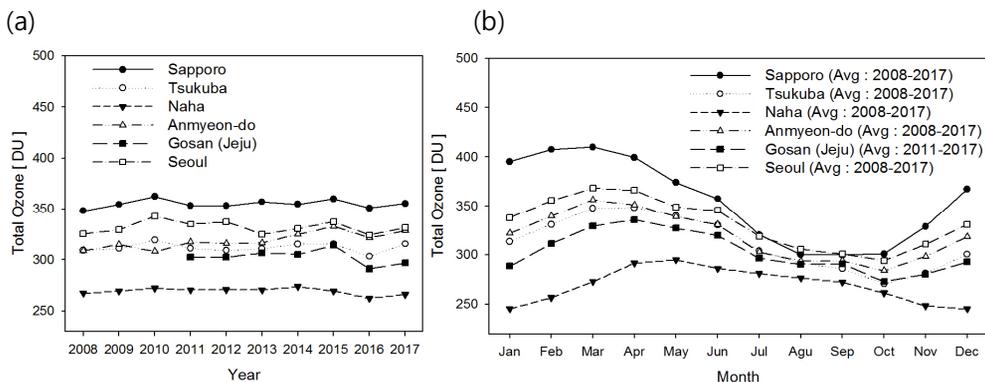


그림 3.5.8 안면도, 서울, 고산 및 일본 상공의 오존전량의 (a) 연평균 및 (b) 월변화.

한반도와 인접한 일본의 오존전량과의 비교를 위하여 삿포로(Sapporo, 43° 04'N, 140° 20'E), 쓰쿠바(Tsukuba, 36° 03'N, 140° 08'E), 나하(Naha, 26° 12'N, 127° 41'E)지역의 Dobson 오존분광광도계 관측값을 함께 분석하였다. 그림 3.5.8(a)는 2008년부터 2017년까지의 연평균 값을 나타낸 것이다. 10년 연평균 값은 삿포로(355 DU), 서울(332 DU), 안면도(319 DU), 쓰쿠바(312 DU), 고산(303 DU) 그리고 나하(269 DU) 순으로 위도가 높을수록 오존전량 평균값이 높았다. 한반도와 일본의 경년변화경향이 거의 비슷함을 알 수 있으며, 2017년의 경우에는 6개 지역 모두 연평균 값이 2016년 대비 증가했다. 2008년부터 2017년까지의 각 월평균 오존전량의 연변화를 그림 3.5.8(b)에 나타내었다. 나하를 제외한 5개 지점의 연 변화 경향은 봄철에 높고, 가을철에 낮게 나타나는 유사한 경향을 보여주고 있으나, 고위도로 갈수록 연 변화의 진폭이 증가하였다. 그리고 연변화의 진폭은 봄철에 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

#### 라. 지상자료와 위성자료 비교

한반도 전역의 오존 분포를 파악하기 위해서는 지상 자료만으로는 한계가 있으므로 위성자료를 통해서 그 분포를 유추하여야 한다. 지상 자료와 위성자료 간에는 매우 큰 상관성을 보이고는 있으나 자료가 언제나 일치하는 것은 아니다. TOMS/OMI 자료와 한반도 지역의 오존분광도계(Brewer), Dobson 분광광도계의 자료 비교를 통해 한반도 오존량 분포의 신뢰도를 살펴보았다. 그림 3.5.9는 2017년의 OMI 위성 자료와 안면도, 고산, 서울의 지상관측자료 간의 상관관계를 나타낸 것이다. 2017년의 서울 지역에서의 Dobson 지상 자료와 OMI 위성 자료의 비교 결과를 볼 경우, 선형회귀에 의한 상관관계 결과 상관관계수 R은 0.901로 나타나 작년과 비교시 유사한 결과를 보이고 있다. Dobson에 대한 OMI 자료의 비는 대략 1.023으로 오존전량은 OMI가 Dobson에 비해 약 2.4%적게 나타났다. 다만 Y-offset의 증가를 유발하는 원인으로 OMI위성에서 극단적으로 과소모의 하는 부분이 있을 것으로 예상된다. 이 부분을 제외하면 대략 0.99%정도 적게 나타나는 것으로 확인된다. 안면도, 고산의 Brewer 지상 자료와 OMI 위성 자료의 비교결과 R은 0.957, 0.958로 좋은 상관관계를 보였다. 고산과 안면도 역시 서울과 마찬가지로 위성값이 지상값보다 작게 나타났다. 이는 일본기상청(2009년)에서 발간한 OMI 자료의 설명에서 2008년 이후 OMI의 오존전량 자료가 1 ~ 2% 정도 적다는 결과와 어느 정도 일치하는 것으로 나타났다.

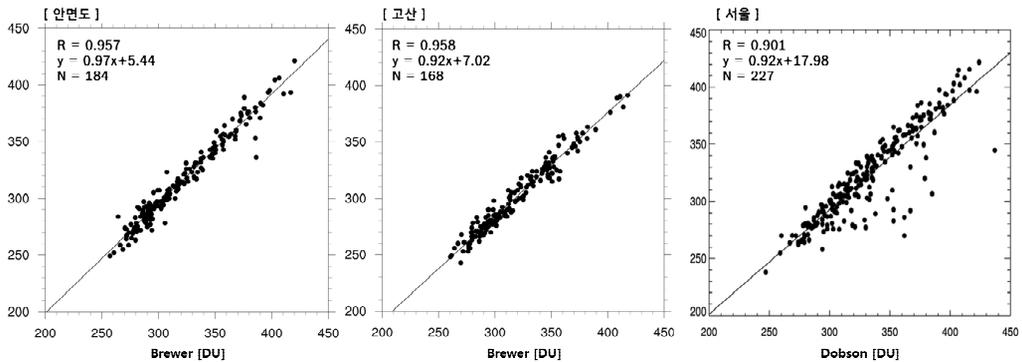


그림 3.5.9 안면도, 고산, 서울 지역의 2017년 지상관측자료와 OMI 위성과의 오존전량 비교.

### 3.5.2 오존 연직분포

대류권과 성층권에 존재하는 오존은 서로 상반된 영향력을 미치는 것으로 알려져 있다(Lu et al.,1997). 성층권에 존재하는 오존은 1차적으로는 유해한 자외선을 차단하여 지구에 생명체를 존재하게 하고 있으며, 2차적으로는 현재와 같은 기상상태를 유지시키는 역할도 하고 있다. 반면 대류권에서 오존이 높은 농도로 존재할 경우, 산화제로 작용하여 인간에게 뿐만 아니라 식물과 건물 등에도 여러 유형의 악영향을 미치게 된다. 대기 중 오존의 형태를 더 정확하게 이해하고, 각각의 대기권의 서로의 오존량에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 대기 중 오존의 수직분포에 관한 연구가 대단히 중요하다(김지영 등, 2000).

오존 연직분포는 연직 공기기둥에 존재하는 각 층의 오존정보로 오존 생성의 광화학과정에 의해 결정된다. 오존은 성층권에서 주로 생성이 이루어진 후, 대류권으로 수송되어 소멸되고 있으며, 이러한 특성상 오존농도는 하부성층권에서 최대로 나타나며, 대류권에서는 대체적으로 균일한 농도를 보이고 있다. 기상청은 포항 기상관측소에서 1995년부터 오존존데를 이용해서 오존의 연직분포를 관측하고 있으며, 위탁관측소인 숙명여자대학교에서는 마이크로파 수신기를 이용하여 2008년부터 관측하고 있다.

## 가. 포항

1995년부터 포항관측소에서 매주 1회 ECC 오존존데(Electrochemical Concentration Cell Ozonesonde)를 이용하여 오존의 연직분포를 관측하고 있다. ECC 오존 존데는 미국 해양기상청(NOAA)에서 개발한 1200 ~ 2000g 정도의 작은 기구로 일반적으로 30 km 이상 올라갈 수 있다. 펌프를 통해 흡입된 공기 중에 포함된 오존과 셀 내의 KI(potassium iodide) 용액이 반응하면 전류가 발생하는데 이때 나타나는 반응 전류의 강약으로 오존량을 측정한다.

2017년에는 총 37회 관측이 실시되었으며, 이중 35회가 성공하여 오존 연직분포를 관측하였다. 그림 3.5.10은 2017년 포항 상공의 월평균 연직 오존분포를 오존분압으로 나타낸 그림이다. 고농도는 주로 18 ~ 28 km에 존재하며, 1 ~ 5월에 높게 나타나며, 주로 봄철에 높은 값이 나타났다.

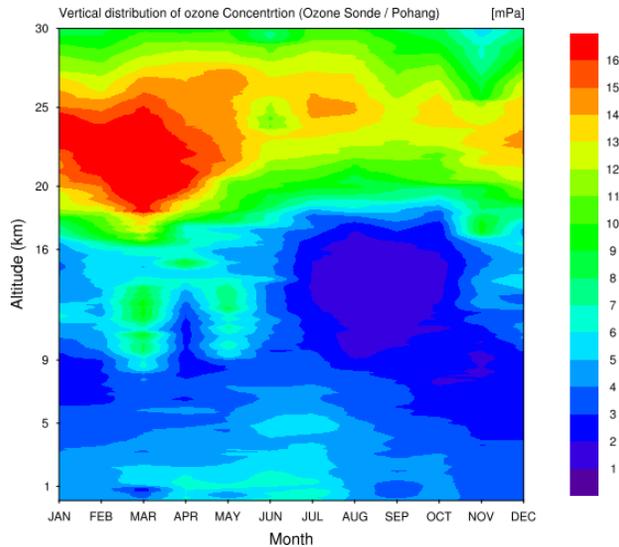


그림 3.5.10 2017년 포항지역의 오존농도 연직분포.

표 3.5.4 포항 2017년 월평균 최대 오존농도와 최대 농도가 나타나는 고도

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
최대농도 [mPa]	16.5	18.3	20.4	17.0	15.0	13.5	14.3	14.1	12.7	13.7	13.7	14.4
고도 [km]	24	22	20	21	22	26	25	25	24	24	23	23

그림 3.5.11은 포항에서 오존존데 관측이 시작된 1995년부터 2017년까지 오존연직분포를 나타낸 그림이다. 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 있어, 연직분포를 성층권(16 km이상), SOP(9 ~ 16 km), 대류권(9 km 이하)로 나누어 장기 변화를 분석하였다(김준 등, 2005; Hwang et al., 2007). 성층권에서는  $-1.68 \text{ \%/decade}$ , SOP  $1.46 \text{ \%/decade}$ , 대류권  $5.49 \text{ \%/decade}$ 로 SOP 구간과 대류권에서 증가경향을 보였다.

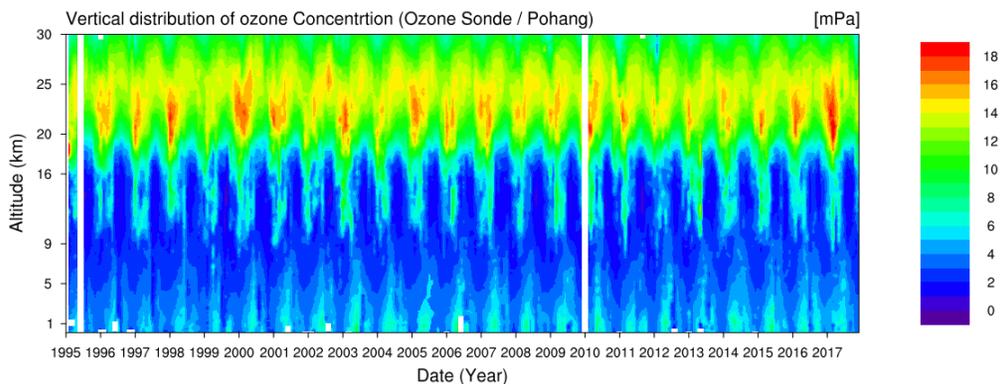


그림 3.5.11 포항지역의 오존농도 연직분포(1995 ~ 2017년).

#### 나. 서울(숙명여자대학교, 위탁관측소)

성층권 오존의 농도변화는 마이크로파 수신기를 통해 측정된 오존 분자의 스펙트럼을 분석하여 고도별 부피혼합비(ppmv)를 관측할 수 있다. 숙명여대 지구환경연구소의 110 GHz 마이크로파 수신기 (SORAS, Stratospheric Ozone Radiometer)를 이용하여 2017년 관측한 우리나라 상공의 오존층 변동을 나타내었다.

마이크로파 수신기는 대기 중 오존에서 자체발산되는 110 GHz 전파를 지상에서 24시간 수신하여 1 GHz 범위의 스펙트럼을 16000개 채널을 통해 수집하고 있으며, 수집한 스펙트럼은 일정시간 동안 적분을 통해 노이즈를 줄인 후 농도 변환 과정을 거친다. 고도별 연직분포는 관측 스펙트럼과 기준에 알려진 기후자료로부터 Optimal estimation method의 통계적 분석 방법을 통해 계산된다.

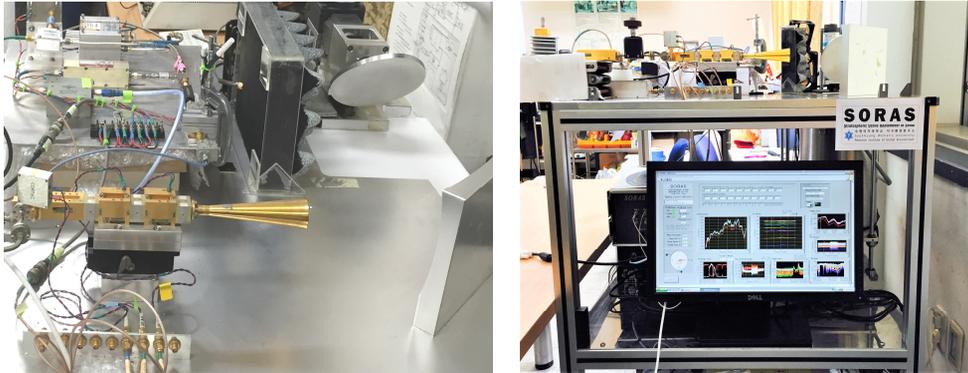


그림 3.5.12 숙명여자대학교 지구환경연구소 110 GHz 오존전파수신기 SORAS (Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul).

그림 3.5.13는 2017년 5월 17일 오전 9시부터 11시까지 SORAS를 통해 관측하여 대류권의 영향을 보정한 이후의 스펙트럼(녹색선)을 나타내었다. 보정을 위한 측정과정을 제외하고 대기 중 오존 전파를 수신한 알짜 시간은 2908초(약 48분)에 이른다. SORAS 관측장비의 자료 저장 특성에 따라 오존 방출 주파수인 110.836 GHz를 중심으로 양쪽 122 MHz 영역은 61 kHz의 분해능을 갖고 있으며, 그 외의 영역은 305 kHz의 분해능을 갖고 있다. 이러한 저장 특성은 높은 고도의 정보를 갖고 있는 중심 주파수 부근의 정보를 보호함과 동시에, 자료의 저장 용량과 분석 시간을 줄이는 장점을 갖고 있다. 검정선은 관측 정보와 대기 정보를 포함하여 계산한 Forward 스펙트럼을 나타낸다.

스펙트럼으로부터 나타낸 오존 연직 분포와 평균 커널을 그림 3.5.14, 그림 3.5.15에 나타내었다. 부피혼합비로 나타난 연직분포는 35 km의 고도에서 최댓값을 보이며, 이는 분압으로 나타냈을 때의 최대 분포 고도와 다르므로, 유의하여야 한다. 농도 검증을 위해 미국 NASA AURA 위성의 MLS 관측장비에서 제공하는 연직 분포를 같이 나타내었다. MLS 관측 장비는 기후변화와 관련있는 대기 성분의 연직 농도 분포를 보여주고 있으며, 전지구영역을 관측하기 때문에 우리나라 상공은 1일 1회의 관측값을 사용할 수 있다. 농도 분석의 평균 커널과 관측 반응도, 연직 분해능도 나타내었다. 22 km부터 60 km까지 0.8 이상의 관측 반응도를 보여, SORAS 관측 장비의 관측 가능 고도가 성층권과 중간권 하부까지 이름을 볼 수 있고, 관측 분해능은 성층권 영역은 8 km부터 16 km, 중간권 영역은 18 km를 보이고 있다.

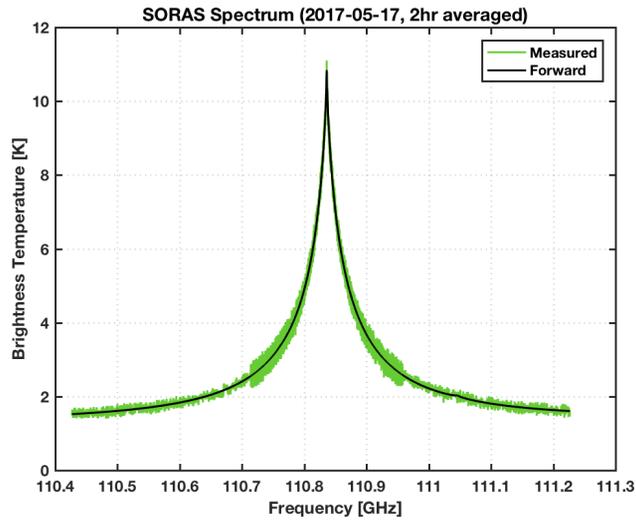


그림 3.5.13 SORAS 전파수신기를 통해 2017년 5월 17일 09시부터 11시까지 관측한 스펙트럼(녹색)과 대기자료와 장비 특성 고려를 통해 계산된 포워드 스펙트럼(검정). 자료 수집시 110.7 GHz부터 110.97 GHz 사이는 61 kHz 간격, 그 외의 영역은 305 kHz 간격으로 설정되어 있음.

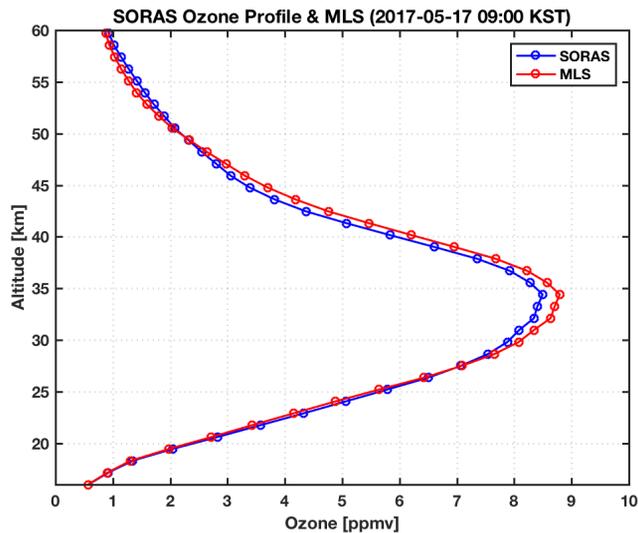


그림 3.5.14 2017년 5월 17일 2시간 관측 스펙트럼으로부터 계산한 오존 분포도 (파랑). 빨간선은 동일일자에 관측된 위성의 MLS (convolved) 관측 자료.

오존의 월평균 관측 자료를 그림 3.5.16에 나타내었다. 부피혼합비로 나타낸 오존의 최댓값 분포 고도는 30 km ~ 40 km 사이에 나타나고 있으며, 월 최댓 농도는 5,6월에 8.8 ppmv를 기록하였으며, 11월에 6.8 ppmv로 최저농도를 기록하였다.

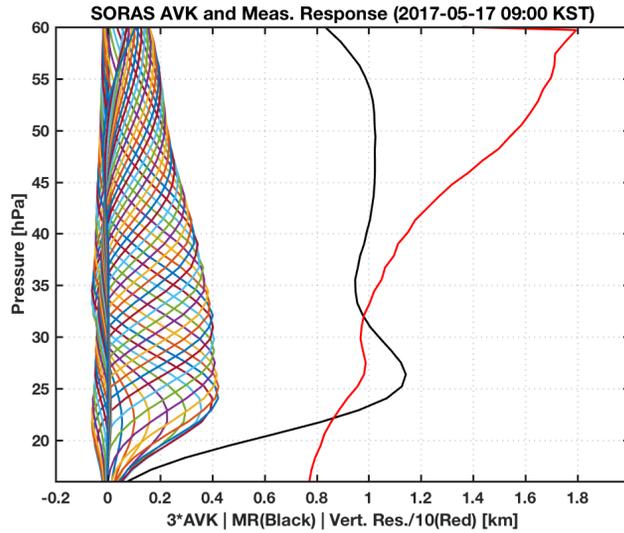


그림 3.5.15 2017년 5월 17일 2시간 관측 스펙트럼으로부터 계산한 오존 분포도의 평균커널(0.5 이하에서 표기된 자료)과 관측반응도 (검정), 연직분해능 (빨강).

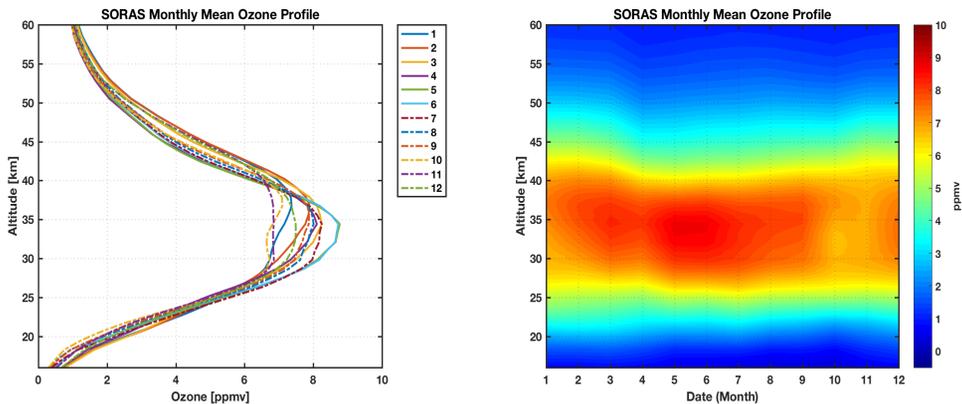


그림 3.5.16 SORAS를 통해 관측한 2017년 월평균 오존 관측자료.

그림 3.5.17에 SORAS로 관측한 오존 연직 분포와 위성 MLS 관측자료와의 차이를 비율로 나타내었다. 두 관측자료는 대체로 10% 범위 내에서 일치하고 있으며, 7, 8월의 경우 25 km 아래 영역에서 20%에 이르는 차이가 나타났으며, 10월과 12월의 경우도 고도에 따라 15% 이상의 차이가 나타나기도 하였다.

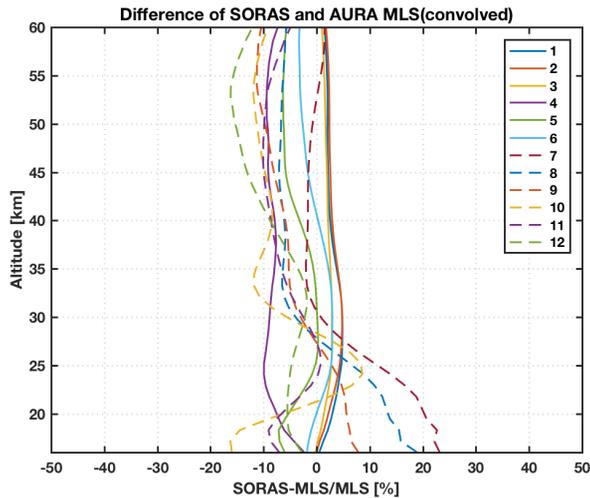


그림 3.5.17 SORAS 관측 오존 관측값과 위성 MLS 관측값과의 월평균 차이.

### 3.5.3 남극 오존홀

극지방은 겨울에 성층권에서 극 소용돌이(Polar Vortex)에 의하여 극지방상공과 그 주위에 공기의 교환이 현저하게 제한되어 극지방상공의 성층권 대기는 주위로부터 오존과 열공급을 받지 못하고 고립된다. 겨울에 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 불균일 반응(기체분자가 고체 또는 액체의 표면에서 일어나는 화학반응)으로부터 성층권의 초산염소( $\text{ClONO}_2$ )와 염화수소( $\text{HCl}$ )의

염소분자( $Cl_2$ )가 발생되어 겨울동안 축적된다(WMO, 1995). 봄이 되면 극지방 상공의 성층권에 태양빛이 비추어져 겨울동안 축적된  $Cl_2$ 가 광해리되어 활성염소원자가 된다. 이 염소가 촉매작용을 하게 되어 오존을 파괴하는데, 오존홀은 남극지방에서 이 메커니즘에 의하여 급격한 오존감소, 파괴가 진행되어 형성된다. 이와 같이 오존홀 형성에는 극 소용돌이의 활동과 밀접한 관계가 있다. 따라서 극 소용돌이의 연 변동에 따라 오존홀의 크기가 매년 달라진다.

