

발 간 등 록 번 호

11-1360000-000991-10

2015 지구대기감시 보고서



차 례

요약	1
제1장 머리말	5
제2장 2015년 기상기후 특성	7
2.1 전지구 특성	7
2.2 한반도 특성	11
제3장 분야별 관측·분석 결과	15
3.1 온실가스	15
3.1.1 이산화탄소	15
3.1.2 메탄	23
3.1.3 아산화질소	25
3.1.4 육불화황	27
3.1.5 염화불화탄소류	29
3.1.6 산림생태계 이산화탄소	34
3.2 반응가스	39
3.2.1 오존	40
3.2.2 일산화탄소	43
3.2.3 질소산화물	46
3.2.4 이산화황	49
3.3 에어로졸	52
3.3.1 물리특성	53
3.3.2 광학특성	59
3.3.3 화학특성	75
3.4 대기복사	91
3.4.1 직달일사, 산란일사	92
3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사	94
3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사	96
3.4.4 순복사	97

3.5 성층권오존	98
3.5.1 오존전량	98
3.5.2 연직분포	107
3.5.3 남극 오존홀	114
3.6 자외선	116
3.6.1 자외선A 복사량	116
3.6.2 흥반자외선B 복사량	119
3.6.3 서울 자외선 복사량, 자외선 지수	125
3.7 총대기침적	130
3.7.1 2015년 강수특성	130
3.7.2 산성도	136
3.7.3 전기전도도	142
3.7.4 강수이온성분	144
3.7.5 강하분진	148
3.8 기타	151
3.8.1 서울의 수증기 농도 연직분포	151
3.8.2 고산의 라돈 농도	155
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법	163
4.1 온실가스, 반응가스	163
4.2 에어로졸	167
4.3 대기복사	170
4.4 성층권오존	172
4.5 자외선	173
4.6 총대기침적	174
참고문헌	175
부록	181
1. 지구대기감시 관측자료	182
2. 지구대기감시 현황	217
3. 기후변화감시 기술노트 목록	222
4. 기후변화감시 관측자료 활용논문 목록	223
5. 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황	225
6. 지구대기감시 보고서 작성자	226

요약

□ 온실가스

2015년 이산화탄소(CO₂) 연평균 농도는 안면도 407.0 ppm, 고산 406.5 ppm, 독도 404.3 ppm, 울릉도 404.2 ppm의 순으로 나타났다. 안면도는 처음 관측을 시작한 1999년 연평균 농도 370.7 ppm과 비교하여 지난 17년간 36.3 ppm 증가하였으며, 산업화 이전인 1750년 이산화탄소 전지구 평균농도 278.0 ppm와 비교하여 46.4% 증가하였다. 2015년 이산화탄소 성장률은 2.5 ppm/yr를 기록하였으며, 전 기간에 대한 이산화탄소 평균 성장률 2.3 ppm/yr 보다 0.2 높았다.

2015년 메탄(CH₄)의 연평균 농도는 1976.6 ppb로 2001년과 비교하여 지난 15년간 60.4 ppb(3.2%) 증가하였고, 아산화질소(N₂O)는 327.4 ppb로 1999년과 비교하여 지난 17년간 13.4 ppb(4.3%) 증가하였다. 육불화황(SF₆)은 9.7 ppt로 안정적으로 농도를 측정하였던 2008년과 비교하여 3.0 ppt(44.8%)로 급격히 증가하였다.

염화불화탄소류 CFC-11과 CFC-12은 1999년과 비교하여 각각 CFC-11 229.6 ppt(▽7.8 ppt), CFC-12 516.0 ppt(▽0.4 ppt)로 감소했고, CFC-113는 2007년과 비교하여 71.2 ppt(▽1.5 ppt) 감소하였다. 염화불화탄소류는 몬트리얼 의정서에 의한 사용규제로 평균농도가 전지구적으로 점차 낮아지는 추세에 있다.

□ 반응가스

반응가스는 대기질에 영향을 줄 뿐 아니라 온실가스와 에어로졸 생성의 전구물질로 작용하여 기후변화감시의 주요 관측요소이다.

2015년 오존(O₃) 농도는 안면도가 27.9 ppb로 최근 10년간(2005~2014년) 평균 39.1 ppb 보다 11.5 ppb 낮게 나타났으며, 매년 꾸준히 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면 고산의 농도는 45.7 ppb로 최근 4년간(2012~2015년) 평균 41.2 ppb 보다 4.5 ppb가 높게 나타났으며, 완만하게 증가하는 추세

를 보이고 있다.

2015년 일산화탄소(CO) 농도는 안면도가 293.5 ppb로 최근 9년간의 평균(270.4 ppb)에 비해 23.1 ppb가 높게 나타났고, 고산은 235.1 ppb로 최근 4년간의 평균(196.2 ppb)에 비해 38.9 ppb 높게 나타났다.

2015년 질소산화물(NOx) 연평균 농도는 안면도가 4.5 ppb로 최근 10년간 평균(7.4 ppb) 보다 2.9 ppb 낮았으며, 2011년 이후 최솟값을 기록하였다.

고산은 4.1 ppb로 최근 4년간 농도 평균(3.7 ppb) 보다 0.4 ppb 높게 나타났다.

2015년 이산화황(SO₂) 연평균 농도는 안면도가 1.4 ppb로 최근 10년간 평균(2.6 ppb) 보다 1.2ppb 낮게 나타났으며, 2012년 이후 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있다. 고산의 농도는 0.5 ppb로 최근 4년간 연평균 농도가 증가하지도 감소하지도 않고 0.5 ppb의 수준을 유지하고 있다.

□ 에어로졸

2015년 안면도에서 관측한 PM10 질량농도 연평균은 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최근 10년(2005~2014년) 평균(42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 약 17% 낮게 나타났으며 2005년 이후 대체로 감소하는 추세를 보이고 있다.

입경별 부피농도는 최근 8년 평균에 비해 1 μm 이하의 농도가 높게 나타났으며, 5월에서 8월 사이에 미세입자 영역의 농도가 높았다.

초미세먼지 수농도는 최근 10년 평균에 비해 다소 낮았으며 월별 수농도는 4~9월 사이에 가장 높게 나타났다. 고산은 최근 6년 평균에 비해 1 μm 이하의 농도가 높게 나타나는 특성을 보였다.

포집방식으로 측정된 PM10, PM2.5의 질량농도는 각각 $65.3 \pm 33.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=27), $30.1 \pm 19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=23)로 최근 10년간 평균(PM10 $76.4 \pm 48.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=361), PM2.5 $39.5 \pm 23.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=191) 보다 약간 높게 나타났다. PM10 에어로졸에서 이차오염물질 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 중 nss-SO_4^{2-} 의 농도는 2015년 $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 10년간 평균($14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 높게 나타났다. NO_3^- 는 2015년도는 $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최근 10년간의 평균($14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 낮게 나타났다. NH_4^+ 성분은 2015년 $10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간의 평균($9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 높은 값을 보였다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 2015년은 $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간 평균($1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 보다 2배 낮게 나타났다.

□ 대기복사

2015년 안면도의 연평균 직달일사량은 393.2 W/m^2 로 최근 10년간(2005~2014년) 평균 357.1 W/m^2 보다 높았고, 고산도 275.5 W/m^2 로 최근 6년간(2009~2014년) 평균 264.1 W/m^2 보다 높게 나타났다.

2015년 산란일사량은 안면도 194.0 W/m^2 로 최근 10년간 평균 192.8 W/m^2 과 비슷했으며, 고산도 196.8 W/m^2 로 최근 6년간 평균 203.0 W/m^2 과 큰 차이가 없었다.

안면도의 2015년도 직달일사 월평균 최댓값은 3월, 최솟값은 7월, 산란일사 최댓값은 6월, 최솟값은 12월로 나타났다. 고산의 2015년 월평균 최댓값은 직달일사 10월, 산란일사 7월, 최솟값은 직달일사와 산란일사 모두 12월로 나타났다.

2015년 안면도의 태양상향복사와 태양하향복사의 연평균 값은 79.2 W/m^2 , 410.9 W/m^2 로 최근 10년간 평균과 비슷하였다. 고산의 태양하향복사 연평균은 381.2 W/m^2 로 최근 6년간 평균 376.4 W/m^2 와 큰 차이가 없었다.

2015년 안면도의 지구상향복사와 지구하향복사는 각각 382 W/m^2 , 310 W/m^2 로 최근 10년간 평균 387 W/m^2 , 322 W/m^2 와 비슷하거나 작게 나타났다. 2015년 안면도 순복사 연평균은 77 W/m^2 로 최근 10년간 평균 75 W/m^2 와 비슷하였다.

□ 성층권오존/자외선

2015년 안면도 연평균 오존전량은 331 DU로 최근 10년간(2005~2014년) 평균 316 DU 보다 높고, 고산은 308 DU로 2012~2014년 기간의 평균 308 DU와 같았다. 2005년부터 오존전량은 증가와 감소를 반복하다가 2012년부터 안면도, 포항, 고산 모두 증가하고 있다. 오존전량은 비교적 봄에 많고 늦여름과 초가을에 적으며 계절 변화가 뚜렷하다.

안면도 오존전량 최댓값은 3월 381 DU이며, 최솟값은 10월 297 DU 이다. 고산도 3월 345 DU, 10월 281 DU로 안면도와 같이 3월에 최대, 10월에 최솟값이 나타났다. 월평균 기준으로 안면도는 연교차가 84 DU로 연평균 오존전량 기준 25%의 변동폭을 보였고, 고산은 21%의 변동폭을 보였다.

서울의 2015년의 연평균 오존전량은 330 DU로 나타났다. 이는 과거 참조값

(1985~2014년)의 324 DU에 비해서 약 1.85% 증가하였으며, 월별로는 2월에 최대 증가 12.2%를 보이고, 4월에 -0.3%로 최대 감소를 보였다.

2015년 자외선A 일 최대 복사량의 월평균은 대체적으로 5월과 8월에 높은 값을 보이는 경우가 많았으며, 연평균 변화는 안면도에서 전체 기간 동안 감소하는 경향을 보였다.

2015년 홍반자외선 일 최대 복사량의 월평균은 목포 5월, 안면도 6월, 강릉, 포항, 고산, 울릉도가 7월이 최대로 나타났다. 연평균 변화는 강릉, 목포가 2015년의 평균이 전체 기간 평균보다 훨씬 컸고, 안면도, 고산, 울릉도는 2015년의 평균이 전 기간 평균과 유사했지만 포항은 2015년의 평균이 전체 기간 평균 보다 훨씬 작게 나타났다. 관측 지점별 전체 기간의 평균을 비교해보면, 고산, 포항, 안면도, 목포, 울릉도, 강릉 순으로 나타났다.

□ 총대기침적

2015년 연강수량은 안면도 659.0 mm, 울진 819.1 mm, 고산 1774.5 mm, 울릉도 1370.2 mm로 고산이 가장 많았다. 최근 10년간(2005~2014년)과 비교할 때 안면도, 울진, 울릉도는 평년보다 적었고, 고산은 평년보다 많았다.

2015년도 안면도, 울진, 고산, 울릉도 강수의 평균 산성도(pH)는 4.55로, 최근 10년간 평균(pH 4.52) 보다 높았고, 2014년 평균(pH 4.57) 보다 낮았다. 2015년 지점별 평균 산성도는 안면도 4.41, 울진 4.71, 고산 4.69, 울릉도 4.52로 안면도가 가장 낮았고, 울진이 가장 높았다.

2015년 산성비 발생 비율을 2014년과 비교할 때 pH 5.6 이하에서 안면도와 울진은 증가하였고, 고산, 울릉도는 감소하였다. pH 4.5 이하에서 안면도는 감소하였고, 나머지 지역은 증가하였다.

강수이온성분은 2005년부터 2014년까지 평균과 2015년 평균 모두 모든 관측지점이 해안에 접해있어서 해염입자인 Na^+ 와 Cl^- 가 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 특히, 해염입자의 구성비가 안면도에서 가장 낮게, 울릉도에서 가장 높게 나타났다. 이온 구성 비율을 비교하면, 안면도는 해염입자가 증가한 반면 다른 이온성분은 감소하였다. 울진은 SO_4^{2-} 비율이 감소하였고, 고산은 평균에 비해 NH_4^+ 비율이 증가하였다. 안면도, 울진, 울릉도는 Na^+ 비율이 증가한 반면 고산은 Na^+ 비율이 감소하였다.

제1장 머리말

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC¹⁾)가 발표한 제5차 기후변화 평가보고서(2013)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(UNFCCC²), 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 원인물질의 대기 중 농도 변화를 기록할 뿐만 아니라 이들 물질의 전체 순환을 밝히기 위한 기초자료를 생산하는데, 이는 IPCC, 유엔 기후변화협약

1) IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

2) UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

(UNFCCC), 그 밖의 국제기구, 정부기관, 과학자 등에 제공되어 현재와 미래 기후시스템 변화를 분석·예측하여 기후변화 대응을 위한 정책 수립에 활용되고 있다.

현재, WMO 회원국 100개 이상의 국가에서 800개가 넘는 관측소를 GAW 관측시스템에 등록하여 운영하고 있으며, 우리나라 기상청은 1992년부터 GAW 프로그램에 참여하고 있다.

기상청에서 운영하는 안면도, 고산, 울릉도독도의 3개 기후변화감시 기본관측소와 포항, 목포 등 4개 보조관측소, 그리고 대학, 유관기관에서 운영하는 6개의 위탁관측소가 한반도 지구대기감시 관측망으로 운영되고 있으며, 이 중 안면도를 대표로 총 5개 지점이 GAW 지역급 관측소로 지정되어 있다.

한반도 지구대기감시 관측망에서는 GAW에서 권고하는 온실가스, 반응가스, 에어로졸, 대기복사, 성층권오존/자외선, 총대기침적 분야 총 37종의 요소를 관측하고 있으며, 동북아시아 지역을 대표하는 수준 높은 관측자료 제공과 연구활동을 통해 국제 네트워크와 프로그램에 활발히 참여하고 있다.

지난 2011년에는 대표적 온실가스 중 하나로 대기 중 극히 미량으로 존재하는 육불화황(SF₆)의 측정 기술을 인정받아 WMO로부터 육불화황 세계표준센터(World Calibration Centre)로 지정되었으며, 2015년에는 강수화학 국제비교실험과 온실가스 관측기술 적합성 평가 등에서 세계 최고 수준의 기술을 보유한 것으로 평가 받았다.

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.

2015년에는 보다 종합적이고 신뢰도 높은 자료 제공을 위해 전지구·한반도의 기상기후 특성을 추가하였고, 급변하는 최근 기후변화의 특성을 파악하기 위해 온실가스를 제외하고, 최근 10년간(2005~2014년)의 평균을 임의 평년값으로 정해 2015년 관측값과 비교 분석하였으며, 관측 요소별 자료 품질관리 방법을 개선하고 관련 정보를 제4장 지구대기감시 자료 통계 방법에 수록하였다.

제2장 2015년 기상기후 특성

2.1 전지구 특성

2.1.1 기온 특성

2015년 전지구 평균기온은 14.8℃로 20세기 평균(13.9℃)에 비해 0.9℃ 높았으며, 1880년 이래 가장 높은 기온으로 기록되었다(2위 2014년/+0.74℃).

2015년 초반부터 엘니뇨가 발달하기 시작하여 하반기에 역대 가장 강력했던 1997/98 엘니뇨에 버금갈 크기로 매우 강하게 발달하면서 2015년 전지구 평균기온 상승에 기여했다. 전지구 평균기온이 1880년 이래 10년에 약 0.07℃씩 상승하고 있으며, 전지구 평균기온이 20세기 평균보다 높았던 해가 39년째 계속되고 있다. 또한, 지난 136년 동안 기온이 높았던 순으로 1위부터 16위에 해당하는 해를 살펴보면, 1998년(6위)을 제외하고 모두 2000년대 이후의 해인 것으로 나타났다.

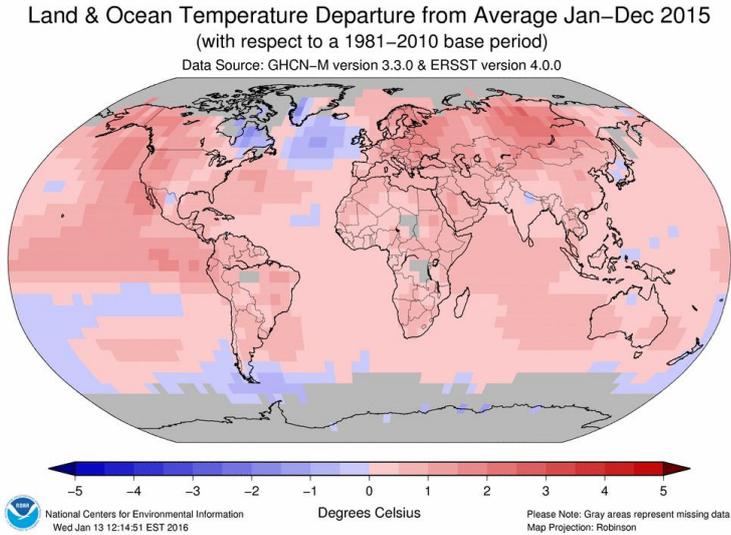


그림 2.1.1 2015년 전지구 평균기온 편차
평년: 1981~2010년 (출처: 미국국립해양대기청)

전지구 연평균기온 편차 분포(그림 2.1.1)를 살펴보면, 전 세계 대부분 지역에서 평년보다 높은 기온 편차가 나타났다. 특히, 중앙아메리카, 유럽, 중앙시베리아 동쪽 부분에서 기온이 평년보다 높았으며, 캐나다 퀘벡 일부와 아르헨티나 남부 끝에서는 평년보다 낮았다.

가. 아시아

아시아의 2015년 평균기온은 역대 가장 높았다. 중국에서는 1월 평균기온이 평년보다 1.9℃ 높았으며, 1961년 이래 가장 높았다. 11월까지의 월별 기온이 평년보다 모두 높았다. 홍콩에서는 1884년 이래 6월과 7월 평균기온이 평년보다 높았다. 일본에서는 4월 기온이 일본 동쪽 중심으로 역대 가장 높았으며, 5월에는 북쪽지방도 기온이 높았다.

나. 북아메리카

북미 동부에서는 2015년 초반에 기온이 평년보다 낮았으나, 북미 대륙의 2015년 평균기온이 관측 이래 다섯 번째로 높았다. 미국은 2015년 평균기온이 20세기 평균기온보다 1.3℃ 높았으며, 관측 이래 두 번째로 높았다. 알래스카에서는 2015년 평균기온이 평년보다 2.3℃ 높아, 1925년 이래 두 번째로 높은 해로 기록되었다. 캐나다 서부는 대부분 지역에서는 여름철 평균기온이 관측 이래 가장 높았다.

다. 남아메리카

남아메리카에서는 대륙 전반적으로 2015년 평균기온이 관측 이래 가장 높았다. 아르헨티나에서의 2015년 평균기온은 지난 55년 중에 두 번째로 높았다. 칠레에서는 2015년 월별 평균기온이 평년보다 높았으나, 10월 평균기온은 평년보다 낮았다.

라. 아프리카

북아프리카에서는 2015년에 평균기온이 2010년 다음으로 높았다. 1980년 이래 2015년 여름철 평균기온이 네 번째로 높았고, 9월, 10월, 11월의 평균기온이 열 번째로 높았다. 남아프리카에서는 봄철에 기온이 높았다. 그리고 남아프리카의 Vredendal에서는 10월 27일 기온이 48.4℃까지 올라갔으며, 이 값은 가장 높은 기온을 나타냈던 1999년 10월 30일의 기온보다 5.9℃ 높았다.

마. 유럽

2015년 평균기온은 프랑스에서 평년보다 1.0℃ 높았으며, 1900년 이래 세 번째로 높았다. 네덜란드에서는 1706년 이래 다섯 번째로 높았다. 스페인에서

는 평년보다 0.94℃ 높았으며, 과거 51년 중에 가장 높았다. 핀란드에서는 평년보다 1.9℃ 높았으며, 관측 이래 가장 높았다. 독일에서는 평년보다 1.7℃ 높았으며, 지난 135년 중에 두 번째로 높았다.

바. 오세아니아

호주에서는 2015년 평균기온이 평년(1961~1990년)보다 0.83℃ 높았으며, 지난 106년 중 다섯 번째로 높았다. 뉴질랜드에서는 2015년 평균기온이 평년보다 0.1도 높았으며, 평년과 비슷했다.

2.1.2 강수량 특성

2015년 전지구 육지 강수량은 1961~1990기간 평균 강수량(1,033 mm)보다 22.5 mm 적었다. 미국 동부, 남아메리카 남부, 유럽 북부와 남동부, 일본에서 강수량이 평년보다 많았으며, 브라질 동부, 유럽 중부, 남아프리카, 몽골, 아시아 남동부에서 강수량은 평년보다 적었다. 극한 강수와 가뭄이 전세계에 걸쳐 발생했다.

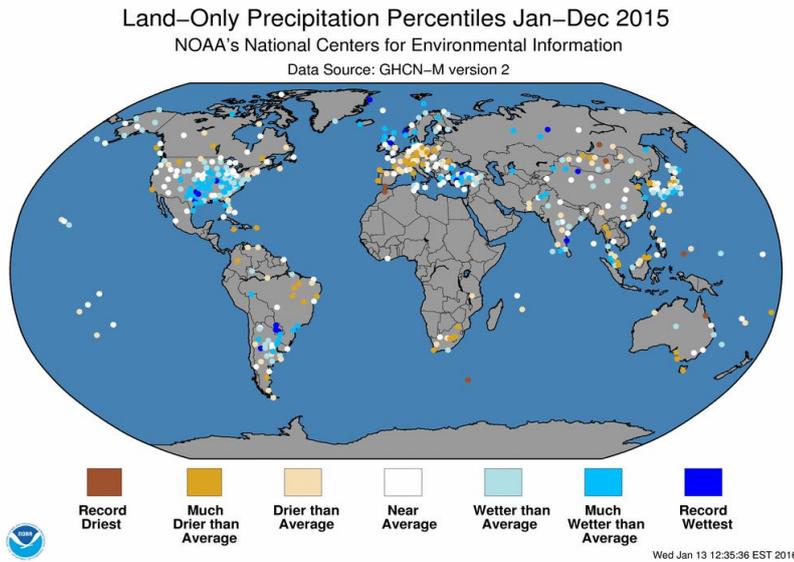


그림 2.1.2 2015년 전지구 강수량 백분위수
(출처: 미국국립해양대기청)

가. 북아메리카

미국 시에라네바다 산맥 부근에서 눈이 적어 미국 서부에서의 가뭄이 3월 말에 심화되었다. 캘리포니아 98% 이상의 지역에서 전혀 없는 가뭄으로 제한 급수를 실시하였다. 멕시코에서는 5월 강수량이 평년대비 373%를 기록하였으며, 1941년 이래 1위를 기록하였다. 멕시코의 바하 캘리포니아에서 6월 강수량이 관측 이래 1위를 기록하였다.

나. 남아메리카

아르헨티나에서 2월에 폭우가 내렸으며, 8월에 아르헨티나 북동부에서 집중 호우로 인해 강이 범람하고 홍수가 발생하였다. 칠레에서는 1월에 50년 만에 극심한 가뭄이 발생하였다. 그러나 3월 말 가뭄이 심했던 칠레 북부의 아타카마와 안토파가스타에는 폭우가 내렸으며, 일부 지역은 연강수량을 넘는 비가 내렸다. 브라질은 1년 내내 가뭄이 지속되고 있다.

다. 아프리카

남아프리카는 2014년 7월~15년 6월 기간에 1991/92년 이래로 가장 건조했으며, 1932/33년 이래로는 세 번째로 건조했다. 앙골라에서는 3월 중순에 집중호우로 인한 홍수가 발생하였으며, 모로코와 알제리 그리고 튀니지에서는 2월에 폭우가 내렸다.

라. 유라시아

유럽 남부에서는 2월에 폭우가 내렸다. 스웨덴 수도인 스톡홀름에서는 200년 만에 역대 가장 많은 강수를 기록하였다. 노르웨이에서는 116년 만에 두 번째로 많은 비가 내렸다. 스페인에서는 5월에 가뭄이 1947년 이래 가장 심했다. 영국에서는 2015년 총 강수량이 지난 116년 기간 중 여섯 번째로 많았다. 늦가을부터 연말까지 폭풍이 계속되면서 영국 북부와 서부지역에 홍수가 발생하였다. 프랑스에서는 2015년 총 강수량이 평년대비 90% 이하였으며, 지난 50년 중 열 번째로 적었다. 중국에서는 5월 5일부터 31일까지 화남북동지역의 강수량이 평년대비 150%를 기록하였으며, 40년 만에 가장 많았다.

마. 오세아니아

호주는 2월 강수량이 평년대비 49%로, 역대 열한 번째 적은 것으로 기록되었으며, 8월 강수량은 평년대비 35%로, 1991년 이래 가장 적었다. 뉴질랜드에서는 6월에 가뭄과 홍수가 동시에 나타났다. 6월 20일에서 21일 사이에 뉴질랜드 북부 아래쪽에 집중호우가 내렸으며, 특히 왕거누이에서는 24시간 동안 100 mm가 넘는 비가 내려 최악의 홍수가 발생하였다.

2.2 한반도 특성

2015년 한 해 동안 이상고온, 대설, 집중호우, 가뭄, 한파 등 다양한 이상기후가 발생하였다(2015 기상연감). 5월에는 이상고온 현상으로 인해 1973년 이래 5월 전국 평균기온 최고 1위를 기록했으며, 장마기간(6.24~7.29) 동안에는 전국 평균 강수량이 평년대비 73%로 적게 나타났다. 또한, 전국 연평균 강수량은 평년대비 72%로 1973년 이래 역대 최저 3위를 기록할 정도로 강수량이 부족하였다. 특히 수도권을 중심으로 강수량이 평년대비 60% 미만으로 적었으며, 제주도와 남해안지방을 제외한 대부분 지방에서 겨울철까지 가뭄 현상이 지속되었다. 그러나 11월에는 비가 온 날이 절반(14.9일)으로 1973년 이래 역대 최다 1위를 기록하는 등 다양한 이상기후가 발생하였다.

2.2.1 기온, 강수량 특성

2015년 전국의 연평균기온은 13.4℃, 평균최고기온은 18.8℃, 평균최저기온은 8.7℃로 평년보다 각각 0.9℃, 0.7℃, 1.0℃가 높았다. 1973년 이래 연평균기온과 연평균최저기온은 두 번째로, 연평균최고기온은 네 번째로 높았다.

연평균강수량은 948.6 mm로 평년대비 72.1%였으며, 강수일수는 112.8일로 평년보다 9.3일 많았다. 연평균강수량은 1973년 이래 최소 세 번째로 적은 강수량을 보였다. 2015년 장마기간은 제주도, 남부지방, 중부지방에서 각각 30일(6.24.~7.23.), 36일(6.24.~7.29.), 35일(6.25.~7.29.)로 남부지방과 중부지방은 평년보다 길었으나, 제주도는 평년보다 짧았다. 장마기간 강수량은 남부지방과 중부지방에서 각각 254.1 mm와 220.9 mm로 평년(348.6 mm, 366.4 mm)보다 적었으나, 제주도에서는 518.8 mm로 평년(398.6 mm)보다 많았다. 지난 30년간(1981~2010년) 장마기간 전국 평균 강수량은 356.1 mm, 강수일수는 17.1일이고, 2015년 장마기간 전국 평균 강수량은 240.1 mm, 강수일수는 17.5일을 보였다. 연대별 장기변화 경향을 살펴보면 전국과 서울의 연평균기온은 꾸준히 상승하고 있으며, 평균최저기온의 상승폭이 평균최고기온의 상승폭에 비해 크게 나타나고 있다. 2000년대 연평균호우일수(1시간 최다강수량 30 mm이상이고, 일강수량 80 mm이상인 날)는 1970년대에 비해 서울이 약 2~3배 증가하였다.

전국 2015년(1~12월) 기상자료 특성(1973~2015)  기상청

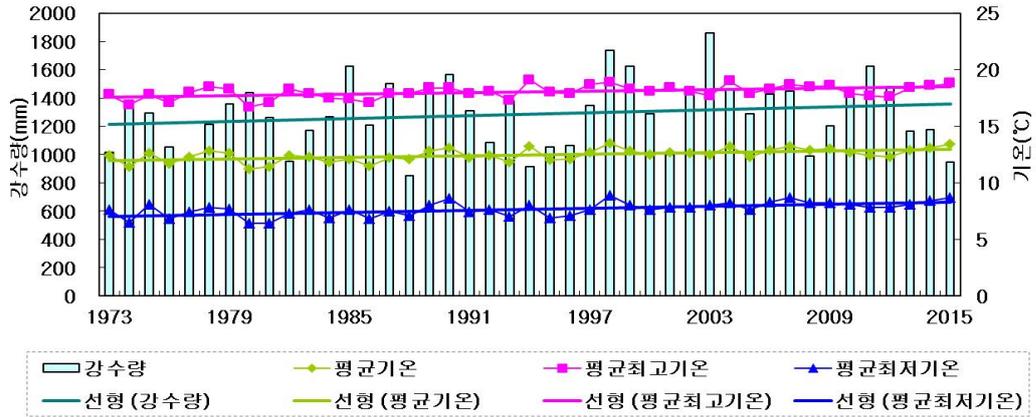


그림 2.2.1 평균기온, 평균최고·최저기온, 평균강수량(1973~2015년)
(출처: 2015 기상연감)

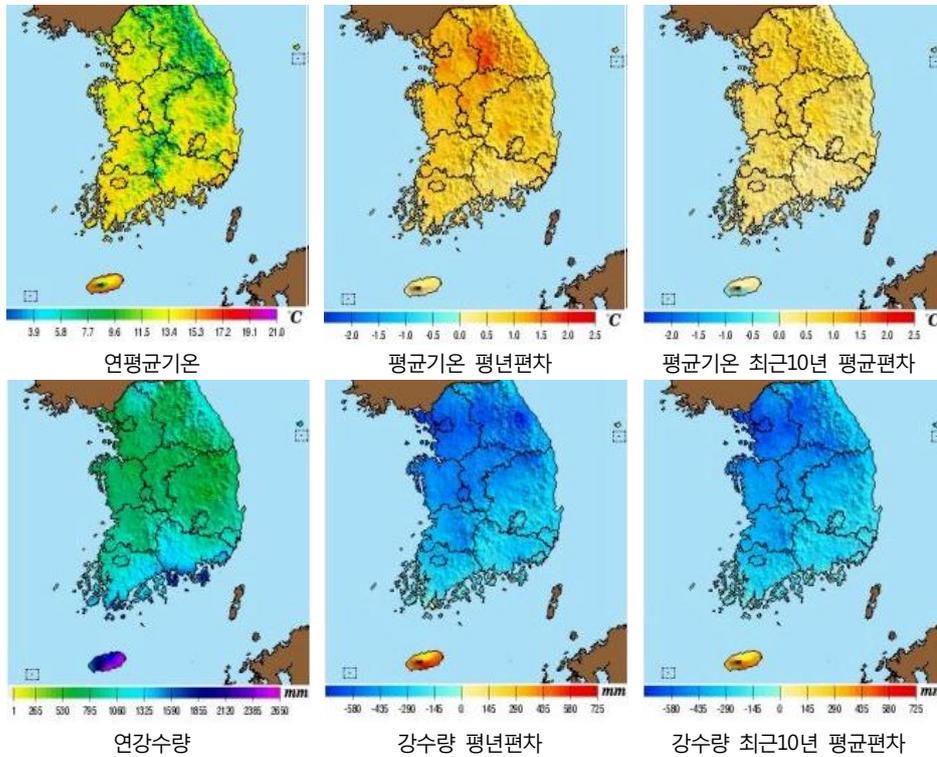


그림 2.2.2 2015년 평균기온, 강수량과 평년값 비교
(출처: 2015 기상연보)

2.2.2 계절별 특성

겨울철(2014.12.~2015.2.) 전국의 평균기온은 0.7℃, 평균최저기온은 -3.8℃로 평년보다 0.1℃, 0.3℃ 높았고, 평균최고기온은 5.7℃로 평년보다 0.4℃ 낮았다. 강수량은 76.7 mm로 평년의 86.5%였고, 강수일수는 26.1일로 평년보다 6.3일이 많았으며 1973년 이래 세 번째로 많은 강수일수를 보였다.

봄철의 전국 평균기온은 12.7℃, 평균 최고기온은 19.1℃, 평균 최저기온은 6.7℃로 평년보다 각각 1.0℃, 1.2℃, 0.7℃ 높았다. 강수량은 223.1 mm로 평년의 88.9%수준이었고, 강수일수는 25.9일로 평년보다 1.4일 많았다. 봄철의 평균기온과 평균 최고기온은 1973년 이래 최고 3위, 평균최저기온은 최고 5위를 기록하였다.

여름철 전국 평균기온은 23.7℃, 평균 최고기온은 28.7℃, 평균 최저기온은 19.8℃로 평년보다 각각 0.1℃, 0.3℃, 0.1℃ 높았다. 강수량은 387.0 mm로 평년의 53.9%를 보였고 강수일수는 33.8일로 평년보다 3.5일 적었으며 1973년 이래 여름철 강수량은 최저 3위, 일강수량 80 mm 이상 일수는 최소 3위를 기록하였다.

가을철 평균기온은 15.2℃, 평균최고기온은 20.6℃, 평균최저기온은 10.6℃로 평년보다 각각 1.1℃, 0.5℃, 1.4℃ 높았다. 강수량은 247.7 mm로 평년의 95.0% 수준이었으며, 강수일수는 27.8일로 평년보다 6.0일이 많았다. 1973년 이래 평균기온은 최고 4위, 평균최저기온은 최고3위를 기록하였다.

2.2.3 주요 관측지점 기상특성

한반도를 대표하는 안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시 기본관측소의 동일 지역 내 기상관서에서 2015년에 관측한 기상자료를 아래 그림 2.2.3과 표 2.2.1로 나타내었다. 안면도는 인근 (구)서산기상대의 자료를 사용하였다.

그림 2.2.3은 바람장미로 방위별 풍향 출현 빈도와 풍향별 풍속계급 빈도를 나타내며, 표 2.2.1은 지점별 주요 기상요소의 월별 평균을 나타낸다.

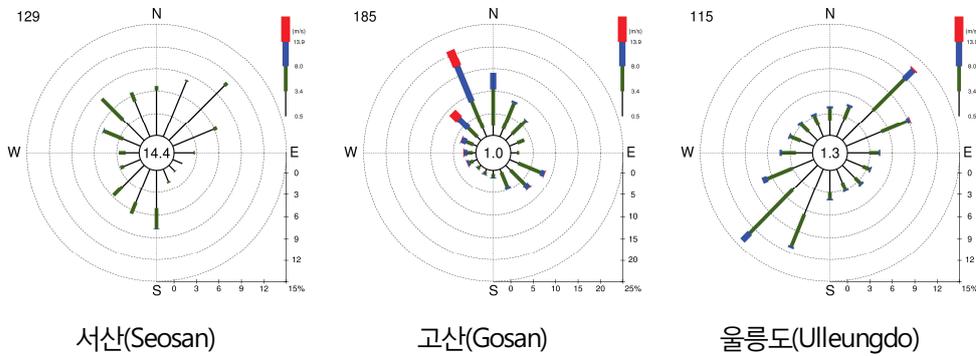


그림 2.2.3 2015년 바람장미, 막대는 바람이 불어오는 방향, 길이는 해당등급의 바람 빈도, 중앙 원 속의 값은 무풍(0.5 m/s 미만)일 경우를 나타냄
(출처: 2015 기상연보)

표 2.2.1 2015년 기후변화감시 주요지점 기상관측 자료

요소	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	전년	평년
평균 기온 (°C)	서산	-0.4	1.0	4.9	11.9	16.8	21.3	24.1	24.9	20.7	14.8	9.5	2.8	12.7	11.9
	고산	6.9	6.5	9.4	13.3	16.7	20.0	23.8	25.6	22.3	18.6	14.6	9.5	15.6	15.6
	울릉도	2.3	2.6	6.6	11.2	17.9	19.4	22.3	24.4	19.2	15.4	10.4	5.4	13.1	12.4
강수량 (mm)	서산	20.7	23.1	20.6	116.8	40.6	64.1	158.5	63.1	15.1	73.1	156.6	63.6	815.9	1285.7
	고산	58.9	62.5	91.3	163.1	232.0	225.0	167.2	84.0	222.8	21.8	123.5	94.3	1546.4	1142.8
	울릉도	154.0	90.1	37.3	67.7	35.9	102.8	98.6	158.9	73.2	46.1	429.4	99.5	1393.5	1383.4
평균 습도 (%)	서산	73	72	63	71	70	82	88	88	79	80	90	81	78	74
	고산	70	69	70	82	80	90	92	86	77	69	78	69	78	75
	울릉도	67	62	55	63	56	79	80	79	76	61	74	66	68	74

※ 위치정보: 서산(36°46′ 126°30′ 해발 28.9m), 고산(33°18′ 126°10′ 해발 71.5m),
울릉도(37°29′ 130°54′ 해발 222.4m)

제3장 분야별 관측·분석 결과

3.1 온실가스

온실가스는 대부분의 태양복사를 투과시키고 지표면이 방출하는 막대한 양의 장파복사를 흡수하는 대기 중에 존재하는 기체를 말한다. 이들은 긴 체류시간으로 한 번 배출되면 대기에 지속적으로 누적되어 지구온난화를 가속시키는 역할을 한다. 대기 중 온실가스 농도는 지구온난화를 야기하는 온실가스의 직접적 영향을 추산할 수 있을 뿐 아니라, 배출원과 소멸원의 변화를 유추할 수 있는 좋은 근거자료이며 유엔 기후변화협약(UNFCCC)의 제3차 당사국총회(일본 교토, 1997)에서는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄소(CFCs), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 규제대상의 온실가스로 규정하였으며, 제17차 당사국총회(남아프리카공화국 더반, 2011)에서는 여기에 삼불화질소(NF₃)를 추가하였다.