이와 관련된 변동을 살펴보기 위해서, 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)와 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서는 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 오존홀은 생성되며, 주로 남극 봄의 9~10월에 최대 면적을 보이게 된다. 남극 지역에서의 오존전량은 1980년 이전에는 300 DU 수준의 오존전량을 보였으나, 오존홀의 발견 이후 계속해서 감소하다가 1993년에는 82 DU로 관측 기록 중 최저를 나타내었다.

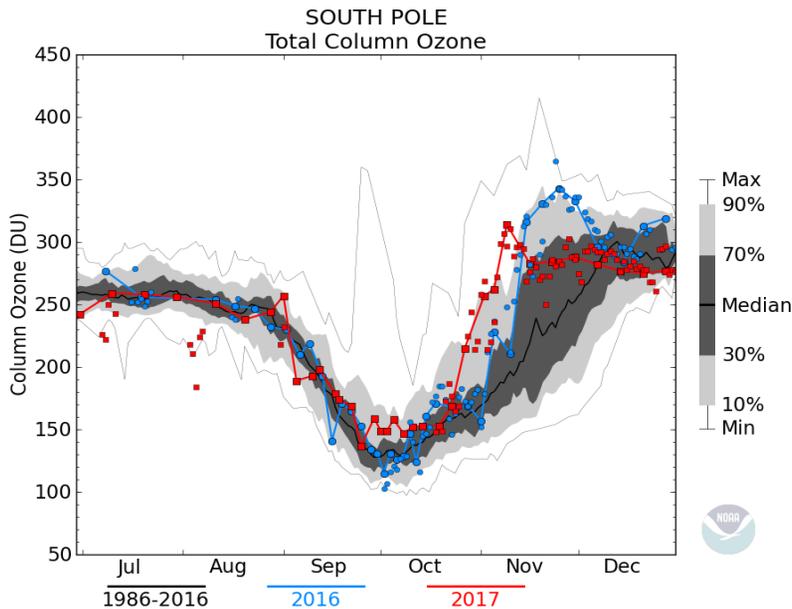


그림 3.5.18 남극에서의 Total Column Ozone의 변화량  
(참조: [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/spo\\_oz/spototal.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/spo_oz/spototal.html)).

그림 3.5.18 은 남극 오존홀이 자주 발행하는 7 ~ 12월의 오존전량의 변화를 시계열로 나타낸 것이다. 2017년(빨간선)의 경우, 장기 월평균(1986 ~ 2016년)과 비슷한 경향을 보였으며, 11월의 경우 낮게 나타났던 과거 기후값에 비해서 오존전량이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 오존전량에 대한 분석에 대해서, 여러 참고문헌(Solomon et al., 2016, Salby et al., 2011)에서는 오존층의 회복세의 가능성을 나타내었고, 추후 장기적인 분석이 필요할 것이라 생각된다.

그림 3.5.19는 오존홀의 연 최대면적에 대한 경년 변화를 시계열로 나타낸 그림이다. 2017년도는 과거 월평균(2006 ~ 2016년)과 2016년에 비해 오존홀의 월 최대면적이 비교적 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

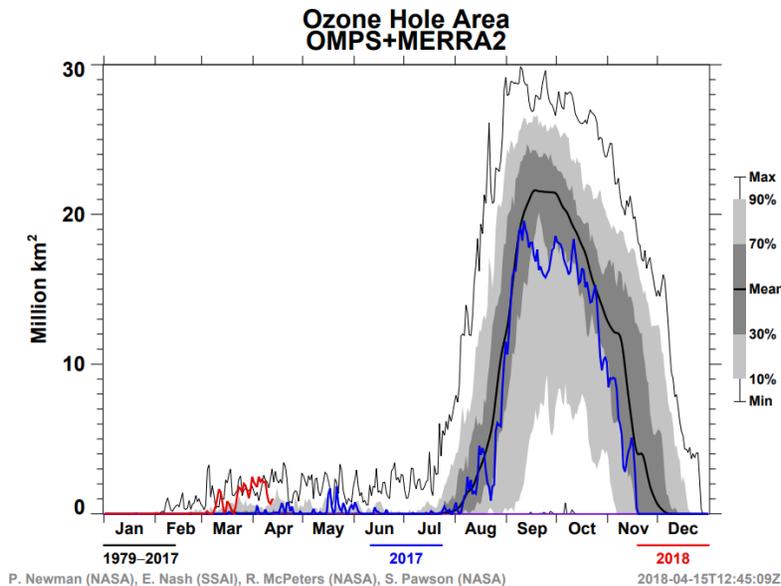


그림 3.5.19 최근 남극 오존홀의 면적 변화

(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 1,850만  $\text{km}^2$ 으로 최근 20년 동안 관측된 오존홀의 최대면적 중 가장 적은 값으로 나타났다. 2013년의 오존홀의 연 최대면적은 2,100만  $\text{km}^2$ 으로 2011년의 2,500만  $\text{km}^2$ 에 비해 약 16%가 작은 값으로 나타났

으며, 2012년에 관측된 극대 값인 1,850만 km<sup>2</sup>에 비해서 약 13.5%가 증가한 면적으로 나타났다.

1979년 오존홀이 처음 발견된 이후로 급증하던 오존홀의 연 최대면적은 1990년 후반 이후로 그 면적이 계속해서 유지되는 경향을 보여 왔다. 2012년에 관측된 연 최대 면적은 1,850만 km<sup>2</sup>으로 최근 20년 동안 관측된 오존홀의 최대면적 중 가장 적은 값으로 나타났다. 2017년의 오존홀은 9 ~ 10월에 2,000만 km<sup>2</sup>으로 평년값과 비슷하게 나타났다.

## 3.6 자외선

자외선 복사는 파장에 따라 자외선A(320 ~ 400 nm), 자외선B(280 ~ 320 nm), 자외선C(100 ~ 280 nm)로 분류한다. 태양빛이 대기를 통과함에 따라 UV-C 복사의 모든 영역과 UV-B 복사의 약 90%가 오존, 수증기, 산소 그리고 이산화탄소에 의하여 흡수된다. 지표에 도달하는 자외선 복사는 대부분 UV-A와 UV-B 복사의 한 부분이다. 자외선 복사는 복사과장, 태양 천장각, 오존 및 기타 미량가스, 구름, 에어로졸, 알베도, 고도, 지구와 태양 간 거리 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 자외선 복사의 변화폭은 매우 크며 대기 변화에 크게 영향을 받는다.

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 햇빛에 적당히 노출시켰을 경우 인체의 비타민 D 합성에 도움을 주는 긍정적인 효과도 있다.

기상청은 국내 7개 지점(안면도, 고산, 울릉도, 강릉, 포항, 목포, 서울)에 자외선 측정기를 설치하여 자외선 복사량을 감시하고 있다. 기상청에서는 UVA-Detector(Solar Light Co. Model #501)를 이용 자외선A(320 ~ 400 nm)와 UV-Biometer(Solar Light Co. Model #501)를 이용 자외선B(280 ~ 320 nm)를 각각 관측하고 있다. 위탁관측소인 연세대학교(서울)에서는 Brewer 분광광도계 (SCI-TEC #148)를 이용 자외선 복사를 관측하고 있다.

### 3.6.1 자외선A

그림 3.6.1은 2017년 7개 지역의 자외선A 일누적 복사량의 시계열이다. 2017년 자외선 자료는 품질관리 단계를 추가하였으며 자세한 내용은 자료통계 방법에 나타내었다. 그림순서는 위도가 높은 순으로 나타내었다. 자외선A 일누적 복사량의 최댓값은 강릉 1.63 MJ/m<sup>2</sup>(6월 5일), 서울 1.52 MJ/m<sup>2</sup>(5월 14일) 울릉도 1.43 MJ/m<sup>2</sup>(6월 5일), 안면도 1.64 MJ/m<sup>2</sup>(6월 4일), 포항 1.53 MJ/m<sup>2</sup>(5월 25일), 목포 1.57 MJ/m<sup>2</sup>(5월 26일), 고산 1.66 MJ/m<sup>2</sup>(5월 26일)로 나타났다. 주로 5월, 6월에 최댓값이 나타났다. 자외선 복사량은 태양의 천정각과 일조시간의 규칙적인 변화로 매년 규칙적인 계절변화를 하고 있다. 또한

매일의 변화를 그날의 운량, 오존전량, 에어로졸 등의 변화에 주로 의존한다. 누적값의 최댓값은 주로 한 여름보다는 5 ~ 6월에 높게 나타난다.

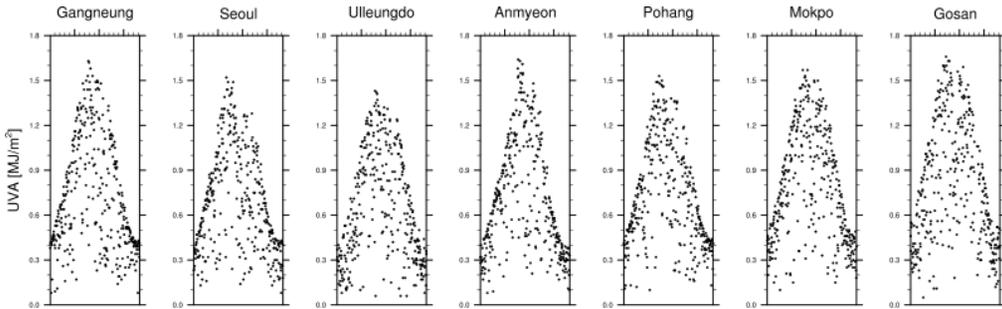


그림 3.6.1 2017년 자외선A 일누적 복사량(그림순서는 위도가 높은 순임).

그림 3.6.2의 왼쪽은 2017년 자외선A의 일누적 복사량의 월변화를 지난 과거 평균값과 같이 비교하였으며, 관측시작년도가 지점마다 달라 과거 평균년도는 강릉, 서울, 목포는 2015 ~ 2016년, 울릉도 2012 ~ 2016년, 안면도 2007 ~ 2016년, 포항 2009~2016년, 고산은 2012~2016년이다. 자외선은 태양천정각과 일조시간 등에 영향을 받기 때문에 자외선 일누적 복사량은 하지를 기준으로 남중고도가 높고, 낮 길이가 긴 5월 ~ 6월 사이 높게 나타날 수 있고, 7월 ~ 8월의 경우는 장마의 영향으로 낮아지는 경향이 있다. 각 지역별 지난 과거 평균값 대비 2017년 월평균 값은 모든 지역에서 증가하였다. 일누적 복사량의 월평균 최댓값은 서울(1.10 MJ/m<sup>2</sup>), 목포(1.15 MJ/m<sup>2</sup>), 포항(1.15 MJ/m<sup>2</sup>), 고산(1.20 MJ/m<sup>2</sup>) 지역은 5월, 강릉(1.19 MJ/m<sup>2</sup>), 울릉도(1.08 MJ/m<sup>2</sup>), 안면도(1.28 MJ/m<sup>2</sup>)는 6월에 가장 높았다. 그림 3.6.2의 오른쪽은 2017년 자외선A의 일 최대 복사량의 월변화를 지난 과거 평균값과 같이 비교하였다. 일 최대값의 월평균 최댓값은 서울(48.23 W/m<sup>2</sup>), 포항(48.82 W/m<sup>2</sup>)은 5월, 강릉(50.85 W/m<sup>2</sup>), 울릉도(45.41 W/m<sup>2</sup>), 안면도(51.55 W/m<sup>2</sup>)는 6월, 목포(51.03 W/m<sup>2</sup>), 고산(54.99 W/m<sup>2</sup>) 지역은 8월에 가장 높았다.

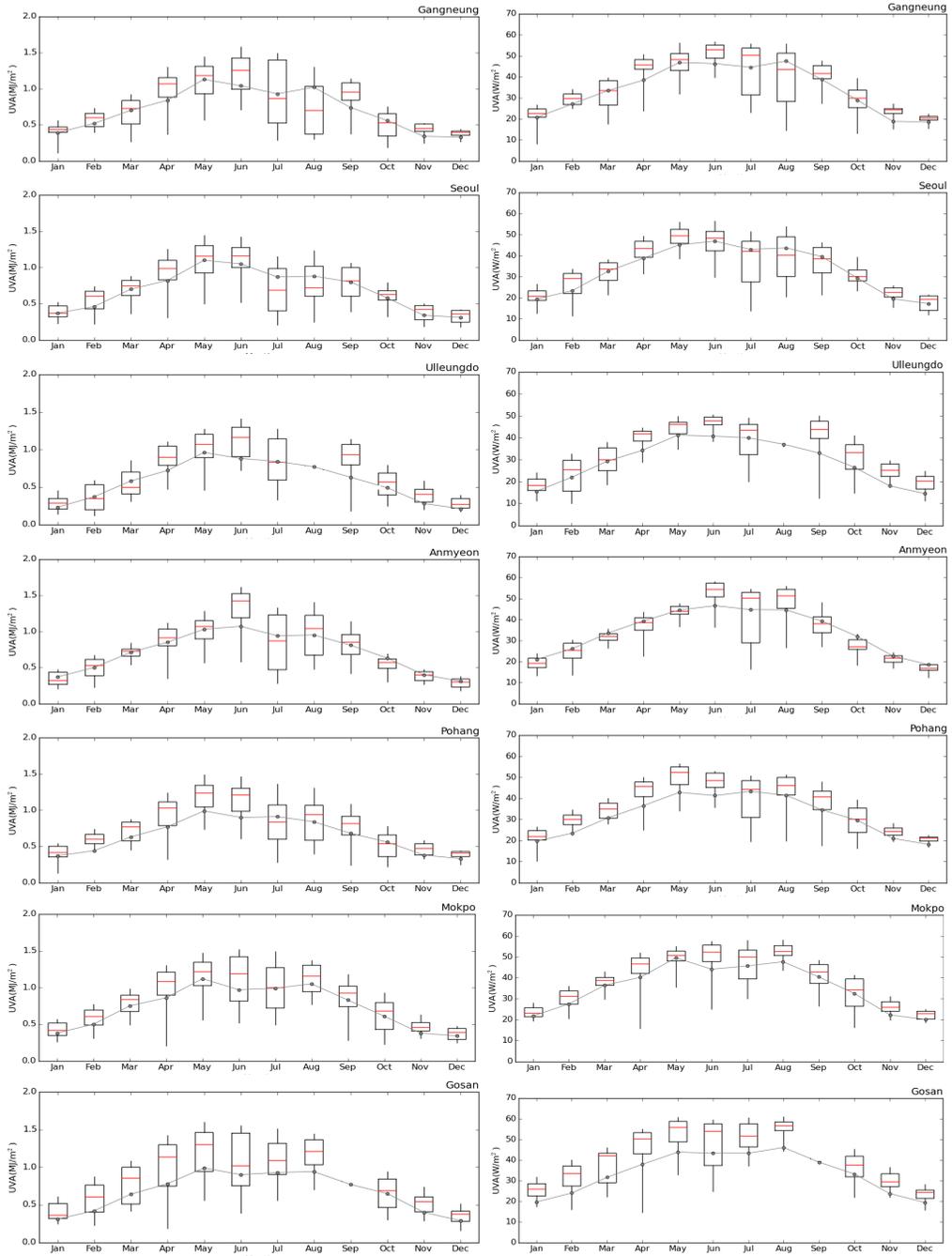


그림 3.6.2 2017년 자외선A 복사량의 월변화(좌: 일누적값, 우: 일최대값). 2017년 월별 분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95%, 상자 양끝은 25, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 지난 과거 평균값(점-선).

### 3.6.2 자외선B

자외선B는 홍반에 대한 가중함수가 적용된 홍반자외선(EUV-B) 복사량이다. 자외선B의 관측단위는 MED이며, MED는 유해자외선 과장영역(280~320 nm)의 최소 홍반점 조사(Minimum Erythmal Dose)를 나타내는 값으로 1 MED는  $210 \text{ Jm}^{-2}$ 의 복사량 값으로 환산할 수 있다. 그림 3.6.3은 2017년 지역별 자외선B의 일누적값을 시계열로 나타낸 것이다. 각 지역별 일누적 최댓값은 강릉 6월 5일  $4.04 \text{ kJ/m}^2$ , 서울 6월 3일  $3.58 \text{ kJ/m}^2$ , 울릉도 7월 26일  $5.67 \text{ kJ/m}^2$ , 안면도 6월 4일  $5.06 \text{ kJ/m}^2$ , 포항 7월 27일  $5.43 \text{ kJ/m}^2$ , 목포 6월 4일  $4.09 \text{ kJ/m}^2$ , 고산 7월 22일  $5.86 \text{ kJ/m}^2$  이다. 주로 6월, 7월에 최댓값을 보였다.

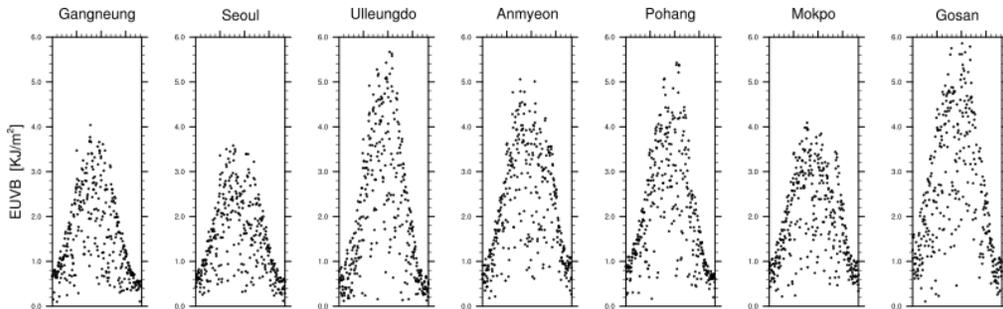


그림 3.6.3 2017년 자외선B 일누적 복사량(그림순서는 위도가 높은 순임).

그림 3.6.4는 자외선B의 일누적 복사량(그림 3.6.4(좌))과 일최대 복사량(그림 3.6.4(우))의 월변동성을 지난과거 월 평균값과 비교한 그림이다. 지난과거 월 평균값은 강릉, 안면도, 포항, 목포는 2007 ~ 2016년, 고산, 울릉도는 2012 ~ 2016년, 서울은 2015 ~ 2016년을 평균한 것이다. 울릉도, 안면도, 포항, 고산의 경우 자외선 복사 값이 높은 여름의 경우 과거 월평균값에 비해 증가하였고, 나머지 지역은 감소하였다. 울릉도와 고산의 경우 일 최댓값의 월 평균값이 과거 월 평균보다 8월에 각각 24%, 15% 증가하였다. 일 최댓값의 월 평균값은 서울은 5월에  $0.128 \text{ W/m}^2$ , 강릉, 안면도는 6월달에 각각  $0.137 \text{ W/m}^2$ ,  $0.179 \text{ W/m}^2$ , 고산, 포항, 울릉도, 목포는 8월에 각각  $0.238 \text{ W/m}^2$ ,  $0.206 \text{ W/m}^2$ ,  $0.204 \text{ W/m}^2$ ,  $0.147 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높았다.

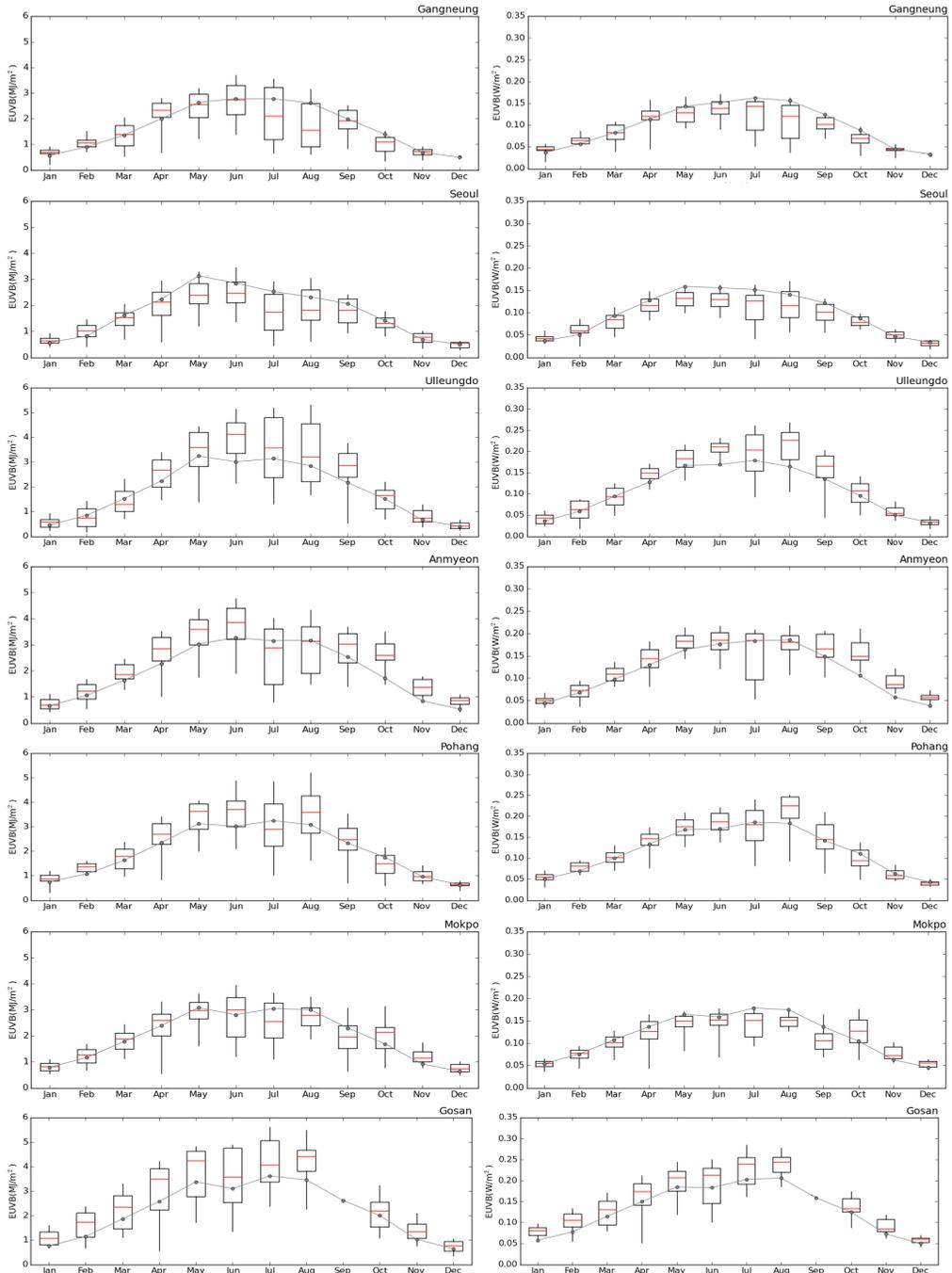


그림 3.6.4 2017년 자외선B 복사량의 월변화(좌: 일누적값, 우: 일최댓값). 2017년 월별 분포(상자의 세로 실선 양끝은 5, 95%, 상자 양끝은 25, 75%값, 상자 가운데 실선은 중간값)와 지난 과거 평균값(점-선).