기상청은 안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시소에서 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 육불화황, 염화불화탄소류(CFC-11, CFC-12, CFC-113) 등 7종을 관측하고 있으며, 위탁관측소인 서울대학교(광릉)에서 산림 이산화탄소 플럭스를 관측하고 있다. 기상청은 안면도 기후변화감시소의 관측을 기준으로 1999년부터 현재까지 총 17년간의 온실가스 배경대기농도 관측자료를 확보하고 있다.

3.1.1 이산화탄소(CO₂)

이산화탄소는 지구온난화를 유발하는 주요 원인물질로 인간의 화석연료 소비증가로 배출되는 대표적인 온실가스이다. 이산화탄소의 전지구 평균 농도는 꾸준히 증가하고 있으며 관측단위는 ppm(part per million, 100만분의 일)이다. 일반적으로 이산화탄소는 배출되어 대기 중에 머무르는 잔류 기간이 100~300년이나 된다. 모든 온실가스의 전지구 복사강제력이 산업화이전 시기(1750년 이전)와 비교하여 2.83 W/m²에 이르며 이중 이산화탄소가 차지하는 전지

구 복사강제력은 1.83 W/m^2 (64.3%)에 이르는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2013).

가. 안면도

2015년 안면도에서 관측된 이산화탄소 연평균 배경대기 농도는 407.0 ppm이다. 안면도에서 처음 이산화탄소 농도를 관측한 1999년 연평균 농도 370.7 ppm과 비교하여 17년간 36.3 ppm 증가하였으며 1999년 농도 대비 9.8% 증가하였다. 산업화 이전인 1750년 이산화탄소 전지구 평균농도 278.0 ppm와 비교하면 46.4% 증가한 값이다.

그림 3.1.1은 1999년부터 2015년까지 안면도의 이산화탄소 배경대기 농도 시계열이다. 안면도의 이산화탄소 농도는 1999년부터 꾸준히 증가하여 2012년에는 처음으로 연평균 농도가 400 ppm을 돌파하였다. 이후에도 지속적으로 상승하여 연평균 농도가 매년 높아지고 있다.

2015년 이산화탄소 성장률은 2.5 ppm/yr 를 기록하였으며 전 기간에 대한 이산화탄소 평균 성장률 2.3 ppm/yr 보다 0.2 ppm/yr 높았다. 또한, 이산화탄소의 배경대기 농도는 계절변동 성분과 추세변화 성분으로 뚜렷이 구분된다.

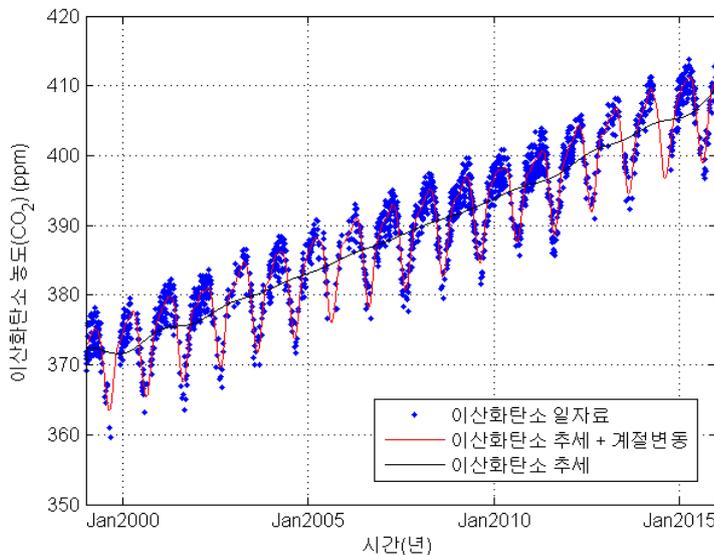


그림 3.1.1 1999년부터 2015년까지 안면도의 CO₂ 배경대기 농도

그림 3.1.2는 1999년부터 2015년까지 안면도 이산화탄소 농도의 주기분석 결과이다. 이산화탄소 농도의 주성분은 1년 주기의 계절변동 성분과 장기 추세 변화 성분이 가장 큰 것으로 나타난다.

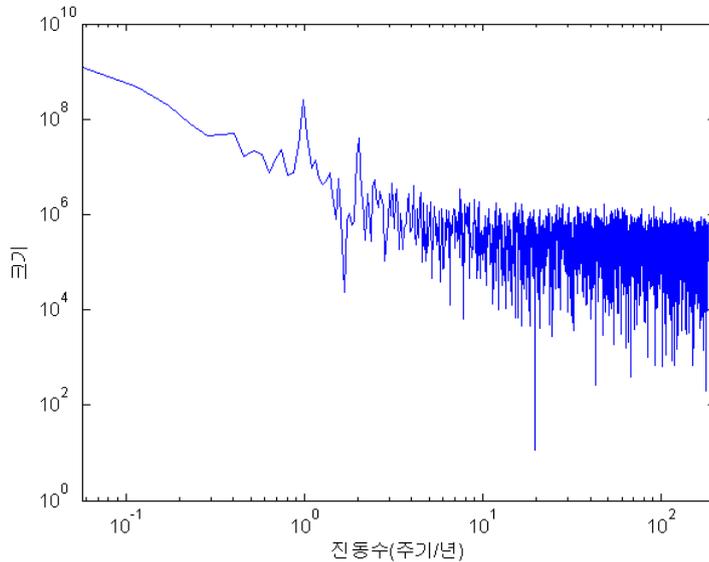


그림 3.1.2 1999~2015년까지 17년간 안면도의 CO₂ 농도 주기분석

표 3.1.1은 2015년 안면도 기후변화감시소에서 관측된 이산화탄소 농도의 월평균, 연평균 농도이다. 2015년 이산화탄소의 배경대기 농도는 4월에 최댓값(411.1 ppm)을, 8월에 최솟값(399.2 ppm)을 기록하였다.

표 3.1.1 2015년 안면도에서 관측한 CO₂ 월평균과 연평균 농도(ppm)

2015년	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
평균값	409.2	410.2	410.6	411.1	410.0	406.3	402.0	399.2	400.8	405.5	409.0	410.4	407.0

그림 3.1.3은 1999~2015년까지 이산화탄소 월평균의 시계열과 $\pm 1\sigma$ 표준편차를 오차막대로 나타내었다. 17년간 평균한 이산화탄소 월평균 농도 또한 4월에 최댓값, 여름철인 8월에 최솟값을 기록하였다. 중국에서 불어오는 편서풍이 강한 계절에 대체로 한반도의 이산화탄소 농도가 높고, 북서태평양에서 깨

끗한 남서풍이 들어오는 여름철에 이산화탄소 농도가 낮게 나타나는 경향을 보여주고 있다. 우리나라를 포함한 북반구에서 이산화탄소 계절변동 특징은 바람에 의한 수송과 식생의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다.

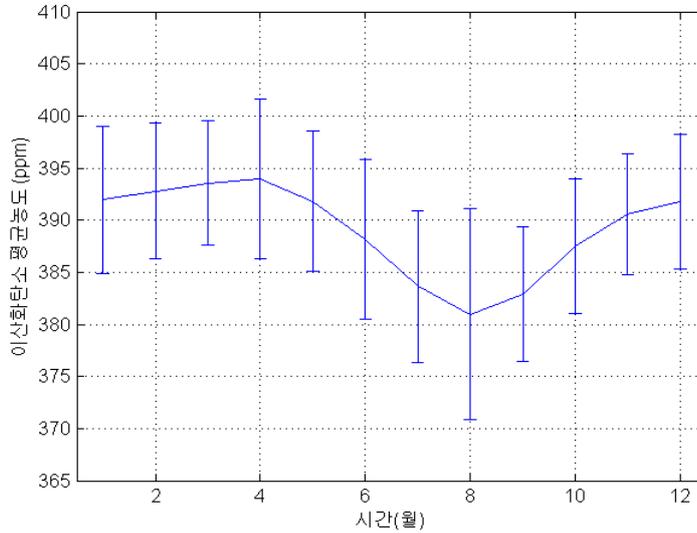


그림 3.1.3 지난 17년간(1999~2015년) 안면도의 CO₂ 월평균 농도의 시계열과 $\pm 1\sigma$ 표준편차

그림 3.1.4는 안면도와 비슷한 북반구 위도 대에 위치한 미국 하와이 마우나로아(Mauna Loa) 관측소와 일본 료리(Ryori) 관측소에서 측정된 이산화탄소 농도의 시계열 그림이다. 특히, 1958년부터 이산화탄소 농도를 측정해 온 마우나로아 관측소는 GAW 지구급 관측소로 지구에서 가장 오래된 이산화탄소 실시간 관측자료를 확보하고 있는 곳이다. 북반구에 위치한 3곳의 관측소 모두 관측 이래 지금까지 꾸준히 이산화탄소 농도가 증가하고 있으며, 최근 들어 안면도뿐만 아니라 다른 두 관측소에서도 이산화탄소 농도가 400 ppm을 넘어 섰다. 일반적으로 북반구에 위치한 많은 GAW 관측소의 이산화탄소 농도는 뚜렷한 계절변동 성분을 가지고 있어 그 시계열이 그림 3.1.4와 같이 톱니모양 형태로 증가한다.

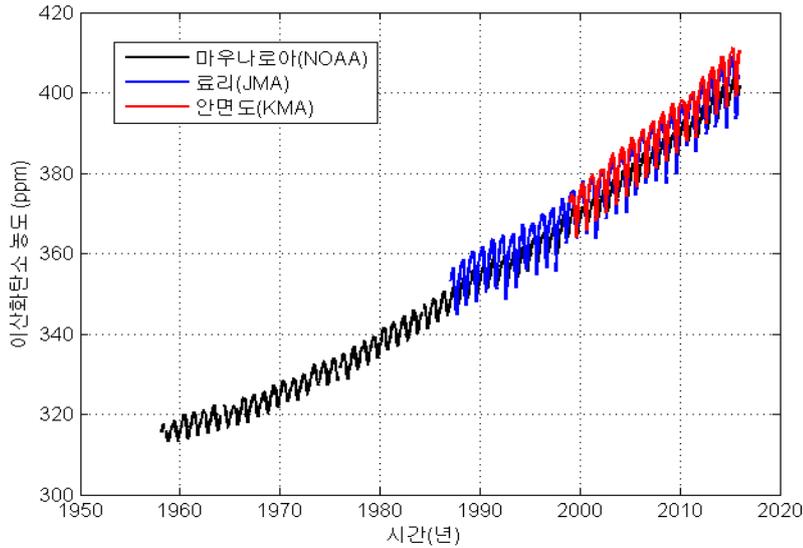


그림 3.1.4 우리나라 안면도(Anmyeondo), 미국 마우나로아(Mauna Loa), 일본 료리(Ryori)에서 관측한 CO₂ 농도

나. 고산, 울릉도독도

2015년 고산과 울릉도독도 기후변화감시소의 이산화탄소 연평균 농도는 각각 고산 406.5 ppm, 울릉도 404.2 ppm, 독도 404.3 ppm로 관측되었다. 각 지점의 이산화탄소 연평균 농도에 안면도 연평균 농도(407.0 ppm)를 뺀 차이는 고산 -0.5ppm, 울릉도 -2.8 ppm, 독도 -2.7 ppm 이다. 이산화탄소 연평균 농도가 가장 높은 곳이 안면도이며 그 다음으로 고산, 독도, 울릉도 순으로 나타났다(표. 3.1.2). 이산화탄소 월평균 최고값은 모든 관측소에서 4월에 나타났으며 월평균 최저값 또한 모든 관측소에서 8월에 나타났다.

표 3.1.2 2015년 고산, 울릉도독도의 CO₂ 월평균과 연평균 농도

2015년	감시소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
이산화탄소 (CO ₂) [단위: ppm]	고산	406.9	408.5	409.6	410.3	409.6	406.9	403.2	399.8	400.4	405.0	408.3	409.5	406.50
	울릉도	407.7	408.8	409.6	410.3	409.2	402.9	395.2	392.2	395.4	402.9	407.5	409.0	404.23
	독도	406.4	407.5	408.8	409.5	408.5	404.8	398.6	394.3	396.2	402.0	406.5	408.1	404.27

다. 남극세종과학기지

남극 세종과학기지에서는 2010년 1월부터 파장스캔 공동감쇄분광기(Wavelength-scanned cavity ring down spectroscopy, WS-CRDS)를 이용해 이산화탄소 농도를 관측해 왔다. 그리고 2010년 10월 26일에 이산화탄소 농도를 포함하여 성층권 오존 농도 등의 관측요소에 대해 WMO/GAW 프로그램의 지역급 관측소로 등재되었다.

세종과학기지에서의 이산화탄소 농도 관측장비는 WS-CRDS 방식의 CO₂/H₂O 분석기(G1200, Picarro Inc, USA)와 제습 장치, 그리고 유량 조절 및 교정 장치로 구성되어 있다. WS-CRDS 방식의 기본 원리는 정밀하게 세부 조정(tuning)된 파장을 공동(cavity)에 보내어 흡수소멸(ring down)되는 시간을 흡수 강도(absorption intensity)로 변환하여 정량화하는 것이다. 관측동 옥상 약 2.7 m 높이(지표면으로부터 약 6 m)의 흡입구(Inlet)에서 포집되는 샘플 공기는 펌프에 의해 제습장치에 도달한다. 두 개의 네피온 드라이어(25 cm)와 화학시료 트랩(Mg(ClO₄)₂)으로 이루어진 제습장치에서 수증기가 제거되고, 기체유량제어시스템인 MFC(mass flow controller)에 의해 일정하게 조절된 유량(400 ml min⁻¹) 중 약 250 ml min⁻¹의 양만 최종적으로 분석기에 도달하여 분석된다.

2015년에는 3월 중순부터 6월 중순에 내장펌프를 교체하기 전까지 관측이 중단되었으며, 11월 하순에도 장비 고장으로 자료수집이 원활하지 않았다. GAW 관측 기준에 맞는 자료 생산이 어려웠으나, 상대적으로 큰 환경 변화를 겪고 있는 남극반도 주변에서의 이산화탄소 농도의 추세를 이해하는 데에는 활용이 가능할 것으로 보인다. 또한 2015년부터 남극대륙 연안에 위치한 남극장보고과학기지(74° 37' S, 164° 13' W)에서 이산화탄소와 메탄 농도의 측정을 시작하였는데(극지연구소, 2016a), 이는 지리적, 기후학적 차이와 서로 다른 대기 순환 과정의 영향을 받는 두 지역에서의 이산화탄소 거동 그리고 이산화탄소 흡원으로써의 남빙양의 역할에 대한 보다 나은 이해를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

그림 3.1.5는 2015년 남극세종과학기지에서 측정된 월평균 풍속과 기온의 변동이다. 풍속은 하계기간 상대적으로 약하고, 겨울에 강한 전형적인 모습을 보인다. 1월 평균 풍속이 7.1 m/s로 가장 약하였고, 6월이 8.9 m/s로 가장 강하였다. 풍향은 예년과 비슷하게 북서풍 계열이 가장 많았다. 연평균 풍속은

8.1 m/s로 예년의 8.0 m/s와 거의 같았다. 기온의 경우 2월이 1.8℃로 가장 높았고, 6월과 7월이 -7℃로 가장 낮았다. 연평균 기온은 -2.3℃로 예년에 비해 0.5℃ 낮았다. 예년에 비해 2015년의 기상 특징은 기압이 다소 낮았으며 관측 이래 가장 낮은 기압이 기록되었다. 또한 강수량이 약 55% 증가하였다. 보다 자세한 기상정보는 극지연구소(2016b)을 참조하면 된다.

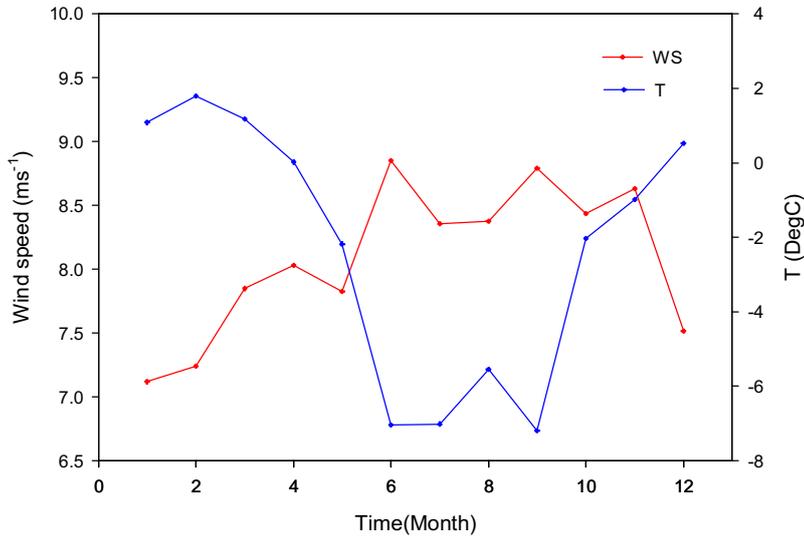


그림 3.1.5 2015년 남극세종과학기지의 월평균 풍속과 기온 변화

2015년 수집된 이산화탄소 농도 자료는 약 60%이다. 월별로 살펴보면, 3월과 4월은 관측이 이루어지지 않아 이용 가능한 자료가 없으며, 5월과 6월은 50% 이내, 나머지 월은 70~90% 이나 12월의 경우 장비의 이상으로 사용할 수 있는 자료가 없었다. 앞에서 샘플한 공기의 수증기로 인한 제습 및 펌프 작동의 문제가 언급되었다. 이에 공동감쇠분광기(CRDS)로 측정된 수증기 농도를 분석한 결과 예상과는 달리 월평균 0.007% 이내로 2010년부터 관측된 자료 중 가장 낮았다. 이로부터 어느 정도 오차 범위 내에서 자료 사용이 가능한 것으로 판단된다.

그림 3.1.6은 2010~2015년의 6년 동안 월평균 이산화탄소의 연변동이다. 매년 세종과학기지에서 측정되는 이산화탄소의 농도 증가가 뚜렷하게 나타난다. 2015년의 월평균 이산화탄소 농도의 크기 및 연변동은 다른 해의 값들 변동과 잘 일치한다. 다른 해의 이산화탄소 농도 최저값은 1~2월 중, 최고값은

9~10월에 나타나는데 2015년의 경우도 이와 잘 일치한다. 2015년 이산화탄소 월평균 최솟값은 1월 395.6 ppm, 최댓값은 9월과 10월 398.4 ppm으로 나타났다. 월 최댓값에서 월 최솟값의 차이는 2.8 ppm으로 결측이 많았던 2014년 자료를 제외하면 지난 5년 중 평균보다 작았다.

한편, 2015년 남극 장보고과학기지에서 측정된 월평균 이산화탄소의 농도는 3월에 396.6 ppm, 11월에 399.4 ppm으로 세종기지에서 측정된 값보다 높았다. 장보고기지의 경우 풍향은 내륙에서 연안 방향이 연중 탁월하다. 따라서 직접 바다를 거쳐 도달하는 세종기지의 대기와는 달리 상대적으로 저위도 지역의 이산화탄소를 포함한 대기가 해양에 의해 제거되지 않고 직접 도달할 가능성이 높아 농도가 높은 것으로 보인다. 하지만 세종기지 농도의 경우 교정과 관련된 오차도 포함되어 있어 그 차이에 대한 원인은 계속 밝혀 나가야 할 것이다.

표 3.1.3 2015년 남극세종과학기지 이산화탄소 월평균과 연평균 농도

2015년	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
평균값	395.6	395.7	-	-	-	397.5	397.9	398.3	398.4	398.4	398.3	-	397.5

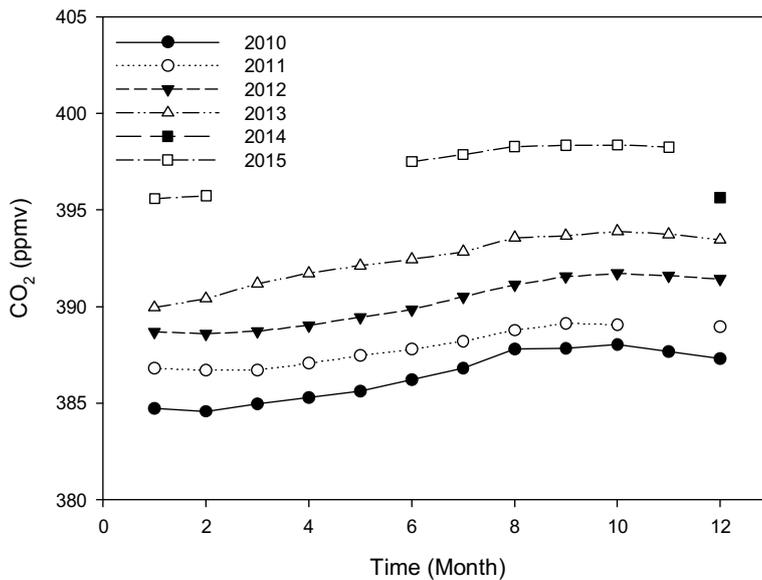


그림 3.1.6 2010~2015년까지의 월평균 이산화탄소 농도의 연변동

3.1.2 메탄(CH₄)

메탄은 주요 온실가스 중 하나이며 ppb(part per billion, 10억분의 일) 단위로 관측한다. 복사강제력은 0.48 W/m²로 전지구 온실가스 복사강제력(2.83 W/m²) 대비 17.0% 기여하고 있다(IPCC, 2013). 일반적으로 메탄은 습지, 흰개미, 해양과 같은 자연적으로 배출하는 양이 40% 정도 되고 목축업, 화석연료 사용, 매립지, 논농사 등 인위적인 배출이 60%를 차지한다. 배출된 메탄은 대기 중에 12.4년 정도 잔류하는 것으로 알려져 있다. 기상청은 1999년부터 안면도에서 메탄 관측을 시작하여 2015년까지 17년간 연속 관측자료를 확보하고 있다.

가. 안면도

2015년 안면도에서 관측한 메탄의 연평균 배경대기 농도는 1976.6 ppb를 기록하였다. 안면도의 2001년 연평균 농도 약 1916.2 ppb와 비교하여, 지난 15년간 60.4 ppb(3.2%) 정도 증가하였다.

표 3.1.4는 안면도 기후변화감시소에서 관측한 메탄의 2015년 월평균 농도와 최근 10년간(2005~2014년) 월평균 농도를 나타낸다. 2015년 연평균농도가 최근 10년간 연평균농도 1933.0 ppb 보다 43.6 ppb 더 높다.

표 3.1.4 안면도의 CH₄ 월평균 농도와 최근 10년간 월평균 농도(ppb)

평균기간	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2015년	1979.7	1971.9	1968.7	1957.6	1961.3	1977.4	1968.3	1970.3	1990.6	1988.6	1989.8	1995.0	1976.6
10년 평균 (2005~2014)	1936.7	1933.2	1929.7	1920.3	1923.1	1932.4	1924.3	1926.8	1946.1	1944.2	1936.0	1942.8	1933.0

그림 3.1.7은 2005년부터 2015년까지 11년간 안면도 기후변화감시소에서 관측한 메탄의 월평균 농도와 추세선을 나타낸다. 메탄은 대기 중에서 이산화탄소 농도보다 대략 1/100배 정도로 적은 양이지만 조금씩 증가하는 추세를 잘 보여주고 있다.

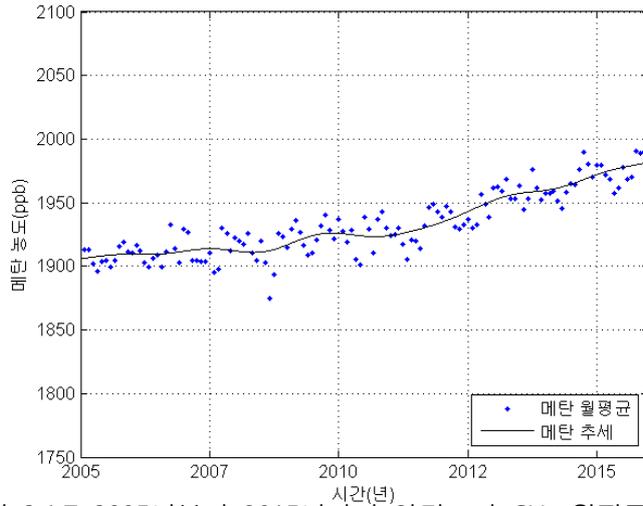


그림 3.1.7 2005년부터 2015년까지 안면도의 CH₄ 월평균(파란점), 배경대기 농도 추세변화(검은선)

그림 3.1.8은 2015년 안면도 메탄 관측값의 월별 박스플롯과 최근 10년간(2005~2014년)의 월평균이다. 2015년의 메탄의 월평균 농도는 최근 10년간 월평균 농도보다 높으며, 이는 최근 10년간 자료와 비교해도 한반도 메탄 배경대기 농도가 증가 추세에 있음을 알 수 있다.

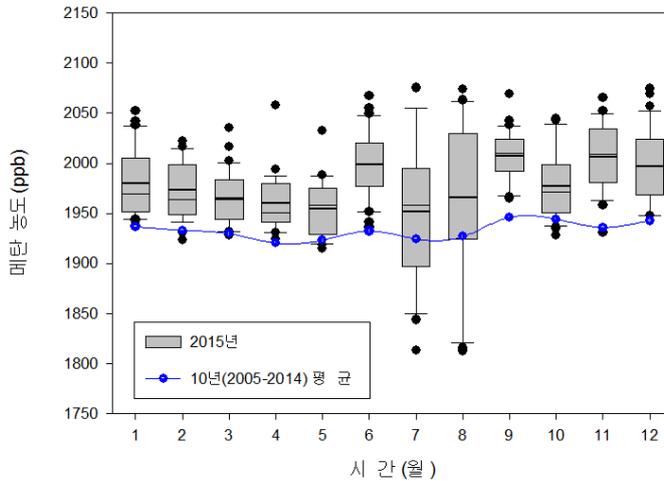


그림 3.1.8 2015년 안면도의 CH₄ 일평균 농도 월별 박스플롯과 최근 10년간 월평균(파란선), 막대 가로선은 중간값과 평균, 박스상단과 하단은 75%, 25%, 오차막대는 90%, 10%, 점은 90%, 10% 밖에 있는 값

3.1.3 아산화질소(N₂O)

아산화질소는 대기 중에 미량으로 존재하는 온실가스로 ppb 단위로 관측한다. 발생원은 해양, 토양, 비료사용, 산업공정, 유기물(biomass) 소각 등이 있으며, 자연적 배출원이 60% 정도 되며 인위적으로 40% 배출된다. 대기 중에 121년 동안 머무르는 긴 잔류기간을 가지고 있다. 기상청은 1999년부터 안면도에서 아산화질소 관측을 시작하여 2015년까지 17년간 연속 관측자료를 확보하고 있다. 아산화질소의 복사강제력은 0.17 W/m²로 전지구 온실가스 복사강제력(2.83 W/m²) 대비 6%를 차지한다(IPCC, 2013).

가. 안면도

2015년 안면도의 아산화질소 연평균 배경대기 농도는 327.4 ppb를 기록하였다. 안면도에서 처음으로 아산화질소 농도를 측정하였던 1999년 연평균 농도 314.0 ppb와 비교하여, 지난 17년간 13.4 ppb(4.3%) 증가하였다.

표 3.1.5는 안면도에서 관측한 아산화질소의 2015년 월평균 농도와 최근 10년간(2005~2014년) 월평균 농도를 나타낸다. 최근 10년간 월평균 자료의 월변동이 거의 없으며, 동일 자료의 주기성분 분석 또한 계절변동 성분이 없음을 확인하였다. 2015년 연평균농도가 최근 10년간 연평균농도 323.8 ppb 보다 3.6 ppb 더 높았다.

표 3.1.5 안면도의 N₂O 2015년 월평균 농도와 최근 10년간 월평균 농도(ppb)

평균기간	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2015년	326.5	328.1	327.5	327.2	327.0	327.4	328.1	327.2	326.8	327.7	327.9	327.6	327.4
10년 평균 (2005~2014)	323.9	324.3	323.9	323.6	323.8	323.8	323.8	323.8	323.6	323.8	323.7	323.6	323.8

그림 3.1.9는 2005년부터 2015년까지의 아산화질소 월평균 농도와 추세변화를 나타낸다. 우리나라 배경대기에서 아산화질소 농도가 ppb 단위의 미량기체이지만 꾸준히 증가하고 있음을 보여준다.



그림 3.1.9 2005년부터 2015년까지 안면도에서 관측한 N₂O 월평균 농도(파란점), 추세변화(검은선)

그림 3.1.10은 2015년 안면도 아산화질소 관측값의 월별 박스플롯과 최근 10년간의 월평균이다. 전체적으로 2015년 아산화질소 농도는 최근 10년간 월평균 농도보다 높음을 보여주며 이는 한반도 배경대기의 아산화질소 농도 또한 최근 10년 평균과 비교해도 증가 추세에 있음을 알 수 있다.

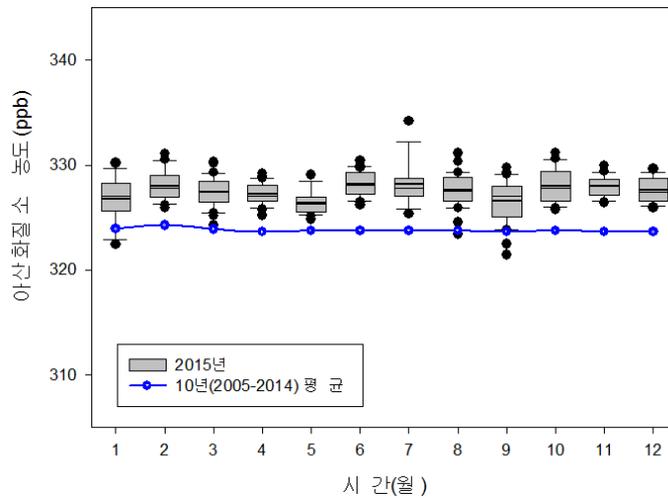


그림 3.1.10 2015년 안면도의 N₂O 일평균 농도 월별 박스플롯과 최근 10년간 월평균(파란선), 막대 가로선은 중간값과 평균, 박스상단과 하단은 75%, 25%, 오차막대는 90%, 10%, 점은 90%, 10% 밖에 있는 값

나. 고산

제주도 고산 기후변화감시소는 2012년부터 아산화질소를 측정해왔다. 고산에서 관측한 2015년 아산화질소 연평균 농도는 328.1 ppb를 기록하였다.

안면도의 2015년 아산화질소 연평균 농도 327.4 ppb와 비교하면 고산의 아산화질소 연평균 농도가 0.7 ppb 더 높았다. 반면, 고산에서 처음으로 아산화질소 농도를 측정하였던 2012년 연평균 농도 325.5 ppb와 비교하여, 지난 3년간 아산화질소 농도가 2.6 ppb(0.8%) 증가하였다.

3.1.4 육불화황(SF₆)

육불화황은 지구대기에서 극미량으로 존재하는 온실가스로 ppt(part per trillion, 1조분의 일)로 관측한다. 육불화황은 100% 인위적으로 제조된 물질로 반도체 세정제, LCD 생산 및 자동차 생산 공정, 변압기 절연체 등에 사용되며, 대기 중으로 배출되면 3200년 동안이나 머무른다.

기상청은 2007년부터 안면도에서 육불화황 관측을 시작하여 2015년까지 8년간 관측자료를 확보하고 있으며, 2011년에는 WMO/GAW 프로그램으로부터 육불화황 세계표준센터로 지정되어 GAW 관측소를 대상으로 기술보급, 교육훈련과정 운영 등의 활동을 하고 있다.

가. 안면도

2015년 안면도 육불화황의 연평균 배경대기 농도는 9.7 ppt를 기록하였다(표 3.1.6). 안면도에서 안정적으로 육불화황 농도를 측정하였던 2008년 연평균 농도 6.7 ppt와 비교하여 최근 7년간(2008~2014년) 3.0 ppt(44.8%) 급격히 증가하였다.

그림 3.1.11은 2008년부터 2015년까지 안면도의 월평균 육불화황 농도와 추세선을 보여주고 있다. 우리나라 배경대기에서 육불화황 농도가 빠르게 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

표 3.1.6 안면도의 SF₆ 월평균 농도와 최근 7년간 월평균 농도(ppt)

평균기간	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2015년	9.2	9.4	9.5	9.5	9.8	9.9	9.6	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7
7년 평균 (2008~2014)	7.7	7.7	7.8	7.8	8.0	8.1	8.0	8.0	8.1	8.1	8.2	8.2	8.0

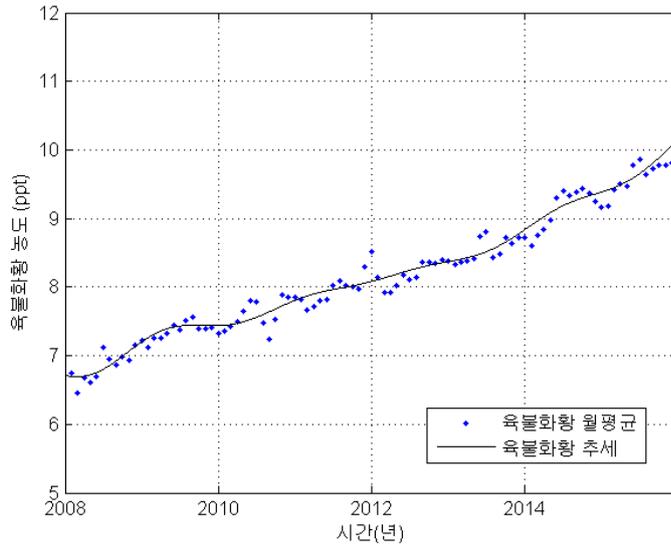


그림 3.1.11 2008년부터 2015년까지 안면도의 SF₆ 월평균 농도(파란점), 추세선(검정선)

그림 3.1.12는 2008년부터 2014년까지 육불화황 농도의 월평균과 2015년 일자료의 월별 박스플롯을 나타낸다. 육불화황의 가파른 증가 추세 때문에 2015년의 월평균 농도가 최근 7년 평균한 월평균 농도보다 높다. 표 3.1.6에서 2015년 6월에 최대 농도인 9.9 ppt가 관측되었고 겨울인 1월에 최저 농도 9.2 ppt를 기록하였다. 하지만 최근 7년간 육불화황의 월평균 자료에는 뚜렷한 계절변동이 없음을 알 수 있다.

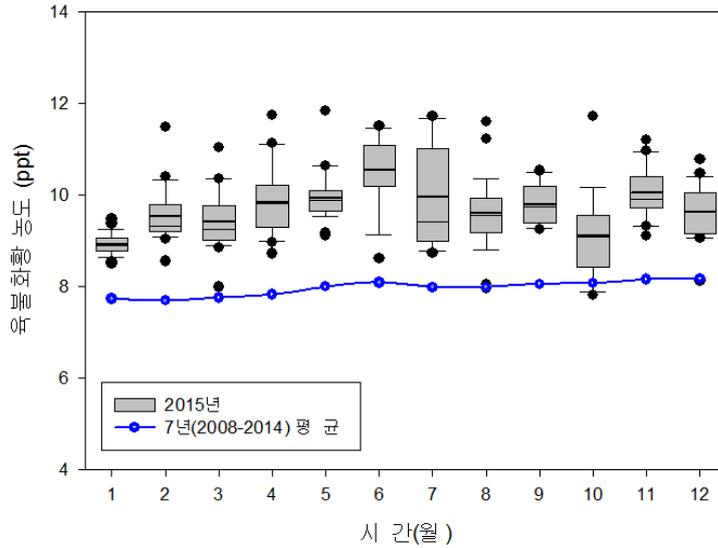


그림 3.1.12 안면도의 SF₆ 2015년 일평균 농도 월별 박스플롯과 최근 7년간 월평균 농도(파란선)

3.1.5 염화불화탄소류(CFCs)

염화불화탄소류(CFCs)는 흔히 프레온가스라고 하며 성층권 오존파괴 물질로 잘 알려져 있다. 지구대기 중에서 극미량으로 존재하여 ppt 단위로 측정한다. 기상청은 1999년부터 안면도에서 염화불화탄소(CFC)-11, 염화불화탄소(CFC)-12 관측을 시작해 왔으며 2007년부터는 추가로 염화불화탄소(CFC)-113 관측을 시작하여 총 3종의 염화불화탄소류(CFCs)의 농도를 측정하고 있다. 염화불화탄소류(CFCs)는 주로 냉장고 냉매, 세척제, 스프레이 제품의 생산과 사용때문에 발생한다. 전 세계 유엔 회원국은 1989년 몬트리올 의정서와 그 후속개정안에서 염화불화탄소류(CFCs)를 규제하였고, 우리나라도 2010년에 염화불화탄소류(CFCs)의 생산과 사용을 완전히 중단하였다. 염화불화탄소류(CFCs)는 45~100년에 이르는 긴 대기 중 잔류기간을 가지고 있으나 염화불화탄소류(CFCs)의 사용규제로 평균농도가 전지구적으로 점차 낮아지고 있는 추세이다.

가. 안면도

2015년 안면도 염화불화탄소(CFC)-11의 연평균 농도는 229.6 ppt를 기록하였다(표 3.1.7). 안면도에서 처음으로 염화불화탄소(CFC)-11 농도를 측정하였던 1999년 연평균 농도 270.4 ppt와 비교하여 지난 17년간 40.8 ppt (15.1%) 감소하였다.

표 3.1.7 안면도의 염화불화탄소류(CFC-11, CFC-12, CFC-113) 월평균 농도(ppt)

2015년	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
CFC-11	231.0	230.7	230.4	230.2	230.0	229.9	229.7	229.4	229.1	228.6	228.1	227.5	229.6
CFC-12	517.0	516.6	516.3	516.2	516.1	516.1	516.1	516.1	516.0	515.7	515.3	514.8	516.0
CFC-113	71.6	71.5	71.3	71.0	71.1	71.4	71.3	71.1	71.1	71.0	71.0	71.0	71.2

그림 3.1.13은 2005년부터 2015년까지의 염화불화탄소(CFC)-11의 월평균 농도와 추세변화를 보여주고 있다. 염화불화탄소(CFC)-11의 연평균 농도가 2005년 256.1 ppt에서 2014년 228.3 ppt로 최근 10년(2005~2014년) 사이 27.8 ppt 감소하였다.

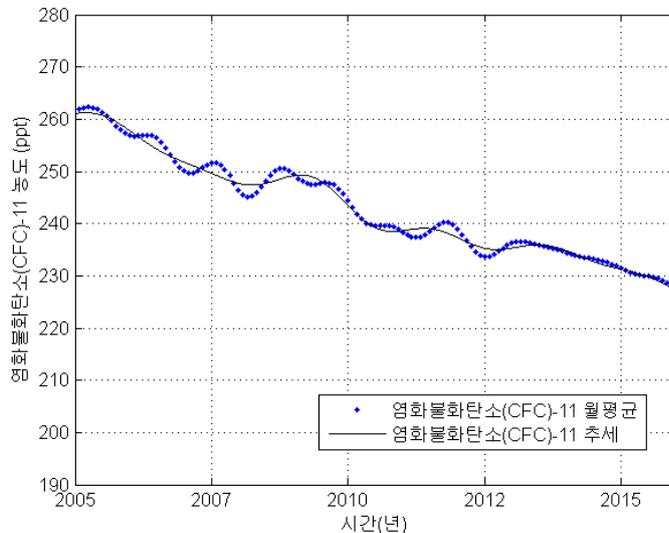


그림 3.1.13 2005~2015년까지 안면도의 염화불화탄소(CFC)-11 월평균 농도(파란점), 추세선(검정선)

그림 3.1.14는 2015년 안면도 기후변화감시소에서 관측한 염화불화탄소(CFC)-11 일평균 농도의 월별 박스플롯과 최근 10년간(2005~2014년) 월평균 농도를 나타낸다. 유효한 일자료 개수가 없거나 부족한 월(1, 8, 12월)이 있지만 최근 10년 사이 다른 염화불화탄소류(CFCs)와 함께 연평균은 빠르게 감소하고 있음을 알 수 있다.

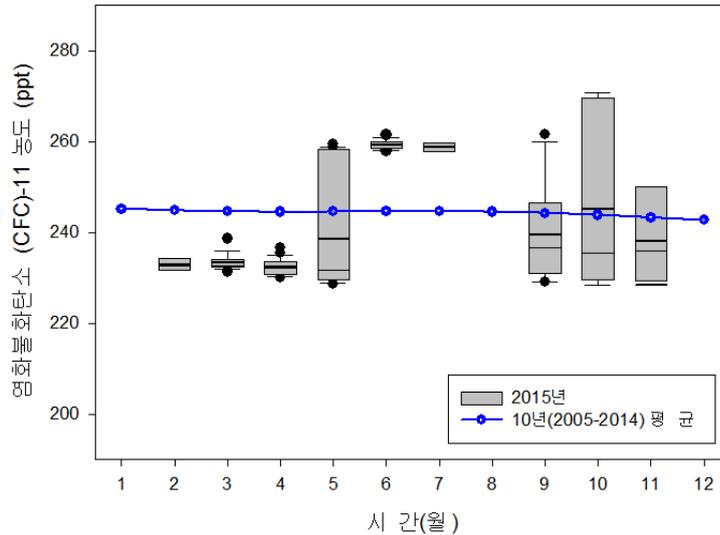


그림 3.1.14 안면도의 염화불화탄소(CFC)-11 2015년 일평균 농도 월별 박스플롯과 최근 10년간 월평균 농도 (파란선)

2015년 안면도 염화불화탄소(CFC)-12의 연평균 배경대기 농도는 516.0 ppt를 기록하였다(표 3.1.7). 안면도에서 처음으로 염화불화탄소(CFC)-12 농도를 측정하였던 1999년 연평균 농도 532.5 ppt와 비교하여 지난 17년간 16.5 ppt(3.1%) 감소하였다.

그림 3.1.15는 2005년부터 2015년까지의 염화불화탄소(CFC)-12의 월평균 농도와 추세변화를 보여주고 있다. 염화불화탄소(CFC)-12의 연평균농도가 2005년 539.2 ppt에서 2014년 514.0 ppt로 최근 10년(2005~2014년) 사이 25.2 ppt 감소하였다.

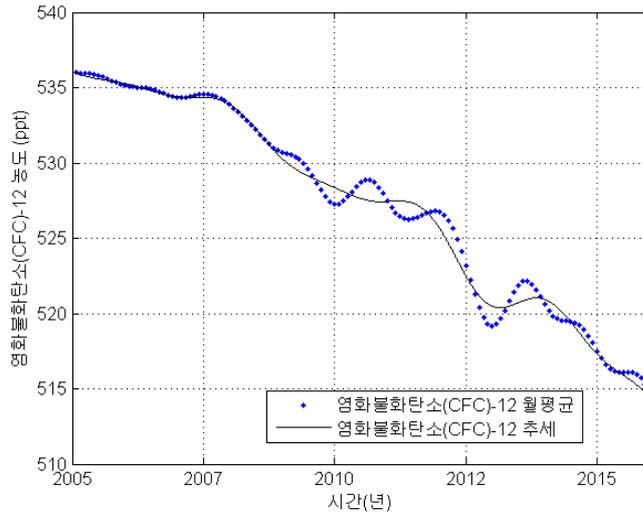


그림 3.1.15 2005~2015년까지 안면도의 염화불화탄소(CFC)-12 월평균 농도(파란점), 추세선(검정선)

그림 3.1.16은 안면도 기후변화감시소에서 관측된 염화불화탄소(CFC)-12의 2015년 일평균 농도의 월별 박스플롯과 최근 10년간 월평균 농도이다. 2015년의 월평균 농도가 최근 10년 월평균 농도와 비교하여 모든 월에서 낮았으며, 7월과 11월의 최고 농도만이 10년 월평균 값을 조금 상회하였다. 배경대기 농도 또한 다른 염화불화탄소류(CFCs)와 함께 감소함을 확인할 수 있다.

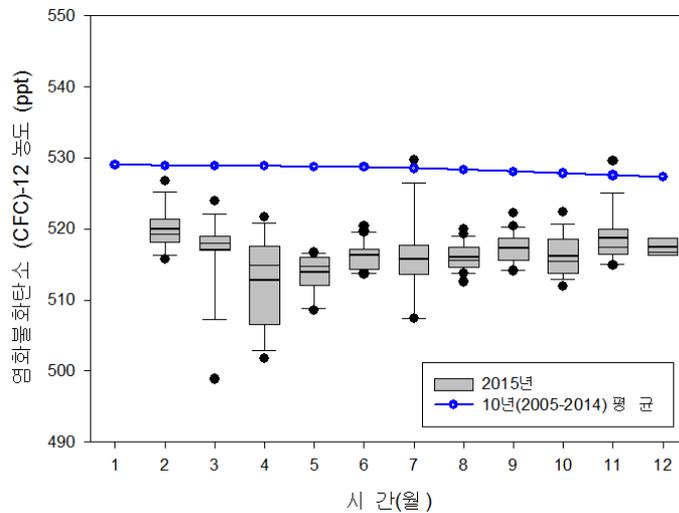


그림 3.1.16 염화불화탄소(CFC)-12로 그림 3.13과 같음

염화불화탄소(CFC)-113의 2015년 안면도 연평균 배경대기 농도는 71.2 ppt를 기록하였다(표 3.1.7).

그림 3.1.17은 2007년부터 2015년까지의 염화불화탄소(CFC)-113의 월평균 농도와 추세변화를 보여주고 있다. 안면도에서 염화불화탄소(CFC)-113 농도를 처음으로 측정하였던 2007년 연평균 농도 76.4 ppt와 비교하여 최근 9년간(2007~2015년) 5.2 ppt(6.8%) 감소하였다.



그림 3.1.17 2007~2015년까지 안면도의 염화불화탄소(CFC)-113 월평균 농도(파란점), 추세선(검정선)

그림 3.1.18은 안면도 기후변화감시소에서 관측한 염화불화탄소(CFC)-113의 2015년 일평균 농도 월별 박스플롯과 최근 8년간(2007~2014년) 월평균 농도를 나타낸다. 2015년 염화불화탄소(CFC)-113의 월평균 농도가 최근 8년 월평균 농도보다 모든 월에서 낮게 나타났다.

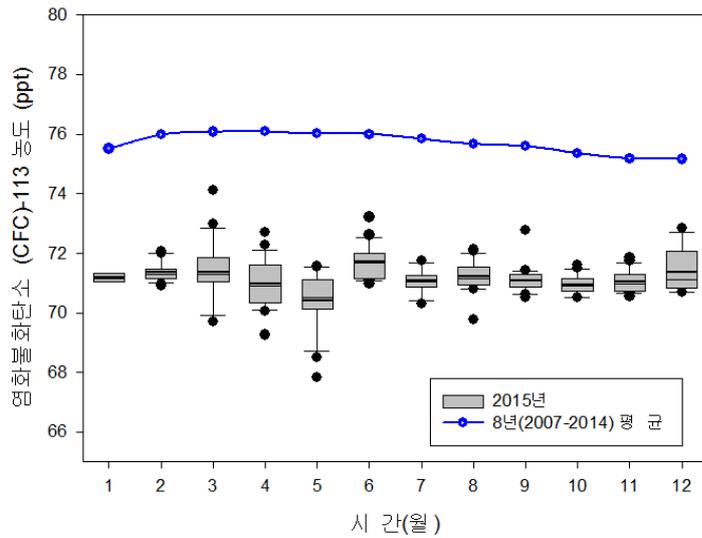


그림 3.1.18 염화불화탄소(CFC)-113로 그림 3.13과 같음

3.1.6 산림생태계 이산화탄소

광릉 관측지는 KoFlux (Korean Flux Measurement Network; <http://ncam.kr/page/koflux/database/index.php>)의 주요 관측지로 한반도 중서부에 위치한 경기도 포천시 소재 국립수목원내 활엽수림 지역(37° 45' 25.37" N, 127° 9' 11.62" E; 260m ASL)에 위치한다. 광릉 산림은 500년간 훼손되지 않는 숲으로 국내에서 가장 잘 보존된 자연림으로 꼽힌다. 광릉 Supersite는 80 ~ 200년 수령의 졸참나무(*Quercus serrata*)와 서어나무(*Carpinus laxiflora*)가 주종을 이룬다(Lee et al., 2007). 군락 높이(canopy height)는 평균 18m이고 최대 엽면적지수(leaf area index)는 6으로 여름에 나타난다. 토양은 사양토(75%), 사질식양토(13%), 사토(12%)를 함유하고 있다.

에디 플럭스 관측을 위한 에디 공분산 시스템은 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(Footprint), 접근성 등을 고려하여 플럭스 타워의 40m 높이에 설치되어 있다(그림 3.1.19). 이산화탄소 농도는 고속반응 개회로 적외선 기체분석기(모델 LI-7500, LI-COR Inc. Lincoln, USA)를 사용하여 관측하고 있다. 이산화탄소 농도는 10Hz로 관측하였고, 10Hz의 원시자료(Raw data)와 30분 평균자료를 집록기(데이터로거 모델 CR3000, Campbell Scientific Inc, USA)에 각각 집록하였다. 에디 공분산 시스템 이외에도 저류항 관측을

위한 프로파일 시스템이 지면에서 군락 위의 대기 중 이산화탄소 농도를 관측하고 있다. 프로파일 시스템의 노후화로 2013년 7월부터 해당 관측이 중단되었으며, 2015년 10월에 새로운 시스템(모델 AP200, Campbell Scientific Inc.)을 설치하여 관측을 재개하였다. 새로운 프로파일 시스템에서는 폐회로 적외선 기체분석기(모델 LI-840, LI-COR Inc.)를 통해 기체농도분석이 초당 2회씩 이뤄지고, 전체높이 분석시간은 120초/회이며, 30분 평균자료를 집록기(모델 CR1000, Campbell Scientific Inc.)에 저장하고 있다.

2015년도 에디 공분산 시스템의 개회로 적외선 기체분석기에서 관측한 이산화탄소 농도 자료 획득률은 70% 정도로 예년 자료 획득률(80% 이상)에 비해 낮았다.

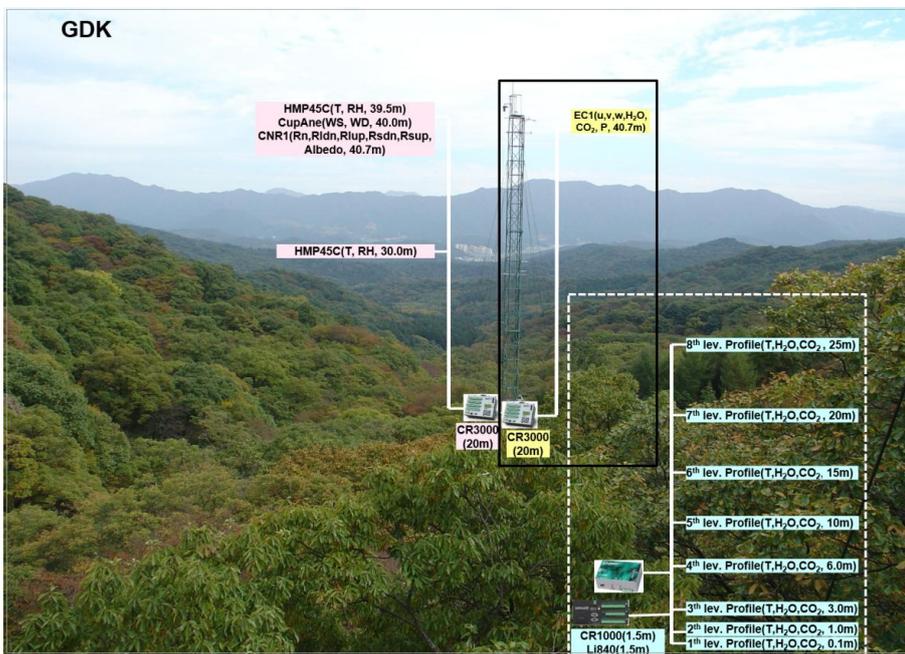


그림 3.1.19 광릉 활엽수림 타워에 설치된 CO₂ 농도와 플럭스 관측 시스템 (실선: 에디 공분산 시스템, 점선: 프로파일 시스템)

그림 3.1.20은 개회로 적외선 기체분석기로 관측한 이산화탄소 농도의 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 이산화탄소 농도는 배경대기농도 관측과 같이 넓은 수평적 공간을 대표하는 경계층 내의 잘 혼합된 평균적인 농도이기보다는 40m 높이에서 기체분석기가 관측하는 발자국 영역(예를 들면 200~1000m)

내의 이산화탄소 농도이다. 식생의 광합성이 활발한 기간(5~9월) 동안 이산화탄소 농도는 밤에 증가하고, 낮에 감소하는 뚜렷한 일 변동을 보였다. 이는 밤에 식생 및 토양의 호흡으로 농도가 증가하고 낮에 광합성 작용으로 농도가 감소한 것에 기인한다.

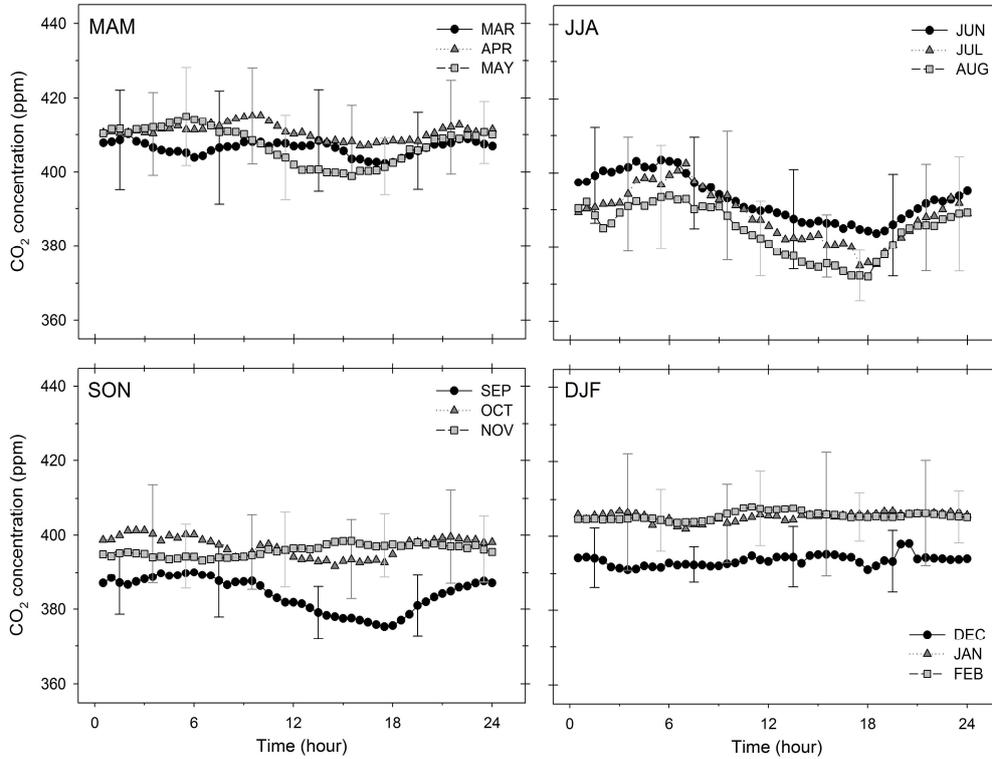


그림 3.1.20 광릉 활엽수림의 월별 CO₂ 농도의 평균 일 변동

평균 탄소 농도는 370~430 ppm의 변동 범위를 보였으며, 5월부터 꾸준히 감소하여, 광합성이 최대로 나타나는 8월말에 최솟값을 보였다(그림 3.1.21). 6월말에서 7월 중순 사이에 전원 공급 문제로 인해 결측이 발생하였다. 두 기체농도의 월 평균 값은 표 3.1.8에 나와 있다.

이산화탄소 농도의 계절 변동의 경우 식생 변화와 관계가 깊은데, 식생 계절 변화를 이해하기 위해 식생 군락 분석기(모델 LAI-2200, LI-COR Inc.)를 이용해 식생면적지수(Plant area index, PAI) 관측이 동시에 수행되었다.

2014년에는 개엽이 4월말에 시작되었으며, 2015년에도 개엽이 4월말로 예년과 비슷하게 발생했다.

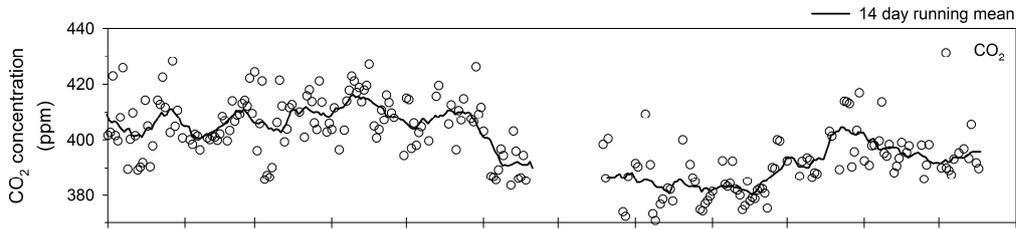


그림 3.1.21 광릉 활엽수림의 일평균 CO₂ 농도

표 3.1.8 광릉 활엽수림의 월평균 CO₂ 농도
()는 월별 표준편차

Month	CO ₂ (ppm)
1	405.3 (13.6)
2	405.2 (7.3)
3	406.5 (12.5)
4	410.9 (11.1)
5	407.0 (11.1)
6	390.7 (11.2)
7	387.9 (14.6)
8	384.6 (13.9)
9	383.9 (9.8)
10	397.2 (11.6)
11	396.5 (8.5)
12	393.5 (7.8)
Average	398.8

광릉 활엽수림의 8년간(2006~2013년) 이산화탄소 농도는 연중 344~452 ppm 범위에 있으며, 겨울철(12월, 1월, 2월)에 값이 높게 나타나는 반면 식생의 광합성으로 8월에 최저값을 보이고 있다. 광릉 활엽수림의 최근 8년간

이산화탄소 농도 평균은 388.1 ppm이며, 매년 연평균 농도는 비슷한 경향을 보이고 있다. 최근 8년 기간 중 2006년에 연평균 농도 390.7 ppm이 관측된 이래 2013년까지 평균 농도가 크게 증가하지 않았다.

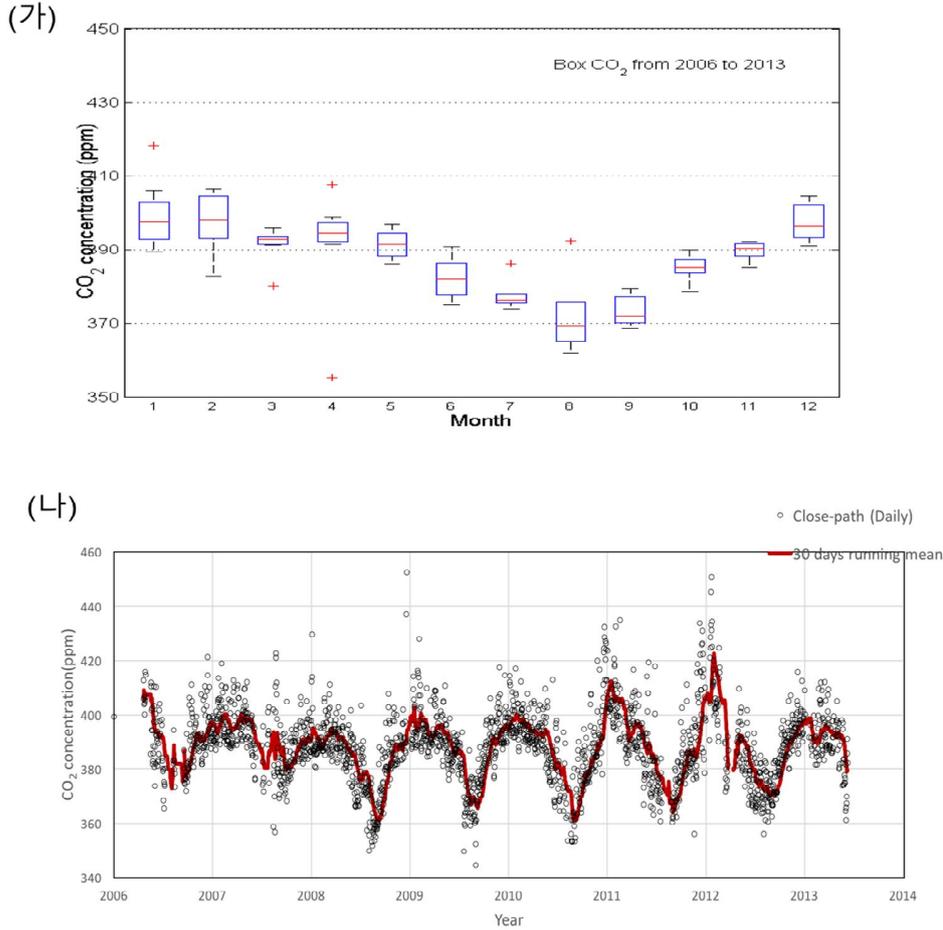


그림 3.1.22 광릉 CO₂의 (가)평년 월평균 농도 비교, (나)최근 8년간 연평균 농도 변화 경향. 그림(가) 상자 선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 선은 중간값, 점은 평균

3.2 반응가스

반응가스에는 오존(O₃), 일산화탄소(CO), 휘발성유기화합물(VOCs), 질소화합물(NO_x, NO_y), 그리고 이산화황(SO₂) 등이 있다. 이들은 대기 내 수명이 수 초 ~ 수 개월 이내로 대기 내 화학반응에 관여하며 광화학 반응과 에어로졸 생성을 통해 기후와의 상호관계에 깊이 관여한다. 기상청은 안면도에서 1998년부터, 고산에서 2012년부터 오존, 일산화탄소, 질소산화물, 이산화황을 관측해왔다.

2015년도에는 반응가스 측정 장비를 일주일마다 교정하였고(4시간 소요) 장비 점검, 소모품 교체 등은 연중 2~3회로 최대 2일이 소요되었다. 안면도에서는 장비장애로 인한 결측은 없었으나 고산의 경우 1, 2월에 이산화황 장비 장애로, 8월에 흡입관 결로와 관측실 냉방시스템 고장으로 약 20일간 정상적인 관측이 이루어지지 못했다.

O₃의 월평균 농도 분포는 안면도와 고산에서 모두 봄과 가을에 농도가 높은 쌍봉 분포를 보였다. 안면도에서 측정한 O₃은 최근 10년(2005~2014년) 동안 점차 감소하는 경향을 보인 반면 고산에서는 최근 4년 동안 O₃ 연평균 농도가 조금씩 증가했다.

안면도와 고산에서 측정한 CO의 월평균 농도는 여름에 낮고 겨울에 높은 분포를 보였다. 또, CO의 연평균 농도는 안면도에서는 2013년까지 증가하다가 이후 점차 감소하고, 고산에서는 점차 증가하였다.

안면도에서 NO_x의 최근 10년간 월평균 농도는 여름에 낮고 겨울에 높은 분포를 보였으나, 2015년 7월에 NO_x의 월평균 농도는 최근 10년간 월평균 농도에 비해 두 배 이상 높았다. 고산의 NO_x 월평균 농도는 봄과 가을에 농도가 다른 계절에 비해 조금 높았으나 전체적으로 계절변동이 미미하였다. 안면도에서 측정한 NO_x의 연평균 농도는 평년동안 점차 감소한 반면 고산에서 측정한 NO_x의 연평균 농도는 최근 4년간 조금씩 증가하였다.

안면도에서 측정한 SO₂의 월평균 농도는 여름에 낮고 겨울에 높은 분포를 보이나, 연평균이 지속적으로 감소하고 있다. 고산에서 측정한 SO₂는 그 농도가 낮아 계절 변동이 뚜렷하게 보이지 않았으며 최근 4년간 연평균이 증가하거나 감소하지 않고 0.5 ppb의 수준을 유지하였다.

3.2.1 오존(O₃)

지표오존(O₃)은 강력한 온실효과를 일으키는 기체 중 하나이며, 대류권 O₃의 복사강제력은 0.4 W/m²로 지구 온난화에 직접적으로 영향을 미친다(IPCC, 2013). 산업활동과 자동차 등의 인위적인 활동에서 나오는 질소산화물과 탄화수소의 광화학반응에 의해서 생성되어 광화학스모그의 원인물질일 뿐 아니라 장파복사에너지를 흡수하는 온실가스로도 작용하며, 시각장애와 폐수종, 폐충혈 등을 일으킨다.

가. 안면도

2015년 안면도에서 측정한 O₃은 광화학 반응이 활발한 봄(3, 4, 6월)과 가을(9월)에는 다른 계절에 비해 농도가 20~60 ppb 사이로 넓은 범위에서 관측되었고 겨울에는 관측농도 수준이 30 ppb 이하로 낮게 분포하였다. 2015년 월평균 농도의 범위가 15~40 ppb 사이로 평년 월평균 농도보다 낮게 분포하였다. 2015년의 연중 농도 분포는 대체로 평년과 같은 쌍봉형태이지만 봄철과 가을철 농도가 다른 월에 비해 상대적으로 평년보다 더 낮게 분포하면서 평년보다는 쌍봉형태가 뚜렷하지 않았다. 최근 10년(2005~2014년) 월평균 농도 최댓값은 5월(52.6 ppb)에, 최솟값은 12월(29.1 ppb)에 나타난 반면 2015년의 월평균 농도는 최댓값이 6월(40.6 ppb)에, 최솟값은 1월(14.9 ppb)에 나타났다. 즉, 2015년에는 평년에 비해 최대 농도가 나타나는 시기가 1개월 가량 뒤로 이동했으며, 평년에 비해 최댓값은 12.3 ppb, 최솟값은 15.3 ppb 가량 낮은 농도가 관측되었다. 안면도의 최근 10년간(2005~2014년) O₃ 농도 평균은 39.1 ppb이며, 매년 연평균 농도가 대체로 꾸준히 감소하는 경향을 보이고 있다(그림 3.2.2). 즉, 최근 10년 기간 중 최솟값은 2005년 평균인 28.5 ppb 이었으며 2008년에 최대 연평균 농도 44.5 ppb가 나타난 이래 점차 감소하여 2015년에 27.9 ppb가 관측되었다. 2015년 연평균 농도는 2014년 연평균 농도 32.4 ppb에 비해 4.5 ppb 만큼 감소하였다. 또, 2013년 이후 농도 감소 추세는 이전에 비해 더 가파른 것으로 나타났다.

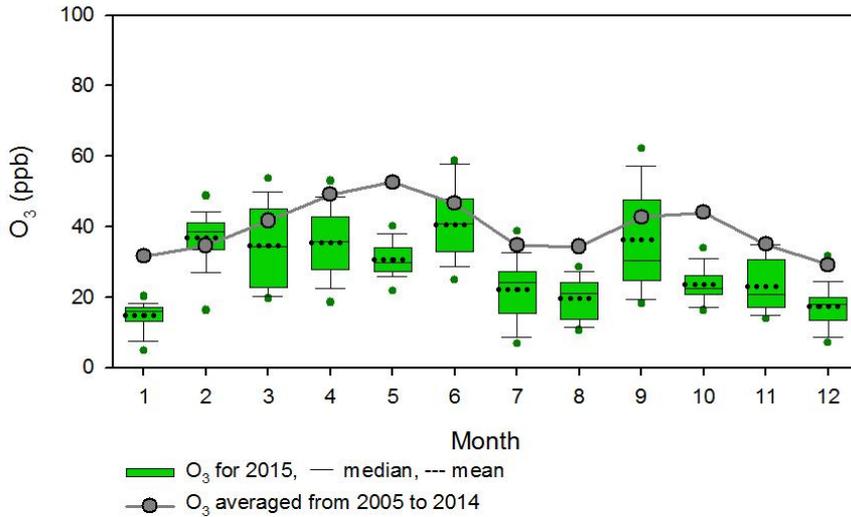


그림 3.2.1 2015년 안면도 O₃의 월평균 농도와 최근 10년간 월평균 농도의 비교. 박스플롯의 아래쪽은 전체자료의 25%, 위쪽은 75%, 수염(whisker)은 각각 10, 90%, 점은 5, 95%, 상자안 실선은 중앙값, 점선은 평균

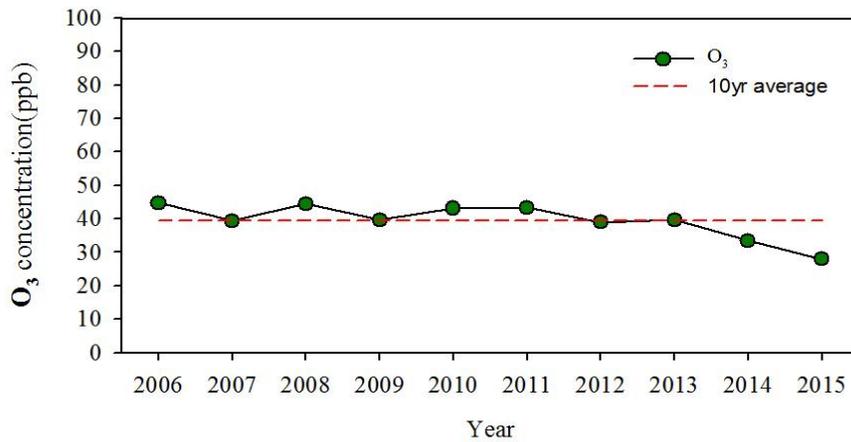


그림 3.2.2 안면도 O₃의 최근 10년간 연평균 농도 변화 경향

나. 고산

고산에서 측정된 O₃의 2015년 농도는 봄철(4월)과 가을철(10월)에 상대적으로 농도가 높게 나타나는 쌍봉분포를 보이고 있다(그림 3.2.3). O₃의 월평균 농도 범위는 27.5~62.5 ppb 사이에 분포하였으며, 봄(4월)과 여름(7, 8월)에

농도가 다른 월에 비해 넓게 분포하였다.

고산의 최근 4년간(2012~2015년) O₃ 농도 평균은 41.2 ppb이며, 매년 연평균 농도가 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 3.2.4). 즉, 최근 4년 기간 중 2012년에 연평균 농도가 34.4 ppb로 관측된 이래 2015년에 연평균 농도 45.7 ppb가 관측됨으로써 약 11.3 ppb 만큼 농도가 증가하였다. 그러나 최근 4년 동안 농도 증가 추세는 완만하게 나타나고 있으며, 2015년 연평균 농도는 45.7 ppb로 2014년 연평균 농도 44.3 ppb에 비해 1.4 ppb 만큼 증가하였고 최근 4년간의 평균(41.2 ppb)에 비해 4.5 ppb 증가하였다.

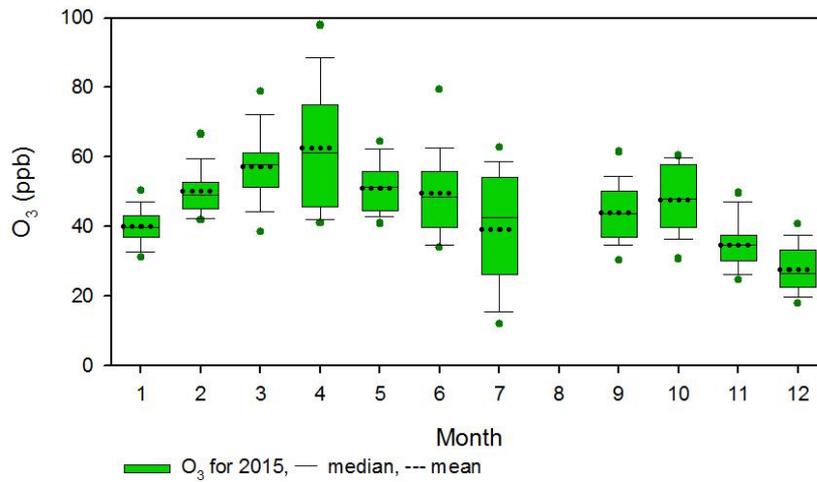


그림 3.2.3 2015년 고산 O₃의 월평균 농도

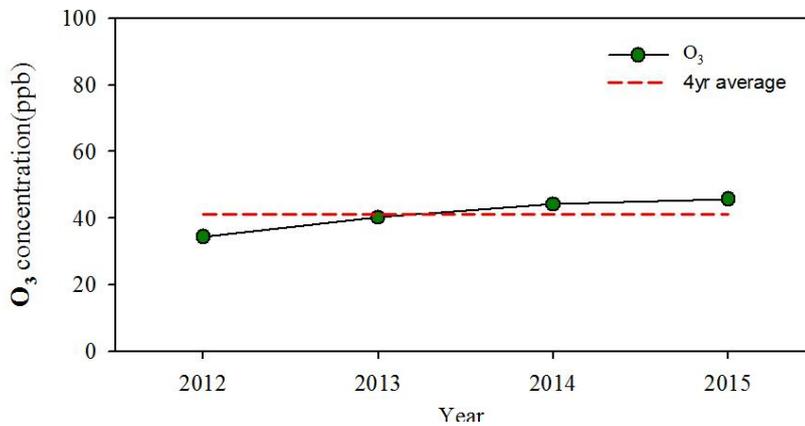


그림 3.2.4 고산 O₃의 최근 4년간 연평균 농도 변화 경향

3.2.2 일산화탄소(CO)

CO의 복사강제력은 0.23 W/m^2 으로 OH·라디칼과의 반응으로 이산화탄소 등 온실가스 농도를 변화시켜 지구온난화에 영향을 미친다(IPCC, 2013). 주로 화석연료나 탄소화합물의 불완전연소, 메탄 등 탄화수소 계열 물질의 산화과정, 화산폭발, 산불, 해수 중의 미생물 작용 등에 의해 생성된다.

가. 안면도

안면도의 최근 10년간(2005~2014년) 일산화탄소의 월평균 농도는 200~320 ppb 사이에 분포하고 있으며, 겨울철(12, 1, 2월)에 높고 여름철(7, 8월)에 상대적으로 농도가 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다(그림 3.2.5).