### 3.6.3 자외선 복사량(연세대학교, 위탁관측소)

연세대학교(서울)는 2004년부터 위탁감시망에 등록되어 현재까지 Brewer 분광광도계 (SCI-TEC #148)로 자외선 복사(290 ~ 363 nm)를 0.5 nm 간격으로 측정하고 있다. 290 ~ 363 nm 파장역의 적분을 총자외선(Total ultraviolet radiation, TUV)이라고 하며, 290 ~ 320 nm의 영역에 피부 홍반에 대한 가중함수를 적용하여 홍반 자외선(Erythemal ultraviolet, EUV) 복사량을 계산하였다. EUV의 가중함수는 McKinlay and Diffey(1987)의 참고문헌의 데이터를 사용하였다. 오존분광도계의 자외선 관측은 날씨의 유무와 관계없이, 태양 천정각에 따라 정해진 관측을 수행하고 있다. 따라서 강수가 있는 날에도 관측을 수행하고 있지만, 정확도는 낮다. 2017년도는 장비 수리로 인한 결측일(31일)을 제외하면, 관측가능일은 334일이다. 2017년도 오존분광도계 관측은 자동적인 수온램프를 수행 하지 못하여 태양을 제대로 따라가지 못하는 문제가 8월에 가장 많이 나타났으며, 겨울철에는 통신 케이블의 끊어짐으로 인해, 연속적인 관측이 수행되지 못하였다. 직달관측을 수행하는 오존과 에어로졸의 관측과는 달리, 자외선 관측은 기기의 온도변화에 대해 관측 값이 민감하게 반응하기 때문에 온도가 높은 여름철에는 파장별 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 있어서, 여름에 높고 겨울에 낮은 특징을 보인다. 그림 3.6.5은 일 적산된 TUV (그림 3.6.5(a))와 EUV (그림 3.6.5(b))의 시계열이다. 2005년을 제외한 2004년부터 2011년도까지는 연 최댓값이 TUV에서 6월에 나타나고 있었지만, 2012년과 2013년도에는 연 최댓값이 8월과 7월에 각각 나타났다. 그러나 2013년도부터 5월과 6월에 꾸준히 높은 값이 나타나는 경향성은 일치하고 있으며, 2017년 최댓값은 6월 3일에 나타났다( $1.13 \text{ MJ/m}^2$ ). EUV에서의 연 최댓값은 7 ~ 8월에 나타났으며, 2017년도 EUV의 최댓값은 7월 12일에  $5.3 \text{ kJ/m}^2$  으로 매우 높은 값이 관측되었다.

2017년 TUV와 EUV의 월평균 값과 2004년부터 2017년까지의 연평균 값의 장기월평균을 각각 그림 3.6.6에 나타냈다. TUV(그림 3.6.6(a))의 장기 월평균 값은 6월에 최댓값( $0.92 \text{ MJ/m}^2$ ), 12월에 최솟값( $0.28 \text{ MJ/m}^2$ )을 나타내었으며, 2017년도는 6월에 최댓값( $0.64 \text{ MJ/m}^2$ ), 12월에 최솟값( $0.39 \text{ MJ/m}^2$ )을 나타내었고 겨울철을 제외 한 계절은 장기 월평균과 비슷한 분포를 보였다.

EUV는 (그림 3.6.6(b)) 2017년 월 평균값과 장기평균값(2004 ~ 2016년)을 각각 나타낸 것이다. 장기평균값은 6월에 최댓값( $2.70 \text{ kJ/m}^2$ )을 가지며, 12월에 최솟값( $0.47 \text{ kJ/m}^2$ )을 가진다. 하지만 2017년은 7월에 최댓값( $2.73 \text{ kJ/m}^2$ )을 가지며, 12월에 최솟값( $0.47 \text{ kJ/m}^2$ )을 가진다.

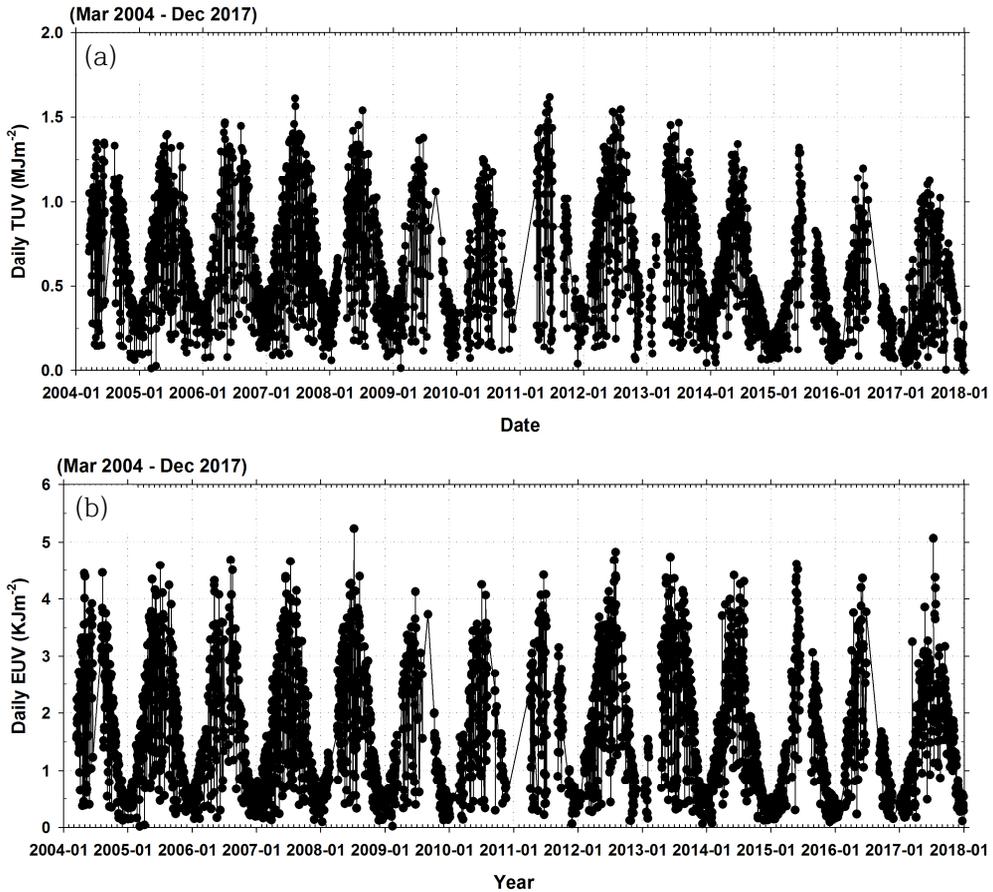


그림 3.6.5 일 적산된 (a) 총자외선과 (b) 흥반자외선의 시계열(2004.3. ~ 2017.12.).

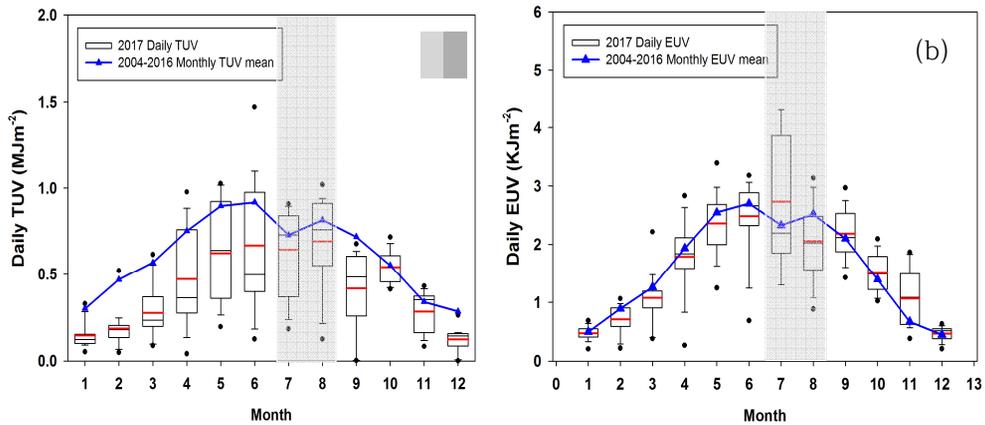


그림 3.6.6 서울 상공 (a) TUV와 (b) EUV의 2017년 연 변화(상자 그림: 2017년의 TUV, 선의 양끝: 10, 90%, 상자 양끝: 25, 75%, 상자가운데 붉은 선: 월 평균값, 검은 선: 중간 값, 상자 양끝의 검은 점: 최댓값 및 최솟값)와 2004년부터 2016년도의 월평균(2017년의 7월 및 8월은 평균값에 사용된 데이터의 수가 월 15개 미만으로 신뢰도가 낮음).

### 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, 건성 침적은 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 09시부터 당일 09시까지 채수한 시료를 분석하며, 강수량이 0.5 mm 이하의 시료를 제거한 후 나머지를 유효시료로 판단한다. 각 지점에서 채취된 강수시료는 여과지로 시료에 포함된 불순물을 제거한 후 전기전도도(EC)와 산성도(pH), 이온크로마토그래피를 이용하여 수용성 이온성분인 양이온 5개성분( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )과 음이온 4개성분( $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )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 이온크로마토그래피를 이용하여 수용성 이온성분인 양이온 5개 성분과 음이온 4개 성분을 분석한다.

Olsen *et al.*(1990)에 의하면, 습성 침적의 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 아래와 같다.

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

$C_{pw}$ : 강수량이 가중 평균된 농도,  $C_i$ :  $i$  번째 강수시료의 분석된 농도

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

$P_{tot}$ : 평균하려는 기간 동안 강수량 총합

### 3.7.1 2017년 강수특성

강수채취율이란 총강수량 중 채취한 강수량의 비율을 의미하며, 2017년 강수채취율은 안면도 97.5%, 고산 96.5%, 울릉도 87.2%로, 세계기상기구 지구 대기감시 프로그램의 강수화학 분야에서 강수채취율의 품질목표인 70%보다 높았다(WMO/GAW Report No. 160, 2004). 그림 3.7.1은 지역별, 연도별 총강수량이다. 연도별 강수량은 지역에 따라 증가와 감소를 반복하는 등 서로 다른 양상을 보인다. 이 중 안면도는 2012년부터 강수량이 계속 감소하고 있으며, 고산지역은 2015년 이후에 감소하는 경향을 보였다. 그러나 울릉도의 경우 2016년에 가장 많은 강수량을 보였고, 2017년에는 가장 낮은 강수량을 나타냈다.

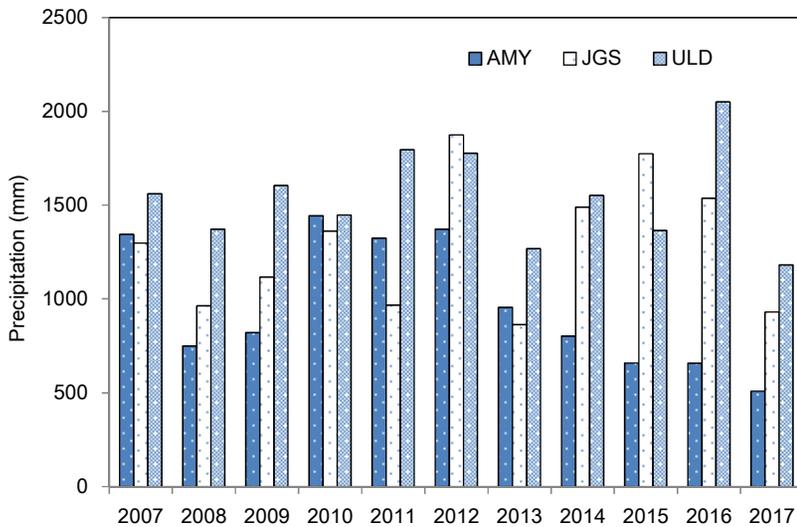


그림 3.7.1 연도별 총강수량(mm).

그림 3.7.2는 강수화학의 품질관리를 통과한 전체강수량을 지역별로 10년(2007 ~ 2016년)과 2017년의 단순평균강수량그래프이다. 2007년부터 2016년까지의 10년간의 평균강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 923.9, 1151.6, 1368.2 mm이며, 2017년 세지역의 강수량은 안면도, 고산, 울릉도 각각 471.5, 893.9, 1008.9 mm로 평년보다 약 51.0, 77.6, 73.7%정도이며, 전체적으로 평년보다는 낮은 강수량을 보였다.

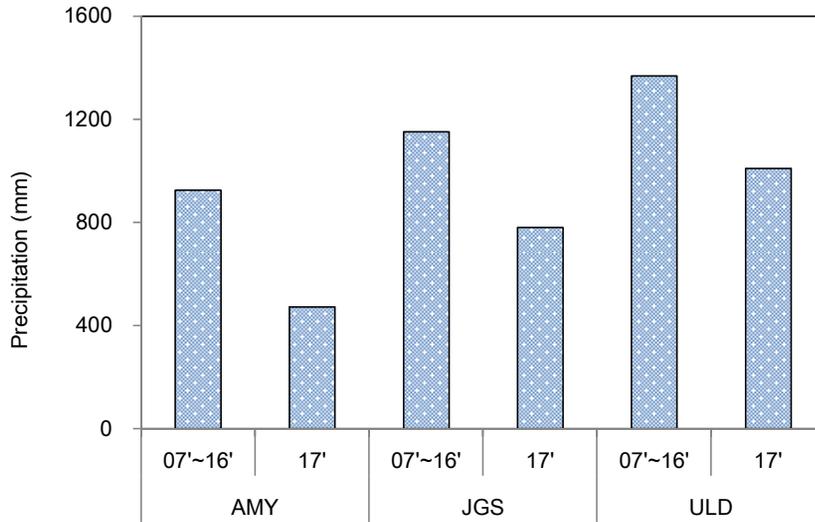


그림 3.7.2 지역별 연평균 평년(07' ~ 16')과 2017년 단순평균 강수량(mm).

또한 2017년 강수량과 평년(2007 ~ 2016년) 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.

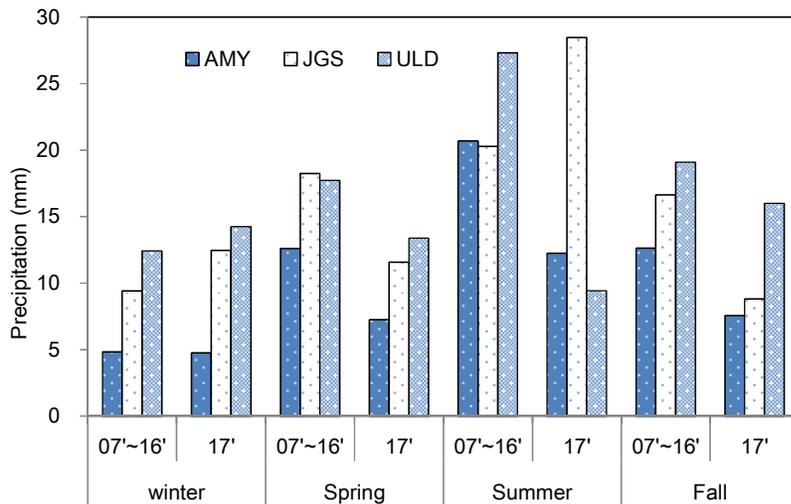


그림 3.7.3 계절평균 평년(07' ~ 16')과 당해연도 단순평균 강수량(mm).

### 3.7.2 산성도(pH)

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 2007년부터 2016년까지 약 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균 산성도와 2017년의 산성도를 확인해본결과(표3.7.1과 그림3.7.4(위) 참고), 각각 4.63, 4.86, 4.76이며, 2017년도의 부피가중평균 산성도는 안면도 4.70, 고산 4.88, 울릉도 4.88로 나타났다. 2017년도의 산성도가 약 10년간의 부피가중평균 산성도보다 약간 높은 것으로 조사되었다. 또한 10년간의 계절별 부피가중 평균의 산성도와 2017년의 계절별 산성도를 비교해본 결과(그림3.7.4(아래) 참고) 안면도, 고산, 울릉도 세 지역 모두 겨울철의 산성도 값이 낮은 값을 보였으며, 특히 다른 지역에 비해 안면도 지역이 4.2로 가장 낮은 값을 나타냈다. 반면에 2017년 봄철에 안면도 지역이 pH 5.3으로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 이는 황사의 영향을 받은 것으로 판단된다.

표 3.7.1 관측지점별 부피가중평균 산성도(pH)

기간 \ 지점	안면도	고산	울릉도
2017	4.70	4.88	4.88
2007~2016	4.63	4.86	4.76

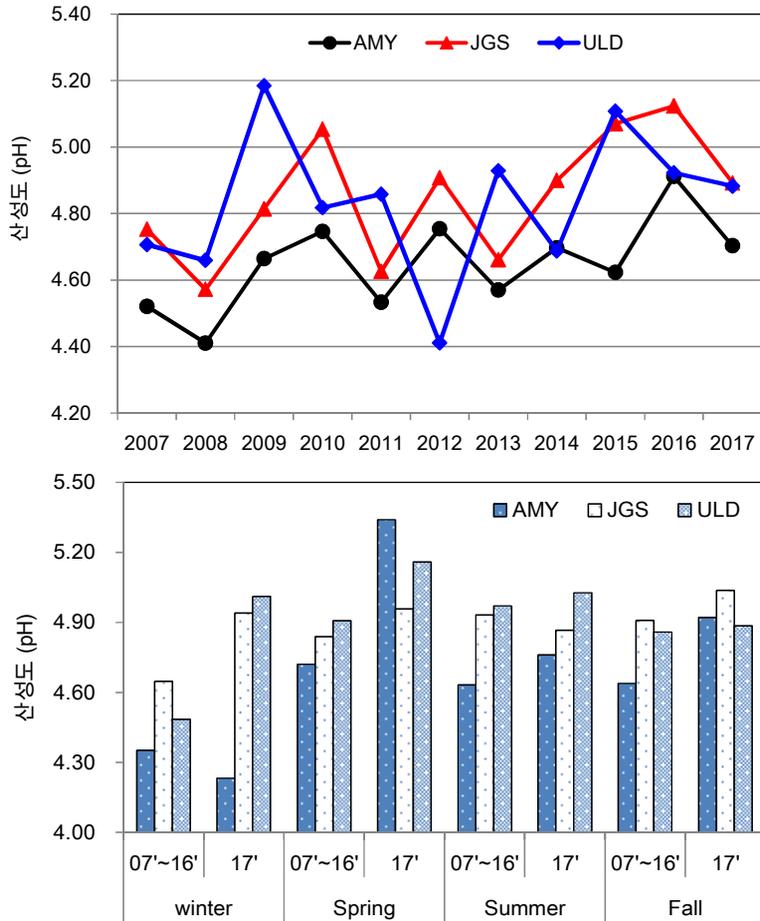


그림 3.7.4 (위) 연도별, (아래) 계절별 안면도, 고산, 울릉도지역의 부피가중평균의 산성도변화.

관측지점별 강수에 대한 pH 구간별 발생빈도는 그림 3.7.5와 같다. 2007~2016년 분포에서 안면도, 고산에서 pH 4.5 ~ 5.0 구간에서, 울릉도는 5.0 ~ 5.5 구간에서 최대 빈도가 나타났다. 2017년에는 안면도, 고산지역은 평년(2007 ~ 2016년)분포와 유사한 경향을 보였고, 울릉도인 경우 pH 4.5 ~ 5.0 구간에서 빈도가 증가하는 결과를 보였다.

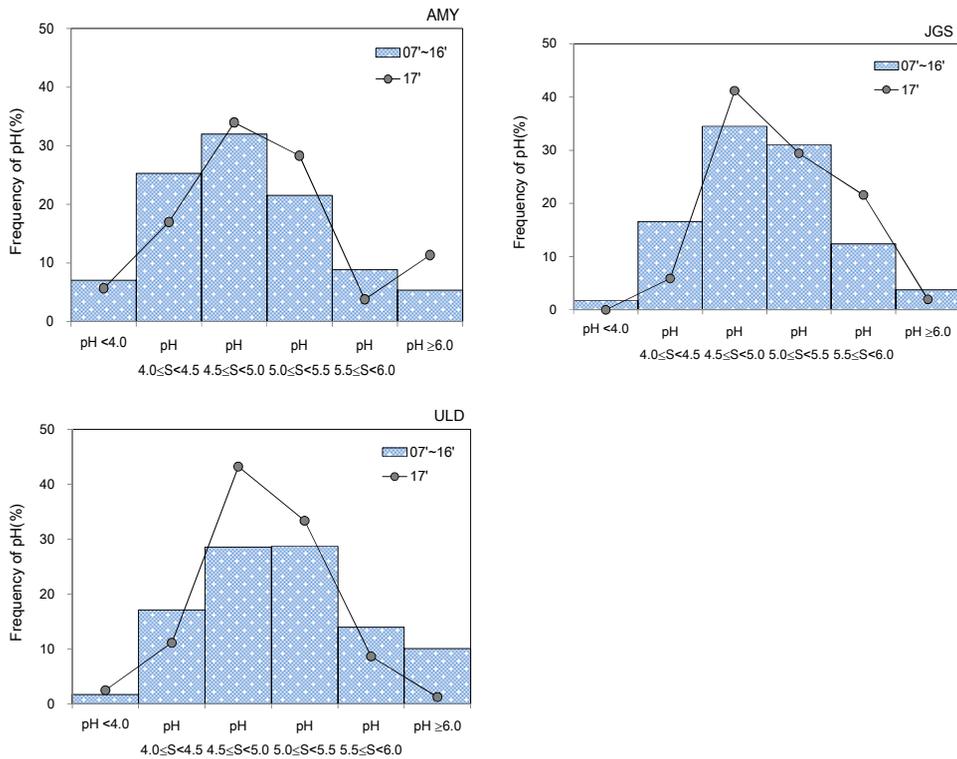


그림 3.7.5 관측지점별 강수의 pH 발생 빈도.

### 3.7.3 전기전도도

강수화학의 품질관리를 통과한 강수 자료 중 2007년부터 2016년까지 약 10년간의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도를 확인해본결과 (표 3.7.2와 그림 3.7.6 참고), 10년간의 전기전도도의 값은 각각 29.0, 26.7, 50.4  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 나타났다. 그리고 2017년도의 부피가중평균의 전기전도도는 안면도 30.8  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 고산 17.1  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , 울릉도 40.7  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 고산이 가장 낮았다. 2007년부터 2016년까지의 안면도, 고산, 울릉도의 부피가중평균의 전기전도도인 경우, 겨울철에 높은 전도도 값을 보였으나, 여름철에는 낮은 값을 나타냈다.

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

기간 \ 지점	안면도	고산	울릉도
2017	30.8	17.2	40.7
2007~2016	29.0	26.7	50.4

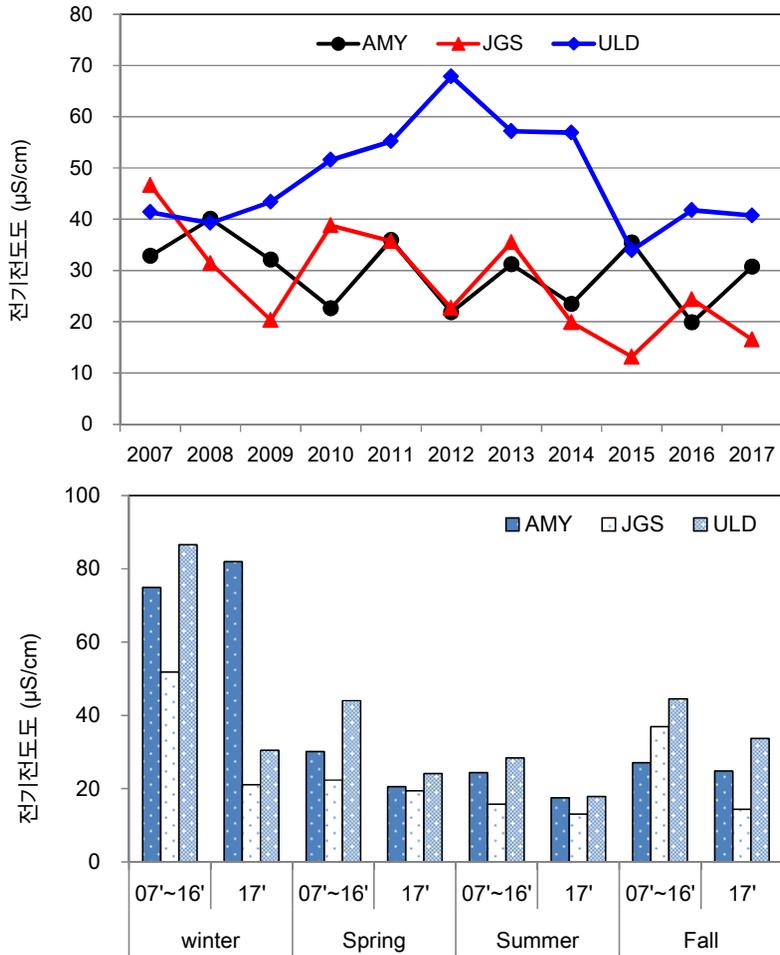


그림 3.7.6 관측지점별 전기전도도의 부피가중평균변화 (위) 연도별부피가중평균 (아래) 계절별 부피가중평균.