2015년 월평균 농도의 범위는 210~370 ppb 사이로 평년 월평균 농도보다 대체로 높게 분포하였다. CO의 월별 농도는 1~4월과 10~12월은 다른 월에 비해 분포 범위가 넓었다. 2015년의 연중 농도는 대체로 평년과 같이 겨울철에 높고 여름철에 낮게 분포하였다. 특히, 2015년 겨울철 농도가 평년에 비해 더 높게 분포하였다. 평년의 월평균 최대 농도는 1월(311.1 ppb)에, 최솟값은 8월(201.6 ppb)에 나타났으며 2015년의 최대 농도는 2월(367.1 ppb)에, 최솟값은 7월(214.3 ppb)에 나타났다. 즉, 2015년에는 평년에 비해 최대 농도가 나타나는 시기가 1 개월가량 뒤로 이동했으며, 최저 농도가 나타나는 시기는 7월로 변동이 없었다.

안면도의 최근 9년간(2006~2014년) CO 농도 평균은 270.4 ppb이며, 매년 연평균 농도가 대체로 증가하다 2015년에 다시 감소하였다(그림 3.2.6). 즉, 최근 9년 기간 중 2008년 연평균 최저 농도 223 ppb가 나타난 이래 2013년 최댓값 307.9 ppb가 관측됨으로써 약 84.5 ppb 만큼 농도가 증가하였다. 2015년 연평균 농도는 293.5 ppb로 전년 평균 농도 295.1 ppb에 비해 1.6 ppb 만큼 감소하였으며 최근 9년간의 평균(270.4 ppb)에 비해 23.1 ppb 높게 나타났다.

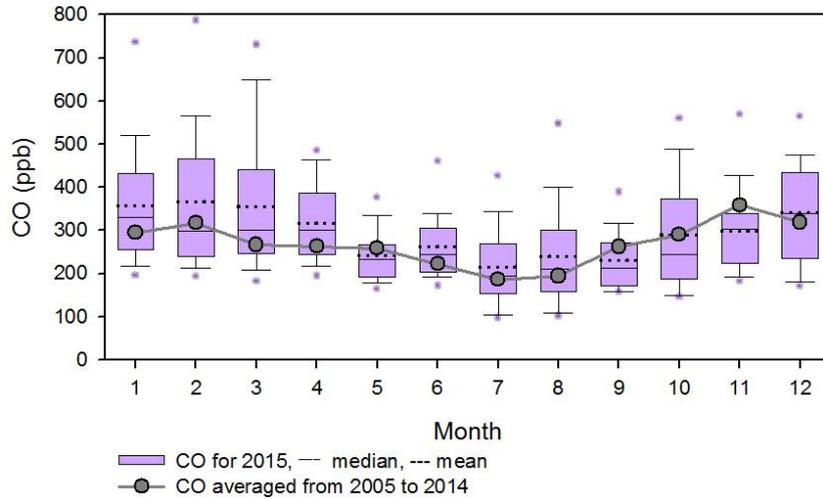


그림 3.2.5 2015년 안면도 CO의 월평균 농도와 최근 10년간 월평균 농도 비교

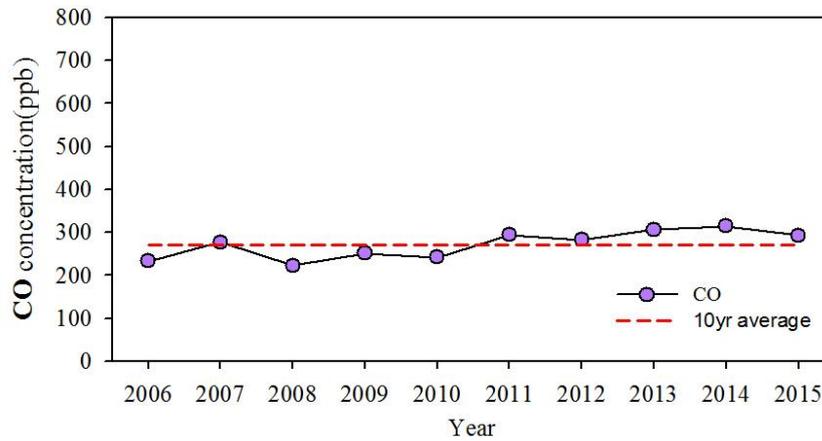


그림 3.2.6 안면도 CO의 최근 9년간 연평균 농도 변화 경향

나. 고산

2015년에 고산에서 측정한 월평균 농도의 범위가 159.3~301.5 ppb 사이로 분포하였다(그림 3.2.7). 2015년 월평균 농도의 최댓값은 10월(301.5 ppb)에, 최솟값은 7월(159.3 ppb)에 나타났다. 5, 6, 7월을 제외하고 월별 농도 분포 범위는 200 ppb 이상으로 넓게 분포하였다.

고산의 최근 4년간(2012~2015년) CO 농도 평균은 196.2 ppb이며, 매년 연평균 농도가 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 최근 4년 기간 중 2012년에 연평균 농도가 146.5 ppb로 관측된 이래 2015년에 연평균 농도 235.1 ppb가 관측됨으로써 약 88.6 ppb 만큼 증가하였다. 2015년 연평균 농도는 235.1 ppb로 2014년 연평균 농도 215.2 ppb에 비해 19.8 ppb 만큼 증가하였다. 2015년 연평균 농도는 최근 4년간의 평균(196.2 ppb)에 비해 38.9 ppb 높게 나타났다.

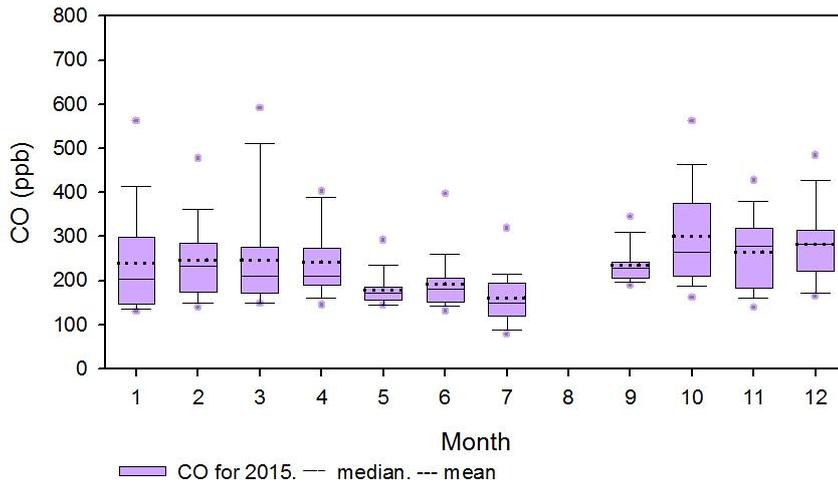


그림 3.2.7 2015년 고산 CO의 월평균 농도

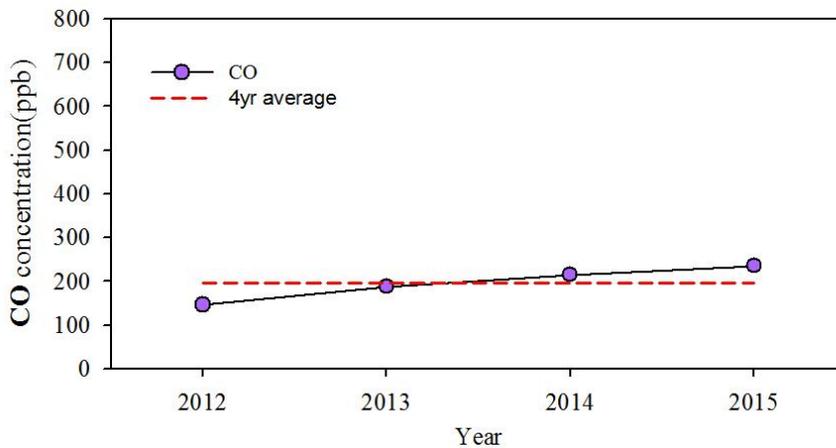


그림 3.2.8 고산 CO의 최근 4년간 연평균 농도 변화 경향

3.2.3 질소산화물(NOx)

NOx는 지구온난화를 일으키는 O₃의 주요 전구물질임과 동시에 지구 냉각화를 일으키는 질산에어로졸의 전구물질이다(IPCC, 2013). 그러나 O₃의 온난화보다 질산에어로졸의 냉각화 영향으로 NOx의 복사강제력은 -0.15 W/m^2 이다. NOx는 주로 산업활동과 차량 등에 의한 연소활동, 생체소각이나 토양의 미생물 활동 등에 의해 배출된다.

가. 안면도

안면도의 최근 10년간(2005~2014년) 질소산화물의 월평균 농도는 연중 3.8~9.2 ppb 범위에 있으며, 겨울철(12, 1, 2월)에 높고 여름철(7, 8월)에 상대적으로 농도가 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다(그림 3.2.9). 2015년 월평균 농도의 범위가 2.5~8.8 ppb 사이로 7월을 제외하고 평년 월평균 농도보다 낮게 분포하였다. 2015년의 연중 농도 분포는 대체로 평년과 같이 겨울철에 높고 여름철에 낮지만 7월에는 연중 최고 농도를 기록할 만큼 높게 나타났다. NOx의 월별 분포 범위는 다른 월에 비해 1월, 7월, 12월에 넓게 분포하였다.

최근 10년간(2005~2014년) 월평균 최대 농도는 10월(9.2 ppb)에, 최솟값은 7월(3.8 ppb)에 나타났으며 2015년의 최대 농도는 7월을 제외하면 1월(7.3 ppb)에, 최솟값은 9월(2.5 ppb)에 나타났다. 2015년 7월에 나타난 높은 농도는 평년과 다른 경향을 보였으며 이에 대한 연구가 필요해 보인다. 안면도에서 NOx의 연평균은 4.5 ppb이며 평년 평균인 7.2 ppb에 비해 2.7 ppb가 낮고 2014년 연평균 4.9 ppb에 비해 0.4 ppb 낮았다.

안면도의 최근 10년간(2005~2014년) NOx 농도 평균은 7.4 ppb이며, 2011년 이후 연평균 농도가 대체로 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 최근 10년 기간 중 2011년에 최대 연평균 농도 8.8 ppb가 나타난 이래 2015년에 최솟값 4.5 ppb가 관측됨으로써 4.3 ppb 만큼 농도가 감소하였다. 또 2014년 연평균 농도 5 ppb에 비해 0.5 ppb 만큼 감소하였다.

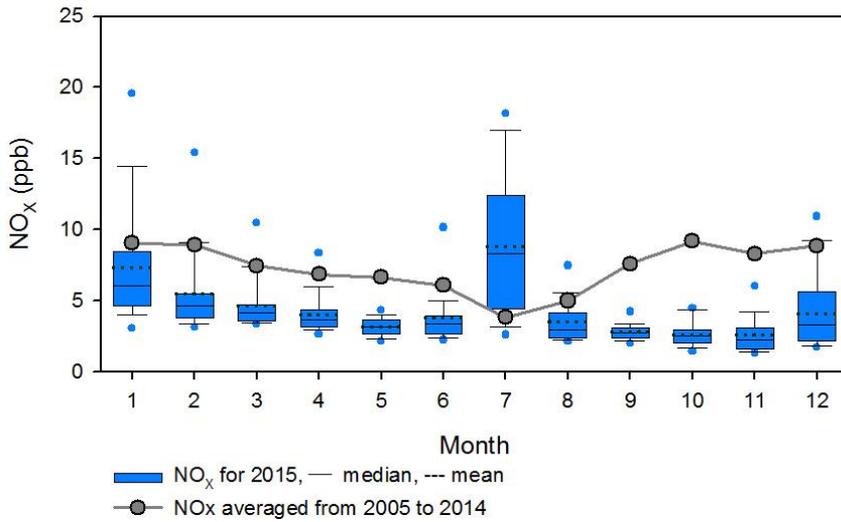


그림 3.2.9 2015년 안면도 NOx의 월평균 농도와 최근 10년간 월평균 농도 비교

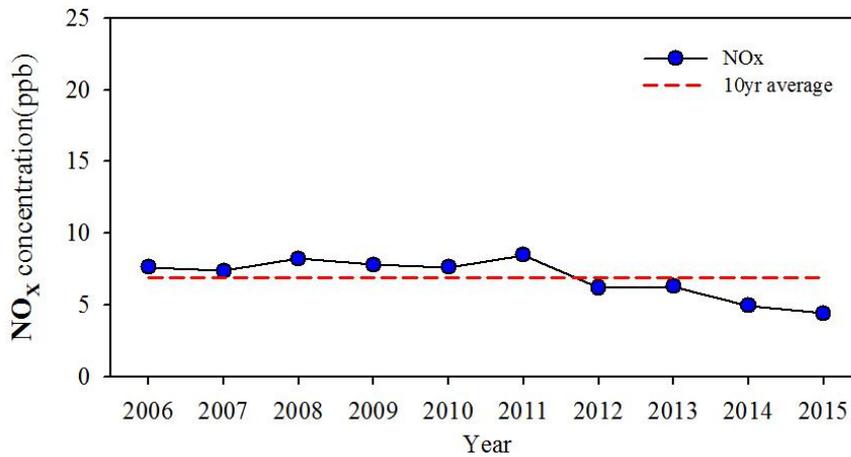


그림 3.2.10 안면도 NOx의 최근 10년간 연평균 농도 변화 경향

나. 고산

고산에서 관측한 NOx의 월평균 농도는 연중 큰 변화를 보이지 않으나 봄철(3, 4, 5월)과 가을철(9, 10월)에 비교적 높고 여름철(7, 8월)에 낮게 나타났다. 2015년 월평균 농도의 범위가 3.3~5.2 ppb 사이로 최근 4년간의 월평균 농도와 비교하였을 때 2015년 월평균 농도가 더 높게 분포하였다. 2015년의

최대 농도는 3월(5.2 ppb), 최소 농도는 2월과 6월에 3.3 ppb로 나타났다.

고산의 최근 4년간(2012~2015) NO_x 농도 평균은 3.7 ppb이며, 최근 4년 동안 미약하게 증가하였다. 2015년 연평균 농도는 전년 평균 농도 3.7 ppb 에 비해 0.4 ppb 만큼 증가하였다.

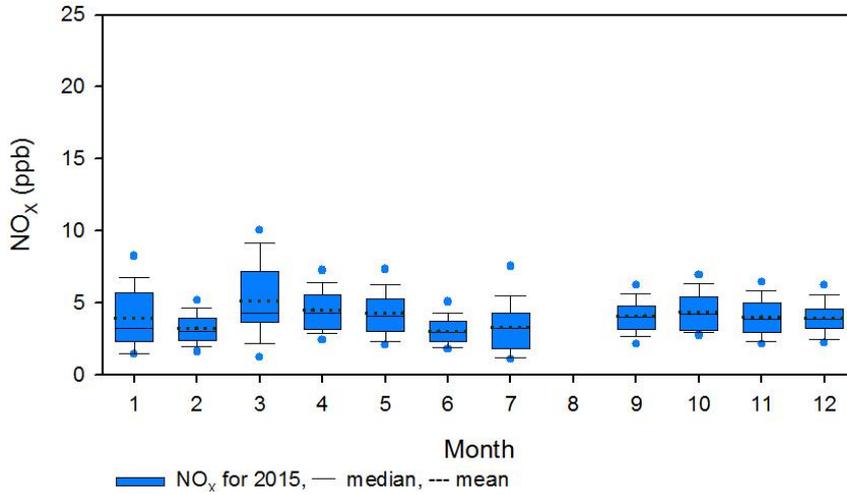


그림 3.2.11 2015년 고산 NO_x의 월평균 농도

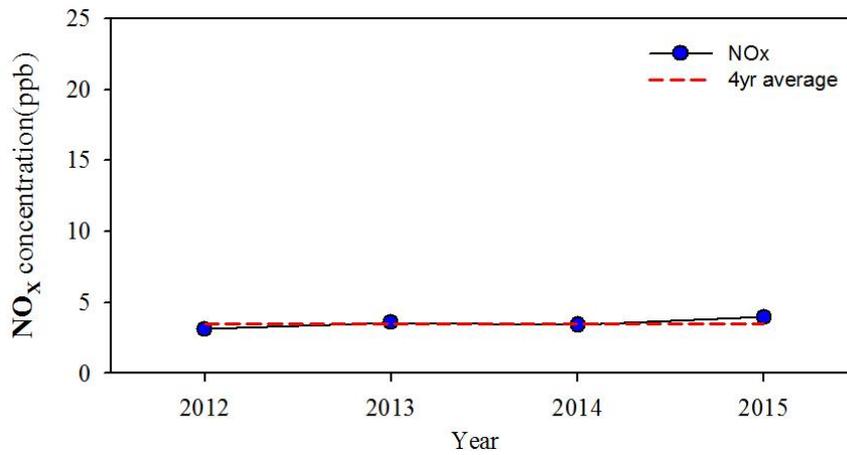


그림 3.2.12 고산 NO_x의 최근 4년간 연평균 농도 변화 경향

3.2.4 이산화황(SO₂)

SO₂은 황산에어로졸의 전구체로 복사강제력이 -0.41 W/m^2 로 나타나며 태양빛을 산란시켜 지구 냉각화에 기여한다(IPCC, 2013). SO₂은 석탄, 기름 연소, 난방 등에서 주로 배출된다. 무색의 자극성이 강한 기체로 액화되기 쉬우며, 기관지염, 천식, 폐기종, 폐쇄성 질환을 일으킨다.

가. 안면도

안면도의 최근 10년간(2004~2015년) SO₂ 농도는 연중 1.2~5 ppb 범위에 있으며, 겨울철(11, 12, 1, 2월)에 높고 여름철(6, 7, 8월)에 상대적으로 농도가 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다(그림 3.2.13). 2015년 월평균 농도의 범위가 3 ppb 이내로 최근 10년간의 월평균 농도보다 낮게 분포하였다. 2015년의 연중 농도 분포는 대체로 최근 10년간의 경향과 같이 겨울철에 높고 여름철에 낮게 나타났다. 최근 10년간의 월평균 최대 농도는 1월(5.0 ppb)에, 최솟값은 7월(1.2 ppb)에 나타났으며 2015년의 최대 농도는 1월과 12월에 2.4 ppb이고, 최솟값은 7월에 0.5 ppb로 나타났다. 안면도에서 SO₂은 평년에 비해 최댓값은 2.6 ppb, 최솟값은 0.7 ppb 가량 낮은 농도가 관측되었다.

안면도의 최근 10년간(2005~2014년) SO₂ 농도 평균은 2.6 ppb이며, 연평균 농도는 2012년 이후 조금씩 감소하고 있다(그림 3.2.14). 최근 10년 기간 중 2007년과 2008년에 최대 연평균 농도 3.3 ppb가 나타난 이래 2015년에 최솟값 1.4 ppb가 관측됨으로써 1.9 ppb 만큼 농도가 감소하였다. 2015년 연평균 농도는 1.4 ppb로 전년 평균 농도 1.7 ppb에 비해 0.3 ppb 만큼 감소하였으며 최근 10년간의 평균(2.6 ppb)에 비해 1.2 ppb 가 낮다.

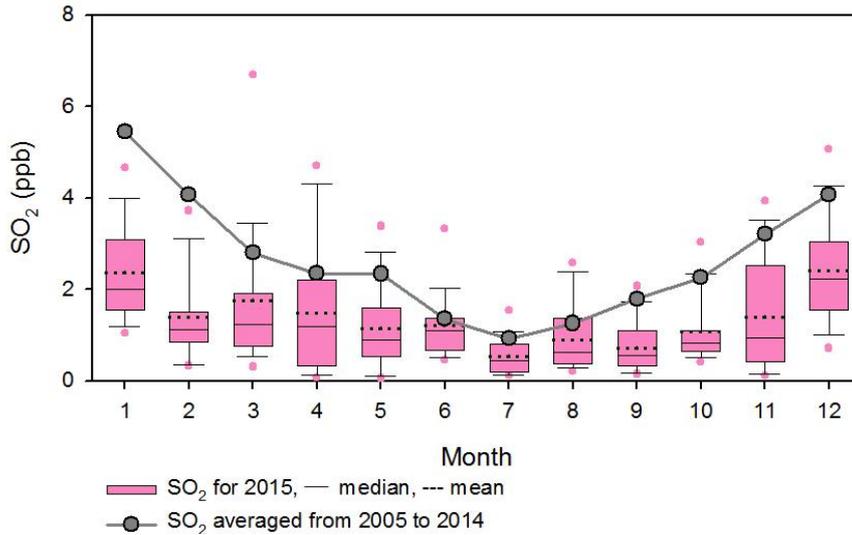


그림 3.2.13 2015년 안면도 SO₂의 월평균 농도와 최근 10년간 월평균 농도 비교

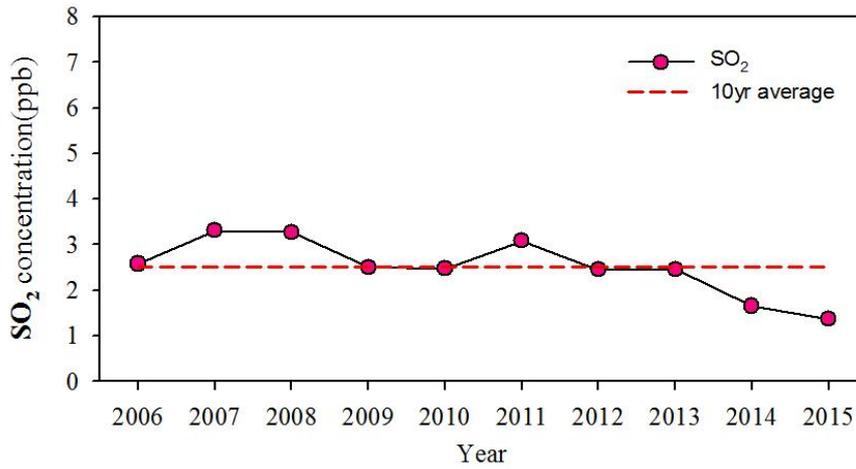


그림 3.2.14 안면도 SO₂의 최근 10년간 연평균 농도 변화 경향

나. 고산

고산에서 관측한 SO₂의 월평균 농도는 연중 1 ppb 이내의 범위에 있으며, 다른 시기에 비해 6, 7월과 9, 10, 11월에 월중 농도분포가 상대적으로 좁게 분포하였다. 2015년의 최대 월평균 농도는 6, 7월(0.7 ppb)에, 최소 월평균

농도는 1월(0.2 ppb)에 나타났다. 즉, 고산에서 SO₂은 2015년과 최근 4년 동안 최댓값과 최솟값을 보인 시기가 일치하지 않으나 모두 1 ppb 이내로 낮은 농도 범위에서 분포하였다.

고산의 최근 4년간(2012~2015년) SO₂ 농도 평균은 0.5 ppb이며, 연평균 농도가 증가하지도 감소하지도 않고 0.5 ppb의 수준을 유지하고 있다.

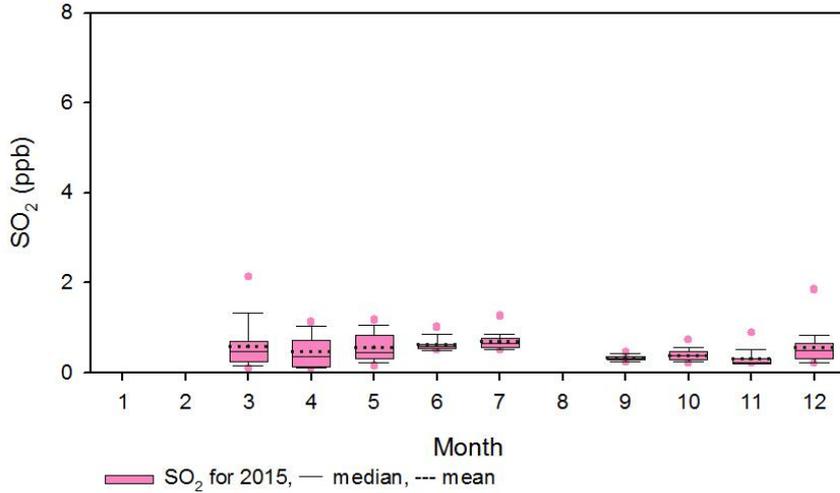


그림 3.2.15 2015년 고산 SO₂의 월평균 농도

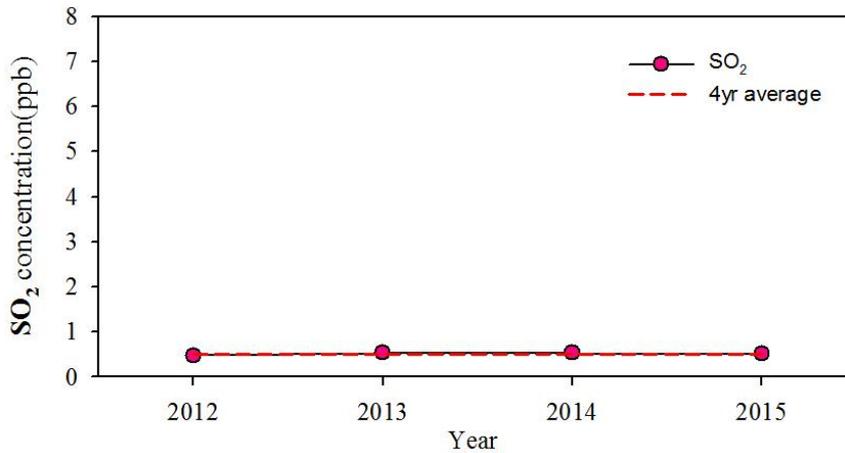


그림 3.2.16 고산 SO₂의 최근 4년간 연평균 농도 변화 경향

3.3 에어로졸

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

에어로졸은 황사, 화산재, 해염같이 자연적 요인에 의해 생성되기도 하고 인간 활동에 따른 인위적 요인에 의해서 만들어질 수도 있다. 도시·산업시설 배출, 소각, 자동차 등은 인위적 오염물질의 주요 발생원이다. 인위적 오염 물질로는 검댕, 황화합물, 유기화합물 등이 있다. 이처럼 다양한 종류의 에어로졸은 서로 다른 운동역학과 광학 특성을 가진다. 그래서 에어로졸 특징 또한 지역별로 다르고 국가마다 다르다.

에어로졸 크기는 핵화 모드(0.001~0.01 μm), 에이트켄 모드(0.01~0.1 μm), 축적 모드(0.1~1 μm), 조대 모드(1 μm 이상)로 나눈다. 에이트켄모드는 확산이나 응축 과정을 거치며, 수 시간에서 수 일 동안 공기 중에 잔존하는 반면, 조대모드는 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 μm 이하의 미세먼지는 호흡기질환, 심질환 발병에 영향을 준다. 에어로졸은 대기오염물질과 결합하여 산성비, 스모그, 시정 감소의 원인이 될 뿐만 아니라 대기 중에 부유하여 지표면으로 들어오는 태양복사에너지를 차단하거나 흡수하여 기후변화를 유발시키는 강제력으로 작용하기도 한다. 에어로졸 복사강제력은 평균적으로 음(-)의 강제력인 $-0.9(-1.9 \text{ to } -0.1) \text{ W/m}^2$ (1750~2011년) 수준으로 알려져 있다(IPCC, 2013). 그 밖에 대기에서 구름이나 강수형성에 중요한 응결핵이나 빙정핵의 역할을 함으로써 구름 형성과 물리특성을 변화시킨다. 이것을 에어로졸 간접효과라고 하는데 에어로졸 간접효과는 지구알베도를 바꾸어 기후변화를 초래하는 원인이 된다.

기상청은 안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시소에서 PM10 질량농도, 이온성분, 광산란계수, PMX 질량농도 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 중 에어로졸 질량농도와 수농도를 측정하여 분석한다. 질량농도는 부유분진측정기(이하 β -ray PM₁₀)로 관측한다. 에어로졸 입경별 수농도는 공기역학입자계수기(APS)와 전자유도입자계수기(SMPS)를 이용하여 관측한다. β -ray PM₁₀은 국내 황사관측망의 기본 관측 장비로 운영되고 있다. 입자크기별 수농도는 공기역학입자계수기, 전자입자유도계수기로 각각 관측한다. 공기역학입자계수기는 0.5 μm 부터 20 μm 까지 상대적으로 큰 입자의 수농도를 주로 측정한다. 반면, 전자입자유도계수기는 가스상에서 성장한 0.5 μm 이하 입자의 수농도를 주로 측정하며 입자생성 현상을 분석하기에 편리하다.

가. 안면도의 PM10 질량농도

β -ray PM₁₀은 대기에 부유하는 직경 10 μm 이하 에어로졸의 질량농도를 연속 측정한다. 탄소의 방사성 동위원소인 탄소-14(C¹⁴)에서 방출되는 β 선을 필터에 포집된 에어로졸에 투과시킬 때 에어로졸이 흡수·산란하여 감소된 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 μg 이며, 장비를 포일(foil)로 교정할 때 기기로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 A 는 필터 스폿(spot)의 면적(cm^2)이며, μ/ρ 는 C¹⁴의 질량감쇠계수(cm^2/mg)이다.

2015년 안면도에서 측정한 PM10 질량농도의 월평균은 25.8~52.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이에 분포하며 최근 10년간(2005~2014년) 월평균과 비교했을 때 2월과 9월을 제외하고는 비슷하거나 낮았다. 특히 평년에는 4, 5월에 최대였으나 2015년 4, 5월의 PM10 질량농도는 최근 10년보다 약 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮았고, 11월에도 최근 10년 평균에 비해 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 낮았다. 2015년에는 2, 3월에 가

장 높은 값으로 관측되었는데, 이 기간 중 안면도는 3번의 황사 영향을 받았기 때문에 생각된다. 특히 2월 22일의 PM10 질량농도는 $542 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 상승하여 월평균을 높이는 데 기여하였다. 안면도 PM10 질량농도 연평균은 2005년 이후 대체로 감소하는 추세이며, 최근 10년 평균은 $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 2015년의 연평균은 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평년보다 약 17% 낮게 나타났다(그림 3.3.1).

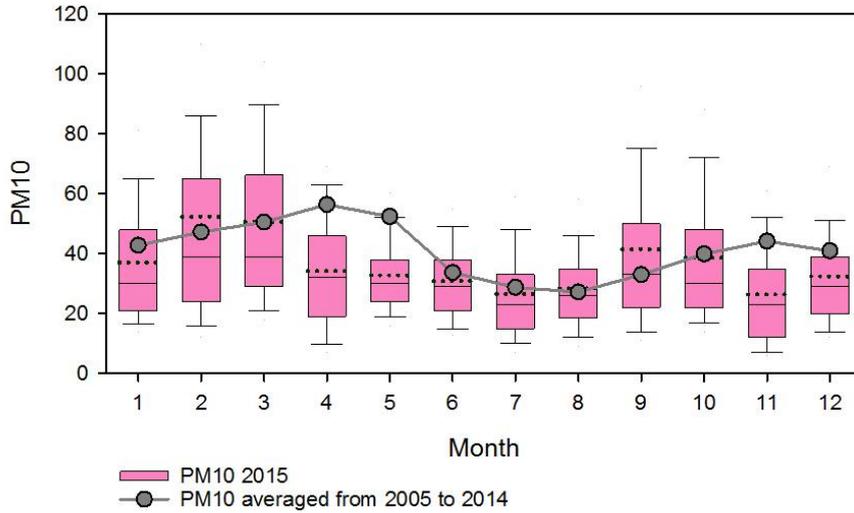


그림 3.3.1 최근 10년 안면도의 PM10 질량농도 월평균과 2015년 월별 변화(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$). 실선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 가로실선은 중간값, 점선은 평균

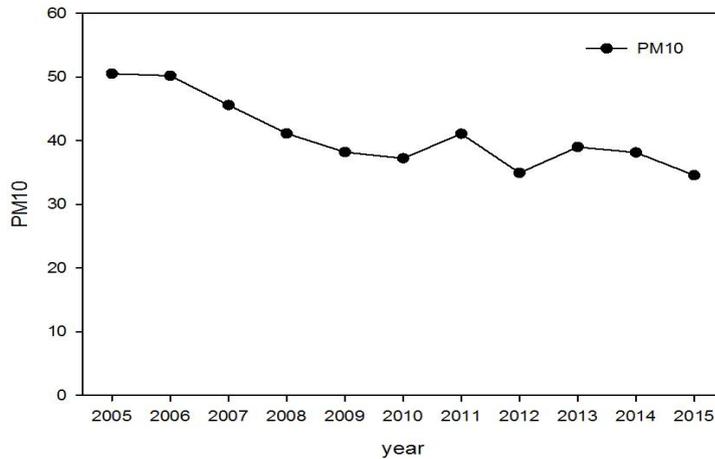


그림 3.3.2 안면도 PM10 질량농도의 최근 10년간 연평균 변화($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

나. 에어로졸 수농도

1) 안면도

안면도에서는 2006년부터 공기역학입자계수기(APS)와 2005년부터 전자유도입자계수기(SMPS)로 직경이 $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 인 에어로졸과 직경이 $0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 인 에어로졸의 수농도를 각각 측정해 왔다.

2015년 안면도에서 측정한 연평균 에어로졸의 입경별 부피농도를 보면, 최근 8년(2007~2014년) 평균에 비해 $1 \mu\text{m}$ 이하의 농도가 높은 것이 두드러진다(그림 3.3.3). 월별 분포를 보면 5월에서 8월 사이에 미세입자 영역의 농도가 높은 것을 알 수 있다(그림 3.3.4).

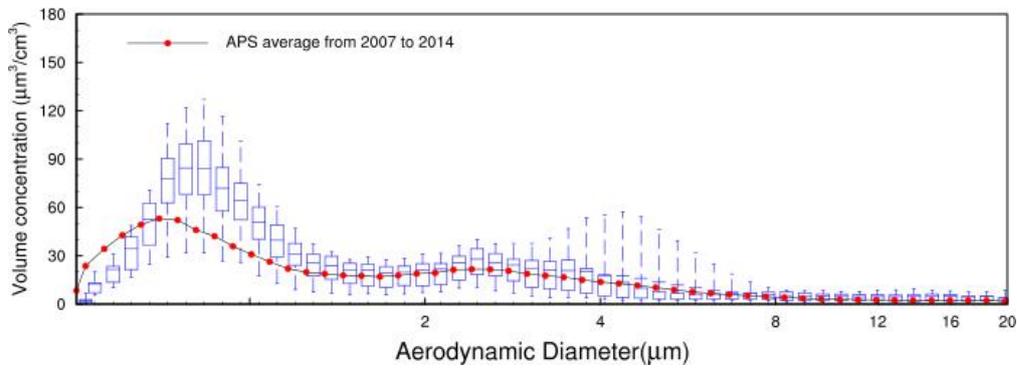


그림 3.3.3 안면도에서 측정한 크기별 에어로졸($0.5 \sim 20 \mu\text{m}$, 52 채널)의 2015년 박스플롯과 최근 8년(2007~2014년) 부피농도 평균

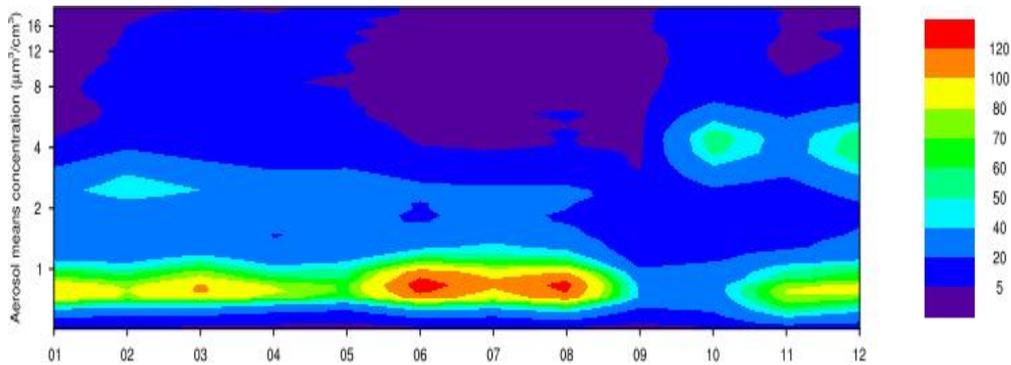


그림 3.3.4 2015년 안면도 월별 입자크기분포

2015년 안면도에서 측정한 초미세먼지 입자크기별 연평균 수농도는 그림 3.3.5와 같다. 에이트킨 모드인 직경 $0.1 \mu\text{m}$ 부근의 입자수가 가장 많다. 2015년의 초미세먼지 수농도는 최근 10년(2005~2014년) 평균에 비해 다소 낮았다. 월별 수농도 분포를 보면 4~9월 사이에 수농도가 가장 높아 이 기간에 입자 생성이 활발했을 것으로 생각된다(그림 3.3.6).