### 3.7.4 강수이온성분

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

그림 3.7.7은 2007년부터 2017년까지 평균값과 당해연도인 2017년의 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. 2017년도 안면도, 고산, 울릉도 세 관측지점에서 해염성분을 제외하고 높은 농도를 보인 성분은  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 성분이며, 이때의 부피가중평균농도는 각각 46.4, 27.1, 36.2  $\mu\text{eq/L}$ 이며, 이때의 조성은 각각 13.8%, 16.6%, 6.8%를 차지하였다.  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 의 2007 ~ 2016년의 안면도, 고산, 울릉도 세 관측지점의 부피가중평균농도는 각각 47.9, 25.6, 46.2  $\mu\text{eq/L}$ 이며, 이때의 조성은 각각 17.7%, 8.4%, 7.5%를 차지하였다. 지난 10년간의 평균농도와 비교한 결과 안면도, 고산지역은 농도변화가 거의 나타나지 않았으나, 울릉도지역에서  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 성분의 농도가 감소하였다. 두 번째로는  $\text{NO}_3^-$ 성분인 경우, 2017년과 지난 10년간의 부피가중평균농도의 범위는 각각 23.2 ~ 48.6 19.4 ~ 33.3  $\mu\text{eq/L}$ 의 값을 보였고, 이때의 조성비의 범위 또한 각각 5.2% ~ 14.5%, 4.9% ~ 12.3%를 보였다.  $\text{NH}_4^+$ 성분은 지난 10년간의 부피가중평균농도가 높게 나타난 반면, 안면도를 제외한 두 지역에서는  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 성분이 2017년이 지난 10년간의 부피가중평균보다 낮은 농도를 보였다.

표 3.7.3 2017년 관측지점별 부피가중평균 이온농도

요소 \ 지점	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{nss-SO}_4^{2-}$	$\text{nss-Ca}^{2+}$
(μeq/L)									
안면도	1.0	79.1	48.6	65.6	55.0	2.8	17.9	46.4	18.5
고산	0.5	39.1	22.2	34.1	24.4	1.5	8.6	27.1	6.1
울릉도	1.1	204.9	27.5	176.8	25.2	6.4	41.2	36.2	10.8

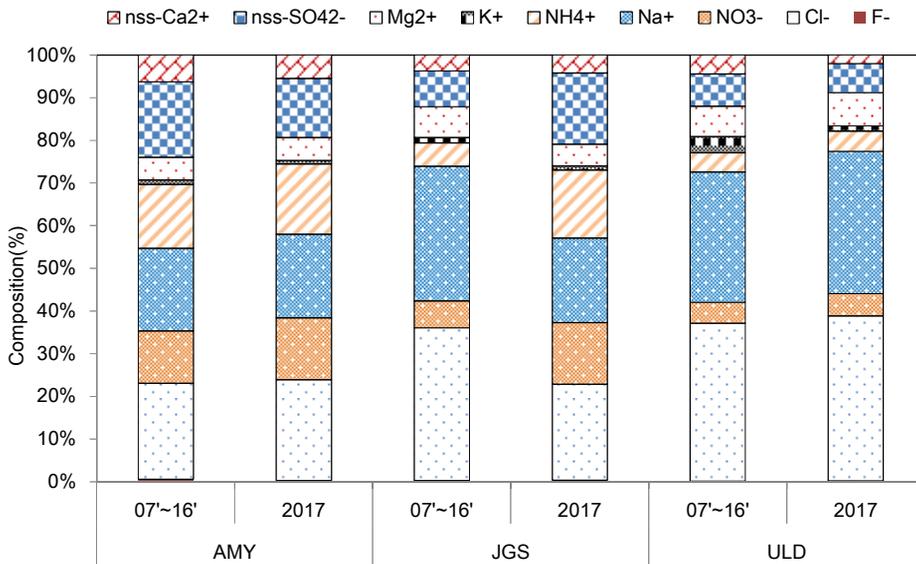
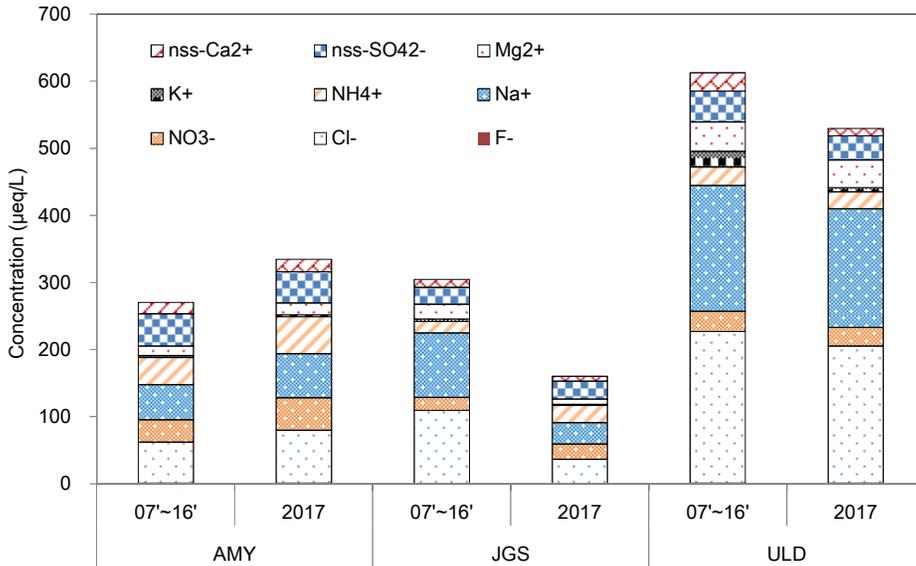


그림 3.7.7 2007 ~ 2017년 안면도(AMY), 고산(JGS), 울릉도(ULD) 지역의 강수성분 (위) 연도별 부피가중평균 농도, (아래) 연도별 부피가중평균 조성비.

안면도, 고산, 울릉도에서 채취한 강수의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 3.7.8 ~ 3.7.10과 같다. 여기서 강수이온성분의 계절별 평균농도는 2007년부터 2016년까지 평균한 값이다. 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해연도 1,2월의 데이터를 평균하였고, 당해연도 12월의 자료는 사용하지 않았다.

우선 안면도 강수에서 이차오염물질인  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 의 지난 10년(2007 ~ 2016년)간과 2017년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면,  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 성분의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도범위는 각각 24.9 ~ 136.7, 25.8 ~ 141.7, 26.3 ~ 157.3  $\mu eq/L$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질( $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ )의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 47.7%, 48.6%, 50.4%, 49.5%로, 여름철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다. 또한 2017년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 49.5%, 45.8%, 49.2%, 48.6%로 나타내었다.

고산지역 강수에서 이차오염물질  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 의 지난 10년(2007 ~ 2016년)간과 2017년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면,  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 성분의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도범위는 각각 17.4 ~ 45.3, 14.0 ~ 35.8, 12.0 ~ 40.8  $\mu eq/L$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질( $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ )의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 46.6%, 47.5%, 47.2%, 44.8%이며, 2017년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 46.8%, 48.4%, 55.9%, 51.2%로 여름철에 높고, 상대적으로 겨울에 낮은 경향을 나타내었다.

마지막으로 울릉도지역 강수에서 이차오염물질인  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 의 지난 10년(2007 ~ 2016년)간과 2017년의 계절별 부피가중평균농도를 비교해 보면,  $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ 성분의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도범위는 각각 22.1 ~ 71.7, 13.7 ~ 52.9, 15.1 ~ 41.2  $\mu eq/L$ 로 조사되었다. 강수이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차오염물질( $nss-SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ )의 조성비는 지난 10년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 44.9%, 41.9%, 40.2%, 42.0%이며, 2017년의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 45.3%, 46.6%, 48.8%, 45.2%로 여름철에 높고, 상대적으로 가을, 겨울철에 낮은 경향을 나타내었다.

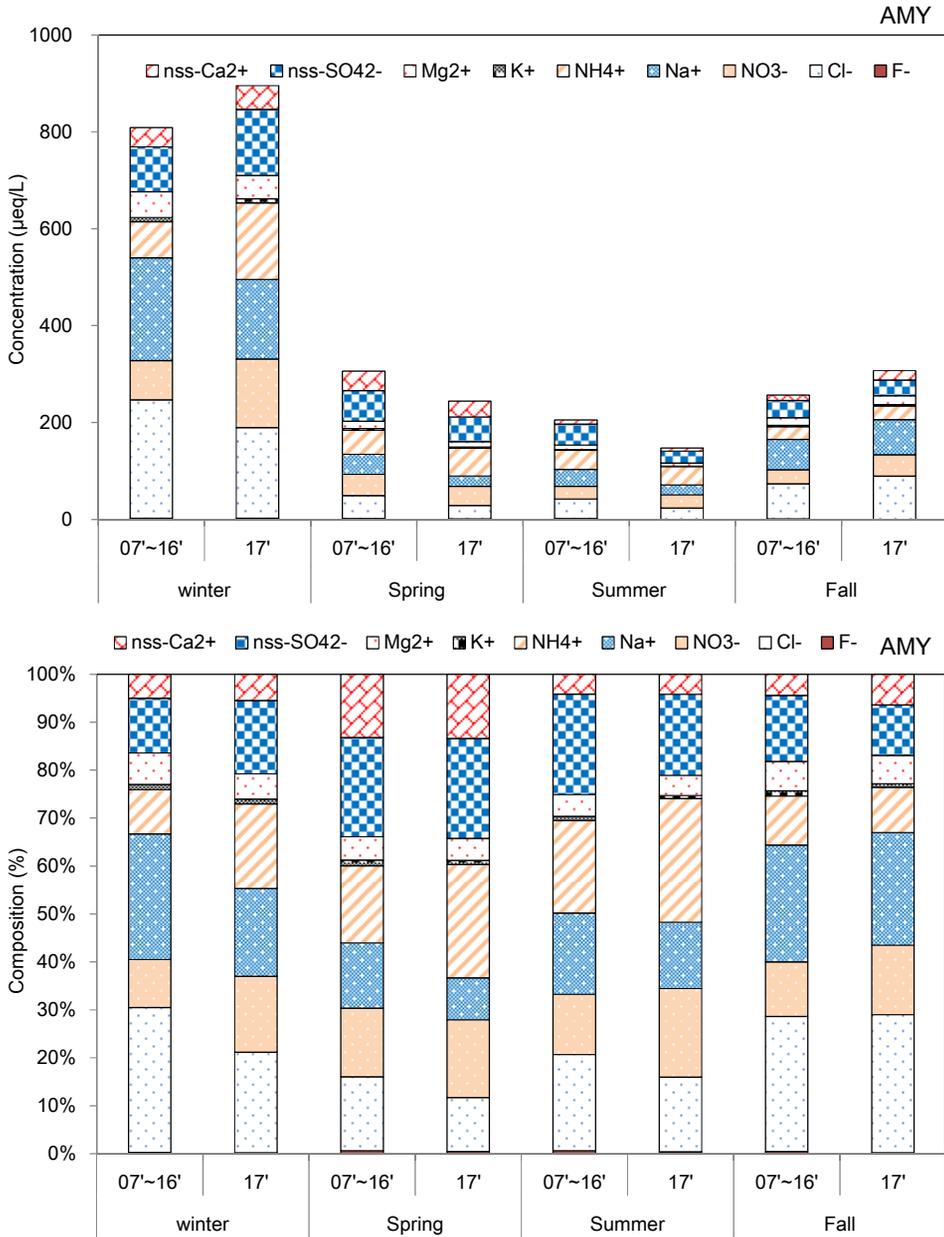


그림 3.7.8 2007 ~ 2017년 안면도 지역의 강수성분 (위) 계절별 부피가중평균 농도, (아래) 계절별 부피가중평균 조성비.

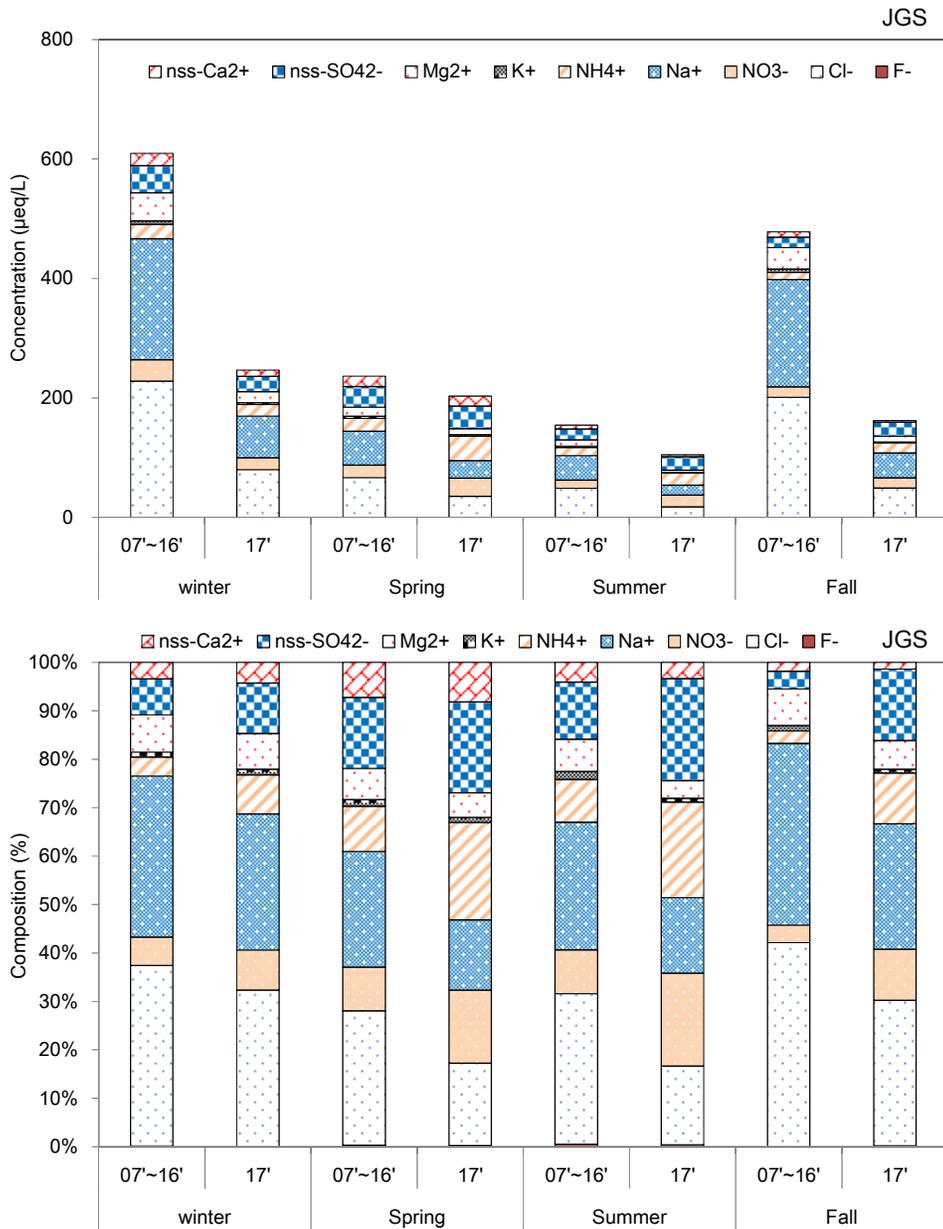


그림 3.7.9 2007 ~ 2017년 고산 지역의 강수성분 (위) 계절별 부피가중평균 농도, (아래) 계절별 부피가중평균 조성비.

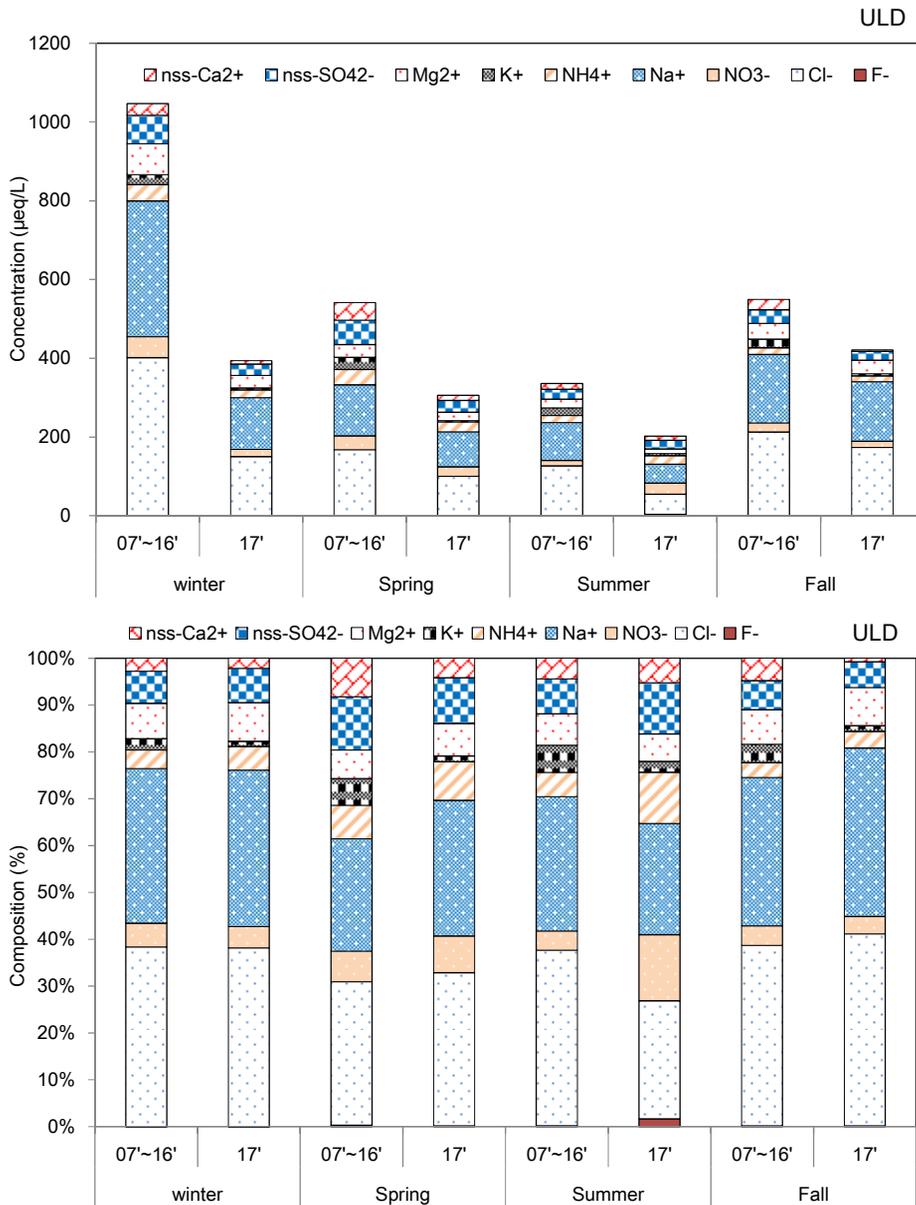


그림 3.7.10 2007 ~ 2017년 울릉도 지역의 강수성분 (위) 계절별 부피가중평균 농도, (아래) 계절별 부피가중평균 조성비.

### 3.7.5 강하분진

안면도에서 채취한 2007 ~ 2017년 건성 및 습성 침적량을 보면(그림 3.7.11), 2013년 이후 대체로 감소하는 경향을 보였으며, 2017년도의 전체 침적량은 8,828 mg/m<sup>2</sup>이다. 또한 2007년부터 2017년까지 건성 침적량이 차지하는 비율은 약 19.3% ~ 45.5%를 차지하였으며, 2007년이 건성 침적량이 가장 적은 비율을 보였고, 2014년이 가장 높은 비율을 차지하였다.

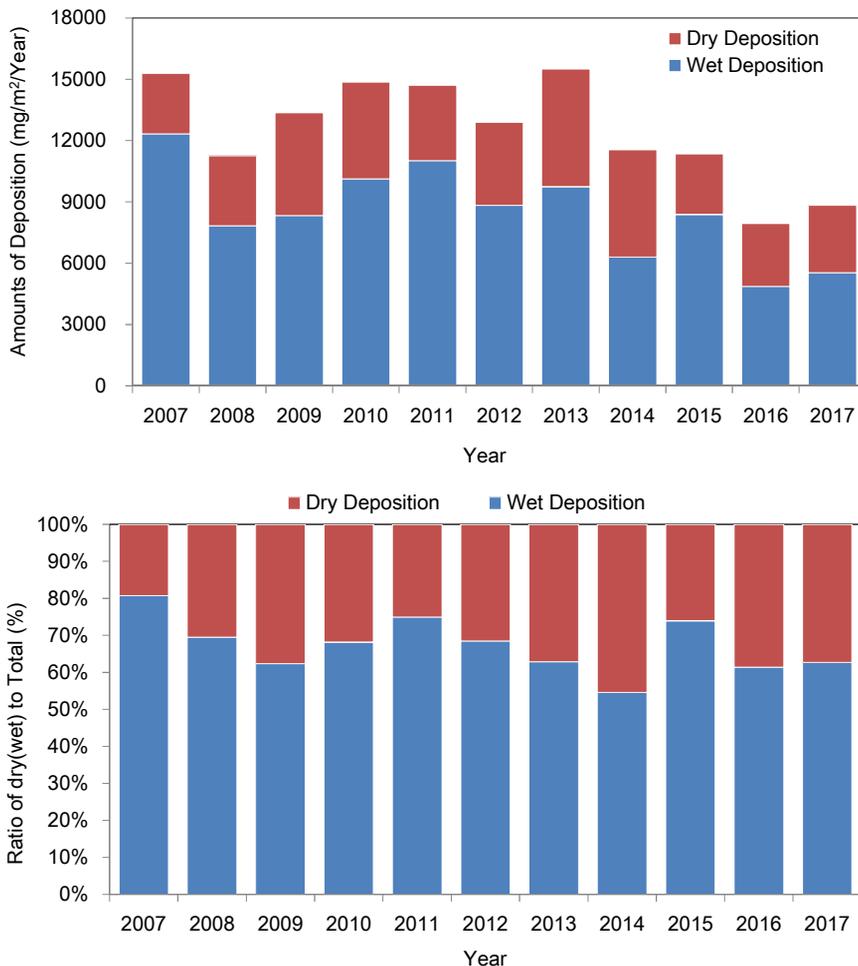
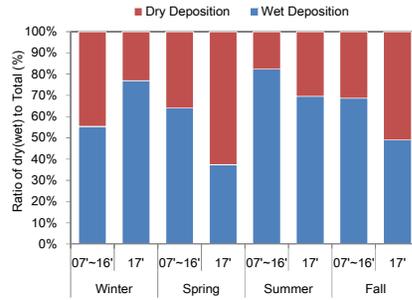
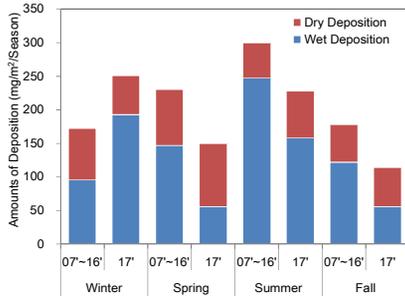


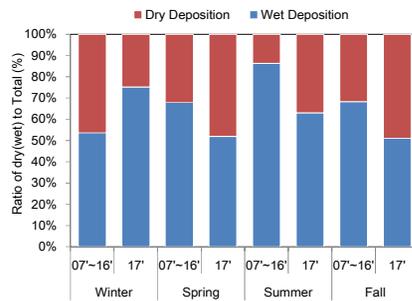
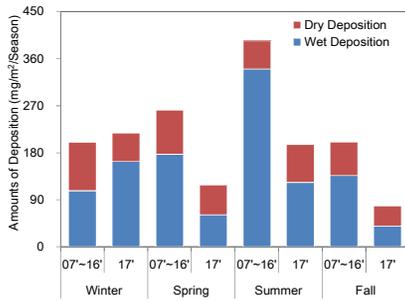
그림 3.7.11 연도별 건성 및 습성 침적량의 (위) 농도, (아래) 비율.

안면도에서 채취한 2007 ~ 2017년 건성 및 습성의 계절별 침적량은 그림 3.7.12와 같다. 여기서 건성 및 습성의 계절별 평균농도는 2007년부터 2016년까지 평균한 값이며, 단 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해연도 1, 2월의 데이터를 평균하였고, 당해연도 12월의 자료는 사용하지 않았다.  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  성분별 농도는 대체적으로 건성 침적량보다 습성 침적량이 더 높은 농도를 보였다. 그러나  $\text{Ca}^{2+}$ 인 경우 10년간의 평년결과에서는 겨울과 봄철에 습성보다는 건성 침적량이 높은 결과를 보였고 나머지 계절에는 비슷하거나 습성 침적량이 높게 나타났다. 2017년도에는  $\text{NO}_3^-$ 성분인 경우 봄철과 가을철에 건성 침적량이 습성 침적량보다 높은 조성비를 보였고,  $\text{SO}_4^{2-}$ 인 경우, 봄철과 가을철에 건성 침적량이 습성 침적량과 비슷한 조성비를 나타냈다.

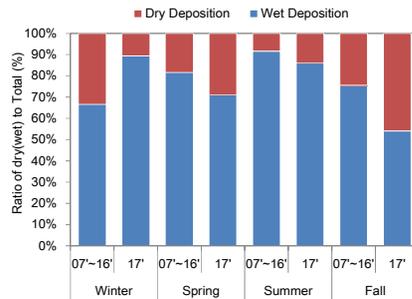
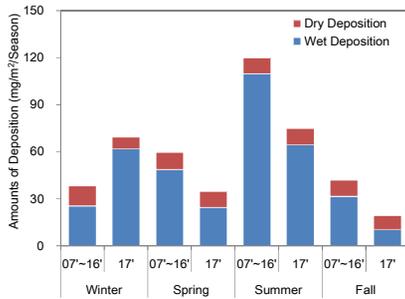
(a)  $\text{NO}_3^-$



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



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



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

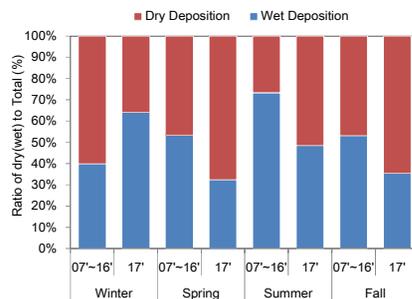
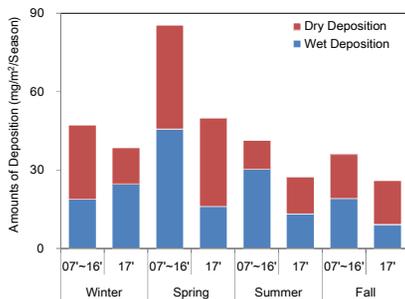


그림 3.7.12 계절별, 이온성분별 건성·습성 (좌) 침적량과 (우) 침적량비율.

## 3.8 기타

### 3.8.1 수증기 농도 연직분포(숙명여자대학교, 위탁관측소)

온실가스이자 대기 중 화학반응의 주요 참여분자인 수증기의 성층권에서 중간권에 이르는 중층대기 내 연직분포는 마이크로파 수신기를 이용한 전파 스펙트럼 분석을 통해 관측할 수 있다. 숙명여대 지구환경연구소의 22 GHz 마이크로파 수신기는 수증기에서 자발적으로 방출되는 22.235 GHz의 전파를 지상에서 수신하고 있다. 숙명여대 과학관 옥상에 설치되어 있는 마이크로파 수신기는 비가 올 경우를 제외하고 24시간 전파를 수신하고 있으며, 강우감지센서와 자동 개폐장치를 통해 강우시 장비를 보호하는 시스템을 갖추고 있다.



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

22.235 GHz에서의 수증기의 전파 신호의 세기는 약하기 때문에 수 시간에 걸친 적분 시간을 갖는 스펙트럼을 이용하여 고도별 분포도를 계산하고 있다. 모든 마이크로파 대역의 대기 전파는 대류권의 습도(물, 수증기)로 인해 그 세기가 감소되며, 감소 크기를 알아내기 위해 보정법을 이용하여 대류권 광학깊이를 계산한다.

그림 3.8.2는 2017년 10월 2일 하룻동안 측정된 22 GHz 수증기 전파 스펙트럼을 보여주고 있다. 대류권으로 인한 스펙트럼 신호 감쇄를 보정한 후의 전파 스펙트럼이며, 일반적으로 0.3 K 이하의 신호 세기를 보인다.

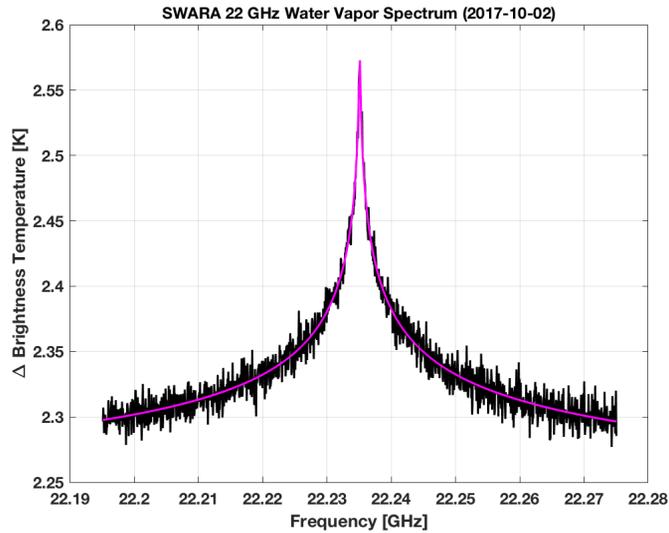


그림 3.8.2 2017년 10월 2일 수증기전파수신기를 통해 관측한 22.235 GHz 수증기 전파 스펙트럼.

그림 3.8.3은 스펙트럼을 Optimal estimation method를 이용하여 분석한 중층대기 수증기의 고도별 분포도이다. 부피혼합비로 나타난 수증기의 고도별 분포는 중간권 하층에 해당하는 50 km에서 60 km 사이의 구간에서 7 ~ 8 ppmv 정도의 최대 농도를 보이고 있다.

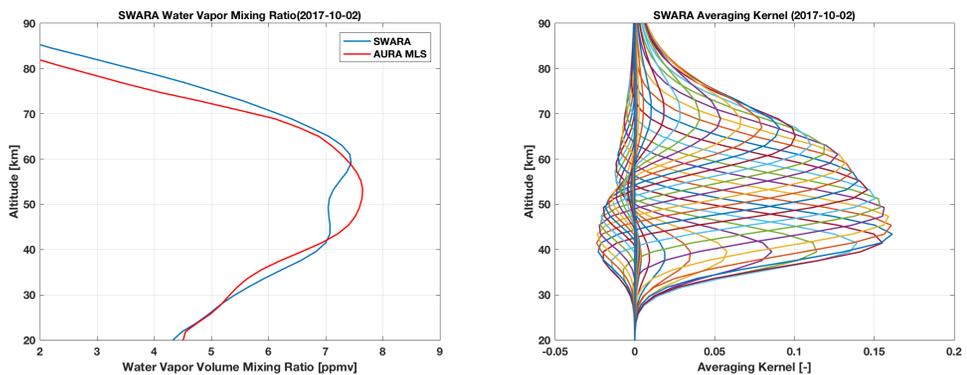


그림 3.8.3 2017년 10월 2일 SWARA를 통해 관측한 중층대기 수증기 연직 분포(파랑)와 AURA 위성 MLS 관측값(빨강, 왼쪽), 평균 커널(오른쪽).

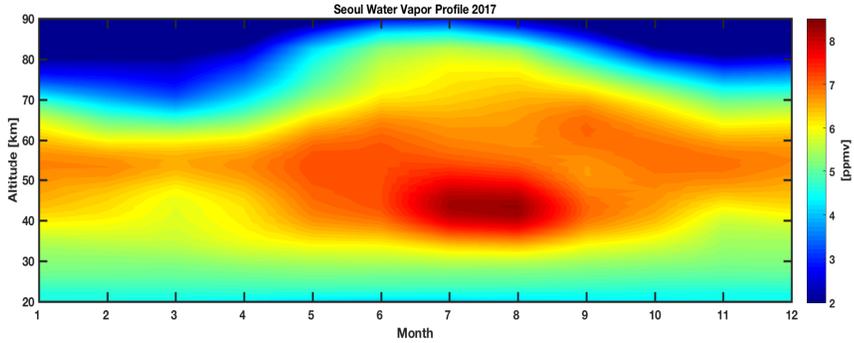


그림 3.8.4 2017년 SWARA를 이용하여 관측한 수증기의 고도별 부피혼합비 변화.

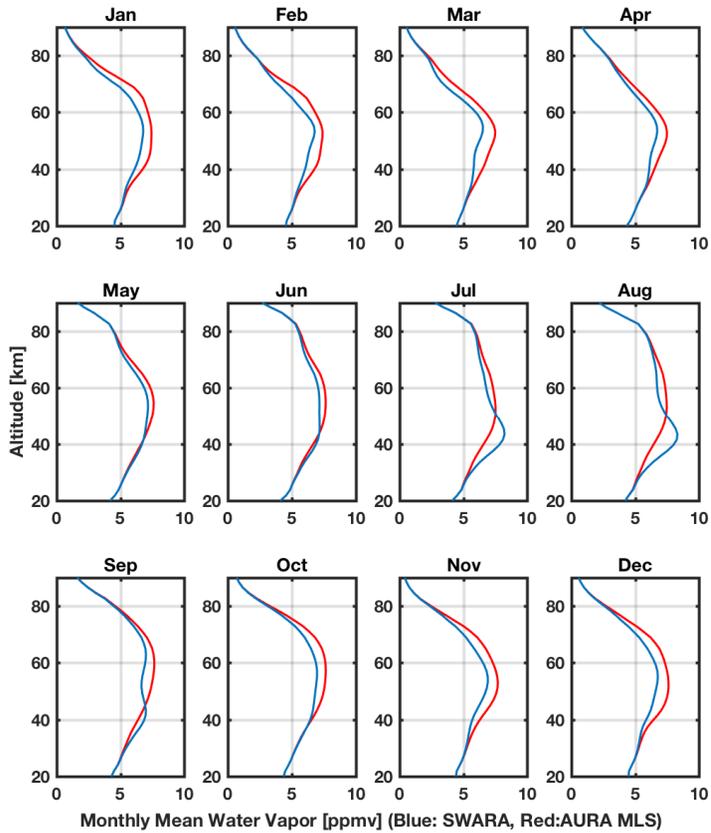


그림 3.8.5 2017년 월평균 수증기 부피혼합비 비교 (파랑: SWARA, 빨강: AURA 위성 MLS 관측 자료).

2017년 SWARA를 이용하여 관측한 수증기의 월평균 분포도는 6.5 ~ 8 ppmv 범위에서 최대농도가 변화하고 있으며, 여름철에 넓은 고도 범위에 걸쳐 많은 양의 수증기가 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 월별 수증기 고도 분포를 AURA위성의 MLS관측 자료와 비교를 하면, 두 자료는 20% 이내에서 일치하고 있으며, 월별 비교 값을 그림 3.8.5에 나타내었다. 시계열 변동 그래프에서 여름철 7, 8월에 40 km 고도에서 농도가 과잉으로 산출되는 경향을 보였으며, 이것은 대류권의 높은 수증기 농도로 인해 광학깊이의 보정이 충분하지 못함을 보여주고 있다. 여름 기간을 제외하고 다른 기간에 걸쳐 전체적인 분포 양상은 위성과 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

앞서 마이크로파의 대류권 감소율을 광학깊이(Opacity)로 표현하였다. 마이크로파 대역에서의 대류권 감소율 변동의 상당부분은 대류권에 분포하는 습도(물, 수증기)의 영향이 크며, SWARA관측을 시작한 2006년 10월부터 2017년 12월까지의 광학깊이 변동 측정값을 그림 3.8.6에 나타내었다. 광학깊이는 여름철에 최댓값을 보이고 있으며, 2015년부터 2017년까지 연중 최댓값이 증가추세를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

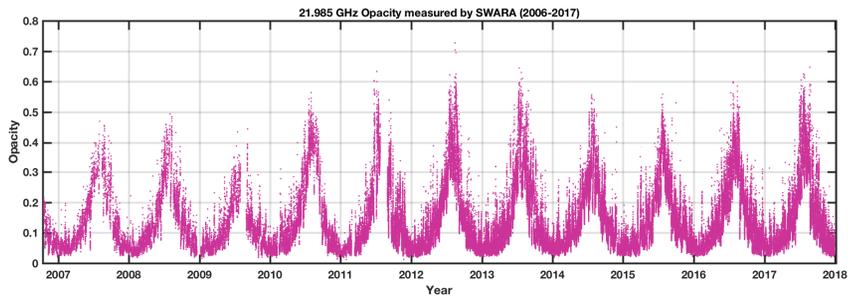


그림 3.8.6 2006년 10월부터 2017년 12월까지 22 GHz에서의 광학깊이 변화 측정값.

### 3.8.2 라돈 농도(제주대학교, 위탁관측소)

대기 중의 방사능 물질은  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$  등 주요 관심 대상이며, 이들 성분들은 WMO/GAW의 관측요소에 포함되어 관리되고 있다 (WMO/GAW, 2001). 특히 이 중 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )은 인체 피폭 방사선량의 50% 이상을 차지하는 대표적인 자연방사능물질이다. 라돈은 흡연 다음으로 위험한 폐암 유발 물질로 평가되고 있고, WHO에서는 폐암환자 중 3 ~ 14%가 라돈에 기인한 것으로 추정하고 있다. 따라서 대기 중의 자연방사능 물질 관리를 위해서는 실내는 물론 실외 라돈농도를 측정할 필요가 있다. 대기 중의 라돈농도 수준을 파악하기 위해서는 청정지역에서 라돈의 배경농도를 관측하는 것이 바람직하다. 특히 아시아대륙의 편서풍 풍하 측에 위치한 한반도의 경우 대륙에서 발생하여 기류를 타고 장거리 이동하는 여러 대기오염물질과 함께 대기 라돈농도 변화 역시 지속적으로 감시할 필요가 있다. 또  $^{222}\text{Rn}$ 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 오래전부터 주요 WMO/GAW 관측소를 중심으로 세계 30여 지점에 라돈검출기를 설치하여 라돈 농도를 지속적으로 모니터링해오고 있다. 제주도 고산관측소에서는 ANSTO에서 제작한 라돈검출기를 이용하여 2001년초부터 대기 라돈농도를 관측해오고 있고, 2017년말 현재 17년간의 관측 자료를 확보하고 있다.

#### 가. 라돈 모니터링

대기 라돈농도는 제주도 고산관측소( $33.17^\circ\text{N}$ ,  $126.10^\circ\text{E}$ ) 현장에 고감도 라돈검출기를 설치하여 2017년 1월부터 12월까지 30분 간격으로 실시간 측정하였다. 라돈 측정을 위한 공기 유입관은 50 mm HDPE 파이프를 사용하여 지상 10 m 높이로 설치하였고, 공기의 유속은 대략 60 L/min이 되도록 조절하였다. 라돈 검출기는 배경농도 측정을 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 측정하는 방식이다. 알파입자는  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ 와 반응하여 섬광을 발생하며 이를 광전증배관으로 검출, 계수하였다. 라

돈 모니터링을 위해 사용한 라돈검출기의 감도(sensitivity)는  $0.28 \sim 0.29 \text{ counts} \cdot \text{sec}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$ 이며, 검출한계(low limit of detection)는  $25 \text{ mBq}/\text{m}^3$ 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.

측정 데이터의 검정은 월 1회 주기로 매회 5시간 동안 실시하였으며, 검정용  $^{222}\text{Rn}$  standard source는  $18.5 \pm 4\%$  kBq의  $^{226}\text{Ra}$  source (Pylon Electronic Inc., 모델 RN-2000A, Canada)를 사용하였다. 또한 검출기의 배경(background) 값은 대략 3개월 주기로 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기의 지시수치를 24시간 동안 측정하였다. 이 때 배경값은 검출기의 2차 필터에 포집된  $^{210}\text{Pb}$  (반감기 22.3년)의 양에 따라 시간이 경과할수록 서서히 상승하는 경향을 보였다.



그림 3.8.7 제주도 (구)고산기상대 비양실의 라돈검출기(ANSTO, Model D1500).

## 나. 라돈 배경농도 모니터링 결과

국내 배경지역인 제주도 (구)고산기상대 비양실에 고감도 라돈검출기를 설치하여 라돈 농도를 실시간으로 모니터링하였다. 그림 3.8.8.는 2017년의 라돈농도 시계열변화를 나타낸 것으로 라돈의 시간별 농도변화를 도시한 결과이다. 2017년 고산관측소의 라돈농도는 시간평균  $2404 \pm 1203$  mBq/m<sup>3</sup>를 나타내었고, 이를 일평균농도로 환산한 농도는  $2409 \pm 906$  mBq/m<sup>3</sup>이었다. 이 결과를 이전의 고산관측소 측정결과와 비교해 보면, 2001~2016년의 평균농도가  $2669 \pm 1112$  mBq/m<sup>3</sup>에 비해 다소 낮은 농도를 나타낸 것으로 조사되었다.

라돈의 계절별 농도는 가을 > 겨울 > 봄 > 여름 순으로 높았다. 월별 농도는 1월 > 10월 > 11월 > 9월 > 12월 > 3월 > 8월 > 2월 > 4월 > 6월 > 5월 > 7월 순으로 농도가 가장 높은 1월과 낮은 7월에 약 2배 정도의 편차를 보이는 것으로 조사되었다. 또한 일간 농도변화를 조사해 본 결과, 대체적으로 하루 중에는 야간이 낮 시간에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그리고 오전 7시 전후에 2757 mBq/m<sup>3</sup>로 가장 높고, 오후 4시 경에 1951 mBq/m<sup>3</sup>로 낮은 농도를 보였다. 이를 계절별로 비교해 본 결과, 봄, 여름, 가을철에는 오전 5 ~ 9시 경에 높은 농도를 보이거나 겨울철은 자정 전후에 높은 농도를 보여 겨울철에 다소 다른 시계열 변동 특성을 나타내었다.

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

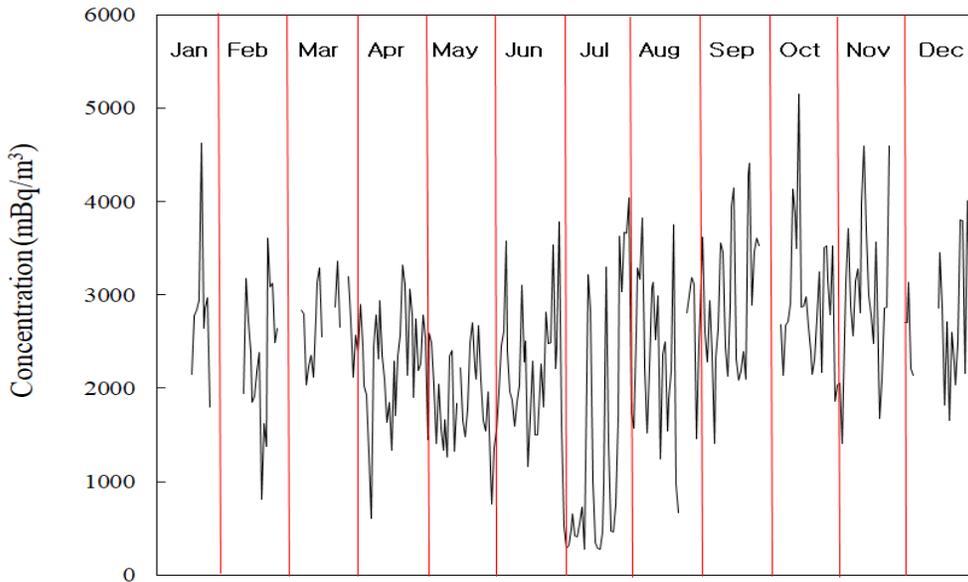


그림 3.8.8 2017년 고산관측소의 라돈농도 시계열 변화.

고산관측소의 2017년 라돈농도를 그림 3.8.9에 계절별로 구분하여 비교하였다. 그림에서 막대그래프는 시간별 라돈농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선 그래프는 중앙값(median)과 90 분위수(90th percentile), 10 분위수(10th percentile) 농도를 나타낸 것이다. 그림 3.3의 결과를 보면 계절별 평균농도는 봄에 2191 mBq/m<sup>3</sup>, 여름 2030 mBq/m<sup>3</sup>, 가을 2920 mBq/m<sup>3</sup>, 겨울 2677 mBq/m<sup>3</sup>로 4계절 중에서는 가을철에 가장 높고, 다음으로 겨울, 봄, 여름 순으로 높은 경향을 보였다. 또한 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수를 각 계절별로 분류하여 비교해 본 결과, 90 분위수와 10 분위수에서 모두 겨울철 높은 농도 값으로 평균농도와 동일한 경향을 보였다. 이처럼 계절별 비교에서 겨울, 가을, 봄에 라돈농도가 높은 것은 이 시기에 북서계열 풍향이 주류를 이루고 있고 이 때 대륙으로부터 대기가 유입되었기 때문으로 추정된다. 반면에 여름에 훨씬 낮은 농도를 나타내는 것은 이 시기에 주로 남동 계절풍의 영향을 받아 해양으로부터 공기가 유입되었기 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. 따

라서 대기 라돈농도는 계절별로 혼합고의 높이에 따라 영향을 받고 있는 것으로 보이며, 혼합고 높이에 반비례하여 겨울과 가을에는 높은 농도를 유지하고, 봄과 여름에는 상대적으로 더 낮은 농도를 유지하는 것으로 추정된다(Kim et al., 2007).

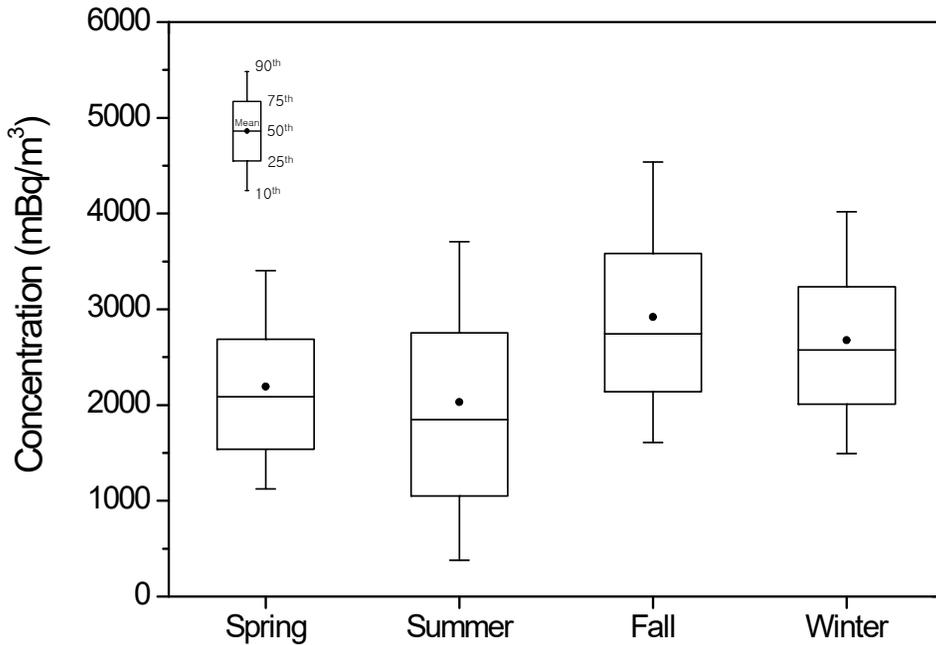


그림 3.8.9 고산관측소의 계절별 라돈농도 비교.

2017년의 라돈농도를 월별로 비교하였고 그 결과를 그림 3.4에 나타내었다. 그림에서 막대그래프로 나타낸 농도는 시간별 농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 각각 중앙값, 90 분위수, 10 분위수 농도를 나타낸 것이다. 이러한 월별 비교에서 라돈농도는 1월 > 10월 > 11월 > 9월 > 12월 > 3월 > 8월 > 2월 > 4월 > 6월 > 5월 > 7월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 1월에 2975 mBq/m<sup>3</sup>, 가장 낮은 7월에 1436 mBq/m<sup>3</sup>로 월별로는 거의 2배 정도의 편차를 보이는 것으로 확인되었다. 또 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수 농도를 월별로 비교해 본 결과, 중앙값과 90 분위수, 10 분위수 농도는 2월, 8월, 10월에 다소 다른 결과를 보였고, 그 외에는 월평균 농도와 비슷한 변화추세를 보였다.