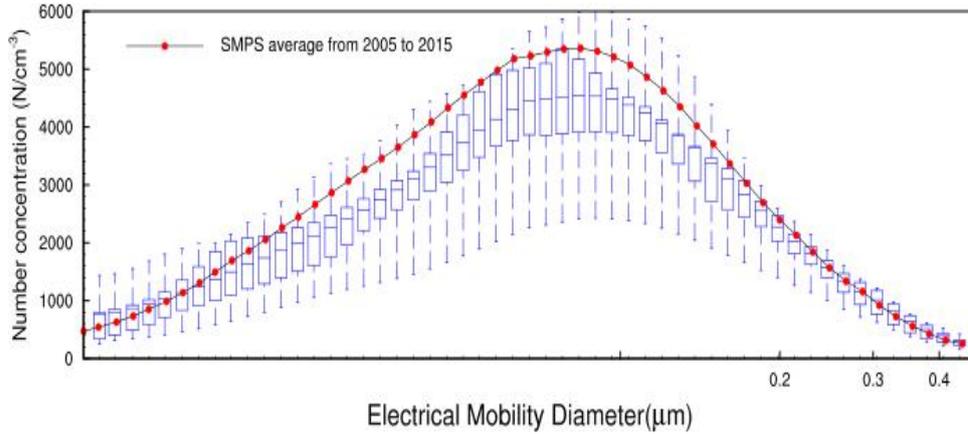


그림 3.3.5 안면도에서 측정한 크기별 에어로졸($0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}$)의 2015년 박스플롯과 최근 10년(2005~2014년) 부피농도 평균

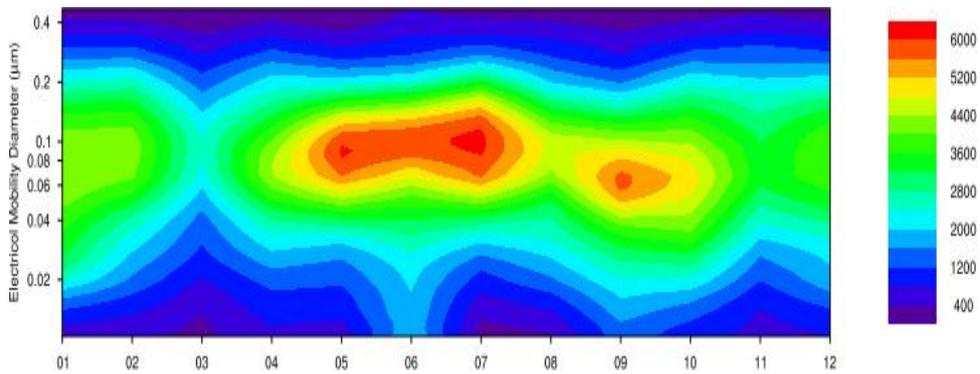


그림 3.3.6 2015년 안면도의 에어로졸($0.01 \sim 0.5 \mu\text{m}$) 입자크기별 일평균 수농도

2) 고산

고산에서는 공기역학입자계수기와 응결핵계수기(condensation particle

counter, CPC)를 이용해 에어로졸 수농도를 감시하고 있다. 응결핵계수기는 0.01~3.0 μm 구간의 에어로졸 총수농도($\#/ \text{cm}^3$)를 관측하기 위한 장비이다. 광학적인 방법으로 측정이 불가능한 작은 크기의 입자를 열역학적 특성을 이용해 광학적으로 측정 가능한 크기로 성장시켜 입자의 수농도를 측정한다.

2015년 고산에서 측정한 연평균 에어로졸의 입경별 부피농도는 최근 6년(2009~2014년) 평균에 비해 1 μm 이하의 농도가 높은 것이 두드러진다(그림 3.3.7). 6월부터는 공기역학입자계수기 장애가 발생하여 수리 의뢰하였고, 12월까지 관측이 중단되었다. 관측된 자료를 보면 5월에 미세입자 영역의 농도가 가장 높고, 1월과 2월에 조대입자 영역의 농도가 가장 높았다(그림 3.3.8).

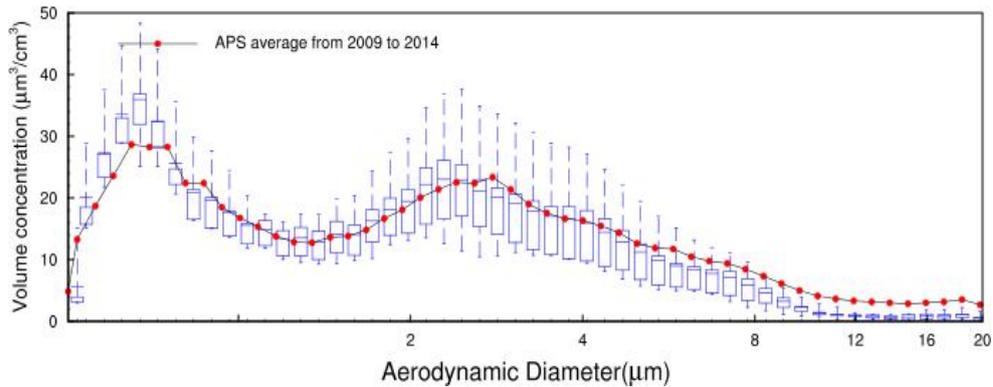


그림 3.3.7 고산에서 측정한 크기별 에어로졸(0.5~20 μm , 52 채널)의 2015년 박스플롯과 최근 6년(2009~2014년) 부피농도 평균

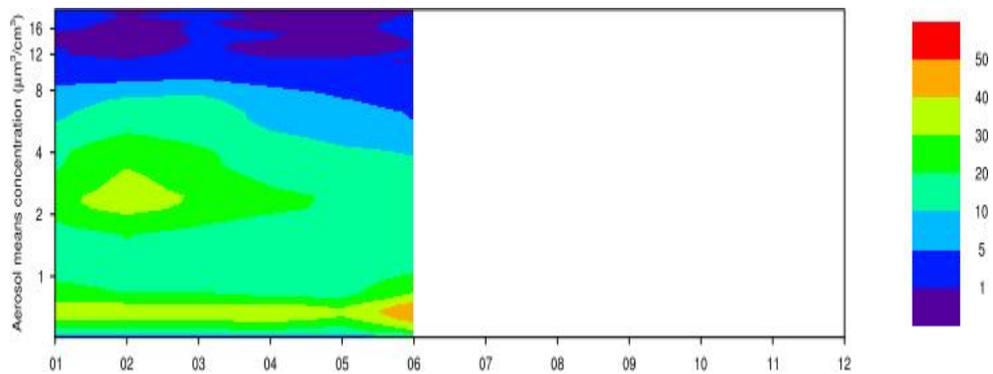


그림 3.3.8 2015년 고산 월별 입자크기분포

고산에서 관측한 에어로졸 응결핵 수농도의 월변동을 그림 3.3.9에 보였다. 최근 5년(2010~2014년)의 자료에서는 가을에 가장 높고 여름에 가장 낮았다. 9월까지의 자료를 보면 5월과 7월의 수농도가 가장 높고, 2월에 가장 낮았다. 2015년 9월 하순에 응결핵계수기(CPC) 장애가 발생하여 12월까지 관측이 이루어지지 않았다. 고산에서 관측한 응결핵 수농도의 연평균은 2010년부터 2013년까지 감소하였으나 이후 약간 증가하였다(그림 3.3.10). 그러나 최초 관측 년도인 2010년에 비해 절반 수준을 유지하고 있다.

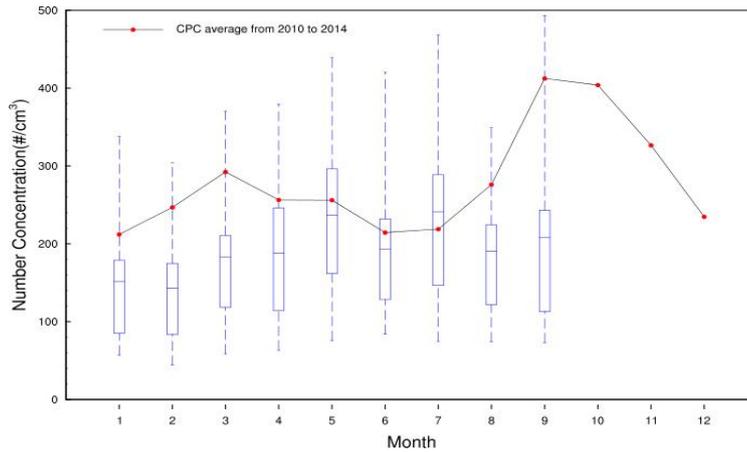


그림 3.3.9 2015년 고산의 0.01~3 μm 사이 에어로졸 응결핵 수농도의 월변동(점-선 그래프는 2010~2014년 평균)

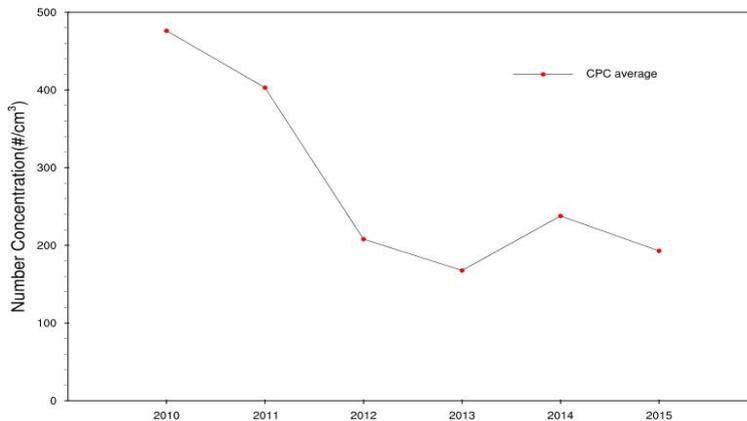


그림 3.3.10 고산의 0.01~3 μm 사이 에어로졸 연평균 응결핵 수농도 변화

3.3.2 에어로졸 광학특성

안면도 기후변화감시소에서는 광산란계수측정기(Nephelometer)와 광흡수계수측정기(Aethalometer)를 이용하여 1997년부터 에어로졸 광학 특성을 측정하고 있다. 광산란계수측정기는 450, 550, 700 nm의 세 파장에서 에어로졸 광산란계수를, 광흡수계수측정기는 370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm의 7개 파장에서 블랙카본 질량농도를 측정한다.

가. 안면도의 광산란계수

광산란계수측정기(TSI model 3563)는 가시영역의 파장인 450, 550, 700 nm의 입자에 대한 산란정도를 Beer-Lambert 법칙을 적용하여 1분 간격으로 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. 측정부의 PMT(photomultiplier tubes)는 광자 수(photon counts)를 세 파장에 대해 각각 측정한다.

에어로졸 광산란계수(σ_{sp})는 Anderson et al.(1996)에서 제시한 방법으로 아래와 같이 구할 수 있다.

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

위 식에서 K_2 는 보정계수, C_m 은 광자 수, W 는 기기 내부에 의한 산란, $\sigma_{s-air}(T, P)$ 는 건조대기 온도(T), 압력(P) 상태에서 알려진 대기(공기)에 의한 광산란계수이다. 산란계수를 알고 있는 스펠(span) 가스인 이산화탄소(CO_2)의 광자 수를 측정하여 K_2 를 구하여 기기에 대한 검·교정을 정기적으로 실시한다. 안면도 기후변화감시소는 2015년에 2회의 검·교정을 실시했다.

2015년 안면도 기후변화감시소에서 측정한 550 nm의 월평균 에어로졸 광산란계수를 그림 3.3.11에 보였다. 2015년 안면도 에어로졸의 월평균 광산란계수는 65.5~140.1 M/m의 분포를 보였다. 월평균 최댓값과 최솟값은 각각 3월과 9월에 관측되었다. 1, 4~6, 9월 과거평균(2003~2014년)보다 광산란계수가 낮았고, 특히 5월에 과거보다 24% 낮았다. 3, 8, 11, 12월은 과거보다 높았으며, 그 중 3월과 11월은 각각 24, 20% 과거보다 높았다. 2, 7, 10월은 과거와의 차이가 10% 내외로 비슷했다.

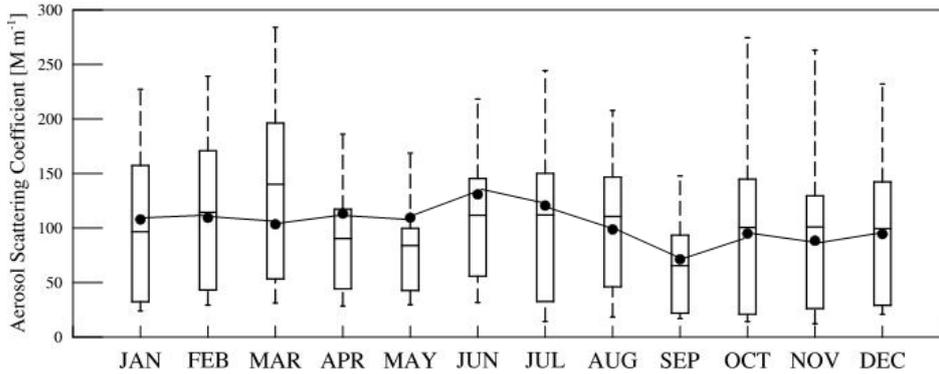


그림 3.3.11 2015년 안면도에서 관측한 월별 에어로졸 광산란계수(550 nm). 파선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 가로선은 평균, 점-선은 2005-2014 평균

2005~2014년 동안 에어로졸 광산란계수는 2005년에 최댓값(130.7 M/m), 2010년에 최솟값(83.6 M/m)을 보였다. 2015년의 연평균 에어로졸 광산란계수는 101.2 M/m로 2014년 106.5 M/m와 비슷했고, 2013년의 89.8 M/m 보다는 높았다(그림 3.3.12). 연평균 에어로졸 광산란계수는 2005년부터 2010년까지 뚜렷한 감소추세를 보이다가 그 이후 소폭 상승했다.

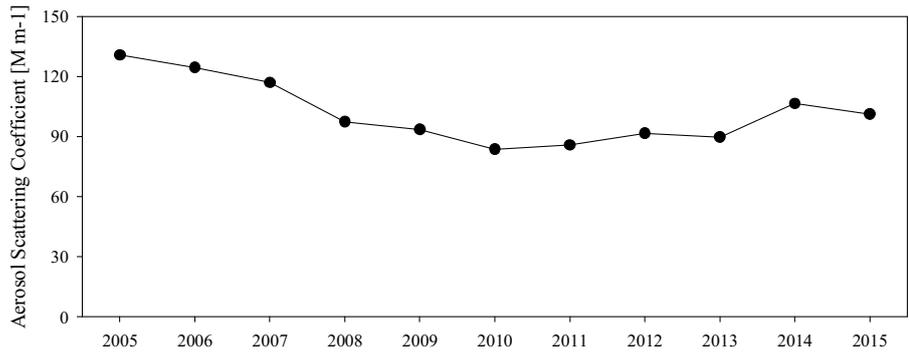


그림 3.3.12 2005-2015년 안면도의 연도별 에어로졸 광산란계수(550 nm)

나. 안면도의 지상 에어로졸 옹스트롬 지수

옹스트롬 지수(Å)는 광산란계수의 파장 의존도를 나타내는 것으로 다음과 같은 관계가 있다.

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

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

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

위의 식으로부터 광산란계수측정기에서 산출되는 450, 550, 700 nm 등 세 파장의 광산란계수로부터 지상 에어로졸의 옹스트롬 지수를 구하였다. 옹스트롬 지수는 에어로졸의 상대적인 크기 정보를 알려주며, 이 값이 작을수록 입자의 크기가 작다고 해석할 수 있다.

2015년 안면도 기후변화감시소에서 측정한 550 nm의 월평균 에어로졸 옹스트롬 지수를 그림 3.3.13에 보였다. 2015년 에어로졸 옹스트롬 지수의 월평균은 1.50~1.86의 분포를 보였다. 최댓값은 5월에, 최솟값은 1월에 관측되었다. 2~7월과 11월에는 과거평균 보다 옹스트롬 지수가 높았으며, 특히 3월과 4월에 모두 18% 높았다. 나머지 월은 10% 내외로 비슷했다.

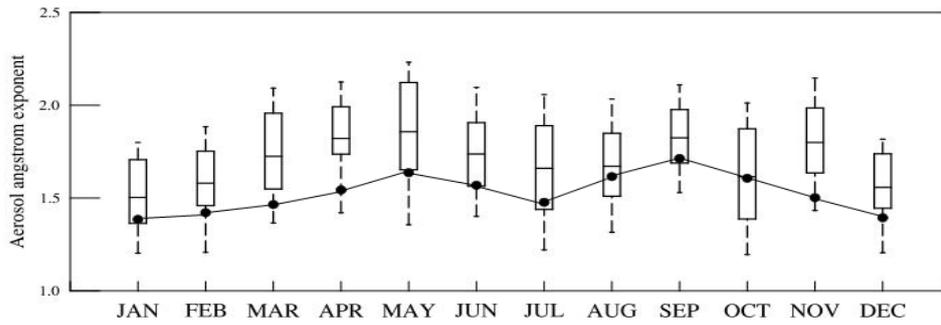


그림 3.3.13 2015년 안면도에서 관측한 월별 에어로졸 옹스트롬 지수. 파선의 양끝은 10, 90%, 상자 양끝은 25, 75%, 상자 가운데 가로선은 평균, 점-선은 2005-2014 평균

2005~2014년 동안 에어로졸 옹스트롬 지수는 2011년에 최댓값(1.63), 2006년이 최솟값(1.39)을 보였다. 2015년의 연평균 에어로졸 옹스트롬 지수는 1.71로 최댓값을 보인 2011년도보다 약 5%가 높았다(그림 3.3.14).

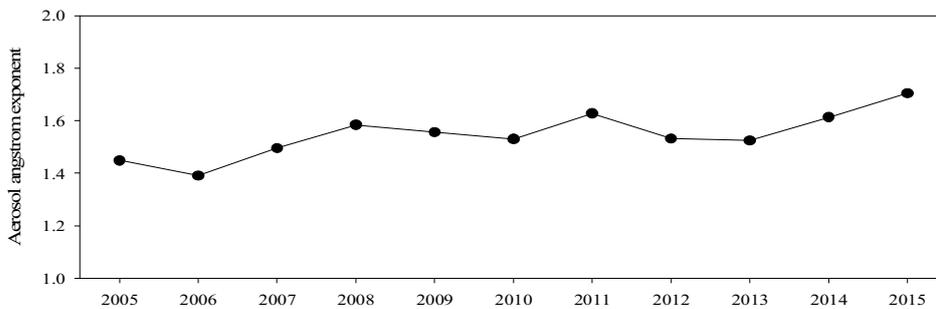


그림 3.3.14 2005-2015년 안면도에서 관측한 연별 에어로졸 옹스트롬 지수

다. 안면도의 광흡수계수

에어로졸 광흡수계수를 측정하는 광흡수계수측정기(에셀로미터, Magee Sci., AE-31)는 석영필터에 에어로졸을 포집하여 370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm의 7파장에서 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 감소된 빛의 세기를 뜻한다. 에어로졸이 필터에 일정 시간(Δt) 동안 포집되면, 감쇄계수(σ_{ATN})는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 A 는 에어로졸이 필터에 포집된 면적, Q 는 포집공기의 유량(3.9 L min⁻¹)이다. 검댕(Black Carbon)의 질량농도는 다음과 같이 산출된다.

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

여기서 α_{ATN} 은 880 nm에서의 교정인자(감쇄단면적), λ 는 파장이다.

검댕의 질량농도로부터 Schmid et al. (2006)에서 제시한 방법을 이용하여 광흡수계수를 산출했으며, 필터에 의한 적산효과는 Schmid et al.(2006), 다중산란효과는 Zhuang et al.(2015)에서 제시한 상수를 이용해 보정하였다. 평균 자료처리 방법은 에어로졸 광산란계수와 같은 기준을 적용하였다.

안면도 기후변화감시소는 2001년부터 2010년 4월까지 880 nm 단일 파장 광흡수계수측정기로 관측하였고, 2010년 7월부터 7파장의 광흡수계수측정기를 도입하였다. 2010년 4월까지 생산된 880 nm에서의 광흡수계수 자료는 2011~2015년의 7개 파장의 자료로부터 계산한 에어로졸 흡수 옹스트롬지수를 이용하여 550 nm의 에어로졸 광흡수계수로 환산하였다.

2015년 안면도 기후변화감시소에서 측정한 550 nm의 월평균 에어로졸 광흡수계수를 그림 3.3.15에 보였다. 2015년 에어로졸 광흡수계수 월평균은 4.9(9월)~12.4 M/m(12월)로 관측되었다. 2월, 3월은 2005~2014년 평균과 10% 내외로 비슷했다. 1월, 4~9월은 과거 평균보다 낮게 관측되었으며, 특히 9월은 49% 낮게 관측되었다. 11, 12월은 각각 12, 26% 높게 관측되었다.

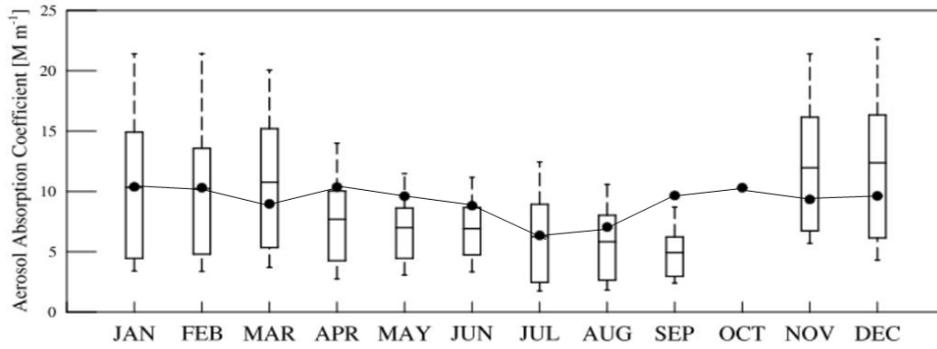


그림 3.3.15 2015년 안면도에서 관측한 월별 550nm 에어로졸 광흡수계수. 파선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 가로선은 평균, 점-선은 2005-2014 평균

2005~2015년 동안 에어로졸 광흡수계수는 2013년에 최댓값(10.2 M/m), 2009년에 최솟값(8.2 M/m)을 보였다. 2015년 연평균 에어로졸 광흡수계수는 8.7 M/m로 최솟값을 보인 2005, 2009~2011년과 비슷했다(그림 3.3.16).

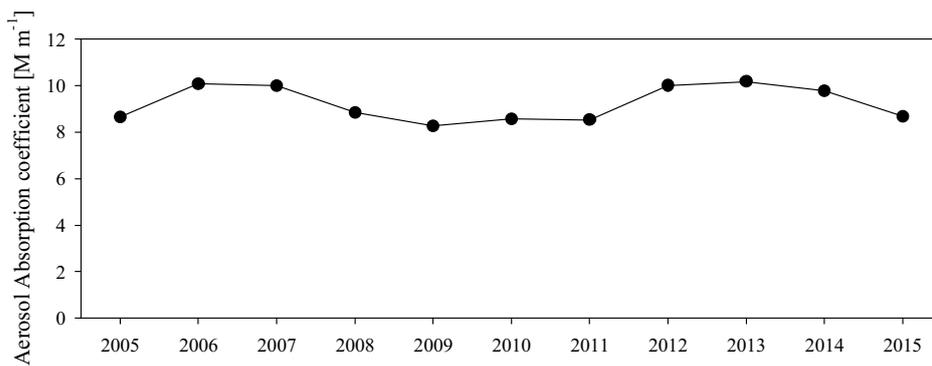


그림 3.3.16 2005-2015년 안면도에서 관측한 에어로졸광흡수계수(500 nm)

라. 에어로졸 광학깊이(AOD)

1) 서울

연세대학교 서울 캠퍼스에서 2004년부터 현재까지 브루어 분광광도계 (SCI-TEC #148)로 286.5~363.0 nm까지의 자외선 영역을 관측하고 있으

며, 이 중에 320.1 nm에서 광학깊이(AOD) 자료를 산출하고 있다. 여기서 사용하게 되는 광학깊이(AOD)는 Brewer (#148)에 의하여 관측한 파장 320.1 nm의 광학깊이(AOD)를 의미한다.

그림 3.3.17은 2004년 3월부터 2015년 12월까지의 일평균 광학깊이(AOD)를 시계열로 나타낸 것이다. 2015년에는 브루어 분광광도계가 자동적으로 수은램프 교정을 하지 못하고 태양을 제대로 따라가지 못하는 문제로 인해, 봄철과 여름철 관측이 일부 수행되지 못하였다. 특히 4월 3일부터 4월 28일, 6월 19일부터 8월 19일까지는 관측이 되었지만, 신뢰도가 낮기 때문에 그림 3.3.17과 그림 3.3.18의 그래프에서는 제외하였다. 2015년은 총 관측일수는 274일로 2014년(275일)과 비슷했다.

광학깊이(AOD) 관측은 직달 일사를 통해서만 가능하다. 이러한 이유로 직달 관측수가 상대적으로 적은 강수나 구름이 많은 날짜에 관측된 광학깊이(AOD) 값들은 제외되었다. 매년 문제가 되었던 여름철 잦은 강수로 인한 관측 일수의 감소는 2015년 여름에도 발생하였으나, 강수 날짜의 변동성과 일수의 감소로 인해 다른 년도에 비해 더 많은 관측을 수행할 수 있었다.

그림 3.3.17은 2004~2015년까지의 일별 광학깊이(AOD) 값을 의미한다. 2015년 일평균 광학깊이(AOD)의 최댓값은 5월 7일에 4.3으로 나타났으며, 이는 2008년의 4.2와 2010년의 4.6의 일평균 최댓값을 보인 해와 비슷한 값을 보였다. 관측 기록 중 최댓값은 최근 2011년 5월 26일에 발생한 5.2이다.

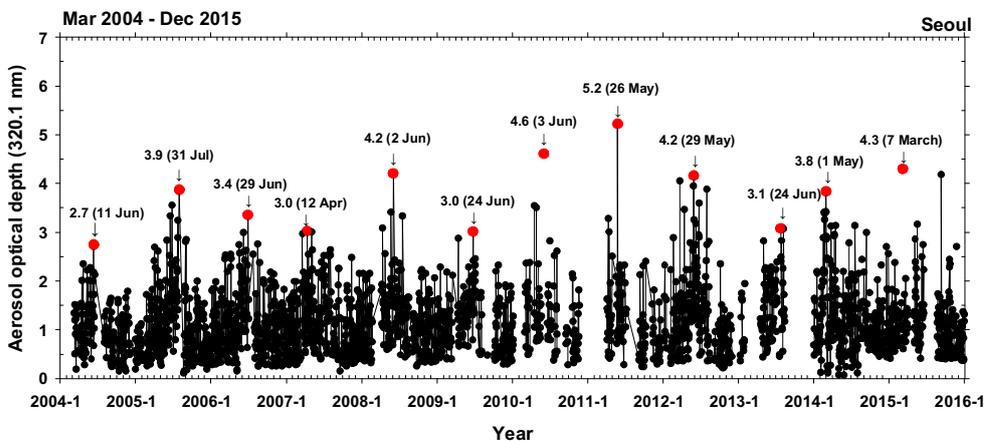


그림 3.3.17 일평균 에어로졸 광학깊이(AOD, 320.1nm)의 시계열(2004.3~2015.12)

월평균 광학깊이(AOD)의 연변화(2004~2015년)를 그림 3.3.18(a)에 표시하였다. 이 그림에서 월평균 최대 광학깊이(AOD) 값은 6월에 1.41, 최솟값은 12월에 0.77로 지난해와 비슷한 경향을 보였다. 광학깊이(AOD)의 연변화를 살펴보면, 그림 3.3.18(a)에서 나타났듯이 여름철에 최댓값을 보이며 평균적으로 겨울철에 값이 적게 나타남을 알 수 있다.

그림 3.3.18(b)는 2004년부터 2015년까지의 연평균 광학깊이(AOD)의 경년변화를 나타낸 것이다. 2015년의 연평균 광학깊이(AOD)는 1.11로 전 기간의 평균 광학깊이(AOD) 1.156 보다 약 4% 낮게 나타났다. 이는 2015년도 브루어 분광계의 자료 중 계절적으로 높게 나타나는 7월의 자료가 빠졌음에도 불구하고, 가을철 광학깊이(AOD) 값이 높게 나타난 결과로 보인다. 이러한 추세는 장기변화경향 분석 그림인 그림 3.3.18(b)에서도 나타나 있다.

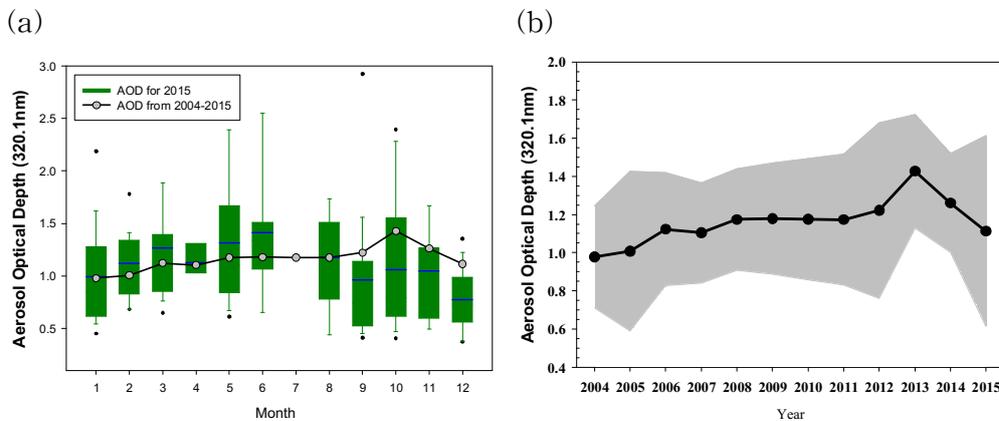


그림 3.3.18 서울 상공 광학깊이(AOD)의 2015년 연변화(녹색 박스 플롯 2015년의 오존전량 ; 상자 선의 양끝 10, 90% 상자 양끝 25, 75% 상자가운데 선은 중간값, 검은 점은 최댓값 및 최솟값). (a) 장기월평균 연변화(1985~2015) (b) 연평균 경년변화

2) 광주

광주과학기술원은 2004년부터 CIMEL사의 태양 파장별 일사계(Sun/sky radiometer 또는 Sunphotometer)를 이용하여 광주과학기술원 다산빌딩 옥상에 설치되어 운영 중이다. 본 장비는 태양광을 사용하며 구름이 있을 때 제거하고 관측을 수행하며 에어로졸 광학깊이(Aerosol Optical Depth; AOD)와

Precipitable water를 측정하고 Inversion 알고리즘을 통해 에어로졸의 광학적 특징인 파장역지수(Angstrom Exponent: α), 에어로졸 입자의 크기 분포(Aerosol volume size distribution), 단산란알베도(Single scattering albedo) 등의 인자를 산출해 오고 있다(Duvobik과 King, 2002). 현재 광주과학기술원의 태양 파장별 일사계는 전지구적 에어로졸의 광학적 특성 산출 및 인공위성 자료의 검보정 활용을 위해 미국항공우주국(NASA)의 에어로졸 네트워크(AErosol RObotic NETwork; AERONET)에 소속되어 있으며 해당 사이트(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)를 통해 사용자에게 실시간으로 데이터를 제공하고 있다. 태양 파장별 일사계의 관측 파장은 자외선 영역인 340 nm 파장과 가시광선 영역의 380, 440, 500, 67, 870 nm의 5개 파장과 적외선 영역인 1020 nm 파장에서의 태양 광도를 측정 중에 있다. 특히, 중국으로부터 유입되는 황사의 영향 연구를 위해 1640 nm 파장 채널을 추가 설치하여 관측을 진행 중에 있다.

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 다양한 종류의 지역적 에어로졸이 발생한다.

그림 3.3.19는 태양 파장별 일사계로 측정한 2015년 월별 수증기량(a), 440~870 nm 두 개의 파장에서 파장역지수(b), 440 nm 파장에서 에어로졸 광학적 두께(c) 자료를 2004년부터 2014년까지의 관측 결과의 평균 자료와 비교하여 나타낸 그림이다. 파장역지수는 대기 중 부유하는 에어로졸의 크기분포를 나타내는 척도로 황사처럼 입자 크기가 큰 에어로졸이 관측되었을 때 0에 가까운 낮은 값을 보이고 입자가 미세한 에어로졸일수록 2에 가까운 값을 갖는다. 에어로졸의 광학적 두께는 대기 중에 존재하는 에어로졸에 의해 빛이 산란과 흡수를 통해 소산되는 양을 측정한 것으로 대기 중에 많은 에어로졸이 분포하면 값이 높아진다. 2015년 관측 데이터는 구름에 의한 영향이 제거되어 바로 산출된 Level 1.5 자료를 사용하였으며, 2004년부터 2014년까지의 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.

표 3.3.1은 2015년 월별 관측일수 및 관측 횟수를 표시한다. 여기서 2015년 1월부터 8월까지의 장비의 정확한 관측과 자료 해석을 위해 2014년에 NASA

에서 장비 교정 작업을 수행하고 케이블 노후화 문제로 다시 NASA에 보내지면서 관측이 장기간 중단되었기 때문이다.

2015년 에어로졸 광학적 두께의 월별 변화는 봄과 여름철에는 관측이 이뤄지지 않았고 9월과 10월에는 파장 440 nm에서 각각 0.22, 0.29로 0.3 이하의 낮은 값을 보여 맑은 날이 많았다(그림 3.3.19(c)). 2015년 11월에는 에어로졸 광학적 두께 값이 0.36로 증가했다. 2015년 9월에는 2004년부터 2014년까지의 평균 에어로졸 광학적 두께 0.33에 비해 값이 낮아졌지만 2015년에 9월의 파장역지수 값은 1.93으로 높은 값을 보이고 있어 에어로졸의 입자의 크기는 작은 것으로 나타났다(그림 3.3.19(b)). 이는 맑은 날에도 대기 중에는 작은 입자의 분포가 높았던 것으로 판단된다. 2015년 10월에는 에어로졸의 광학적 두께가 동년 9월과 0.3이하로 값이 비슷했지만 파장역지수 값은 1.27로 9월과 차이가 있었다. 하지만 여전히 미세입자의 비율이 조금 높을 것으로 판단된다. 2015년 12월의 경우는 관측 데이터 수가 작아 월별 대기 특성을 파악하기 어려웠다.

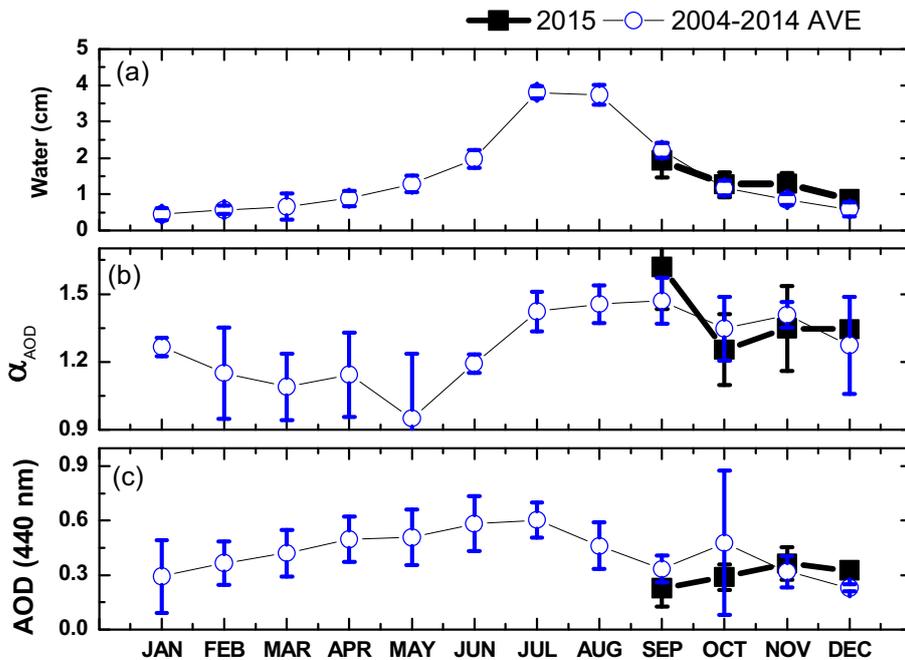


그림 3.3.19 (a)광주지역 광흡수 파장역지수, (b)광소산 파장역지수, (c)440 nm에서의 에어로졸 광학적 두께. 사각형은 2015년 관측 결과, 원형은 2005년부터 2014년까지 관측된 결과의 평균

표 3.3.1 2015년 태양 파장별 일사계 월별 관측일수와 관측 횟수

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
관측일수	-	-	-	-	-	-	-	-	11	6	8	1
관측횟수	-	-	-	-	-	-	-	-	56	40	44	4

그림 3.3.20은 2015년 9~12월까지 관측된 월별 대기 에어로졸의 입자 크기 분포를 보여주고 있다. 입자 크기 분포는 관측된 입자의 입경이 1 μm 이상인 조대입자와 이하인 미세입자로 표현하며 그림에서 표현되는 조대입자와 미세입자의 봉우리 높이와 폭으로부터 각각의 입자 분포를 파악할 수 있다.

그림 3.3.20(a)에서 2004~2014년 동안 9월 평균 입자크기 분포의 경우, 미세먼지 중 조대입자에 비해 미세입자의 비율이 높은 분포를 보였지만 2015년에는 미세입자와 조대입자의 분포가 비슷한 형태를 보여주고 있다. 2015년 10월의 경우 미세입자와 조대 입자의 비율이 과거에 비해 비슷해졌는데 이는 감소한 평균 떡지수(그림 3.3.19(b))와 일치하는 결과이며 2015년 11월은 과거 미세입자 비율이 월등히 높았지만 2015년에는 떡지수 값이 감소하는 결과와 일치하게 미세먼지와 조대입자의 분포가 비슷해졌다.

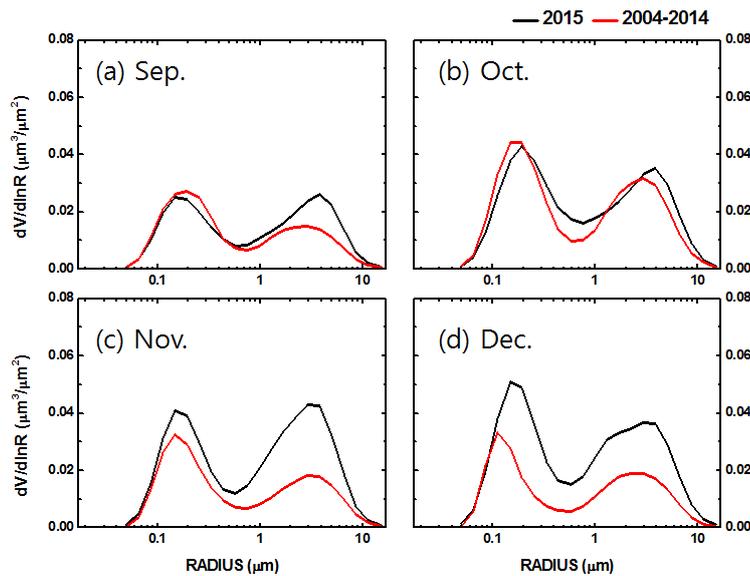


그림 3.3.20 2015년과 2004~2014년 월별 평균 입자 크기 분포

그림 3.3.21은 2015년 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 있다. 연무와 같은 인위적 오염물질이나 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 2015년 12월의 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 SSA를 보인다. 하지만 그림 3.3.20(d)의 입자의 크기 분포 자료에서 조대 입자에 비해 미세입자의 비율이 높은 것으로 확인되어 인위적으로 발생하는 미세먼지에 황사와 같은 토양 성분이 섞여 있을 가능성이 높을 것으로 판단된다.

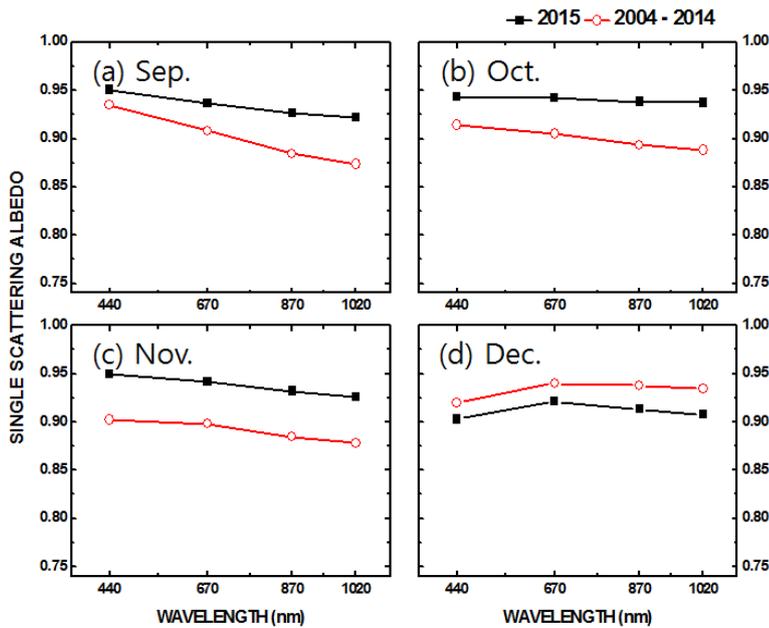


그림 3.3.21 2015년과 2004~2014년 월별 평균 단산란 알베도

마. 광주의 에어로졸 연직분포

광주과학기술원은 3β (backscatter) + 2α (Extinction)를 기초로 하는 국내 유일의 다파장 라만 라이더를 보유하고 있으며 지속적인 관측을 실시하고 있다. 다파장 라만 라이더는 355, 532 그리고 1064 nm 파장의 Nd:YAG 레이저를 광원으로 총 11개 관측 채널을 확보하고 있다. 레이저에서 생성된 광원은 여러 광학적 처리 과정을 거쳐 대기 중으로 수직 조사된다. 망원경을 통해 수집된 후방산란 신호는 광전자증배관(PMT)을 이용하여 신호를 증폭하는데, 이때 광학적 위치 배열은 레이저 파장을 중심으로 탄성산란 채널이 분포해 있고, 질소 라만을 이용한 채널이 설치되어 있다. 또한 수증기 라만 채널, 석영 라만 채널이 설치되어 있다. 그리고 355, 532 nm 파장에서의 에어로졸의 입자의 비구형성을 판단하기 위해 편광 채널이 설치되어 있다(그림 3.3.22).

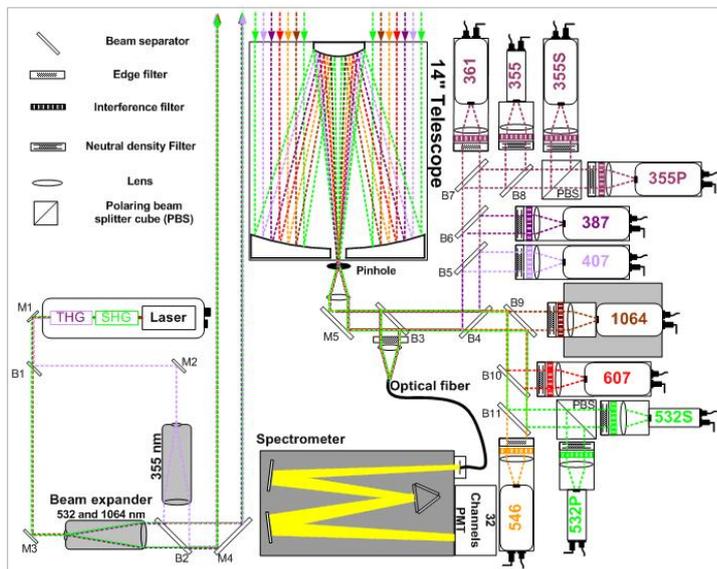


그림 3.3.22 광주과학기술원의 다파장 라만 라이더 모식도

지난 2015년에는 다파장 라만 라이더의 시스템 점검 및 업그레이드, 레이저 시스템의 교정 등의 이유로 관측 횟수가 제한되었다. 본 보고서에는 대기 경계층 바로 위로 약한 황사가 지나간 관측 예, 물방울 구름이 관측된 예, 그리고 대기 경계층 내에서만 황사가 관측된 예의 세 가지 경우 관측 예를 다루었다.

그림 3.3.23은 2015년 1월 19일에 관측된 대기 경계층 바로 위로 황사가 지나간 예를 보여준다. 그림 3.3.23(a)는 대기 에어로졸의 고도분포와 광학적 농도를 파악할 수 있는 532 nm에서의 후방산란신호를, 그림 3.3.23(b)는 입자의 비구형도를 파악할 수 있는 편광소멸도를 보여준다. 후방산란신호는 1.2 km 고도까지만 주요한 대기 에어로졸이 분포하고 그 이상의 고도에서는 대기 에어로졸이 거의 분포하지 않거나 매우 미세한 양이 분포함을 보여준다. 후방산란신호와 달리 편광소멸도는 주요한 에어로졸이 분포하는 대기 경계층 내에서는 0에 가까운 값을 보여주나 대기 경계층 바로 위의 1.2~1.5 km 고도에서 0.1에서 0.2 사이의 값을 보여준다. 편광소멸도가 0에 가까운 값을 보여주는 것은 분포하는 주요한 대기 에어로졸이 구형에 가깝다는 것을 말한다. 높은 값을 보이는 것은 비구형 입자가 많이 분포하고 있음을 나타낸다. 1월 19일의 관측 데이터는 대기 경계층 내의 주요 에어로졸은 구형 입자로 일반적인 오염입자임을 나타내며, 대기 경계층 위에서 편광소멸도가 높은 값을 보이는 것은 대기 경계층 상층으로만 황사를 포함한 에어로졸이 관측되었음을 나타낸다. 다만, 후방산란신호가 매우 미약한 지점이므로 그 농도는 매우 미약함을 알 수 있다.

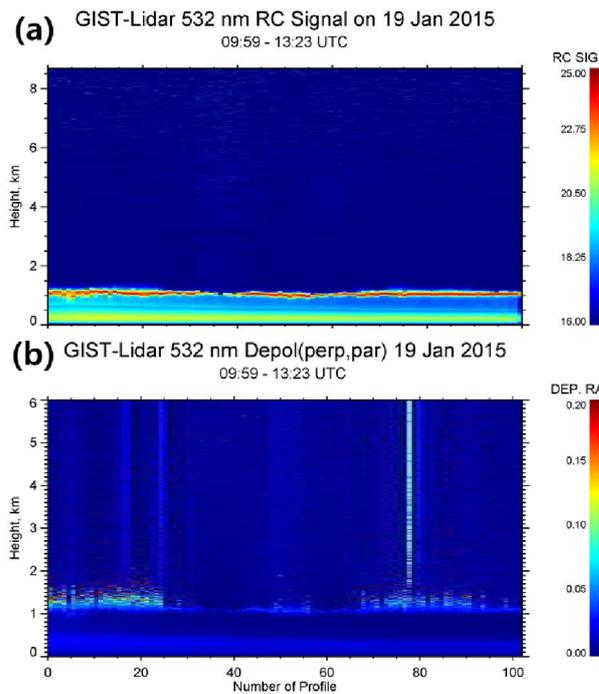


그림 3.3.23 관측 분석 데이터 (a)후방산란신호, (b)광소멸도 (1.월 19일)

그림 3.3.24는 1월 20일에 관측된 후방산란신호와 편광소멸도를 보여준다. 후방산란신호는 지표면에서 1 km 고도와 3.5~6 km 고도에서 높은 산란 신호가 관측된다. 하지만, 편광소멸도는 전체 관측 영역에서 0에 가까운 낮은 값의 분포를 보여준다. 특히, 상층에서 매우 강한 후방산란 신호가 관측된 영역에서 후방산란신호가 강한 지점일수록 편광소멸도가 낮은 값을 보이고 있다. 이는 상층에서 관측된 에어로졸이 구름임을 의미한다. 다만, 상층 강한 산란신호의 가장자리 영역에서 편광소멸도가 증가하는 것은 실제 신호가 증가한다기보다는 구름에 의한 강한 산란신호로부터 왜곡된 신호와 구름에 의한 레이저 투과율의 감소로 발생된 신호 잡음으로 간주된다.

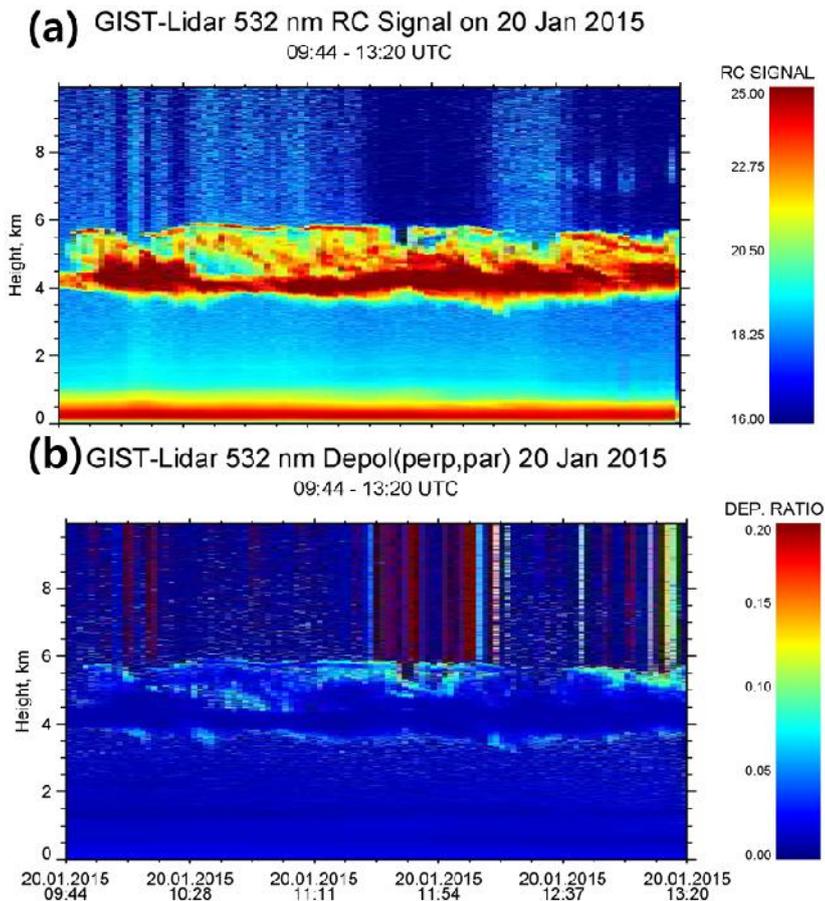


그림 3.3.24 관측 분석 데이터 (a)후방산란신호, (b)편광소멸도 (1월 20일)

그림 3.3.25는 2월 23일에 관측된 데이터로 2 km 고도까지 매우 강한 산란 신호가 관측되고 편광소멸도도 같은 영역에서 0.2 이상의 높은 값을 보여준다. 이는 관측된 대기 에어로졸이 높은 농도의 황사임을 나타낸다. 편광소멸도의 경우 오염입자만이 분포할 경우 0에 가까운 값을 보여주고, 오염입자에 황사가 혼합될 경우 편광소멸도가 증가한다. 황사의 비율이 높을수록 편광소멸도는 증가하며 오염입자가 혼합되지 않은 순수한 황사 입자가 관측될 경우 0.3 이상의 값을 보인다.

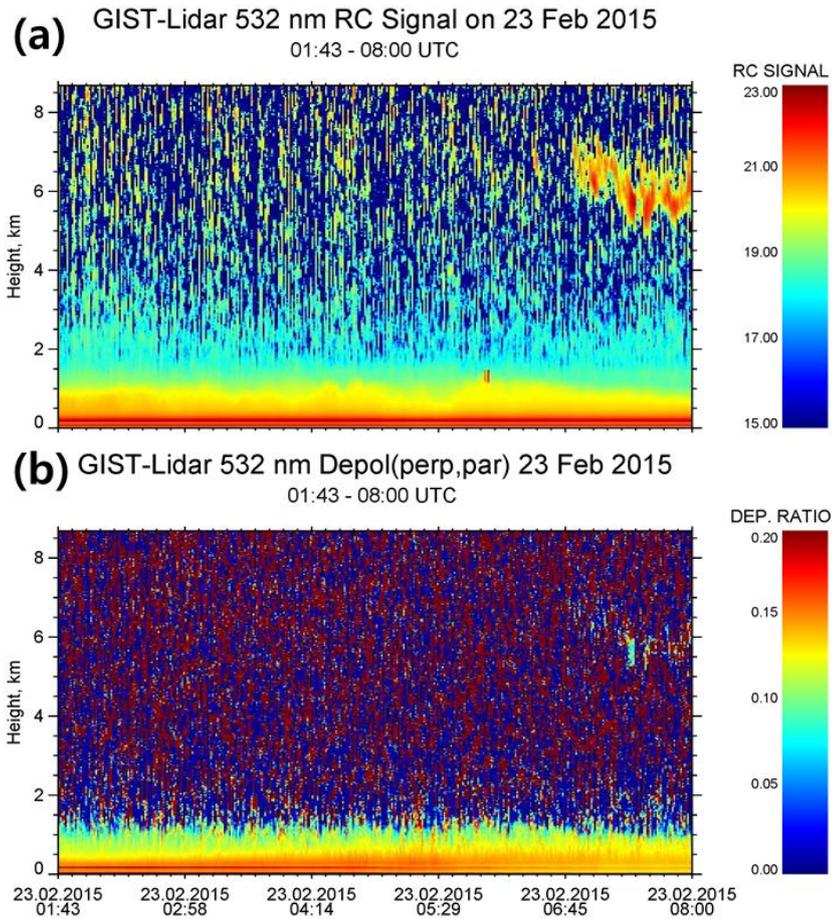


그림 3.3.25 관측 분석 데이터 (a)후방산란신호, (b)편광소멸도 (2월 23일)

3.3.3 에어로졸 화학특성

기상청 안면도 기후변화감시소에서는 매주 1회씩 24시간 동안 크기별로 총 부유분진(TSP)과 직경이 10 μm 이하인 에어로졸(PM10), 직경 2.5 μm 이하인 에어로졸(PM2.5)를 포집하여 에어로졸의 화학특성을 분석한다. TSP와 PM10은 2001년과 1997년부터 고용량 미세먼지채취기(High Volume Air Sampler)를 1999년부터 PM2.5는 저용량 미세먼지채취기(Low Volume Air Sampler)를 사용하였다. 또한 2008년부터는 사이클론 방식의 포집기를 이용하여 PM10과 PM2.5를 측정하고 있다. 2015년 안면도에서 실시한 에어로졸 포집방식과 관측 횟수는 표 3.3.2와 같다.

표 3.3.2 에어로졸 포집방식과 관측 횟수

방식	TSP	PM10	PM2.5	PM10 (cyclone)	PM2.5 (cyclone)
제조사/모델명	TISCH/ TE-HIVOL+	TISCH/ TE-PM10+	APM/ PMS-202	APM/ 2000A	APM/ 2000A
분립장치 방식	다단형	다단형	다단형	싸이클론형	싸이클론형
포집 성공 /관측횟수	55/56	55/56	56/56	54/56	55/56

가. 안면도의 에어로졸 질량농도

포집된 에어로졸의 질량농도는 포집 전후의 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(m^3)으로 평균 유량(m^3/min)에 포집시간(1440 min)을 곱한 값이다. 2015년 1월부터 2015년 12월까지 안면도 기후변화감시소에서 PM10, PM2.5 에어로졸 시료를 채취하여 질량농도를 측정하였다. 2015년 에어로졸의 전체평균 질량농도는 그림 3.3.26과 같다. PM10 $58.9 \pm 28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5 $28.1 \pm 21.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 이 중 이온 불균형(imbalance) 데이터와 화학성분 농도의 합보다 질량농도가 높은 데이터를 제거한 결과, PM10, PM2.5에

어로졸 시료의 질량농도는 PM10 $65.3 \pm 33.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=27), PM2.5 $30.1 \pm 19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=23)으로 조사되었다. 2015년 PM10, PM2.5 에어로졸 시료의 일별 질량농도는 그림 3.3.26과 같다. (구)서산기상대의 기상현상 관측 자료를 기초자료로 사용하였다. PM10은 $129.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사일인 2015년 2월 23일에 높은 농도를 보였으며, PM2.5는 $71.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약한 연무가 발생한 1월 14일에 높은 농도를 나타냈다.

현재 국내에서는 PM10, PM2.5의 에어로졸 농도가 24시간 기준 각각 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 설정되어있어 안면도 PM10, PM2.5의 질량농도는 국내 대기환경기준보다는 약간 높은 수준을 보였다. 그러나 이는 황사와, 연무와 같은 기상현상이 포함되어 있기 때문에 높은 값을 보이는 것으로 추정된다.

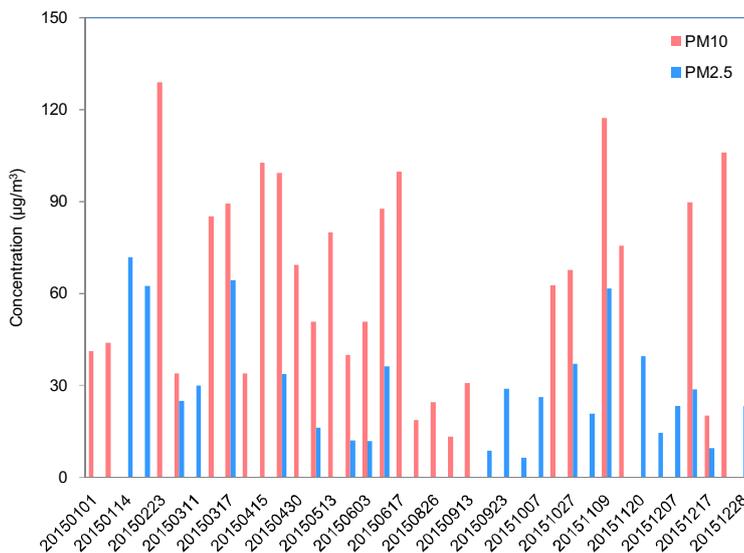


그림 3.3.26 2015년 안면도의 PM10, PM2.5의 일별 질량농도

2005년부터 2015년까지의 PM10, PM2.5 에어로졸별 평균질량농도와 비교 해본 결과는 그림 3.3.27~3.3.28과 같다.

PM10, PM2.5 에어로졸의 최근 10년간(2005~2014년) 평균 질량농도는 각각 $76.4 \pm 48.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=361), $39.5 \pm 23.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=191)로 나타났으며, 이는 2015년도 에어로졸 질량농도보다 모두 약간 높은 질량농도를 보였다. 국내 PM10, PM2.5의 1년 기준 농도가 각각 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 10년

간(2005~2014년) 안면도 PM10, PM2.5 에어로졸의 질량농도는 국내 대기환경기준보다 약간 높은 농도수준을 보였으나, 황사·연무와 같은 기상현상이 포함되어 질량농도가 높은 것으로 추정된다.

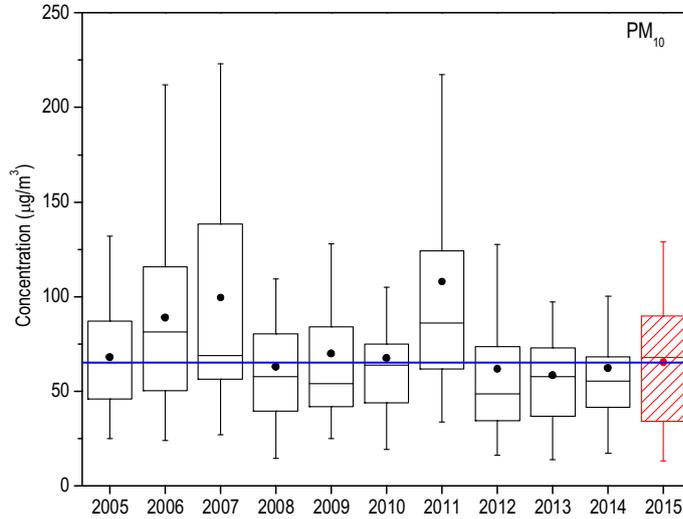


그림 3.3.27 2005~2015년 PM10의 연평균 질량농도. 파란색 실선은 2005~2014년 평균 질량농도, 상자 양끝 선 outlier(1.5)값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 선은 중간값, 점은 평균

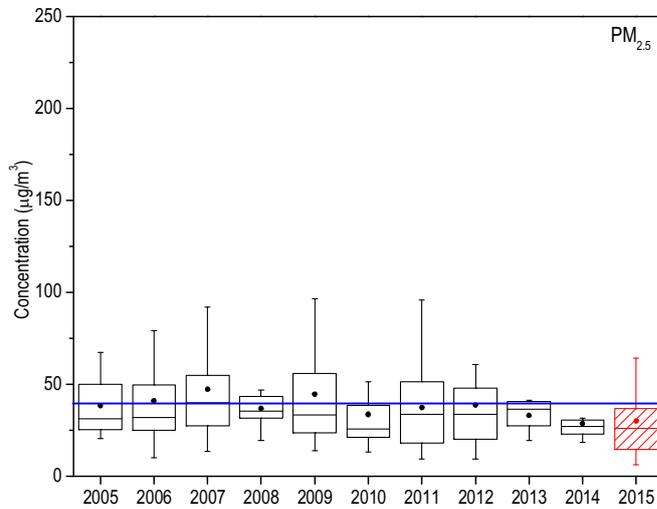


그림 3.3.28 2005~2015년 PM2.5의 연평균 질량농도

2015년 PM10, PM2.5 에어로졸 시료의 평균질량농도를 최근 10년간 (2005~2014년)의 계절별 각 에어로졸 평균질량농도와 비교한 결과는 그림 3.3.29와 같다. PM10은 봄철에 최근 10년간의 전체평균이 다른 계절보다 높은 농도를 보였고, 2015년은 겨울철이 가장 높은 농도를 보였다. PM2.5는 겨울철이 다른 계절보다 전체 평균과 2015년 계절별 평균농도가 높게 나타났다.

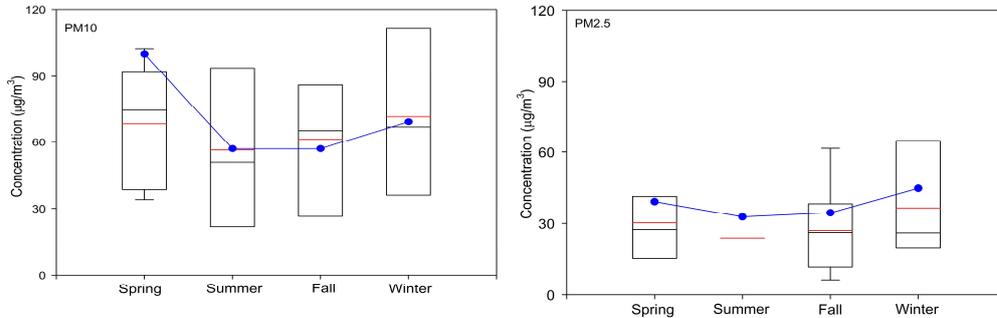


그림 3.3.29 2005~2015년 PM10, PM2.5의 계절별 평균질량농도

나. 안면도의 에어로졸 이온성분

2015년 1월부터 2015년 12월까지 안면도 기후변화감시소에서 PM10, PM2.5 에어로졸 시료를 채취하여 수용성 이온 9종(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})을 분석하였고, PM10 에어로졸의 원소성분은 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti, Mn, Zn, Cu, V, Cr, Co, Ni, Sr, Ba, Pb, U(or Mo)로 약 20종의 성분을 분석하였다. 이 중 이온 불균형(imbalance) 데이터와 화학성분 농도보다 질량농도가 낮은 데이터 제거 후, PM10, PM2.5 에어로졸 시료의 수용성 이온성분과 원소성분을 살펴보았다.

안면도에서 측정된 PM10, PM2.5 에어로졸의 이온 및 원소성분에 대한 연평균 농도는 그림 3.3.30~그림 3.3.35와 같다.

우선 수용성 이온성분 중 nss-SO_4^{2-} 는 비해염(non-sea salt) SO_4^{2-} 의 농도로, $[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Na}^+] \times 0.251$ 의 식에 의해 SO_4^{2-} 총 농도에서 해염으로부터 유입된 SO_4^{2-} 의 농도를 뺀 결과이다. nss-Ca^{2+} 역시 비해염 Ca^{2+} 의 농도로 nss-SO_4^{2-} 과 유사하게 $[\text{nss-Ca}^{2+}] = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Na}^+] \times 0.04$ 의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho et al, 2003).

PM10 에어로졸에서 이차오염물질 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 중 nss-SO_4^{2-} 농도는 2015년 $15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간 평균 농도 $14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 나타났다. 연도별로는 2012년도에 가장 높았고, 상대적으로 2001년에 낮은 경향을 보였다. NO_3^- 는 2015년 $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최근 10년간 평균 농도 $14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮게 나타났다. 연도별로는 2007년에 가장 높았고, 2005년에 낮은 값을 보였다. NH_4^+ 는 2015년 $10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년간의 평균농도 $9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 값을 보였다. 연도별로는 2015년에 가장 높고, 2005년에 가장 낮은 경향을 보였다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 2015년 $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균 농도 $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 2배 낮았다. 연도별로는 2011년도에 가장 높았고, 상대적으로 2015년에 낮은 경향을 나타냈다. 그 외 성분은 2015년 Cl^- , Na^+ 성분이 2005~2014년 전체 평균농도보다 높게 나타났고, K^+ , Mg^{2+} , F^- 성분이 전년도 보다 낮은 농도를 보였다. 또한 2005~2015년까지의 연도별 수용성 이온성분 농도를 비교해본 결과 2015년도에 Cl^- , 2010년은 Na^+ , 2007년도에는 Mg^{2+} 성분이 가장 높은 농도를 보였다.

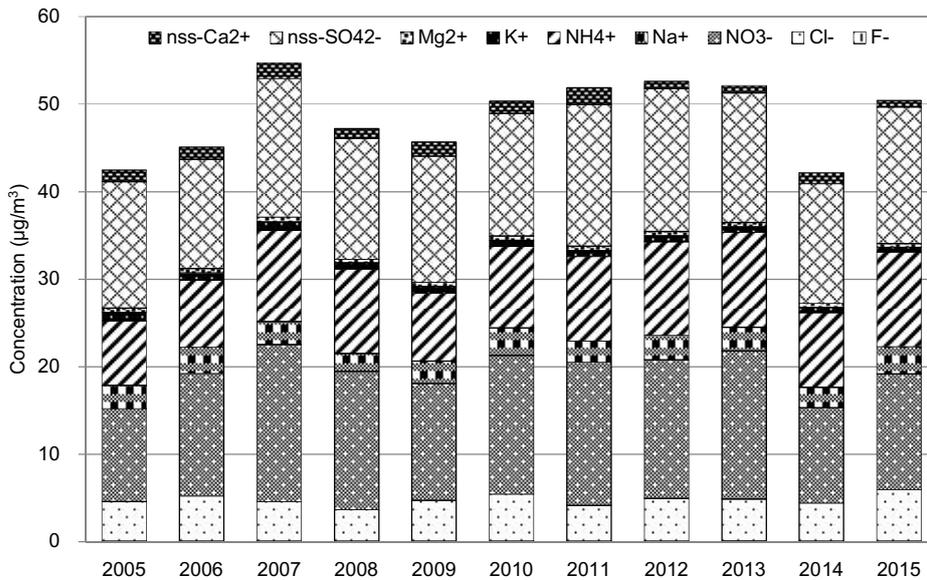


그림 3.3.30 2005~2015년 PM10 에어로졸 수용성 이온성분의 연평균 농도

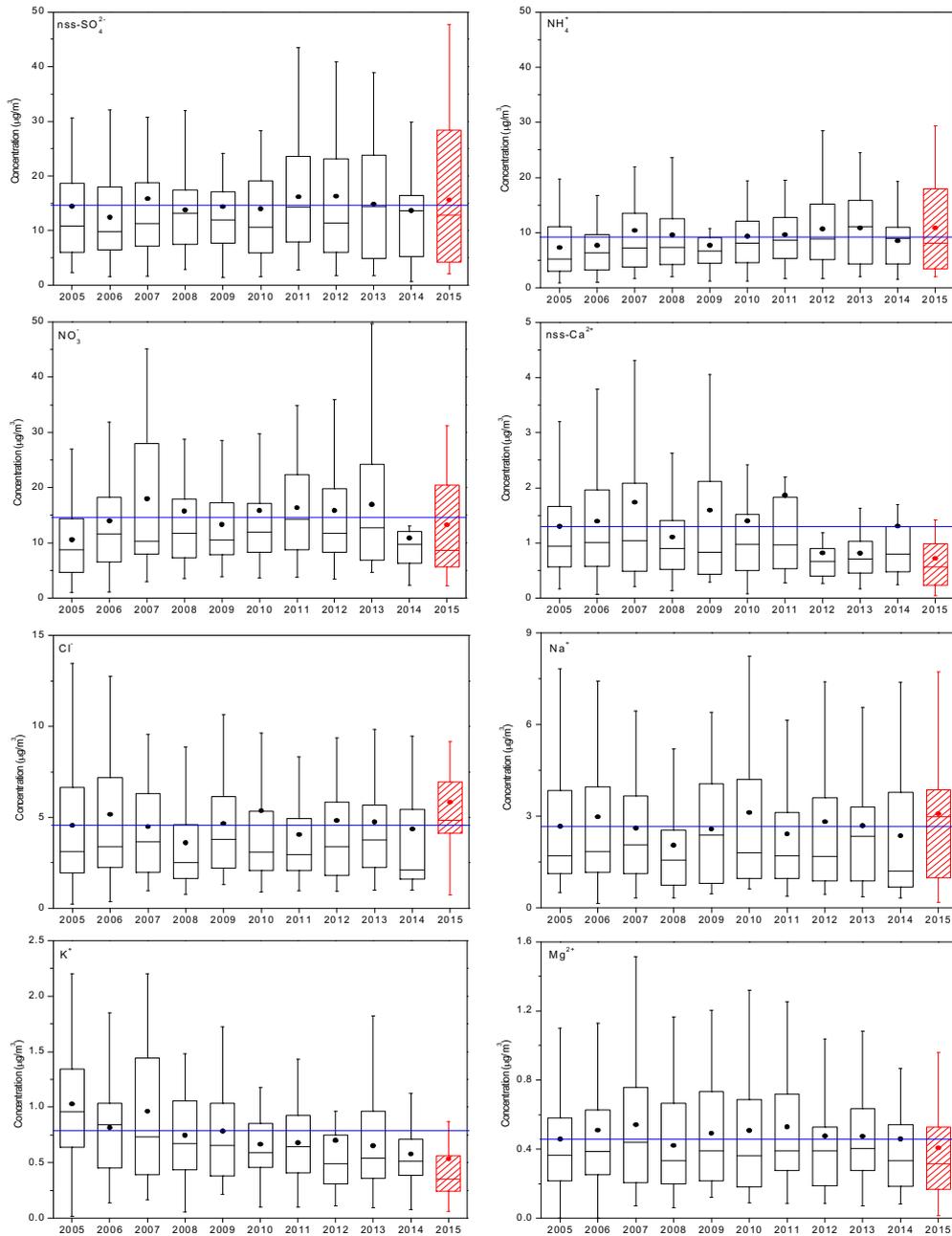


그림 3.3.31 2005~2015년 PM10 에어로졸 수용성 이온성분별 연평균 농도비교. 파란색 실선은 2005년~2014년(10년간)의 평균 질량농도, 상자 선의 양끝은 outlier(1.5) 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 선은 중간값, 점은 평균

PM2.5 에어로졸에서 이차오염물질 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ 중 nss-SO₄²⁻ 농도는 2015년 5.3 μg/m³로 최근 10년 평균 농도 6.4 μg/m³ 보다 낮은 경향을 보였다. 연도별로는 2005년이 가장 높고, 상대적으로 2011년에 낮았다. NO₃⁻는 2015년 5.9 μg/m³로 최근 10년 평균 농도 8.6 μg/m³ 보다 낮게 나타났다. 연도별로는 2009년에 가장 높고, 2014년에 낮은 값을 보였다. NH₄⁺는 2015년 3.1 μg/m³로 최근 10년간의 평균농도 2.8 μg/m³ 보다 약간 높은 값을 보였다. 연도별로는 2012년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮은 경향을 보였다. 토양성분인 nss-Ca²⁺은 2015년 0.5 μg/m³로 최근 10년 평균 농도 0.3 μg/m³ 보다 높게 나타났다. 연도별로는 2014년도에 가장 높고, 상대적으로 2008년에 낮은 경향을 보였다. 그 외의 성분은 2015년 Mg²⁺ 성분이 2005~2014년 전체 평균농도보다 높게 나타났고, K⁺, Na⁺, Cl⁻, F⁻ 성분은 최근 10년간의 평균농도보다 낮은 값을 보였다. 2005년도에 K⁺, 2006년도에는 F⁻, Na⁺, Cl⁻, 2014년은 Mg²⁺ 성분이 가장 높은 농도를 나타냈다.