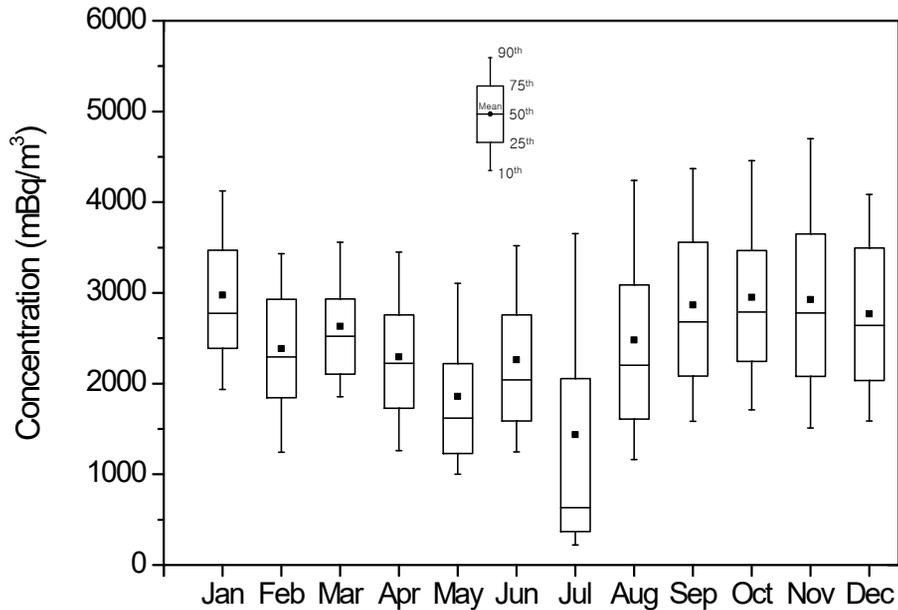


그림 3.8.10 고산관측소의 월별 라돈농도 비교.

라돈농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 비교하였고 그 결과를 그림 3.8.11에 나타내었다. 일간 변화를 비교한 결과에서 라돈농도는 오전 7시에 2757 mBq/m<sup>3</sup>로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 4시경에 19517 mBq/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 대체적으로 야간에 더 높고 주간에는 낮은 경향을 보였으며, 일간 변화는 아침부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하고 다시 저녁시간에 상승하여 밤에는 점차로 상승하는 추세를 보였다(Omori et. al., 2009). 이러한 경향은 대기의 혼합고의 변화에 따라 영향을 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 가까이 안정된 복사역전층이 형성되는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1985). 따라서 주간에는 혼합고가 최대로 확장되어 라돈이 확산되므로 낮은 농도를 보이지만, 야간에는 혼합고가 낮아지고 밀집된 라돈이 더 높은 농도를 나타내는 것으로 추정된다. 이처럼 라돈의 일간 농도는 월별, 계절별 농도와 마찬가지로 혼합고의 확장, 축소에 따라 라돈의 확산과 농집에 영향을 미치고 이로 인해 농도가 변화하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

계절별로는 겨울철에 라돈의 최대, 최소 농도가 큰 차이를 보이지 않지만 여름에는 겨울에 비해 훨씬 더 큰 차이를 보이고 있다(그림 3.8.12). 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).

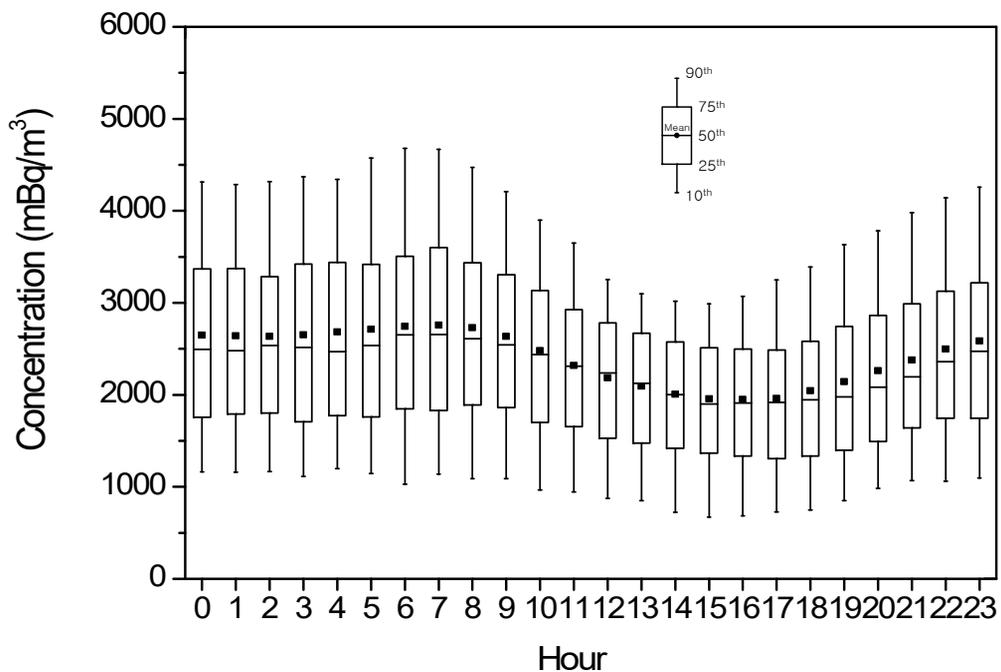


그림 3.8.11 고산관측소의 시간별 라돈농도 비교.

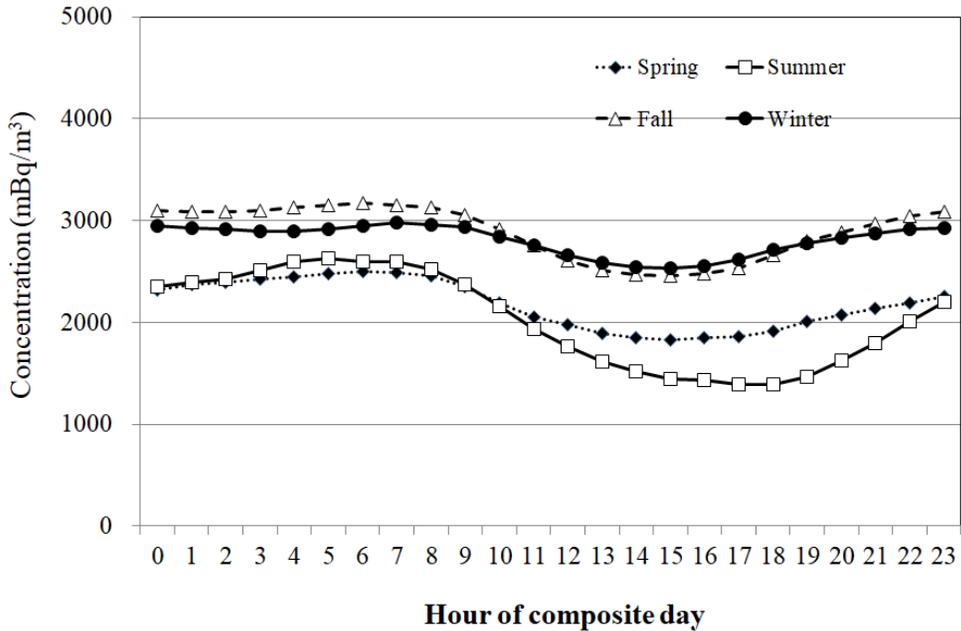


그림 3.8.12 고산관측소의 계절별 시간 라돈농도 비교.

#### 다. 라돈 장거리 이동 수송경로

2017년에 측정된 라돈의 일평균 농도를 기준으로 이 시기의 기류 이동패적을 역궤적 군집분석법으로 조사하였다. 그리고 그림 3.8.13과 같이 기류의 유입 경로를 제주도를 중심으로 중국북부(Cluster 1), 한반도 (Cluster 2), 중국중부 및 황해(Cluster 3), 북태평양(Cluster 4), 일본 및 동해(Cluster 5)의 5개 구간으로 나누고, 역궤적 군집분석 결과를 기초로 제주도로 유입된 기단의 이동 경로를 조사하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA)의 HYSPLIT4 모델을 이용하였다. 또한 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의 북반구 GDAS를 이용하였다. 또 중국대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 5일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사시간은 72시간으로 설정하였고, 측정지점 좌표는 고산(33.17° N, 126.10° E)을 기점으로 선정하였다. 또 출발점 고도는 72 m, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC (KST 09:00)를 기준으로 설정하였다.

역궤적 군집분석을 기초하여 5개 군집별 일평균 라돈농도를 분석한 결과, 기류의 이동은 Cluster 1 ~ Cluster 5에서 각각 17, 38, 19, 15, 11%의 빈도를

나타내어 대부분 북서풍을 타고 중국대륙으로부터 제주로 이동한 것으로 확인되었다. 그리고 이 때 각 기류 이동경로별 라돈농도를 비교한 결과, Cluster 1 ~ Cluster 5에서 각각 2701, 2372, 2693, 1595, 2660 mBq/m<sup>3</sup>를 나타내었다. 이처럼 라돈 농도는 기류가 중국대륙에서 제주도로 이동했을 때 대체적으로 더 높은 경향을 보였다. 반면에 기류가 북태평양에서 제주지역으로 유입되었을 때에는 중국에서 유입되었을 때에 비해 1.7배 정도 더 낮은 농도를 나타내었다. 이와 같이 라돈 농도는 대체적으로 대륙에서 기류가 유입(continental fetch)되었을 때 높고, 북태평양에서 이동했을 때에 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

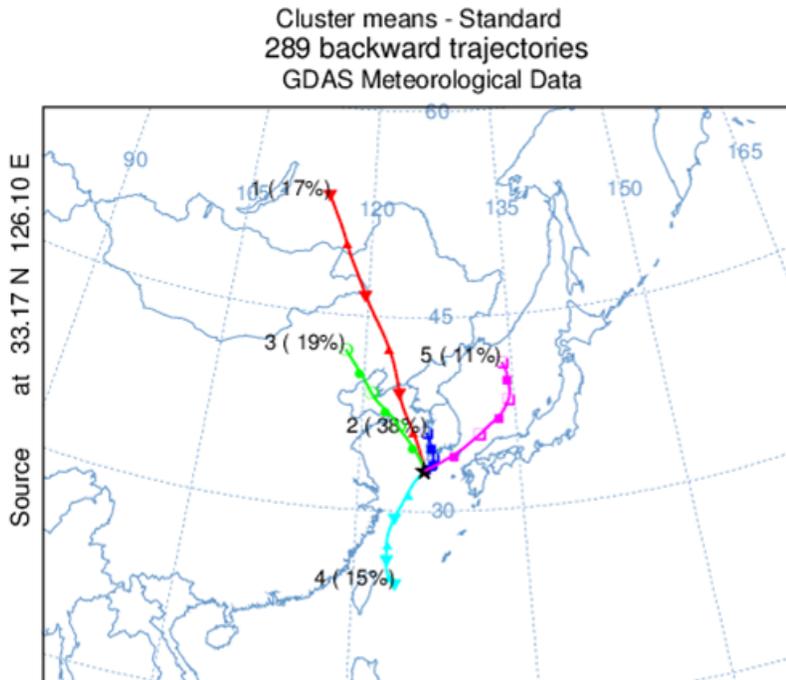


그림 3.8.13 유입경로별 라돈농도.

# 제4장 지구대기감시 자료 통계 방법

## 4.1 온실가스

### 4.1.1 관측장비

#### ○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	측정주기	관측연도
CO <sub>2</sub>	비분산적외선분석기 (NDIR)	Simense	30초	1999년 ~ 2011년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	가스크로마토그래프- 불꽃이온화검출기 (GC-FID)	Agilent	30분	1999년 ~ 2015년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2016년 ~ 현재
N <sub>2</sub> O	가스크로마토그래프- 전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	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	측정주기	관측시작연도
CO <sub>2</sub>	비분산적외선분석기 (NDIR)	Simense	30초	2009년 ~ 2013년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2014년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2015년 ~ 현재
N <sub>2</sub> O	가스크로마토그래프 -전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	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	측정주기	관측시작연도
CO <sub>2</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재
N <sub>2</sub> O SF <sub>6</sub>	가스크로마토그래프 -전자포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	2012년 ~ 현재 2015년 ~ 현재

○ 독도

관측요소	장 비 명	제 작 사	측정주기	관측시작연도
CO <sub>2</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재
CH <sub>4</sub>	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재

#### 4.1.2 자료선별법 및 배경대기 산출법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
이산화탄소 (CO <sub>2</sub> )	5초	<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 차이면, 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 * 자료의 약 30 ~ 32 % 기각됨</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt;</p> <p>⑤ ④의 시간평균 자료가 n개 이상일 때 1차 일평균 산정 * 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> )	5초	<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 구한뒤</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 선정된 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)	1시간	<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 선정된 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 * 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/yr 반영 (Thoning et al., 1989)</p>
염화불화탄소류(CFCs)	1시간	<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) <math>\pm 4</math> ppt, CFC-12: (A) <math>\pm 5</math> ppt CFC-113 (A) <math>\pm 1.5</math> ppt * 전체자료의 연속값의 차이값 분포를 통해 상위 90%, 하위 10% 값을 기준함</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt; ※ <i>O'Doherty et al., 2001</i></p> <p>⑤ 선별된 날을 기준으로 <math>\pm 60</math>일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting 함</p> <p>⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출</p> <p>⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(<math>\sigma</math>) 산출</p> <p>⑧ 중간값 + <math>3\sigma</math>의 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> )	1시간	<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 기준함</p> <p>&lt;일평균, 월평균&gt; ※ <i>O'Doherty et al., 2001</i></p> <p>⑤ 선별된 날을 기준으로 <math>\pm 60</math>일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting 함</p> <p>⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출</p> <p>⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(<math>\sigma</math>) 산출</p> <p>⑧ 중간값 + <math>3\sigma</math>의 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	측정주기	관측기간
O <sub>3</sub>	오존분석기	ECOTECH	ML9812	10분	1998년 ~ 2005년
		THERMO	49i	10분	2005년 ~ 2007년
				5분	2007년 ~ 현 재
CO	일산화탄소분석기	ECOTECH	ML9830	10분	1998년 ~ 2005년
		THERMO	48i	10분	2005년 ~ 2007년
				5분	2007년 ~ 현 재
NO <sub>x</sub>	질소산화물분석기	ECOTECH	ML9841A	10분	1998년 ~ 2005년
		THERMO	42i	10분	2005년 ~ 2007년
				5분	2007년 ~ 현 재
SO <sub>2</sub>	이산화황분석기	ECOTECH	ML9850	10분	1998년 ~ 2005년
		THERMO	43i	10분	2005년 ~ 2007년
				5분	2007년 ~ 현 재

#### ○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	측정주기	관측기간
O <sub>3</sub>	오존분석기	THERMO	49i	5분	2012년 ~ 현재
CO	일산화탄소분석기	THERMO	48i	5분	2012년 ~ 현재
NO <sub>x</sub>	질소산화물분석기	THERMO	42i	5분	2012년 ~ 현재
SO <sub>2</sub>	이산화황분석기	THERMO	43i	5분	2012년 ~ 현재

#### ○ 울릉도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모 델	측정주기	관측기간
CO	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	G2401	5초	2015년 ~ 현재

## 4.2.2 반응가스 자료통계방법

관측요소	측정주기	자료통계 방법
<p>오존(O<sub>3</sub>) 일산화탄소(CO) 질소산화물(NOx) 이산화황(SO<sub>2</sub>)</p>	<p>5분</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 매 2시간마다 분석하는 zero값으로 2시간의 표류오차값을 보정함. 예) 04시 zero = 5 ppb, 06시 zero = 10 ppb라면 2시간동안 5ppb가 선형적으로 증가/감소하였다고 가정하여 관측값에서 빼 줌.</p> <p>○ NOx자료 중 NO는 전일 밤 10시 ~ 당일 새벽 2시의 NO 평균값을 zero값으로 산출하여 연속된 날의 zero값과 zero값 사이를 선형으로 증가/감소하였다고 가정하여 관측값에서 빼 줌.</p> <p>&lt; 일통계 &gt; ○ 자료기간 : 시간평균자료가 하루 75% 이상일 때 산출(시간자료 18개 이상) ○ 자료종류 : 일평균값 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음</p> <p>&lt; 월통계 &gt; ○ 자료기간 : 일자료가 50% 이상일 때 산출 ○ 자료종류 : 월평균값 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음</p> <p>&lt; 연통계 &gt; ○ 자료기간 : 해당 연의 1월부터 12월까지의 1년만에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 연평균값 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음</p>

## 4.3 에어로졸

### 4.3.1 관측장비

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

### 4.3.2 에어로졸 물리·광학 자료통계방법

○ 에어로졸 물리·광학 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
PM10 질량농도 (β-ray 흡수법)	1시간	<p>&lt;자료품질관리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거</li> <li>기기상태 검사: 6자리 상태 코드가 '000000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심'</li> <li>계측한계: 1 ~ 5,000 μg/m<sup>3</sup>를 벗어나면 '오류'</li> <li>시간연속성 검사 현재(t)와 직전(t-1) 또는 직후(t+1)에 관측된 PM10 질량농도의 변동량이 '50+0.15×PM10'를 초과할 경우 '의심'</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> $d = [PM10(t) - PM10(t-1)] - [PM10(t+1) - PM10(t)] \quad (2)$ $d \geq Md - z \times MAD \text{ or } d \leq Md + z \times MAD \quad (3)$ $MAD = \text{median}( d - Md ) \quad (4)$ <ul style="list-style-type: none"> <li>현재 PM10 질량농도가 지난 1시간 평균의 20%를 초과하면 '의심'</li> <li>지속성 검사: 과거 60분 동안 농도의 변동량이 0일 경우 '의심'</li> <li>정합성 검사: 인근 동일 요소 산출물 비교하여 차이가 50% 초과할 경우 '의심'</li> <li>'의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자가 장비유지보수 일지를 참조하여 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리함.</li> </ul> <p>&lt;통계방법&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>자료품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 75% 이상일 때 시간평균값 산출, 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>기기상태 검사</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>상태 코드가 '0000 0000 0000 0000'인 경우만 '정상', 나머지는 '의심'</li> <li>event 4&gt;0 : '의심'</li> <li>dead time = 0 : '의심'</li> <li>내부 diode 온도 ≤ 18 °C : '의심'</li> </ol> <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'</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 지속성 검사: 직전(t-1)과 현재(t) 총 수농도의 변동량이 0일 경우 '의심'</li> <li>○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자가 장비유지보수 일지를 참조하여 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리함.</li> </ul> <p>&lt;통계방법&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자료품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출</li> </ul>
미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5 μm)	1시간	<p>&lt;자료품질관리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기기상태 검사: 상태 코드가 '0000'인 경우만 '정상', 나머지는 '오류'</li> <li>○ 계측한계: 총수농도가 10<sup>7</sup> 개/cm<sup>3</sup>(계측한계) 이상일 때 '오류'</li> <li>○ 지속성 검사: 직전(t-1)과 현재(t) 총 수농도의 변동량이 0일 경우 '의심'</li> <li>○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자가 장비유지보수 일지를 참조하여 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리함.</li> </ul> <p>&lt;통계방법&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자료품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출</li> </ul>
응결핵 수농도 (0.01~3 μm)	1시간	<p>&lt;자료품질관리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기기상태 검사: 'Instrumental error'가 'None'일 경우만 '정상'</li> <li>○ 계측한계: 구간별 수농도가 10,000 개/cm<sup>3</sup> 이상일 때 '오류'(관측 시 희석기(dilutor)를 사용하여 1/20로 희석된 농도를 처리함)</li> <li>○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자가 장비유지보수 일지를 참조하여 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계처리함.</li> </ul> <p>&lt;통계방법&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자료품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출</li> </ul>
광산란계수	1시간	<p>&lt;자료품질관리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기기상태 검사: 4자리 상태 코드가 '0000'인 경우만 '정상', 나머지는 '오류'</li> <li>○ 광산란계수(Total scattering)가 후방산란계수(Back scattering)보다 작을 때 '오류'</li> <li>○ 옹스트롬지수가 -2보다 작을 때 '오류'</li> <li>○ 현재 제로값이 과거 제로값과 차이가 10% 이상 발생할 경우 '의심'</li> <li>○ 계측한계: 최대계측한계 (20,000 Mm<sup>-1</sup>)와 최소관측한계 (Anderson et al, 1996; 0.29(450 nm, total), 0.11(550 nm, total), 0.17(700 nm, total), 0.19(450 nm, back), 0.07(550 nm, back), 0.14(700 nm, back) Mm<sup>-1</sup>)를</li> </ul>

		<p>벗어나면 '오류'</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자가 장비유지보수 일지를 참조하여 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계 처리함.</li> </ul> <p>&lt;통계방법&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자료품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출</li> </ul>
광흡수계수	1시간	<p>&lt;자료품질관리&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 현재 감쇄계수(n)가 과거 감쇄계수(n-1)보다 작을 경우 '오류'</li> <li>○ 계측한계: 검댕의 농도가 0 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> 이하이면 '오류'로 분류, 0.01-10 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>을 벗어나면 '의심'</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ '의심'으로 분류된 자료는 분석 담당자가 장비유지보수 일지를 참조하여 '정상' 또는 '오류'로 최종 확정하며 '정상'으로 분류된 자료만 통계 처리함.</li> </ul> <p>&lt;통계방법&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 자료품질관리를 통과한 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출</li> </ul>

### 4.3.3 에어로졸 화학

관측요소	관측주기	자료통계 방법
PM10 에어로졸 채취 및 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 에어로졸 채취 및 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	측정주기	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	측정주기	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 : $S_a \times 1.5 \times \mu_0^{1.2} + 100 \text{ W/m}^2$
- Reflected Solar Radiation	Min : -4 W/m <sup>2</sup> Max : $S_a \times 1.2 \times \mu_0^{1.2} + 50 \text{ W/m}^2$
- Direct Solar Irradiance	Min : -4 W/m <sup>2</sup> Max : $S_a$
- Diffuse Solar Radiation	Min : -4 W/m <sup>2</sup> Max : $S_a \times 0.95 \times \mu_0^{1.2} + 50 \text{ W/m}^2$
- 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)	$\sigma(T_a - 15K)^4 < LWUP < \sigma(T_a + 25K)^4$ $0.4 \times \sigma T_a^4 < LWDOWN < \sigma T_a^4 + 25$
- 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
* 태양상향복사(SWUP), 태양하향복사(전천일사/Global), 직달일사(SWDIR), 산란일사(SWDIFF), 지구상향복사(LWUP), 지구하향복사(LWDOWN)	
* SUM : SWDIFF + SWDIR × μ <sub>0</sub>	
* SZA : Solar Zenith Angle	
* μ <sub>0</sub> : Cos(SZA)	
* S <sub>a</sub> : 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)	
* σ : 5.67 × 10 <sup>-8</sup>	
* T <sub>a</sub> : air temperatuer in Kelvin (170K < T <sub>a</sub> < 350K)	

## 4.5 성층권오존

### 4.5.1 관측장비

#### ○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정주기	관측기간
오존전량	오존분광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	Kipp & Zonen	MKⅢ	하루	2013년 ~ 현재

#### ○ 고 산

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정주기	관측기간
오존전량	오존분광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	Kipp & Zonen	MKⅢ	하루	2011년 ~ 현재

#### ○ 포 항

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정주기	관측기간
오존전량	오존분광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	SCI-TEC	MKⅡ	하루	1994년 ~ 2017년
오존연직 분포	오존존데	Vaisala	ECC	주 1회	1995년 ~ 현재

# 지대보고서에서는 2013년 자료까지 사용함.

#### ○ 서 울(위탁관측소)

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정주기	관측기간
오존전량	오존분광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	SCI-TEC	MK-IV	하루	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	측정주기	자료통계 방법
오존전량	하루	<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	1회/1주	<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	측정주기	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)
※ 관측기간은 2017년 품질관리 기준으로 작성됨.					
자외선B	UV-Biometer	Solarlight	#501	10분	2001년 ~ 현재 (강릉)
					2015년 ~ 현재 (서울)
					2012년 ~ 현재 (울릉도)
					1999년 ~ 현재 (안면도)
					1999년 ~ 현재 (포항)
					2000년 ~ 현재 (목포)
					2011년 ~ 현재 (고산)
1999년 ~ 2012년 (고산기상대)					
※ 관측기간은 2017년 품질관리 기준으로 작성됨.					
총자외선	Brewer 분광광도계	SCI-TEC	MK-IV	상시	2004년 ~ 현재 (서울, 위탁관측소)

## 4.6.2 자외선 자료통계방법

관측요소	측정주기	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</li> <li>• The spike detection method (Papale et al., 2006, Hong et al., 2009)                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연속된 3개의 관측 값의 차이를 이용한 튀는 값 처리</li> <li>- 관측값 차이의 절댓값의 중앙값(median)으로부터 벗어난 정도를 이용하여 튀는 값 처리</li> </ul> </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>- 태양천정각(Solar Zenith Angle) &lt; 90°인 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

장비명	관측지점	제작사	모델명	관측시작년도	관측요소
강수자동측정 시스템	안면도	Eigenbrodt	NMO 191/ KSDSC	2012년	건성침적, 습성침적
	고산	KNR	APK9900	2014년	
	울릉도	KNR	APK9900	2014년	
	울진	KNR	Aqua, JP/RM8300	2007년	
산성도측정기	안면도	Thermo	Orion 3-Star	2009년	산성도
	고산	Thermo	Orion 3-Star	2009년	
	울릉도	Thermo	Orion 3-Star	2009년	
	울진	Thermo	Orion 3-Star	2009년	
전기전도도 측정기	안면도	Thermo	Orion 3-Star	2009년	전기전도도
	고산	Thermo	Orion 3-Star	2009년	
	울릉도	Thermo	Orion 3-Star	2009년	
이온크로마토 그래프(IC)	안면도	Dionex	ICS-2000	2005년	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> )
		Dionex	ICS-2000	2005년	

## 4.7.2 총대기침적 자료통계방법

관측요소	측정주기	자료통계 방법										
산성도	강수시	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 당일 09시부터 익일 09시까지 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	강수시	<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> $ConductivityDifference(\%) = \frac{EC_{cal} - EC_{mea}}{EC_{mea}} \times 100$ <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	강수시	<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

- 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.
- O' Dorthy, S., P. G. Simmonds., D. M. Cunnold, H. J. Wang, G. A. Sturrock, P. J. Fraser, D. Ryall, R. G. Derwent, R. F. Weiss, P. Salameh, B. R. Miller, and R. G. Prinn, 2001, In situ chloroform measurments at Advanced Global Atmsopheric Gases Experiment atmospheric research stations from 1994 to 1998. *J. Geophys. Res.*, 106, 20429–20444.
- Schwartz, Stepehen E., and Warneck Peter, 1995: Units for use in atmospheric chemistry, *Pure & Appl.Chem.*, Vol.67 pp. 1377–1406, 1995
- Thoning K. W. and P. P. Tans, 1989, Atmospheric Carbon Dioxide at Mauna Loa Observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974–1985. *J. Geophys. Res.*, 94, 1989
- WMO 2017: Greenhouse Gas Bulletin, No13, ISSN2078–0796, 2017

### 3.2 반응가스

- 지구대기감시 업무매뉴얼, 2017, 국립기상과학원
- WCC–Empa, System and performance audit of Surface Ozone, Carbon Monoxide, Methane, Carbon Dioxide and Nitrous Oxide at the Reginal GAW Station Jeju Gosan, Republic of Korea, June 2017.
- WCC–Empa, System and performance audit of Surface Ozone, Carbon Monoxide, Methane, Carbon Dioxide and Nitrous Oxide at the Reginal GAW Station Anmyeon–do, Republic of Korea, June 2017.
- GAW report No. 209, NO.192, No. 195, WP4/D4.2(M12) (drift)).
- Japan Meteorological Agency, WMO WDCGG DATA SUMMARY WDCGGNo.41 (March 2017)
- 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>

### 3.3 에어로졸

- 심상규, 강창희, 김용표, 1994: 제주도에서의 빗물 이온 농도 분석, *한국대기보전학회지*, 10(2), 98–104.
- 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.
- Anderson, T. L. & J. A. Ogren, 1998: Determining Aerosol Radiative Properties Using the TSI 3563 Integrating Nephelometer, *Aerosol Science and Technology*, 29:1, 57–69
- 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, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups 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.
- Park, M. H., Y. P. Kim, C. H. Kang, 2003: Aerosol composition change due to dust storm: Measurements between 1992 and 1999 at Gosan,

Korea, Water, Air, & Soil Pollution : Focus, 3(2), 117–128.  
World Meteorological Organization (WMO), 2016: WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, 2nd Edition (WMO No.1177), *GAW Report*, No. 227.

### 3.4 대기복사

C. N. Long 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.

일본기상청, Annual Report of Ozone Layer Monitoring : 2008, 2009.

조희구, 백선균, 김준, 오성남, 2003: 서울 상공의 근 인위적 오존층 변화 경향, *대기*, 13(1), 144–147.

조희구, 이재원, 1990: 반전 관측에 의한 서울의 연직오존분포, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 26(4), 216–228.

조희구, 이승만, 최치영, 1989: 서울의 오존전량 변동, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 25(1), 21–29.

조희구, 이방용, 이준석, 박선욱, 2001 : 한국 전역의 지표 홍반 자외선 복사의 계절 기후, *한국기상학회지*, 37, 5, 525–539.

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.

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.

Park, S. S., J. Kim, H. K. Cho, H. Lee, Y. Lee, 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. Env.*, 47, 226–235.

Wayne, R. P., 1991: *Chemistry of Atmosphere*. Oxford Science Publication, New York. 2nd Edition.

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

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

### 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

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

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

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

Chambers, S. W. Zahorowski, K. Matsumoto, and M. Uematsu, 2009: Seasonal variability of radon-derived fetch regions for Sado Island, Japan, based on 3 years of observations: 2002–2004, *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.

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.

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.

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

box model analysis of radon-222 in the atmospheric surface layer at L'Aquila, Italy: March 2009 case study, *Environ. Ear. Sci.*, 71(5), 2353-2359.

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.

# 부 록

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

# 1. 지구대기감시 관측자료

## 1.1 온실가스

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄.

### □ 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>

#### ○ 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>

○ 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>

○ 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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

□ 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>

□ 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>

○ 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>

□ 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>

○ 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>

○ 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>

□ 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>

□ 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>

□ 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>

## 1.2 반응가스

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄.

### □ 오존(O3) [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	32.6	45.5	50.4	67.3	58.2	53.4	32.3	42.6	49.1	45.0	30.9	27.9	<b>44.6</b>
2009	29.5	32.1	39.5	55.5	56.0	50.9	38.6	36.8	46.0	45.0	29.4	15.7	<b>39.6</b>
2010	33.5	35.4	42.7	49.3	56.8	60.7	40.3	36.6	40.5	44.8	42.3	34.1	<b>43.1</b>
2011	36.9	40.5	47.9	54.9	58.3	53.8	37.5	38.8	45.8	42.7	34.2	28.0	<b>43.3</b>
2012	28.7	35.7	44.8	50.7	58.2	42.8	33.1	30.7	50.6	41.5	29.3	23.5	<b>39.1</b>
2013	33.5	36.5	44.2	51.5	56.8	50.3	34.3	39.9	42.2	32.6	26.9	26.3	<b>39.6</b>
2014	23.5	28.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	53.9	57.5	59.2	54.9	41.7	42.6	52.7	38.3	34.8	30.5	<b>46.1</b>

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

#### ○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012*	-	-	-	-	-	44.3	36.1	28.1	52.3	49.8	36.6	37.4	<b>37.1</b>
2013	47.1	44.1	56.2	64.1	52.1	33.3	19.2	21.7	44.8	39.9	35.2	38	<b>41.3</b>
2014	36.9	42.0	46.8	64.6	64.6	55.9	32.9	33.3	43.3	40.3	39.3	35.4	<b>44.6</b>
2015	39.7	50	57.2	62.6	51.1	49.6	38	38.3	43.8	47.6	35.2	27.6	<b>45.1</b>
2016	30.3	47.0	50.3	52.6	56.2	40.3	21.7	28.0	34.2	39.9	36.4	34.5	<b>39.3</b>
2017	41.2	50.8	56.8	66.0	55.4	47.4	29.5	39.4	48.9	43.1	41.9	36.6	<b>46.4</b>

※ 고산은 2012년 6월부터 관측시작.

□ 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	252.8	227.4	254.1	194.2	126.3	204.1	228.9	239.2	222.9	279.7	215.3	236.3	<b>223.4</b>
2009	243.3	352.5	256.0	301.0	216.8	198.1	182.6	268.3	237.6	219.6	212.0	290.0	<b>248.2</b>
2010	269.9	286.9	244.0	242.8	287.8	229.5	159.6	179.8	232.3	234.8	277.7	302.6	<b>245.7</b>
2011	253.1	483.4	305.9	294.1	280.1	277.1	126.2	193.4	226.0	301.6	493.6	289.7	<b>293.7</b>
2012	440.3	321.3	321.6	256.5	320.7	212.3	174.1	188.7	267.1	237.9	317.7	353.8	<b>284.3</b>
2013	473.4	367.8	322.0	363.7	314.8	269.2	215.1	225.9	249.7	244.5	300.0	348.6	<b>307.9</b>
2014	324.2	382.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	371.9	231.6	179.7	195.9	180.8	215.6	290.6	255.7	269.6	317.9	<b>252.0</b>

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

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	-	131.0	108.5	80.1	147.4	163.4	194.9	186.1	<b>152.9</b>
2013	247.1	204.6	217.2	208.4	231.4	152.8	81.5	99.4	144.4	155.2	216.2	214.5	<b>181.1</b>
2014	241.3	254.7	209.1	205.7	263.1	198.3	141.7	142.7	188.9	176.2	217.9	211.7	<b>204.3</b>
2015	235.6	245.6	246.9	237.4	177.8	191.9	156.8	207.7	235.3	195.8	264.3	283.4	<b>231.6</b>
2016	295.2	241.2	233.4	249.6	235.1	203.6	136.3	166.6	215.8	199.7	219.1	202.6	<b>216.5</b>
2017	267.1	260.6	285.9	255.3	188.8	196.4	127.7	179.9	224.3	187.5	212.3	231.6	<b>218.1</b>

※ 고산은 2012년 6월부터 관측시작.

○ 울릉도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2015	-	-	271.1	220.7	208.1	183.0	155.8	171.9	155.7	177.4	184.3	214.0	<b>193.2</b>
2016	231.4	234.6	241.5	231.1	191.2	168.7	96.1	116.4	108.7	129.1	156.2	156.0	<b>171.5</b>
2017	211.2	238.4	247.3	218.7	203.9	155.6	157.9	97.0	159.2	153.5	189.2	197.9	<b>186.7</b>

□ 질소산화물(NO<sub>x</sub>) [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	13.5	5.5	9.8	9.3	8.5	7.1	3.1	7.1	7.8	10.1	10.1	7.3	<b>8.3</b>
2009	9.7	10.3	6.4	7.6	7.3	4.4	3.5	5.6	10.7	8.8	8.8	10.9	<b>7.8</b>
2010	8.9	11.0	7.2	9.0	8.3	5.2	2.4	4.0	5.7	8.9	9.2	11.4	<b>7.6</b>
2011	8.2	13.9	7.7	8.8	8.3	6.0	4.7	7.2	9.7	12.3	10.2	8.8	<b>8.8</b>
2012	8.4	8.8	5.8	4.4	7.5	5.4	5.8	8.2	4.9	5.5	8.7	11.4	<b>7.1</b>
2013	7.5	6.7	4.9	4.6	7.6	7.1	3.7	2.5	5.5	7.1	7.4	11.2	<b>6.3</b>
2014	7.8	12.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	10.1	7.3	3.9	4.0	2.4	3.5	5.3	6.8	5.7	7.9	<b>5.5</b>

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

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2012	-	-	-	-	-	3.5	2.6	2.6	3.1	3.5	3.6	3.4	<b>3.3</b>
2013	3.3	2.9	4.0	3.5	4.1	5.0	1.7	2.5	4.9	3.4	3.5	4.3	<b>3.6</b>
2014	3.7	3.9	3.5	3.7	3.3	2.8	2.9	2.9	3.9	4.4	3.8	3.0	<b>3.5</b>
2015	3.9	3.2	5.1	4.4	4.3	3.1	3.4	3.2	4.0	4.4	4.0	3.9	<b>3.9</b>
2016	3.9	3.4	3.7	4.5	4.4	3.1	2.7	2.4	4.0	4.4	3.5	3.6	<b>3.6</b>
2017	3.3	2.6	3.7	5.0	2.7	3.1	2.3	2.9	3.2	3.4	2.9	3.0	<b>3.2</b>

※ 고산은 2012년 6월부터 관측시작.

□ 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	4.0	2.6	1.4	0.9	1.8	2.6	2.9	4.4	3.9	<b>3.3</b>
2009	3.9	3.9	2.6	3.7	2.5	1.5	1.1	1.5	2.3	2.8	1.9	2.3	<b>2.5</b>
2010	4.7	2.9	2.0	2.2	2.7	1.7	1.0	0.9	1.7	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	4.5	<b>3.1</b>
2012	7.5	3.6	2.0	1.4	2.0	1.4	1.2	1.3	1.3	1.7	3.1	3.5	<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	1.9	4.0	<b>2.5</b>
2014	4.5	4.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	2.7	1.3	1.7	1.5	0.7	1.1	1.6	1.6	1.4	2.0	<b>1.5</b>

※ 2014. 3. ~ 2017.2. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 결측 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	0.7	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	0.5	0.8	<b>0.5</b>
2015	0.2	-	0.6	0.4	0.6	0.6	0.7	-	0.3	0.4	0.3	0.7	<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	0.9	0.8	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	<b>0.5</b>

※ 고산은 2012년 6월부터 관측시작.

### 1.3 에어로졸

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 또는 해당 월/년의 유효한 시간평균이 전체의 30% 미만인 경우임(부유분진측정기는 75%).

※ WMO/GAW 세계자료센터 자료 제출기준에 따라 표준상태(0°C, 1기압)로 변환한 자료임.  
(CPC와 SMPS(~2016년) 제외)

#### □ 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	<b>49</b>
2005	45	39	57	75	49	39	43	-	43	58	69	40	<b>51</b>
2006	48	59	71	101	52	41	23	34	35	53	44	46	<b>50</b>
2007	49	63	53	70	72	26	34	19	25	36	49	49	<b>46</b>
2008	43	46	55	54	42	30	25	29	36	46	-	42	<b>41</b>
2009	32	55	43	51	41	35	27	26	35	41	28	43	<b>38</b>
2010	34	28	44	36	39	31	24	26	29	37	63	53	<b>37</b>
2011	33	59	56	50	78	32	24	26	29	40	37	31	<b>41</b>
2012	48	37	38	39	46	28	22	24	34	30	40	34	<b>35</b>
2013	51	38	44	47	46	33	31	34	37	31	35	40	<b>39</b>
2014	45	49	43	44	61	38	33	25	26	29	31	30	<b>38</b>
2015	37	52	50	35	33	31	27	29	26	39	26	32	<b>35</b>
2016	33	34	41	50	40	33	22	31	31	31	38	31	<b>35</b>
2017	35	32	42	44	46	30	25	19	26	23	28	27	<b>31</b>

##### ○ 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	<b>30</b>
2012	28	22	31	30	-	-	17	17	21	25	30	19	<b>25</b>
2013	32	25	40	32	41	22	22	20	19	25	37	31	<b>29</b>
2014	41	-	37	33	52	35	24	23	24	23	24	28	<b>32</b>
2015	33	45	40	33	28	29	27	27	22	34	24	30	<b>31</b>
2016	31	35	39	44	41	33	18	20	-	-	-	-	<b>31</b>
2017	29	28	34	42	39	29	26	25	-	29	33	26	<b>31</b>

※ 2017년 9월 21일까지 환경분석센터, 2017년 9월 22일부터 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>

○ 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	44.0	27.0	37.3	30.8	38.3	37.5	17.8	21.0	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	19.0	24.8	21.0	25.7	30.0	24.2	-	-	-	-	<b>22.0</b>

※ 2013년 12월부터 수월봉(슈퍼사이트)에서 관측.

2017년 9월 22일부터 수월봉(통합관측실)으로 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>

※ 2005 ~ 2016년(0.01 ~ 0.5 μm), 2017년(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>4750</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	-

※ 2013년 12월부터 수월봉(슈퍼사이트)에서 관측.

2017년 10월부터 수월봉(통합관측실)으로 관측위치 변경.

□ 550 nm 에어로졸 광산란계수 [단위:  $Mm^{-1}$ ]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	160.3	232.9	244.4	153.3	276.9	273.5	222.4	159.4	-	132.3	115.6	152.2	<b>191.4</b>
2004	149.6	118.8	126.5	114.4	169.7	164.3	84.2	110.6	-	-	-	-	<b>131.8</b>
2005	207.3	108.4	149.3	145.1	149.9	253.2	363.7	174.9	160.2	152.7	121.9	86.2	<b>171.4</b>
2006	151.7	163.8	144.2	147.5	187.6	252.4	114.6	189.3	116.7	187.7	96.7	163.2	<b>159.5</b>
2007	178.5	199.9	159.3	173.6	155.5	106.9	166.7	64.1	82.9	124.2	136.4	155.7	<b>144.5</b>
2008	105.0	91.3	154.6	192.1	101.9	119.1	103.2	98.8	-	125.6	111.8	-	<b>120.5</b>
2009	-	-	106.4	180.9	113.2	143.6	102.1	-	88.9	97.4	74.3	120.5	<b>114.3</b>
2010	104.5	88.8	92.0	95.4	82.1	152.7	70.4	70.7	71.6	104.6	171.1	117.4	<b>101.5</b>
2011	73.1	209.3	97.0	115.6	125.1	122.5	66.9	84.9	76.3	123.0	127.1	94.7	<b>108.6</b>
2012	169.4	119.1	113.6	79.4	-	109.9	-	-	-	-	67.9	109.7	<b>117.1</b>
2013	146.3	103.6	101.7	102.7	126.7	127.3	130.4	120.3	93.1	75.1	110.6	113.6	<b>112.8</b>
2014	133.4	178.7	128.2	153.3	148.5	171.8	129.3	104.5	84.1	-	-	-	<b>134.3</b>
2015	118.1	142.5	168.8	107.6	100.8	138.6	140.9	137.5	79.9	124.6	122.7	122.3	<b>124.3</b>
2016	102.9	73.8	99.2	103.3	58.2	88.7	49.5	74.3	76.0	52.0	57.5	-	<b>77.2</b>
2017	-	85.0	131.6	90.2	73.7	80.1	74.7	57.5	78.2	54.4	70.0	85.1	<b>80.0</b>

□ 지상 에어로졸 응스트롬 지수 (450-700 nm)

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	1.51	1.60	1.57	1.61	1.58	1.43	1.24	1.32	-	1.65	1.63	1.45	<b>1.51</b>
2004	1.50	1.39	1.25	1.58	1.76	1.94	1.89	2.00	-	-	-	-	<b>1.66</b>
2005	1.38	1.41	1.41	1.36	1.66	1.52	1.41	1.44	1.54	1.58	1.43	1.49	<b>1.48</b>
2006	1.41	1.27	1.27	1.17	1.70	1.51	1.36	1.64	1.73	1.44	1.39	1.45	<b>1.45</b>
2007	1.38	1.42	1.42	1.54	1.56	1.77	1.73	1.54	1.69	1.79	1.59	1.49	<b>1.57</b>
2008	1.50	1.50	1.60	1.69	1.76	1.63	1.65	1.85	-	1.89	1.88	-	<b>1.68</b>
2009	-	-	1.53	1.79	1.78	1.50	1.30	-	1.82	1.59	1.54	1.43	<b>1.60</b>
2010	1.54	1.56	1.55	1.66	1.74	1.78	1.73	1.69	1.67	1.73	1.47	1.36	<b>1.62</b>
2011	1.41	1.58	1.45	1.68	1.53	1.75	1.83	1.90	1.83	1.77	1.67	1.50	<b>1.67</b>
2012	1.41	1.47	1.55	1.67	-	1.74	-	-	-	-	1.76	1.50	<b>1.57</b>
2013	1.56	1.72	1.72	1.81	1.82	1.85	1.35	1.65	1.57	1.63	1.36	1.51	<b>1.63</b>
2014	1.44	1.61	1.63	1.70	1.68	1.57	1.78	1.92	2.06	-	-	-	<b>1.72</b>
2015	1.60	1.63	1.79	1.90	1.92	1.83	1.74	1.77	1.89	1.69	1.89	1.67	<b>1.79</b>
2016	1.67	1.70	1.83	1.74	1.66	1.72	1.85	1.88	1.94	1.77	1.80	-	<b>1.79</b>
2017	-	1.41	1.73	1.49	1.47	1.61	1.49	-	-	-	-	1.49	<b>1.53</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>12.0</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>

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

[참고]

- 안면도 본동 옥상 단독 흡입구(비도체 튜브 사용)로 연속 관측(2003년 ~ 2004년)
- 안면도 연구동 이전 통합 흡입구(도체 튜브 사용)로 연속 관측(2005년 ~ 2006년)
- 광학특성 측정 장비 샘플링시스템 개선 적용(2007년 ~ 2012년)
- 광학특성 측정 장비 표준 에어로졸 샘플링시스템 구축 적용(2013년 ~ 2016년)

## 1.4 대기복사

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 등 한 달 일평균 값 50% 미만으로 제거한 값임.

### □ 직달일사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

#### ○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	-	-	-	-	140.7	131.6	61.0	124.9	123.1	113.7	108.6	-
2000	69.2	139.7	166.3	184.8	119.0	134.4	102.7	168.3	136.1	137.6	130.1	131.8	<b>135.0</b>
2001	101.7	120.2	-	-	-	-	70.8	-	-	-	142.8	117.4	-
2002	107.0	160.4	158.5	172.4	149.4	200.7	104.0	65.8	141.4	177.2	108.3	112.8	<b>138.2</b>
2003	105.2	135.9	114.8	144.1	162.1	97.4	59.8	85.4	120.6	201.3	104.4	79.0	<b>117.5</b>
2004	99.5	165.0	165.3	187.8	156.2	111.3	67.7	152.4	157.3	209.7	54.4	118.5	<b>137.1</b>
2005	104.1	115.1	179.2	167.9	219.8	60.3	72.6	125.6	118.8	152.2	118.9	64.9	<b>125.0</b>
2006	106.1	108.4	165.9	119.7	135.0	96.7	40.0	176.0	153.0	139.9	90.1	71.8	<b>116.9</b>
2007	84.6	142.4	90.8	130.9	135.5	106.4	68.9	74.4	-	-	-	-	-
2008	98.8	157.8	163.7	145.1	141.0	109.6	94.0	180.8	-	-	114.7	114.1	<b>132.0</b>
2009	146.8	107.3	184.6	195.1	-	180.0	116.0	165.2	137.0	157.8	61.8	81.0	<b>139.3</b>
2010	100.2	111.8	103.5	162.1	169.9	161.5	140.1	157.9	-	-	104.3	80.1	<b>129.1</b>
2011	120.5	148.0	227.7	223.5	-	185.8	108.5	92.6	183.1	161.5	108.4	115.5	<b>152.3</b>
2012	133.2	175.7	162.2	187.5	186.4	180.5	170.9	146.7	161.1	180.8	120.2	103.7	<b>159.1</b>
2013	101.7	142.4	152.8	192.5	198.8	178.7	79.1	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	157.4	149.4	207.7	143.4	107.5	83.6	185.1	182.7	101.3	69.6	<b>138.8</b>
2015	118.6	103.5	197.9	145.8	222.2	-	129.1	146.7	191.5	141.6	50.1	88.5	<b>139.6</b>
2016	67.6	140.3	173.8	139.0	206.0	126.4	117.7	169.9	124.1	-	-	-	-
2017	-	195.9	202.3	190.8	263.9	-	-	145.9	200.5	-	131.0	102.2	-

※ 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	10.6	-	-	-	-	50.5	-	-	-	-	74.7	71.4	-
2009	53.8	71.6	108.8	177.1	205.3	126.5	71.7	137.2	142.2	169.5	72.7	50.7	<b>115.6</b>
2010	59.4	77.8	91.4	132.8	133.5	91.0	65.8	130.1	134.2	122.3	111.7	65.2	<b>101.3</b>
2011	42.6	111.4	174.9	201.5	130.1	37.8	103.7	-	-	-	93.2	53.0	-
2012	50.3	63.0	123.4	162.1	150.3	97.7	111.7	174.2	162.8	177.8	92.8	50.7	<b>118.1</b>
2013	69.4	107.1	135.5	-	-	78.3	101.6	171.1	171.1	174.9	99.3	83.1	<b>119.1</b>
2014	120.9	105.8	135.8	159.7	197.6	76.8	75.4	75.6	116.5	202.9	132.8	61.3	<b>121.8</b>
2015	81.5	94.5	146.0	145.0	195.2	115.6	91.0	132.4	174.3	191.0	55.9	58.6	<b>123.4</b>
2016	30.5	91.1	112.9	123.4	165.4	89.2	135.5	180.1	93.4	70.0	91.7	82.5	<b>105.5</b>
2017	69.8	130.3	137.5	160.0	147.4	119.4	92.9	164.9	-	138.7	126.6	65.4	<b>123.0</b>