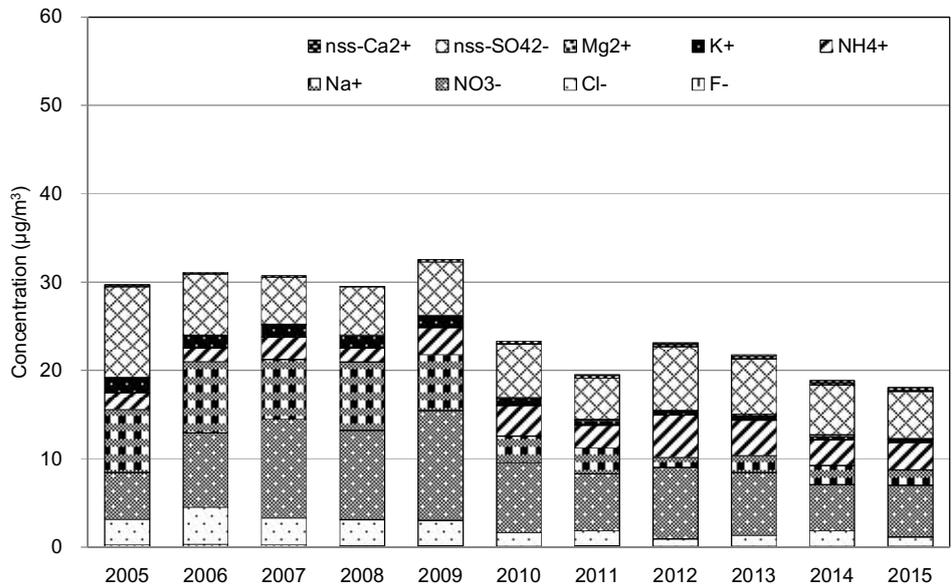


그림 3.3.32 2005~2015년 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분의 연평균 농도

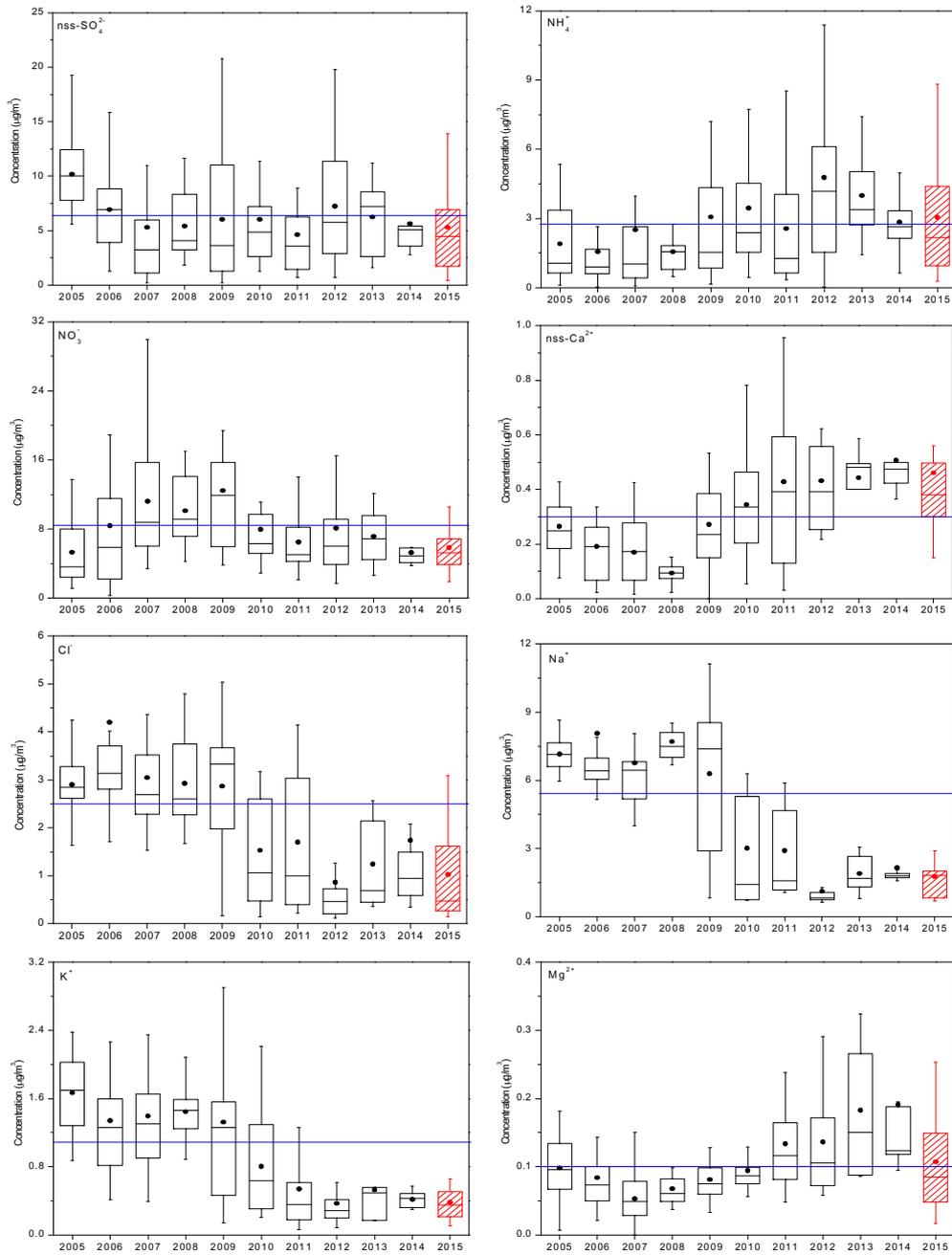


그림 3.33 2005~2015년 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분별 연평균 농도비교

PM10 에어로졸 원소성분 중에서 인위적인 기원성분인 S 성분은 2015년 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균 농도 $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 경향을 보였다. 연도별로는 2007년이 가장 높았고, 상대적으로 2008년에 낮은 경향을 보였다. Zn 성분은 연도별로는 2009년에 높고 상대적으로 2008년에 낮은 경향을 보였다. 2015년은 $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최근 10년 평균농도보다 낮은 값을 보였다. Pb의 농도는 연도별로 2007년에 높고 상대적으로 2008년에 낮은 경향을 보였으며, 2015년 $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년 평균농도보다 낮은 값을 보였다. 대표적인 토양성분인 Al, Fe, Ca 중 연도별로 각각 2007년, 2007년, 2009년에 가장 높았고 Al은 2012년, Fe은 2013년, Ca는 2015년에 상대적으로 낮은 경향을 보였다. 최근 10년간의 평균 농도는 각각, 2.2, 1.4, 1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 측정기간의 평균농도는 각각 0.8, 0.6, 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다.

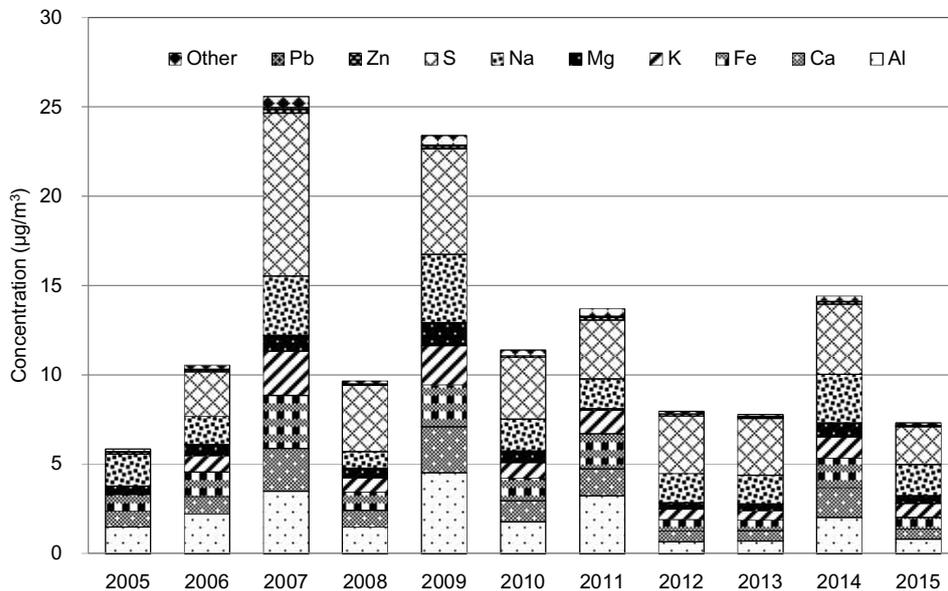


그림 3.3.34 2005~2015년 PM10 에어로졸 원소성분의 연평균 농도
 * Other: Ti, Mn, Cu, V, Cr, Co, Ni, Sr, Cd, Ba, U(or Mo)

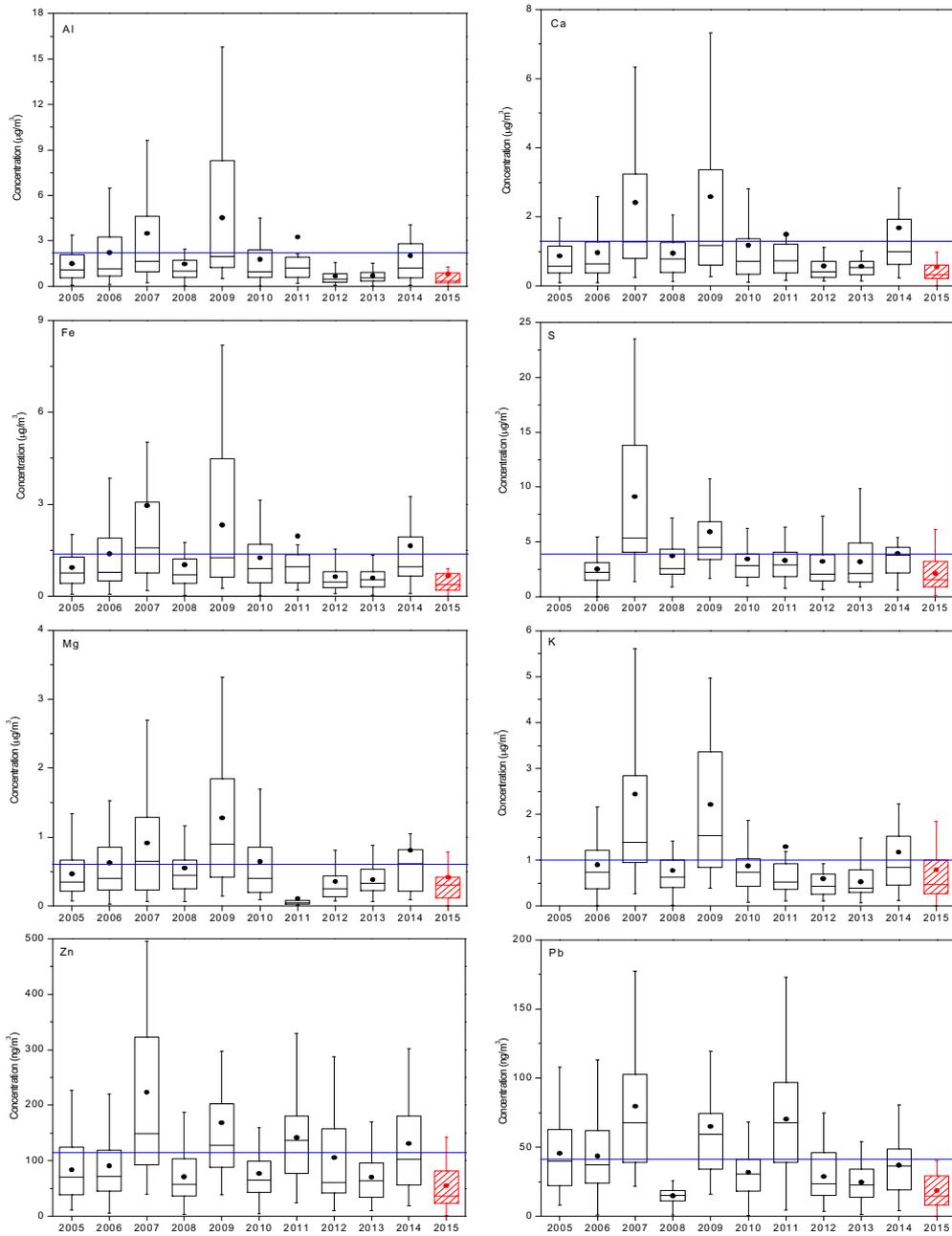


그림 3.3.35 2005~2015년 PM10 에어로졸 원소 성분 중 Al, Ca, Fe, S, Mg, K, Zn
과 Pb 성분별 연평균 농도비교

안면도에서 측정한 PM10, PM2.5의 이온성분과 PM10의 원소성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 3.3.36~그림 3.3.41과 같다. 여기서 PM10, PM2.5 이온, 원소성분의 월평균농도는 2005년부터 2015년까지 평균한 값이다.

PM10 에어로졸에서 이차오염물질 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ 중 가장 농도가 높은 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺의 최근 10년(2005~2014년)과 2015년의 계절별 농도를 비교해 보면, 최근 10년간의 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 각각 12.6~15.9, 11.5~17.4, 7.5~9.9 μg/m³로 조사되었다. nss-SO₄²⁻성분의 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철은 각각 21.6(n=10), 16.8(n=5), 6.1(n=6), 14.1(n=6) μg/m³, 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철 각각 15.5(n=10), 16.4(n=5), 7.6(n=6), 12.7(n=6) μg/m³, 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철은 각각 13.2(n=10), 13.7(n=5), 5.1(n=6), 10.3(n=6) μg/m³로 나타났다. 세 성분 모두 최근 10년과, 2015년 모두 봄철, 여름철에 가장 높은 것으로 조사되었다. 토양성분인 nss-Ca²⁺은 최근 10년간과 2015년의 계절별 농도를 비교해 보면, 최근 10년간의 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 0.4~2.0 μg/m³, 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 0.3~1.1 μg/m³로 최근 10년과, 2015년 모두 봄철에 가장 높고, 그다음으로 겨울, 가을, 여름 순으로 조사되었다.

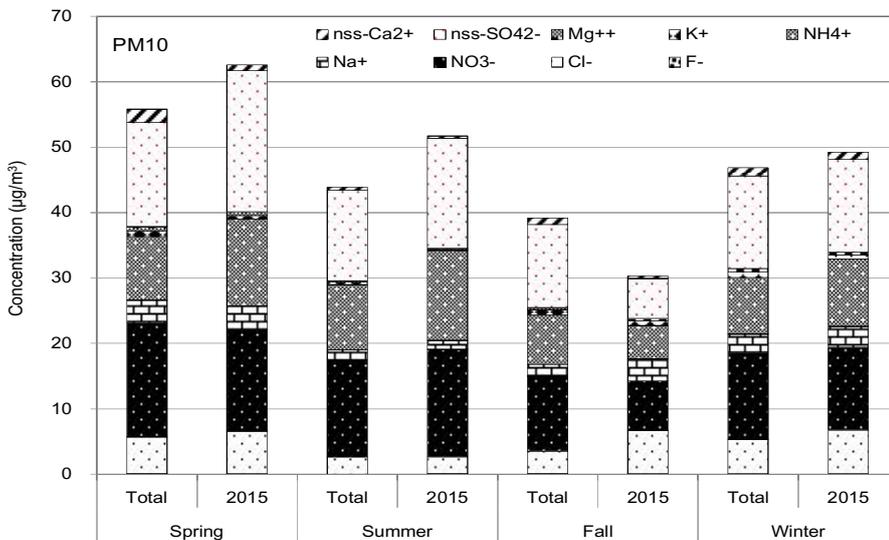


그림 3.3.36 PM10 에어로졸 수용성 이온성분의 계절별 평균 농도 (2005~2015년) *Total: 2005~2014년(10년간) 평균농도

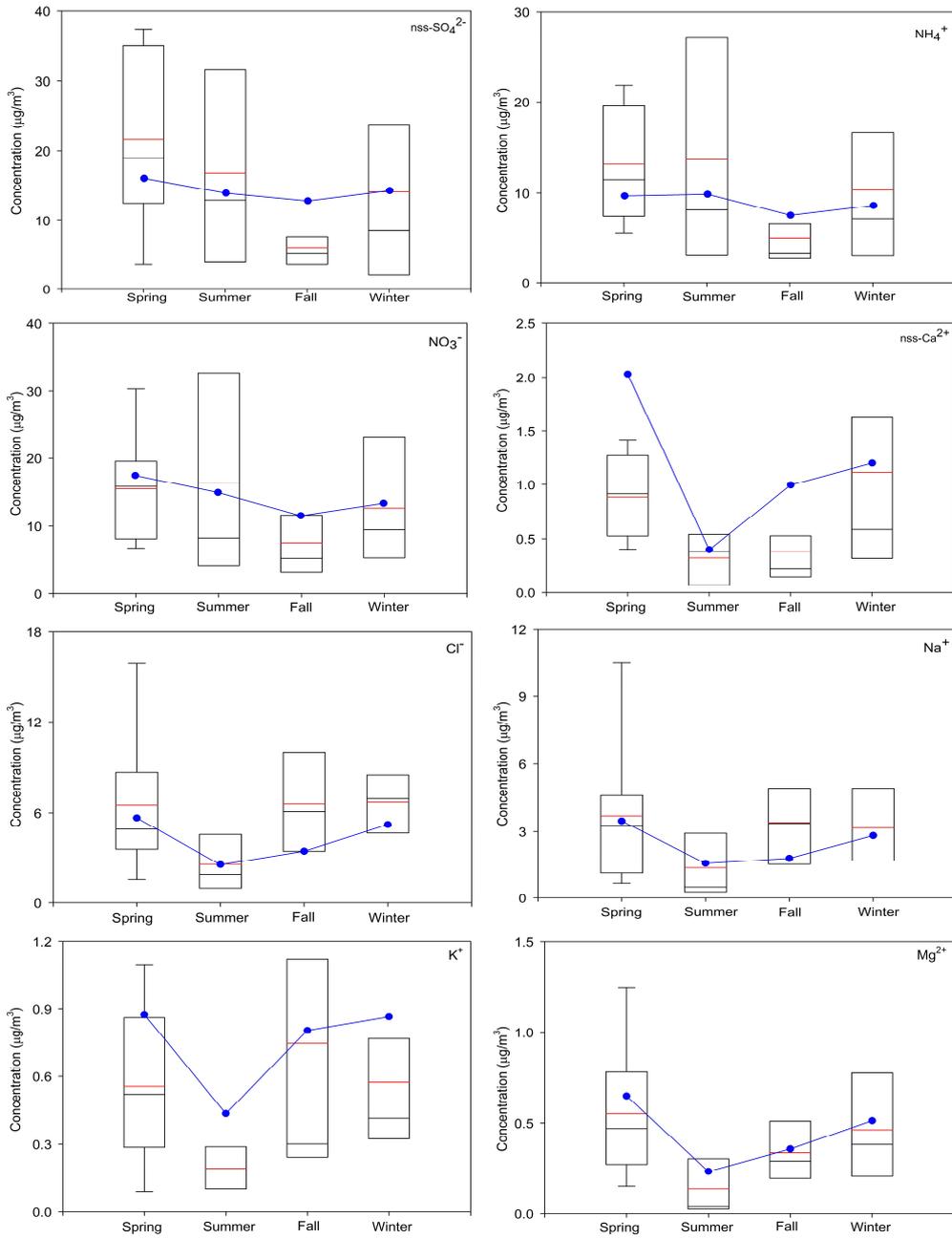


그림 3.3.37 PM10 에어로졸 수용성 이온성분의 계절별 평균농도비(2005~2015년)

PM2.5 에어로졸에서 이차오염물질 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 최근 10년간과 2015년의 계절별 농도를 비교해 보면, 최근 10년간의 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 각각 5.5~8.1, 6.9~10.7, 2.3~3.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었다. nss-SO_4^{2-} 성분의 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 각각 3.6~7.4, 4.3~7.9, 2.1~5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 이차오염물질인 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분 모두 최근 10년간은 겨울철이 가장 높은 농도를 보였고, 2015년은 세 성분 모두 여름철에 높은 농도를 보였다. 토양성분인 nss-Ca^{2+} 은 최근 10년간과 2015년의 계절별 농도를 비교해 보면, 최근 10년간의 봄, 여름, 가을, 겨울철은 농도 범위가 0.2~0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 0.3~0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최근 10년과, 2015년 모두 봄철에 가장 높은 것으로 분석되었다.

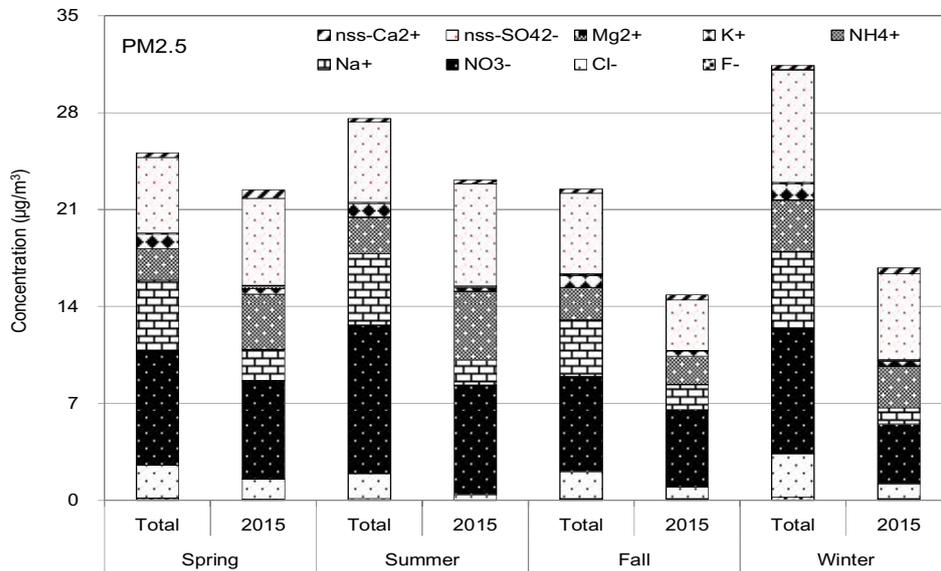


그림 3.3.38 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분의 계절별 평균농도(2005~2015년)

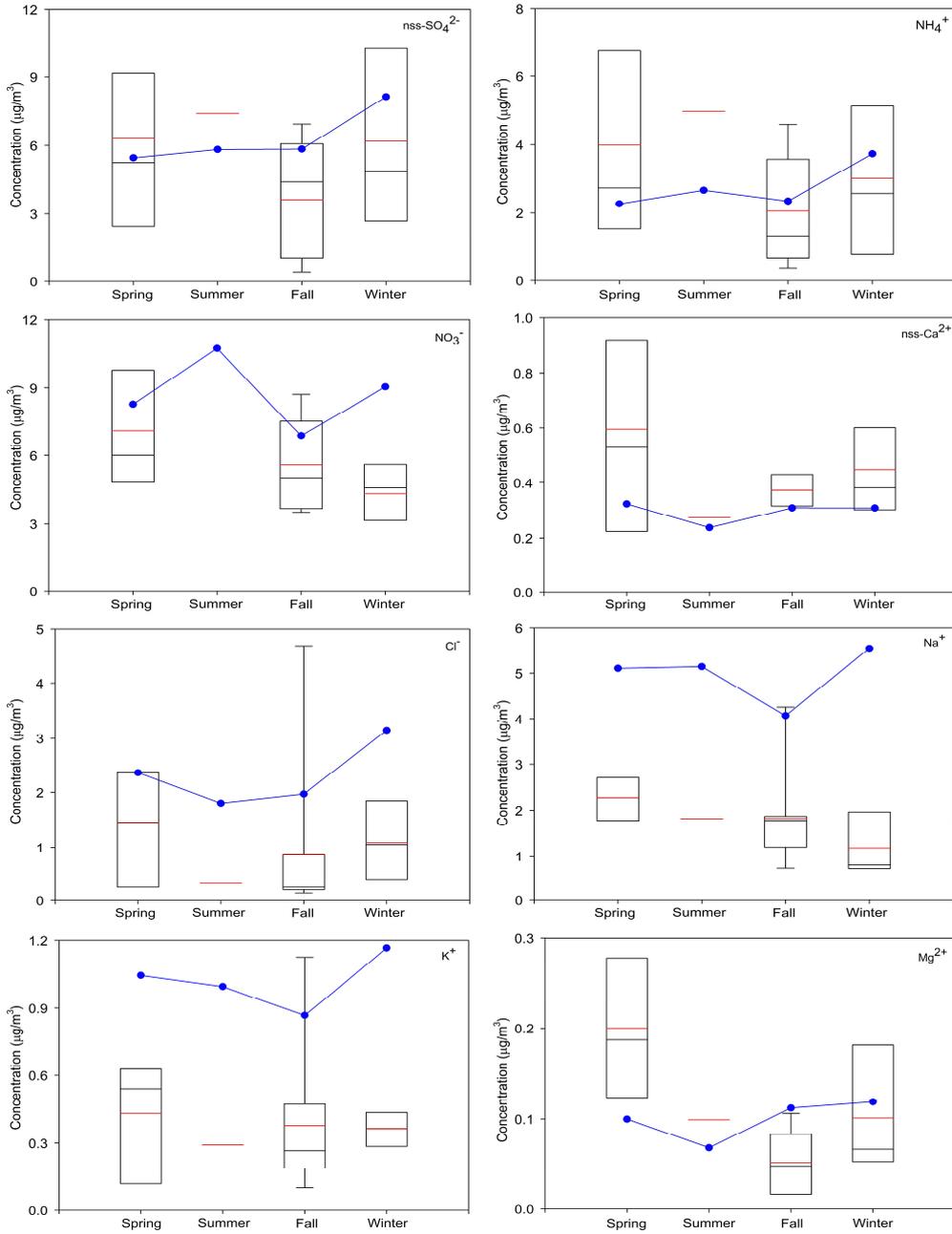


그림 3.3.39 PM2.5 에어로졸 수용성 이온성분의 계절별 평균농도비교(2005~2015년)

PM10 에어로졸 원소성분들 중에서 인위적 기원의 주요 성분들 농도를 최근 10년간과 2015년의 계절별로 비교해 보면 S, Zn과 Pb의 농도가 최근 10년간의 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 각각 2.8~4.0, 0.05~0.13, 0.02~0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 각각 1.3~2.7, 0.02~0.08, 0.01~0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고, 최근 10년과, 2015년 모두 봄철에 가장 높고, 가을철에 낮은 것으로 조사되었다. 대표적인 토양 성분들 중 Al, Fe, Ca의 농도가 최근 10년간의 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 각각 0.4~3.4, 0.3~2.2, 0.3~1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2015년 봄, 여름, 가을, 겨울철의 농도 범위는 각각 0.3~1.7, 0.3~1.3, 0.2~0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 최근 10년은 봄철에 가장 높은 농도를 보였고, 2015년은 겨울철에 높은 농도로 분석되었다.

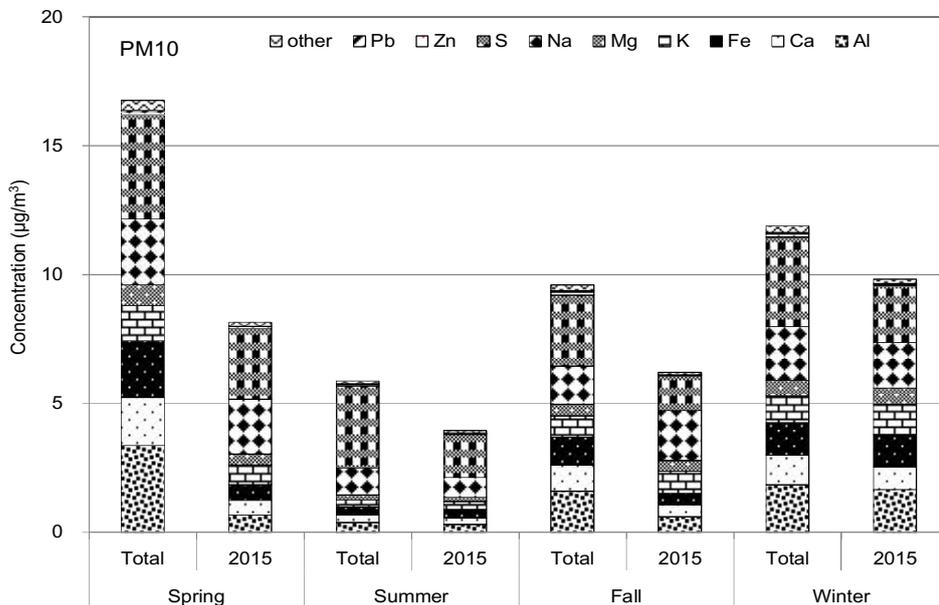


그림 3.3.40 2005~2015년 PM10 에어로졸 원소성분의 계절별 평균 농도

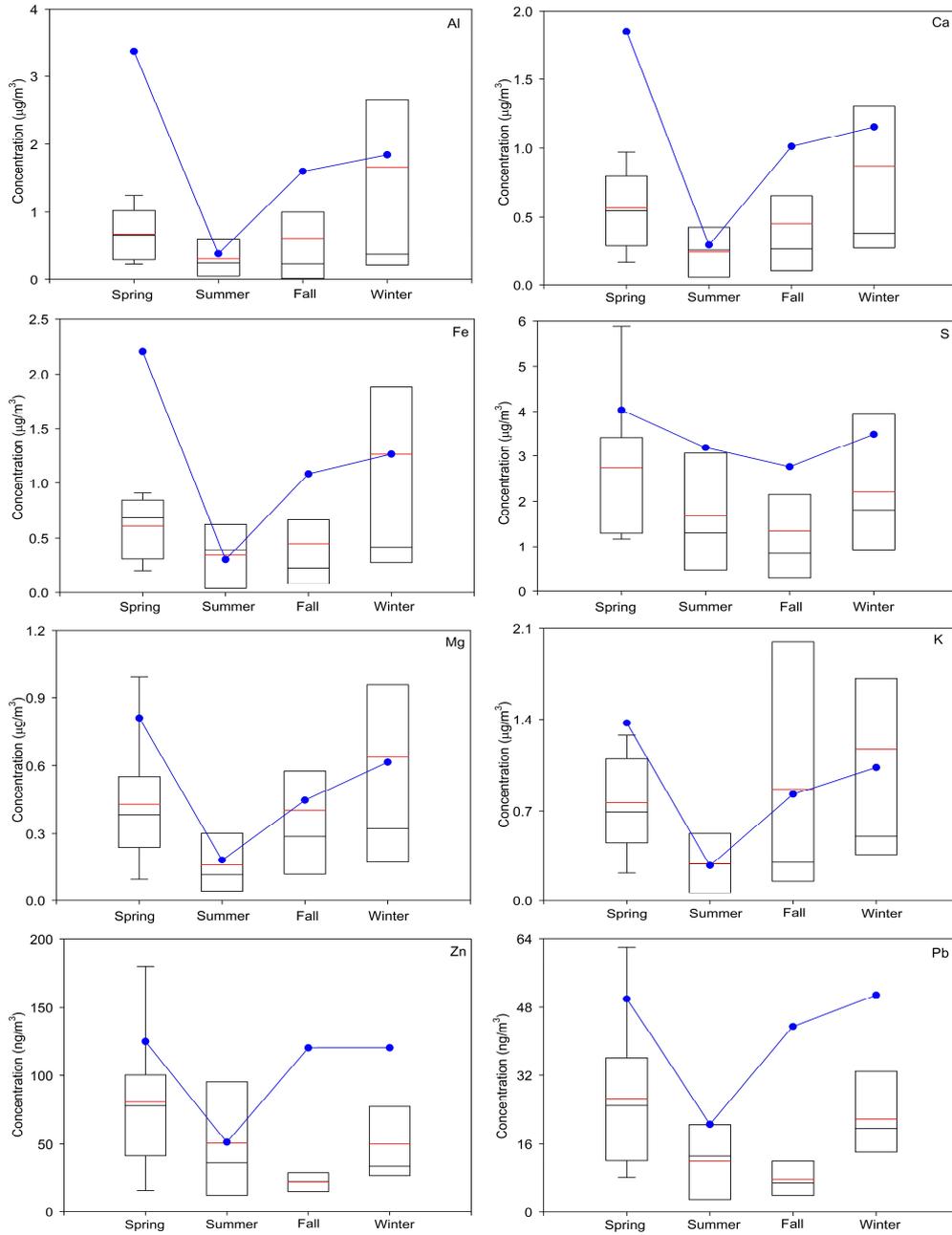


그림 3.3.41 PM10 에어로졸 원소 성분 중 Al, Ca, Fe, S, Mg, K, Zn 과 Pb 성분의 계절별 평균농도비교(2005~2015년)

3.4 대기복사

태양에너지는 지구대기를 움직이는 1차적 원동력이고 지구상의 모든 생명체의 필수적 에너지원이다. 태양에너지는 대기를 통과하면서 산란 및 반사되거나 흡수되고 나머지는 지표에 도달한다. 이러한 태양 복사 에너지는 공기를 가열하는데 사용되므로 대기의 온도 구조를 결정하는데 중요한 역할을 한다.

기후변화감시소는 태양복사에너지 및 그 변화를 감시하기 위해 청정지역인 안면도, 고산에 종합복사 관측 시스템을 설치하여 대기복사 관측을 수행하고 있다. 지상에서 연속적으로 관측하는 대기복사 자료는 기후학적으로는 장기간 대기 복사량의 변화를 파악하고, 위성에 의한 원격탐사자료나 기후모델, 대기복사 모델 등에 의해 계산된 결과와의 비교에 이용될 수 있다. 복사자료는 태양복사와 지구복사로 구분되며, 각각의 상향·하향복사, 대기로부터 직접 에너지를 측정하는 직달일사와 산란일사, 지표면의 에너지 수지를 측정하는 순복사 등 7가지이다. 안면도 기후변화감시소는 태양복사, 지구복사, 순복사 등 7가지 요소를, 고산 기후변화감시소는 태양복사 3가지 요소를 관측하고 있다.

2015년 안면도 기후변화감시소의 직달일사 연 평균은 393.2 W/m^2 로 최근 10년간(2005~2014년) 평균인 357.1 W/m^2 보다 증가하였고, 지구하향복사는 310.2 W/m^2 로 최근 10년간 평균 322.6 W/m^2 보다 다소 감소하였다. 그 외 관측요소들은 평년대비 큰 차이가 없었다. 고산 기후변화감시소의 연평균 직달일사는 275.5 W/m^2 로 최근 6년(2009~2014년) 평균(264.1 W/m^2) 보다 증가하였고, 산란일사는 196.8 W/m^2 로 최근 6년 평균(203.0 W/m^2) 보다 약간 감소하였다.

그림 3.4.1은 복사자료에 영향을 주는 강수량과 일조시간을 월별로 나타낸 것이다. 안면도 기후변화감시소는 안면도에서부터 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 (구)서산기상대의 관측결과를 이용하였으며, 고산 기후변화감시소는 약 4 km 떨어져 있는 (구)고산기상대 자료를 이용하였다. 일조시간은 크게 태양고도와 운량의 영향을 받는다. 대체적으로 태양고도가 낮은 겨울철에 일조시간이 낮게 관측되었고, 강수량이 많은(즉, 운량이 많은) 시기(안면: 4월, 7월, 11월, 고산: 6월, 7월)에 일조시간이 낮았다.

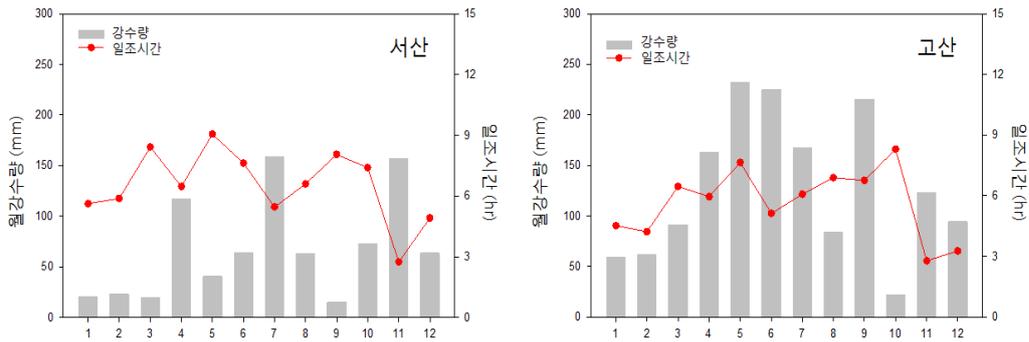


그림 3.4.1 2015년 서산, 고산의 월강수량과 월평균 일조시간

3.4.1 직달일사, 산란일사

태양복사는 물리적 과정에 따라 직달일사와 산란일사로 구분된다. 직달일사는 대기 중에서 산란 또는 흡수되지 않는 태양복사를 말하며, 산란일사는 차폐판을 이용하여 전천일사계로 입사되는 직달태양복사성분을 차단하고 관측한 복사량을 말한다. 2015년 안면도 기후변화감시소의 직달일사는 태양추적장치 고장으로 전천일사에서 산란일사를 뺀 값 $[(\text{전천일사} - \text{산란일사}) / \cos(\text{solar zenith angle})]$ 을 계산하여 비교 분석하였는데, 최근 10년간(2005~2014년) 평균도 같은 방법으로 계산하였다. 고산 기후변화감시소의 2008년 관측자료는 QC 과정에서 손실되는 자료가 많아 분석에서 제외하였다.

2015년 안면도와 고산 연평균 직달일사량은 각각 393.2 W/m^2 , 275.5 W/m^2 로 최근 10년간 평균 357.1 W/m^2 , 264.1 W/m^2 보다 높게 나타났다. 2015년 산란일사량은 안면도 194.0 W/m^2 , 고산 196.8 W/m^2 으로 최근 10년간 평균 192.8 W/m^2 , 203.0 W/m^2 과 큰 차이가 없었다(그림 3.4.2).

그림 3.4.3, 3.4.4는 안면도, 고산의 최근 10년간 직달일사의 월평균과 2015년 월평균을 나타낸다. 안면도 기후변화감시소의 2015년도 직달일사 월평균 최댓값은 3월 560.6 W/m^2 , 최솟값은 7월 269.2 W/m^2 이고, 산란일사 최댓값은 6월 261.5 W/m^2 , 최솟값은 12월 135.0 W/m^2 이다. 고산 기후변화감시소 2015년 월평균 최댓값은 직달일사 10월 505.7 W/m^2 , 산란일사 7월 253.6 W/m^2 이며 최솟값은 직달일사 12월 92.6 W/m^2 , 산란일사 12월 155.9 W/m^2 이다. 안면도, 고산의 2015년 직달일사는 봄철에 높아지다가 여름철에는 구름과 잦은 강수로 값이 낮게 나타나고 가을철에 다시 높아지는 계절변동을 보였다.