□ 산란일사 [단위: W/m<sup>2</sup>]

○ 안면도

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	-	73.1	85.0	97.4	115.4	121.1	132.6	169.8	97.4	68.6	55.9	42.2	<b>96.2</b>
2000	47.8	68.4	87.6	105.1	125.6	129.8	129.9	92.9	78.3	68.3	49.1	46.2	<b>85.8</b>
2001	52.1	63.5	82.2	107.2	106.6	120.1	120.4	102.3	-	65.3	48.2	43.2	<b>82.8</b>
2002	49.3	60.7	82.7	96.3	98.3	100.1	128.4	102.8	95.0	65.4	50.4	42.3	<b>81.0</b>
2003	48.9	63.5	100.8	95.9	121.0	118.2	115.4	96.3	88.4	57.0	43.9	45.1	<b>82.9</b>
2004	52.9	61.1	87.8	95.2	99.9	131.2	97.9	101.5	77.2	55.9	62.0	41.6	<b>80.4</b>
2005	54.4	63.8	80.0	99.6	101.5	127.6	120.6	94.1	82.0	62.8	55.3	43.7	<b>82.1</b>
2006	49.9	65.0	86.3	108.7	113.8	135.0	107.1	110.5	88.4	67.5	53.2	47.0	<b>86.0</b>
2007	49.7	57.9	84.1	108.6	114.0	122.5	126.6	127.6	-	-	-	41.3	
2008	46.7	64.5	86.4	112.0	112.3	127.4	107.8	107.5	-	-	47.3	33.3	<b>84.5</b>
2009	37.6	56.0	83.5	99.6	-	108.0	114.2	93.2	-	-	52.0	45.1	
2010	50.7	51.5	80.2	95.6	104.6	120.7	113.8	87.4	-	-	65.5	61.0	<b>83.1</b>
2011	47.1	58.7	65.9	83.7	100.2	104.9	85.7	97.9	75.5	59.7	48.6	37.8	<b>72.1</b>
2012	38.0	54.3	66.6	83.8	118.0	120.9	92.6	91.7	76.0	57.7	45.0	38.5	<b>73.6</b>
2013	48.9	57.2	93.9	81.8	99.6	119.8	103.6	-	-	22.6	20.9	24.4	<b>67.3</b>
2014	31.7	52.2	76.2	102.6	114.2	143.0	127.0	108.0	79.3	50.2	46.3	43.4	<b>81.2</b>
2015	42.2	63.5	77.6	93.2	102.6	125.7	108.8	108.5	77.2	67.3	42.7	36.0	<b>78.8</b>
2016	54.3	55.4	78.7	100.2	99.9	127.3	116.1	106.5	91.2	-	-	-	-
2017	-	52.4	79.0	97.5	90.6	-	-	93.3	66.0	-	34.9	35.7	-

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	20.5	-	-	-	-	94.6	-	-	-	-	48.2	44.7	-
2009	46.8	67.9	87.7	92.5	94.8	110.1	112.2	102.4	87.7	76.9	57.6	43.7	<b>81.7</b>
2010	53.9	59.2	75.8	92.3	111.5	117.9	123.7	98.2	94.7	80.6	67.5	44.6	<b>85.0</b>
2011	50.2	67.3	84.4	94.8	111.4	126.8	122.4	-	-	-	51.8	42.1	
2012	57.6	62.9	74.6	90.5	122.7	128.7	104.6	100.7	91.8	68.3	57.7	42.9	<b>83.6</b>
2013	50.9	57.0	92.7	-	-	121.5	126.5	106.5	81.3	73.6	60.5	45.7	<b>81.6</b>
2014	54.6	72.5	80.8	92.5	114.5	131.1	120.7	115.2	91.4	57.7	54.3	49.7	<b>86.3</b>
2015	51.3	61.1	89.7	98.6	108.9	111.8	122.3	105.9	73.3	63.6	50.6	44.7	<b>81.8</b>
2016	46.4	67.5	86.1	100.9	111.4	117.8	113.5	91.9	84.5	71.6	52.2	44.1	<b>82.3</b>
2017	55.6	59.4	83.1	90.6	111.8	120.8	127.3	101.3	-	61.5	59.5	51.6	<b>83.9</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	-	-	21.5	47.9	41.4	39.6	35.2	36.3	31.6	26.8	18.5	16.3	<b>31.5</b>
2001	23.0	19.8	-	-	-	-	28.9	-	-	-	23.8	21.2	-
2002	17.2	26.0	33.8	40.8	34.2	45.3	34.3	25.6	36.3	32.5	19.6	18.2	<b>30.3</b>
2003	28.0	23.7	30.6	34.6	41.6	32.8	25.7	26.3	31.2	35.2	18.7	15.8	<b>28.7</b>
2004	27.9	30.3	41.0	39.8	36.0	36.5	25.3	38.6	35.2	37.0	18.4	18.6	<b>32.1</b>
2005	23.3	28.5	38.2	40.3	45.3	29.9	30.9	32.2	30.5	30.6	23.8	27.2	<b>31.7</b>
2006	16.0	23.0	33.3	33.8	-	36.5	-	37.0	31.0	22.3	15.7	12.7	<b>26.1</b>
2007	12.9	-	21.9	-	-	37.9	32.0	32.4	25.0	27.1	-	-	-
2008	-	27.6	34.7	35.8	-	-	-	40.0	-	-	21.9	18.5	-
2009	22.6	21.4	35.3	41.6		43.1	34.6	38.2	33.6	32.6	16.1	21.5	<b>31.0</b>
2010	32.0	21.2	25.6	35.0	40.1	42.3	37.3	33.5	39.3	32.5	25.4	21.4	<b>32.1</b>
2011	26.4	27.4	39.1	43.6	-	39.5	27.6	30.0	38.7	32.1	20.3	18.1	<b>31.2</b>
2012	23.8	31.6	33.2	40.0	46.6	44.3	35.7	33.5	33.5	32.7	21.2	26.8	<b>33.6</b>
2013	26.3	30.4	39.1	39.4	42.2	44.2	27.2	49.4	48.4	-	-	-	-
2014	-	25.8	34.2	38.0	47.5	42.1	33.0	28.2	35.4	32.3	21.7	22.0	<b>32.7</b>
2015	19.9	23.5	39.4	35.2	48.7	-	34.8	39.5	38.2	29.8	12.9	15.2	<b>30.6</b>
2016	25.1	25.1	37.2	36.5	46.6	40.8	35.1	41.9	36.1	-	-	19.5	<b>34.4</b>
2017	29.6	34.2	45.7	49.6	55.3	47.5	33.1	41.2	45.2	36.8	30.4	25.2	<b>39.5</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	-	-	-	-	-	227.7	230.3	210.5	178.8	135.3	107.2	81.5	-
2000	75.7	142.1	180.9	230.3	214.4	231.7	204.7	209.0	162.2	141.9	106.4	98.5	<b>166.5</b>
2001	94.7	123.0	-	-	-	-	175.5	-	-	-	113.0	90.5	-
2002	93.1	139.3	177.3	214.7	200.9	246.5	200.9	147.6	184.0	163.5	99.3	88.2	<b>162.9</b>
2003	91.9	132.7	169.5	195.0	241.5	191.2	157.9	154.1	163.8	166.5	91.7	75.7	<b>152.6</b>
2004	93.7	146.0	189.8	223.6	215.0	214.2	147.6	209.4	179.8	171.9	91.3	89.1	<b>164.3</b>
2005	98.3	127.3	190.4	216.5	259.5	181.5	177.8	180.2	160.0	148.6	109.1	66.4	<b>159.6</b>
2006	94.8	117.2	189.0	191.1	211.3	210.7	138.2	238.7	187.5	145.8	93.9	71.5	<b>157.5</b>
2007	73.3	114.2	140.0	189.4	210.1	200.2	179.3	178.7	132.1	144.8	87.4	61.8	<b>142.6</b>
2008	84.0	142.9	185.6	210.7	212.2	207.9	175.5	233.6	-	-	98.1	81.0	<b>163.2</b>
2009	99.4	115.8	195.5	231.0	-	235.9	197.0	207.2	165.2	154.9	81.5	76.0	<b>159.9</b>
2010	89.6	106.9	144.5	197.2	226.2	237.2	216.4	194.7	216.5	169.0	122.2	88.8	<b>167.4</b>
2011	98.2	136.9	201.1	238.1	-	245.9	162.3	158.1	191.0	151.2	97.8	83.2	<b>160.3</b>
2012	96.8	145.9	163.6	212.3	249.4	253.9	214.1	189.4	173.0	158.8	100.4	78.2	<b>169.7</b>
2013	90.4	130.7	191.1	211.3	237.9	250.1	158.5	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	172.6	203.0	261.7	251.5	202.8	163.3	188.2	151.5	97.0	71.3	<b>176.3</b>
2015	92.9	115.8	194.3	188.2	256.8	-	200.4	214.1	200.5	148.6	66.7	77.3	<b>159.6</b>
2016	87.2	128.2	187.8	195.9	253.5	225.4	204.7	226.7	170.6	-	-	-	-
2017	-	152.5	202.5	244.1	293.6	-	-	210.0	201.6	-	101.2	79.1	-

○ 고산

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2008	26.6	-	-	-	-	135.9	-	-	-	-	84.0	78.0	-
2009	73.0	107.6	159.6	220.9	252.8	209.3	169.5	201.7	181.0	175.8	91.2	67.6	<b>159.2</b>
2010	83.5	101.4	137.0	187.7	214.8	187.9	177.9	193.4	181.7	148.0	121.5	74.0	<b>150.7</b>
2011	71.7	129.0	193.0	235.7	214.3	146.6	199.8	-	-	-	96.6	67.2	-
2012	81.6	99.2	157.1	205.2	238.7	201.5	185.8	220.4	198.9	168.3	103.7	65.8	<b>160.5</b>
2013	83.9	116.1	183.4	-	-	184.0	206.8	227.7	188.3	171.0	108.6	83.1	<b>155.3</b>
2014	110.3	127.4	162.1	200.8	262.2	190.4	174.7	167.8	166.0	170.8	117.5	76.8	<b>160.6</b>
2015	88.8	110.3	182.4	201.8	252.9	193.8	196.0	200.5	188.5	177.6	78.0	71.7	<b>161.9</b>
2016	62.1	120.5	160.4	189.5	229.6	187.2	212.0	228.9	151.4	114.0	100.2	82.3	<b>153.2</b>
2017	91.8	136.0	173.4	212.5	229.6	214.0	204.1	217.8	-	136.2	120.0	79.7	<b>165.0</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	365.6	370.4	395.9	427.5	436.2	465.5	468.7	466.4	450.3	446.4	411.6	391.8	<b>424.7</b>
2001	354.8	358.0	-	-	-	-	418.0	-	-	-	351.9	315.1	-
2002	319.6	330.2	355.7	381.8	400.6	430.5	447.5	445.1	426.5	384.1	339.9	323.5	<b>382.1</b>
2003	307.2	319.1	346.3	374.8	409.2	423.9	439.2	442.3	426.9	390.9	357.8	317.7	<b>379.6</b>
2004	306.0	326.5	343.8	370.0	396.8	429.0	422.6	451.1	417.5	381.1	345.5	328.7	<b>376.6</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	306.0	303.6	336.2	338.1	368.1	419.0	434.7	447.7	416.7	374.5	350.3	-	<b>372.3</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	308.1	322.9	340.3	372.2	-	439.7	444.9	446.4	412.9	389.4	342.8	308.9	<b>375.3</b>
2010	301.2	318.1	335.4	356.5	400.2	425.1	430.2	451.9	-	-	-	295.7	-
2011	282.0	309.0	314.9	-	-	-	441.4	447.6	419.2	383.9	372.0	316.7	-
2012	303.7	308.9	338.7	376.0	415.3	441.4	453.0	458.8	419.5	384.6	341.3	287.5	<b>377.4</b>
2013	301.6	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	309.1	324.2	339.7	366.9	382.6	-	423.8	439.1	418.4	380.9	349.9	327.9	<b>369.3</b>
2016	312.4	319.2	345.4	376.9	400.4	415.6	442.2	449.9	433.1	-	-	323.8	<b>381.9</b>
2017	312.8	311.4	338.1	367.7	402.3	404.6	-	424.4	404.6	347.6	330.8	312.0	<b>359.7</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	433.9	377.1	343.2	301.3	-
2000	308.5	302.4	328.1	361.4	388.1	417.9	429.9	420.4	391.2	374.8	336.6	314.9	<b>364.5</b>
2001	293.6	302.9	-	-	-	-	415.7	-	-	-	279.6	256.8	-
2002	264.3	257.1	284.8	316.8	348.3	365.3	410.1	415.1	368.0	315.8	283.2	273.3	<b>325.2</b>
2003	251.3	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	248.7	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	-	286.8	256.7	<b>321.3</b>
2006	249.9	246.1	266.9	293.5	327.5	363.3	411.6	399.6	350.8	331.2	296.5	263.7	<b>316.7</b>
2007	250.7	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	342.1	388.9	413.9	393.4	-	-	286.7	271.5	<b>314.9</b>
2009	243.0	264.7	262.4	286.8	-	361.8	385.1	375.7	339.5	308.6	291.8	257.6	<b>307.0</b>
2010	250.9	268.4	278.7	276.7	322.6	347.0	370.6	396.9	-	-	-	240.9	-
2011	226.0	243.5	229.7	-	-	-	401.5	396.1	342.8	303.3	314.3	260.6	-
2012	246.8	240.3	271.2	301.1	326.6	352.2	390.9	399.8	351.2	307.3	281.3	240.3	<b>309.1</b>
2013	248.3	252.7	261.9	289.7	325.4	350.8	349.5	373.8	-	-	-	-	-
2014	-	197.5	262.8	275.6	295.8	337.8	371.8	366.2	311.9	294.4	283.0	250.1	<b>295.2</b>
2015	247.5	262.5	253.5	297	295.8	-	371.5	373.1	329.6	301	305.1	265.9	<b>300.2</b>
2016	254.7	247.1	259.9	305.5	315.1	341.7	382.9	369	349.9	-	-	268.7	<b>309.5</b>
2017	252.0	238.0	250.3	282.3	310.5	314.2	-	367.8	330.4	269.7	260.3	256.8	<b>284.8</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	16.6	49.3	71.8	107.9	117.3	138.4	139.4	132.3	80.3	52.0	24.6	15.1	<b>78.8</b>
2001	19.5	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	10.1	47.5	75.0	107.3	119.4	125.1	93.9	121.1	88.9	56.2	10.9	7.8	<b>71.9</b>
2005	20.1	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	7.2	30.6	59.1	97.0	107.6	112.4	111.7	107.4	69.9	49.6	14.4	-6.7	<b>63.4</b>
2008	11.9	35.6	72.9	99.2	115.4	125.2	110.2	139.8	-	-	23.4	12.6	<b>74.6</b>
2009	16.6	34.6	82.8	113.8	-	129.6	119.1	125.7	70.9	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	10.4	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	130.4	135.6	131.9	115.1	86.0	55.4	17.6	4.1	<b>74.8</b>
2013	7.4	37.0	75.3	99.9	125.1	144.3	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	97.0	142.6	-	121.3	130.0	92.6	55.8	19.1	8.5	<b>72.5</b>
2016	11.7	41.0	79.8	105.3	139.0	133.2	131.0	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>

## 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>

※ 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>

○ 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>

## 1.6 자외선

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측, 품질관리 등 한달 일 자료가 80% 미만으로 제거한 값임.

### □ 자외선A 일누적값의 월평균 자료 [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>

#### ○ 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>

#### ○ 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>

#### ○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

□ 자외선A 일 최댓값의 월평균 자료 [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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

□ 자외선B (홍반자외선) 일누적값의 월평균 자료 [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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

□ 자외선B (홍반자외선) 일 최댓값의 월평균 자료 [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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

○ 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>

## 1.7 총대기침적

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

### □ 습성침적 관측자료

#### ○ 안면도 부피가중평균

연도	개수	강수량 (mm)	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	(μeq/L)				
									Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
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
<b>연평균</b>		<b>763.3</b>	<b>4.68</b>	<b>27.8</b>	<b>1.7</b>	<b>61.7</b>	<b>32.4</b>	<b>54.4</b>	<b>55.9</b>	<b>38.6</b>	<b>3.1</b>	<b>14.6</b>	<b>21.3</b>

계절	기간	개수	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	(μeq/L)				
									Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
겨울	2007~2016	114	4.35	74.9	2.5	244.1	81.2	118.0	212.2	74.4	9.0	53.1	49.6
	2017	13	4.23	83.5	2.2	187.4	141.7	156.6	164.5	157.3	9.0	47.7	56.1
봄	2007~2016	137	4.72	30.1	2.0	47.2	43.8	68.3	41.7	49.2	3.6	15.1	42.2
	2017	11	5.25	21.2	1.2	27.5	39.5	53.5	21.4	57.7	2.2	11.2	33.6
여름	2007~2016	232	4.63	24.3	1.3	41.1	25.8	47.1	34.7	39.6	1.8	9.4	10.0
	2017	23	4.76	17.5	0.6	22.9	27.2	27.4	20.4	38.0	0.9	6.2	7.0
가을	2007~2016	169	4.64	27.1	1.3	72.3	29.2	42.9	62.5	26.3	2.7	15.9	14.1
	2017	8	4.92	24.9	0.7	88.3	44.6	41.0	72.1	28.8	2.4	18.1	22.8

○ 고산 부피가중평균

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)											
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	52	893.9	4.88	17.1	0.5	39.1	22.2	31.2	34.1	24.4	1.5	8.6	7.6
연평균		907.4	4.88	26.7	0.8	102.1	20.6	41.1	93.6	17.6	4.0	22.3	17.0

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>
겨울	2007~2016	149	4.65	51.8	1.0	227.2	35.8	69.8	202.7	23.8	6.2	47.0	29.5
	2017	11	4.94	21.1	0.2	79.6	20.3	34.1	69.3	19.8	2.9	18.2	13.5
봄	2007~2016	168	4.84	22.4	0.9	65.6	21.3	41.4	56.4	22.0	3.3	15.3	19.6
	2017	14	4.96	19.2	0.6	34.5	30.6	41.7	29.6	40.8	2.2	10.3	17.9
여름	2007~2016	216	4.93	15.8	0.8	47.9	14.0	23.1	40.7	13.5	2.6	10.3	8.0
	2017	15	4.87	13.1	0.5	17.0	20.1	24.1	16.4	20.6	0.8	3.8	4.2
가을	2007~2016	157	4.91	36.9	0.4	200.9	17.4	39.2	179.5	12.0	5.5	36.2	16.5
	2017	13	4.93	17.5	0.4	48.6	17.0	28.9	42.0	16.9	1.3	9.6	4.1

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

※ 2017년 7, 9월은 AWS고장으로 기상대 자료를 사용함.

○ 울릉도 부피가중평균

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
<b>연평균</b>		<b>1067.5</b>	<b>4.90</b>	<b>43.4</b>	<b>0.9</b>	<b>197.6</b>	<b>27.6</b>	<b>60.9</b>	<b>167.9</b>	<b>23.5</b>	<b>19.0</b>	<b>38.7</b>	<b>34.5</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	2007~2016	273	4.49	86.5	1.3	399.9	52.9	113.5	345.4	41.2	25.6	78.8	44.7
	2017	36	5.01	30.5	0.3	149.9	18.0	44.7	131.4	19.9	4.3	32.5	14.4
봄	2007~2016	145	4.91	44.0	1.5	165.7	35.4	77.3	129.7	38.7	30.8	33.1	50.2
	2017	14	5.16	24.2	0.5	99.6	24.0	40.5	88.4	25.1	3.7	21.2	16.7
여름	2007~2016	138	4.97	28.4	0.6	125.9	13.7	36.7	96.3	17.5	19.5	22.5	19.1
	2017	18	5.03	17.9	3.3	51.0	28.4	27.9	48.0	22.1	4.7	11.8	12.7
가을	2007~2016	202	4.86	44.5	0.7	211.6	23.0	55.1	173.9	17.3	21.7	40.4	34.2
	2017	18	4.89	33.7	0.6	172.4	15.7	41.4	151.3	15.1	5.1	34.2	10.0

## 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

※ 기상청 기후정보포털([www.climate.go.kr](http://www.climate.go.kr))의 홍보·열린마당에서 열람 가능

### 3. 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.
- 최병철, Y. Iwasaka, 임재철, 정상부, 김윤석, T. Dmitri, T. Nagatani, M. Yamada, 김상백, 홍기만, 이영근, 유희정 2005: 광학입자계수기를 이용한 안면도 연직 에어러솔 수농도 크기 분포 특성. 대기, 15, 149-153.
- 노영민, 김영민, 김영준, 최병철 2006: GIST / ADEMRC 다과장 라만 라이더 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이더 비 연구. 한국대기환경학회지, 22, 1-14.
- 구태영, 홍기만, 김상백, 공중웅, 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.
- 강창희, 김원형, 허철구, 강동훈 2012: 제주도 고산지역의 라돈 배경농도 실시

- 간 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.
- Matsuil, H., M. Koikel, N. Takegawa, Y. Kondol, A. Takami, T. Takamura, S. Yoon, S. W. Kim, H. C. Lim, and J. D. Fast, 2013:

- Spatial and temporal variations of new particle formation in East Asia using and NPF-explicit WRF-cham model: North-south contrast in new particle formation frequency. *Journal of Geophysical Research*, 118, 11,647–11,663.
- Panicker, A. S., S. H. Park, D. I. Lee, D. C. Kim, W. S. Jung, S. M. Jang, J. H. Jeong, D. S. Kim, J. g. Yu, and Harrison Jeong, 2013: Observations of black carbon characteristics and radiative forcing over a global atmosphere watch supersite in Korea. *Atmospheric Environment*, 77, 98–104.
- Park, S. Y., J. G. Park, C. S. Kim and I. C. Shin 2013: Clarification of methane emission sources using WDCGG data: Case study of Anmyeon-do observatory, Korea. *Asian journal of Atmospheric Environment*, 7-2. 85–94.
- Hong, H., 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.
- 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.
- 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.

#### 4. 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.)

## 5. 지구대기감시 보고서 작성자

### ○ 작성자

1장	머리말	환경기상연구과	기상연구소	김 수 민
2장	지구대기감시 현황 및 기상특성	환경기상연구과	기상연구소	김 수 민
3장	3.1 온실가스	환경기상연구과 서울대학교 극지연구소	기상연구소 교 수 선임연구원	이 해 영 김 준 최 태 진
	3.2 반응가스	환경기상연구과	기상연구소	김 수 민
	3.3 에어로졸	환경기상연구과	기상연구소	김 정 은
		"	기상연구소	이 상 삼
		"	기상연구소	임 한 철
		"	연 구 원	고 희 정
	3.4 대기복사	연세대학교	교 구 원	이 김 혜
		광주과학기술원	책임연구원	김 관 철
3.5 성층권오존	환경기상연구과 연세대학교 숙명여자대학교	연 구 원 교 수 교 수	이 송 삼 송 승 주	
3.6 자외선	환경기상연구과 연세대학교	연 구 원 교 수	송 승 주 김 준	
3.7 총대기침적	환경기상연구과	연 구 원	고 희 정	
3.8 기타	숙명여자대학교 제주대학교	교 수 교 수	오 정 진 강 창 희	
4장	지구대기감시 자료 통계 방법	환경기상연구과 "	기상연구관 기상연구관	한 상 옥 차 주 완

### ○ 작성 지원

환경기상연구과 기상주사	유 제 규	환경기상연구과 연구원	고미영	김은실	문세영
환경기상연구과 기상연구소	유 희 정		이 단	이동현	이세표
			이지선	정지영	최남원
			최은영	최홍우	함지영

---

## 2017 지구대기감시 보고서

---

발 행 일 : 2018년 6월

발 행 처 : 국립기상과학원 환경기상연구과

63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로

33 국립기상과학원

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

---

# 2017

## 지구대기감시 보고서

Report of Global Atmosphere Watch 2017

지구대기감시보고서는 기후정보포털([www.climate.go.kr](http://www.climate.go.kr))에서도 자료를 확인할 수 있습니다.  
기후변화감시통계는 통계법 제17조 및 제18조에 따른 국가승인통계자료로서 국가통계포털([kosis.kr](http://kosis.kr))을 통해 확인 할 수 있습니다.



책임운영기관

국립기상과학원

National Institute of  
Meteorological Sciences

63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33  
기상청 기후정보포털 [www.climate.go.kr](http://www.climate.go.kr)