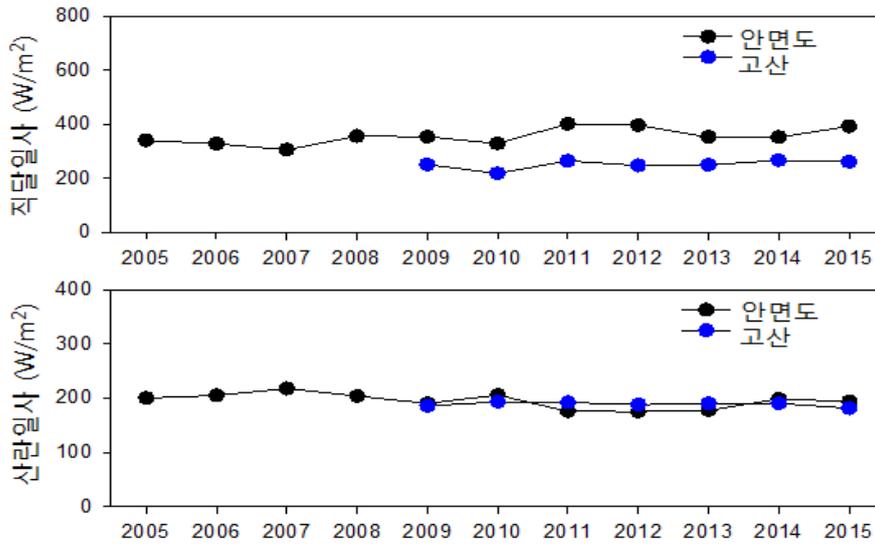


그림 3.4.2 안면도, 고산기후변화감시의 직달일사와 산란일사 연평균

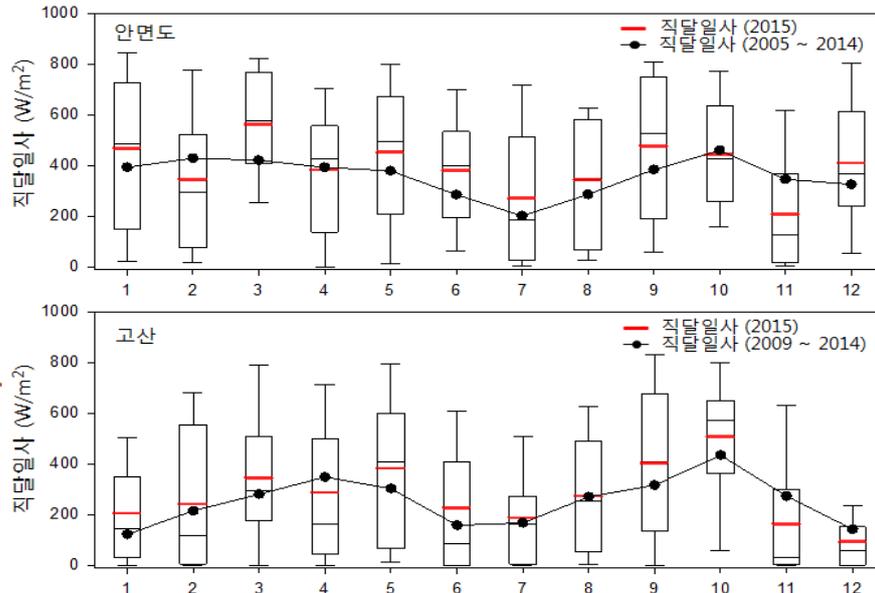


그림 3.4.3 안면도, 고산 기후변화감시소의 월평균 직달일사. 상자 선의 양끝은 5%, 95%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 빨간색 선은 평균

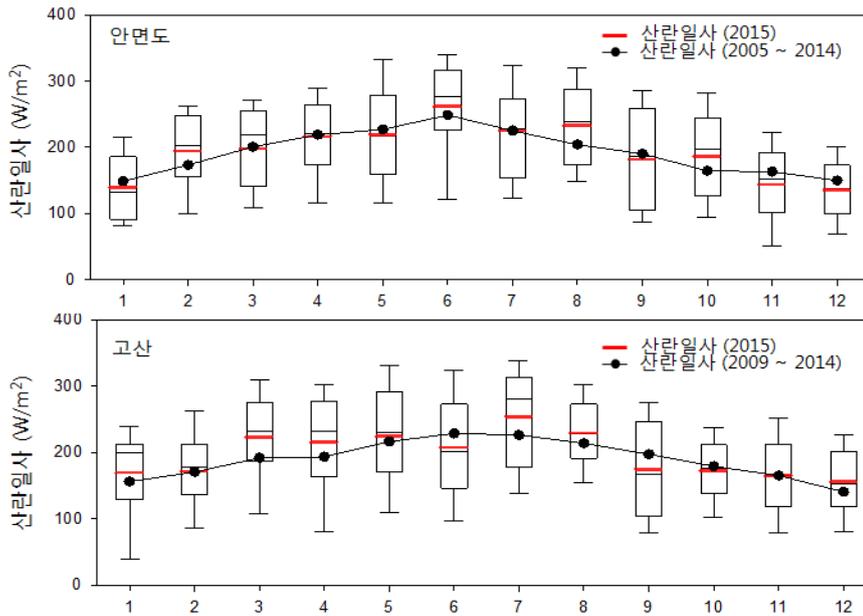


그림 3.4.4 안면도, 고산의 월평균 산란일사

3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)

지표에 도달하는 태양하향복사(전천일사)량은 운량, 수증기, 에어로졸, 오존 등 태양복사를 흡수하는 미량 기체 성분의 대기 내 연직 분포에 따라 영향을 받으며, 태양상향복사는 지표알베도에 영향을 받는다.

그림 3.4.5는 안면도와 고산의 태양상향복사, 태양하향복사의 연평균 값이다. 2015년 안면도 태양상향복사와 태양하향복사의 연평균은 79.2 W/m^2 , 410.9 W/m^2 로 평년과 비슷하였다. 고산의 태양하향복사 연평균은 2015년도 381.2 W/m^2 로 평년 376.4 W/m^2 와 큰 차이가 없었다. 그림 3.4.6은 안면도, 고산의 태양상향복사와 태양하향복사의 월평균 값이다. 태양복사의 월평균은 계절변동으로 여름으로 갈수록 증가하고 겨울로 갈수록 감소하나 여름철에 구름과 강수로 인해 값이 낮아진다. 안면도 2015년 월평균 최댓값은 5월 101.7 W/m^2 (태양상향복사), 537.4 W/m^2 (태양하향복사), 최솟값은 11월 39.9 W/m^2 (태양상향복사), 208.0 W/m^2 (태양하향복사)로 관측되었다. 2015년 태양상향복사와 태양하향복사가 봄철 중 4월에만 감소하였는데 이 시기에 서산과 고산의 강수량이 증가하고 일조시간은 감소한 것에 기인한 것으로 보인다(그림 3.4.1 참조).

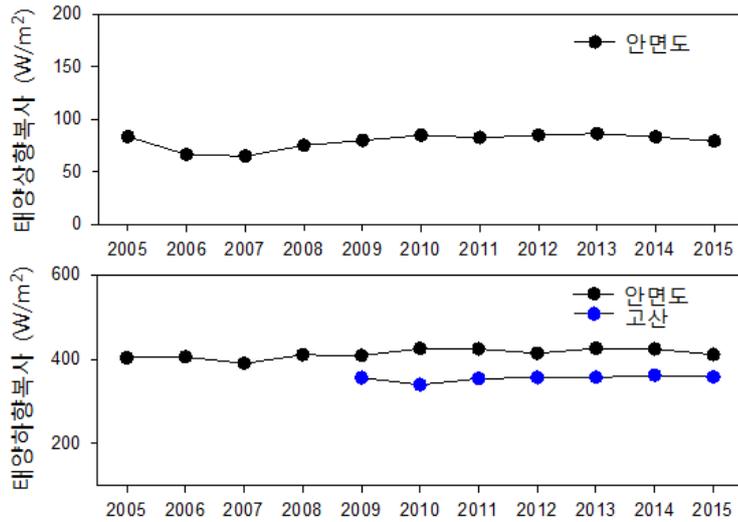


그림 3.4.5 안면도와 고산의 태양상향 복사, 태양하향복사의 연평균

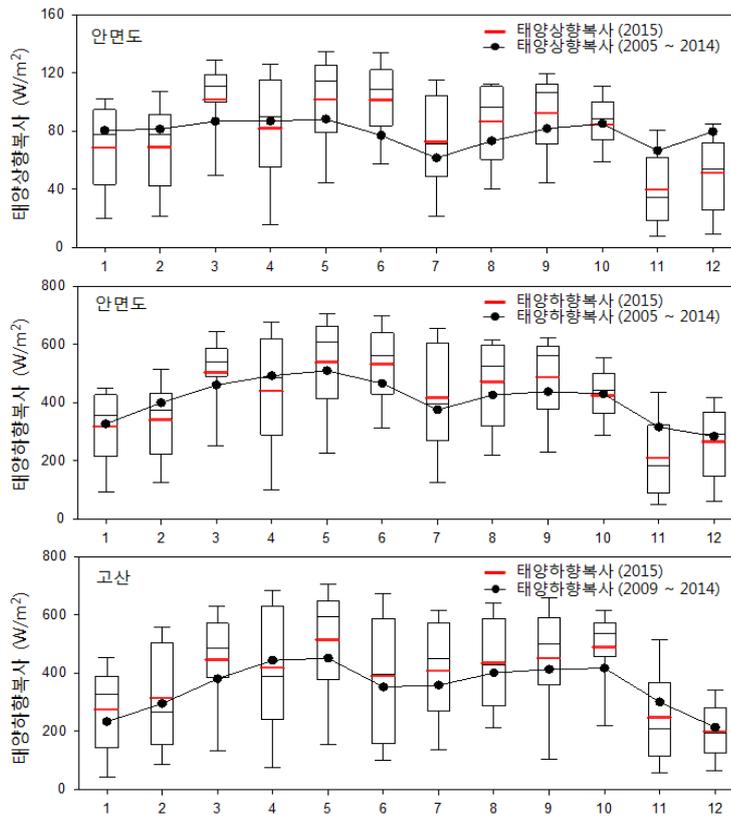


그림 3.4.6 안면도와 고산의 태양상향복사, 태양하향복사 월평균

3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사

지구복사는 3 μm 이상의 장파복사를 측정한다. 지구상향복사는 지면온도에 영향을 받으며 지표에 의해 반사된 대기복사를 측정한다. 지구하향복사는 주로 기온과 습도의 연직분포, 운량, 구름물리성분 등에 따라 달라진다. 지구복사는 태양복사에 비해 일변화 폭이 적고, 지구상향복사량이 하향복사량보다 평년값은 약 86 W/m^2 정도 높아 지면에서 대기로 방출되는 장파복사가 항상 더 크다. 그림 3.4.7은 지구복사의 연평균이다. 2015년 지구상향복사는 382 W/m^2 으로 최근 10년간 평균 387 W/m^2 과 비슷했으며, 지구하향복사는 310 W/m^2 으로 최근 10년간 평균 322 W/m^2 보다 작았다. 2015년 월평균 지구상향복사 최댓값은 8월 453 W/m^2 , 최솟값은 1월 317 W/m^2 이며, 지구하향복사 최댓값은 7월 385 W/m^2 , 최솟값은 1월 253 W/m^2 이다. 겨울에 낮고 여름에 높은 계절변동 특성이 잘 반영되고 있다.

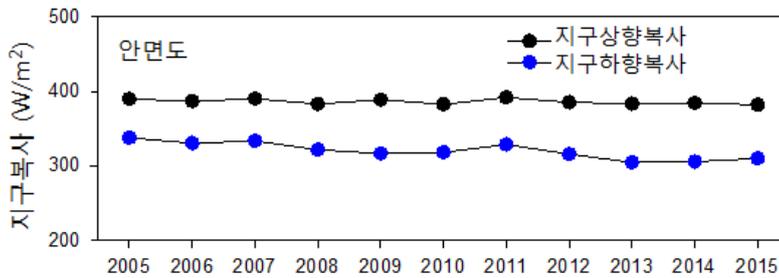


그림 3.4.7 안면도 지구 상향복사와 하향복사의 연평균

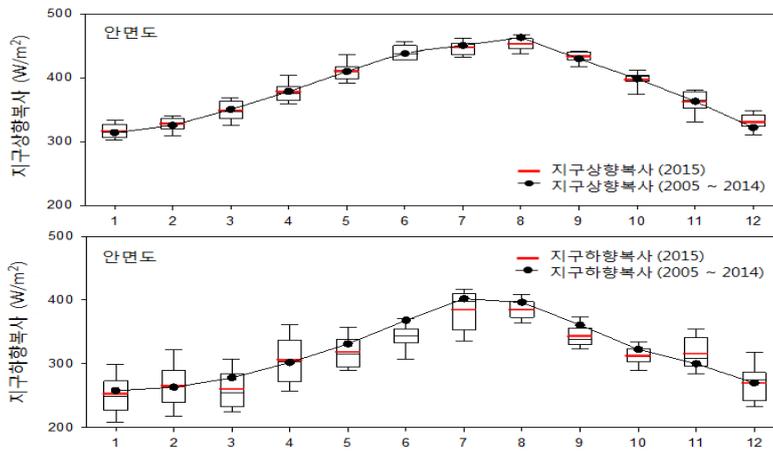


그림 3.4.8 안면도 지구 상향복사와 하향복사의 월평균

3.4.4 순복사

순복사는 지표 에너지수지를 결정하는 원천이며, 태양과 지구사이의 복사에너지 수치로써 태양으로부터 들어오는 태양복사와 지구에서 방출하는 지구복사의 관계식(산출 순복사 = 태양하향복사 - 태양상향 복사 + 지구하향 복사 - 지구상향복사)에 의해서 알 수 있다.

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 태양고도각이 증가함에 따라 서서히 증가하여, 정오에 최대가 된다. 최대증가는 일출 후 시간 동안에 나타난다. 그림 3.4.9는 안면도 순복사 연분포이다. 2015년 연평균은 77 W/m²로 평년 75 W/m²와 비슷하였다. 2015년 월평균 최댓값은 5월 157 W/m², 최솟값은 12월 8 W/m²으로(그림 3.4.10) 겨울철에 낮고 여름철에 증가하는 분포를 보였다.

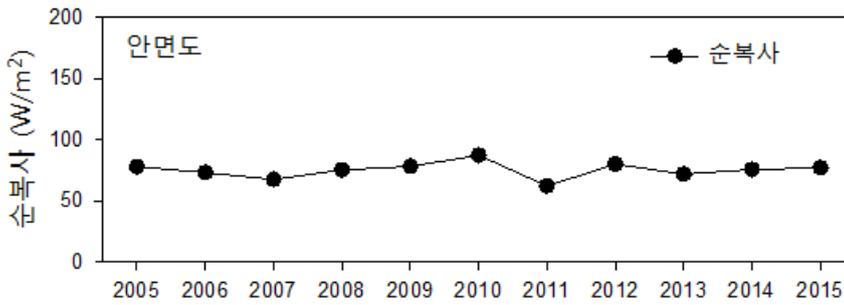


그림 3.4.9 안면도 순복사 연평균

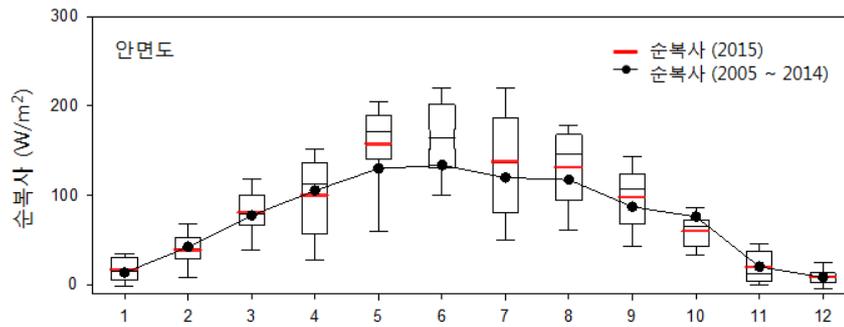


그림 3.4.10 안면도 순복사 월평균

3.5 성층권오존

오존층은 태양에서 들어오는 유해자외선을 차단하는 역할과 함께 오존은 지구 온실가스 중 하나로 현재의 기후 상태를 유지하는 데 중요한 역할을 하는 기체이다. 그러나 1970년대 이후, 오존층의 파괴 현상이 관측되고 있으며, 이는 인간 활동에 의한 것으로 밝혀져 최근에 오존층 변화 연구와 감시는 전세계적인 관심사가 되었다.

3.5.1 오존전량

한반도 오존전량은 기상청의 안면도(2013~), 고산(2010~), 포항(1994~)의 3지점에서 관측하고 있다. 이 중 포항과 안면도는 WMO/GAW 내의 오존 및 자외선 세계자료센터(WOUDC; World Ozone and Ultraviolet Data Centre)와 매월 관측 자료를 공유하고 있다. 위탁관측소인 연세대학교는 1984년부터 서울에서 오존전량을 관측하고 있다.

가. 포항, 안면도, 고산

그림 3.5.1은 포항, 안면도, 고산에서 측정한 연평균 오존전량을 나타낸다. 포항의 오존 브루어(Brewer) 관측기기는 2013까지 관측 후 중단하였고, 안면도는 2013년부터 관측을 시작하였다. 포항(36.03 129.37)과 안면도(36.54 126.33)는 같은 위도대로 2013년 전후로 포항과 안면도 값을 같이 분석하였다. 또한 2011년 고산 오존전량은 관측값 오류로 분석에서 제외하였다.

2015년 안면도 연평균 오존전량은 331 DU로 2014년 연평균 316 DU 보다 높고, 고산은 308 DU로 2012~2014년 기간의 평균 308 DU와 같았다. 2005년부터 오존전량은 증가와 감소를 반복하다가 2012년부터 안면도, 포항, 고산 모두 증가하고 있다. 오존 전량은 비교적 봄에 많고 늦여름과 초가을에 적으며 계절 변화가 뚜렷하다(조희구, 1996).

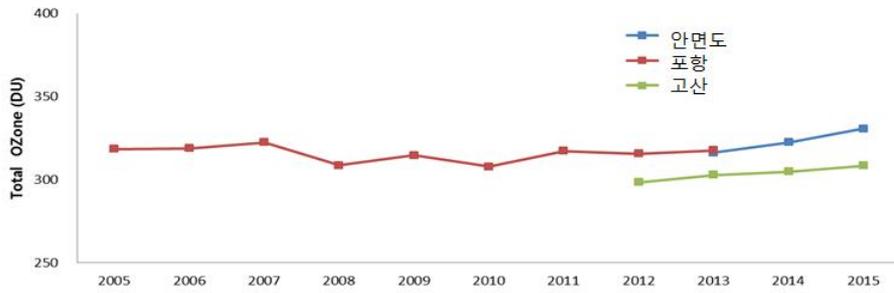


그림 3.5.1 안면도, 포항, 고산에서 관측한 연평균 오존전량 분포

그림 3.5.2는 안면도, 고산에서 측정한 오존전량 월평균을 비교한 것이다. 안면도 오존전량 최댓값은 3월 381 DU이며, 최솟값은 10월 297 DU 이다. 고산도 3월 345 DU, 10월 281 DU로 안면도와 같이 3월에 최대, 10월에 최솟값이 나타났다. 월평균 기준으로 안면도는 연교차가 84 DU로 연평균 오존전량 기준 25%의 변동폭을 보였고, 고산은 21%의 변동폭을 보였다.

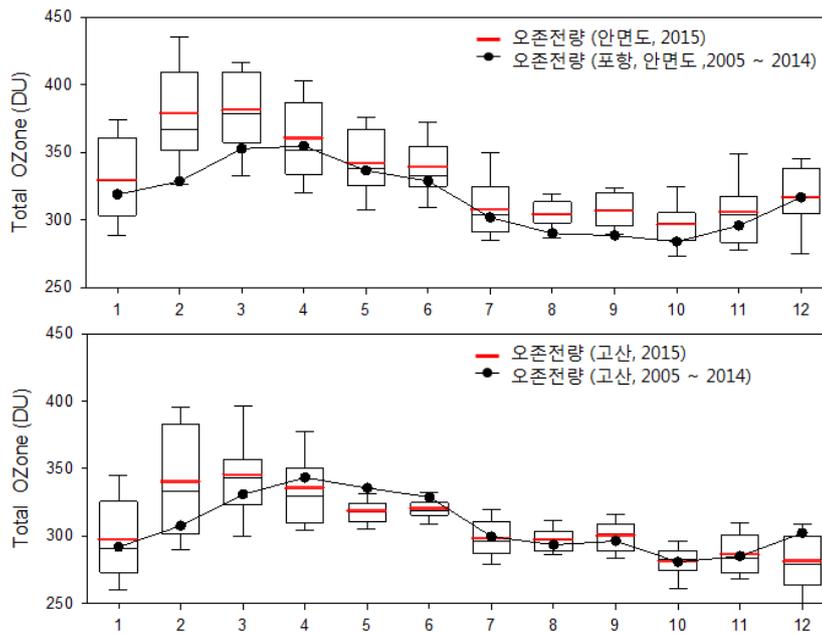


그림 3.5.2 안면도, 포항, 고산의 2015년 월평균 오존전량 분포. 검정색 점은 2005~2014년 월평균 값, 상자 선의 양끝은 5%, 95%값, 상자 양끝은 25%, 75%값, 상자 가운데 선은 중간값, 빨간색 선은 평균

나. 서울

한반도 상공의 오존층의 감시는 1984년 5월부터 연세대학교 월봉(月峰) 오존관측소에서 돕슨(Dobson) 오존 분광광도계(Beck #124)를 통해 매일 이루어지고 있다. 현재 월봉 오존관측소는 WMO/GAW의 전지구오존관측시스템(GO3OS)의 관측소로 지정이 되어 주기적으로 캐나다에 있는 세계 오존 및 자외선 자료센터(World Ozone and Ultraviolet Data Center, WOUDC)에 관측 자료를 전송하고 있다.

연세대학교 오존 관측소는 2004년부터 오존 관측 시스템의 자동화를 통해 객관적인 관측 방법을 구축하여 보다 정확한 관측 자료를 생산하고 있으며, 브루어(Brewer) 분광광도계(SCI-TEC, #148)가 1997년부터 설치가 되어 자외선과 오존전량을 동시에 관측하고 있다. 이들 자료는 돕슨 분광광도계에서 관측된 오존전량과의 비교, 검증 자료로 사용되어 한반도 상공의 오존전량 관측의 정확도 향상에 기여하고 있다.

대기 중의 연직 오존전량의 90% 이상이 성층권의 오존층에 분포되어 있으므로 오존전량의 변화는 오존층의 변화를 의미한다. 이 오존전량은 돕슨 분광광도계에 의하여 측정되고 있다(조희구, 이승만, 최치영, 1989). 여기에서는 2015년도 한반도 상공의 오존층 변화를 과거 장기간 참조값(평년값)과 비교분석하여 평가한다.

그림 3.5.3(a)는 2015년 서울 상공의 일 오존전량 시계열, 그림 3.5.3(b)는 서울 상공 오존전량의 장기평균 연변화(1985~2015년)를 나타낸 것이다. 2015년 1~3월에는 장비가 설치된 건물의 외벽 공사로 인해 많은 에어로졸이 발생하여 오존전량 관측에 영향을 주어 오차를 유발했을 것으로 예상된다. 또한 기상 및 장비 보정으로 인한 결측 기간의 관측 자료는 OMI-TOMS 오존전량 관측 자료로 재구성하였다.

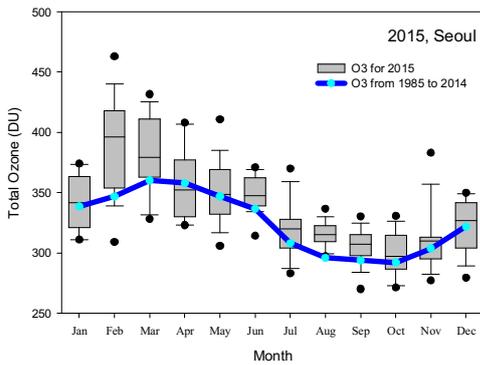
2015년 봄철의 오존전량의 감소는 북극에서 나타난 오존전량의 급감과 이에 의한 오존홀은 현상이 북반구 중위도 지역까지 영향을 미친 것으로 분다(Manne et al., 2011). 그러나 서울 지역의 일 대표값 관측 자료를 기준으로 보게 될 경우, 봄철에 300 DU 이하로 감소하는 경우는 나타나지 않았으며, 모든 관측값이 과거 관측값의 영역 내에 존재하고 있었다.

2015년의 일 최댓값은 2월 5일에 463 DU, 일 최솟값은 9월 29~30일에

270 DU로 나타났으며, 2015년도에 관측된 일 최댓값 463 DU는 과거 기록 (2011년 5월 11일) 극대값인 518 DU에 비해서 약 55 DU가 적은 값이다. 최댓값은 2월에 관측되었고, 2~3월에는 평년보다 높은 오존값을, 4~5월의 높은 오존값은 과거 자료와 마찬가지로 봄철에 주로 관측되었다.

오존전량의 연(계절) 변화를 보게 될 경우, 그림 3.5.3(b)와 표 3.5.1에서 보는 바와 같이 서울 상공의 1985~2015년까지의 연평균 오존전량은 325 DU로 나타났으며, 3월에 최대인 362 DU, 10월에 최소인 290 DU로 월평균 기준으로 연교차가 72 DU로 연평균 오존전량 기준으로 22%의 변동폭을 보였다. 그리고 오존량의 변동은 3월에 표준편차가 36.4 DU로 가장 심하고, 9월에 15.5 DU로 가장 안정한 변동을 나타내었으며, 계절 변화의 폭이 3월을 중심으로 봄에 가장 크고, 9월을 중심으로 가을철에 작은 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 이러한 연변화에 대해서 6~7월에 걸쳐서 여름에 오존의 감소가 급격히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

(a)



(b)

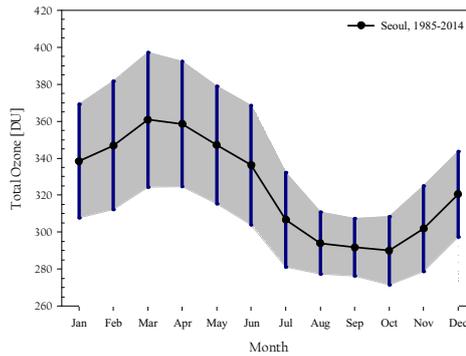


그림 3.5.3 서울 상공 오존전량의 (a)2015년 연변화 (회색 박스 플롯 2015년의 오존전량. 상자 선의 양끝 10, 90%, 상자 양끝 25, 75%, 상자가운데 선은 중간값, 검은 점은 최댓값 및 최솟값), (b)장기월평균 연변화 (1985~2014년)

2015년도의 월별 평균 오존전량은 그림 3.5.4와 표 3.5.1에서 보는 바와 같다. 2015년의 연평균 오존전량은 330 DU로 나타났다. 이는 과거 참조값 (1985~2014년)의 324 DU에 비해 약 1.85% 증가하였으며, 월별로는 2월에 최대 증가 12.2%를 보이고, 4월에 -0.3%로 최대 감소를 보였다. 2015년의 연

교차는 2월의 389 DU와 10월의 300 DU의 차로 89 DU로 나타났다. 이는 과거 참조값의 연교차인 71 DU 보다 높게 나타났다.

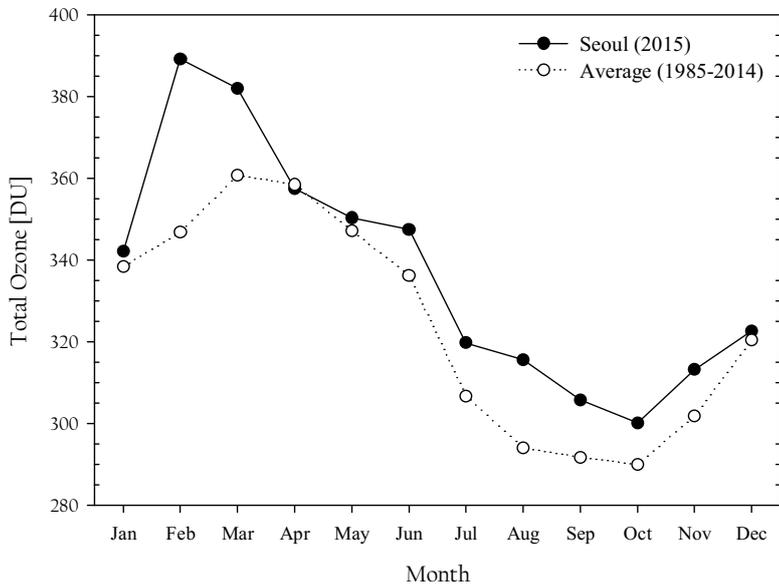


그림 3.5.4 평균 월 오존전량의 참조값(1985~2014년)과 2015년 월평균의 연변화 비교

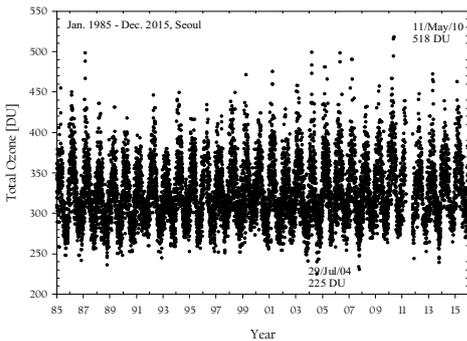
표 3.5.1 서울 상공의 장기 오존전량 및 참조값(1985~2014)과 2015년 값의 비교, 장기기후 평균(1985~2015)과 극값(최대와 최소)(DU)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
참조값 (Ref. 85-14)	338	347	361	358	347	336	307	294	292	290	302	320	324
2015	342	389	382	358	350	348	320	316	306	300	313	323	330
Diff (%)	1.1	12.2	5.9	-0.3	0.9	3.4	4.3	7.4	4.8	3.5	3.8	0.7	1.9
기후값 (Avg. 85-15)	339	348	361	358	347	337	307	295	292	290	302	321	325
Stdev	30.6	34.8	36.4	33.8	31.8	32.2	25.5	16.8	15.5	18.5	23.1	23.1	28.8
Max	451	498	499	516	518	449	411	401	354	398	379	434	518
Date, YY/DD	03/04	87/27	04/06	10/30	10/11	98/03	10/14	09/03	11/12	11/05	99/26	04/31	2010/ 05/11
Min	262	264	252	283	267	275	225	240	234	231	242	241	225
Date, YY/DD	02/1 2,15	99/25	97/01	02/05	88/09	90/23	04/29	04/01	07/19	07/12	86/14	03/01	2004/ 07/29

그림 3.5.5(a)는 1985년부터 2015년까지의 일 오존전량의 시계열을 나타낸다. 서울 지역의 오존은 매년 규칙적인 계절변동이 나타나며, 최대극값은 2010년 5월 11일의 518 DU, 최소극값은 2004년 7월 29일의 225 DU로, 그 차이는 293 DU로 나타났다. 이러한 오존전량의 단기 일변화는 주로 중관기상장의 변화에 의해서 나타나고 있으며, 연변화는 대기대순환의 영향을 받고 있다.

그림 3.5.5(b)의 연평균 오존전량의 경년변화를 보면, 과거 관측 기간(1985~2015년) 동안 연평균 오존전량이 가장 많았던 시기는 2010년도로 343 DU를 기록했으며, 최소값은 1993년에 나타난 312 DU였다. 경년변화 수준의 오존전량 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(예: 조희구 등, 2003; 김준 등, 2005). 2015년 2월 평균 오존량(389 DU)은 과거 기후값(347 DU)보다 42 DU 차이로 가장 크게 나타났으나 다른 월에서는 차이가 적게 나타났다.

(a)



(b)

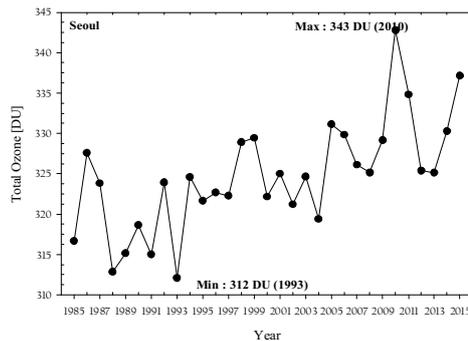


그림 3.5.5 (a)일 오존전량의 연시계열, (b)연평균의 경년변화(1985~2015년)

그림 3.5.5(a)에서 보인 일 오존전량으로 일일차 변화율(Day To Day Change, DTDC)을 그림 3.5.6에 나타내었다. DTDC는 전일 오존량에 대한 그 다음날 오존량의 차이에 대한 변화율로 정의하여 표시하였다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 오존전량의 일일차 변화율은 $-30.3\sim 38.4\%$ 의 범위에서 나타났다. 오존전량은 $\pm 10\%$ 이내에서 변화하는 것으로 나타났는데 이러한 오존전량의 단기 일변화는 중관기상장 일변화에 기인한 것으로 보인다.

표 3.5.2는 서울 지역의 오존전량 일일차 변화율에 대한 증가와 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 작게 나타났다. 전 기간의 일일차 변화율은 평균 5.3% 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 일일차 변화율의 증감 경향에서 증가 경향의 평균은 5.6%, 감소 경향의 평균은 -5.2%로, 오존전량의 일일차 변화는 감소 경향보다는 증가 경향이 더 큼을 알 수 있다.

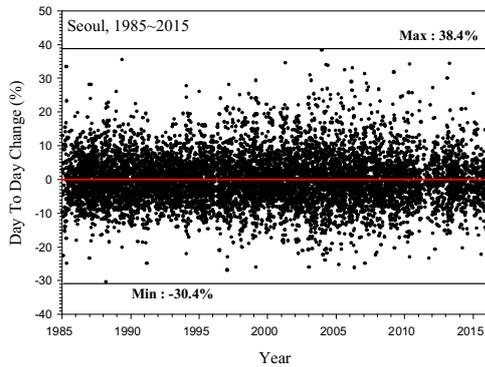
중관 규모 기상장은 매년 여러 자연 진동에 의해서 그 기상장의 패턴이 변화하게 되므로 오존전량의 변화에 영향을 미치게 된다. 따라서 오존전량이 급변하는 경우에 대해 경년변화가 다르게 나타날 수 있으며, 이는 장기적인 오존전량의 장기 변화경향을 분석하는 데에 영향을 미칠 수 있다.

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 경년변화 분석은 오존전량의 경년변화와 장기 변화 경향을 파악하는 데 있어 매우 중요하다.

그림 3.5.6(b)는 일일차 변화율에 대한 관측횟수를 나타낸 것이다. 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측횟수를 볼 경우, 2011년에 15회로 최소로 나타났으며, 2003년에 84회로 최대로 나타났다. 10% 이상 증가한 관측횟수의 경우에는 1991년과 2011년에 8회로 최소로 나타났으며, 2003년에 46회로 최대로 나타났다. 2015년도의 경우, 전날에 비해 5% 이상 증가한 관측횟수는 24회, 7% 이상 증가한 관측횟수는 15회, 13% 이상 증가한 관측횟수는 8회이다.

그림 3.5.5(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 일부 영향을 받는 것으로 보인다.

(a)



(b)

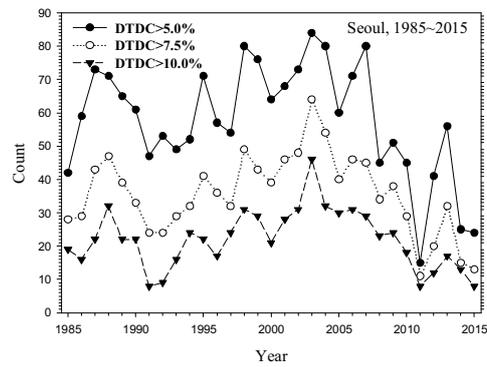


그림 3.5.6 서울 오존전량의 일일차 변화율의 (a)시계열, (b)증가 경향의 일일차 변화율에 대한 관측횟수

표 3.5.2 서울의 오존전량 일일차 변화율에 대한 월평균과 연평균(1985~2015)

Difference (%)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Absolute	6.3	6.5	6.9	6.2	5.9	5.1	4.8	4.1	3.7	3.8	4.6	5.6	5.3
Stddev.	5.1	5.6	5.6	5.2	5.0	4.1	4.3	3.7	3.3	3.6	3.9	4.9	4.5
Increase	6.6	6.9	7.5	6.6	6.5	5.4	4.9	4.4	3.9	3.9	5.0	6.1	5.6
Stddev.	5.5	6.2	6.0	5.9	6.1	4.5	4.6	4.1	3.7	3.7	4.2	5.5	5.0
Decrease	-6.3	-6.3	-6.5	-5.9	-5.5	-5.0	-5.0	-4.1	-3.7	-3.9	-4.5	-5.4	-5.2
Stddev.	4.7	4.8	5.1	4.5	3.9	3.7	3.9	3.2	2.9	3.4	3.5	4.1	4.0

한반도에 인접한 일본과 오존전량을 비교하기 위해 삿포로(Sapporo, 43° 04'N, 140° 20'E), 쓰꾸바(Tsukuba, 36° 03'N, 140° 08'E), 나하(Naha, 26° 12'N, 127° 41'E) 돕슨(Dobson) 관측값을 함께 분석하였다. 일본은 3개의 관측 지역에 대해서 1985년 이전부터 관측이 시작되어 왔으나 서울과의 비교를 위해 1985년부터 2015년까지의 각 월평균 오존전량의 연변화를 그림 3.5.7(a)에 나타냈다. 나하를 제외한 3개 지점의 연 변화 경향은 봄철에 높고, 가을철에 낮게 나타나는 유사한 경향을 보여주고 있으나, 고위도로 갈수록 연 변화의 진폭이 증가함을 알 수 있다. 그리고 연변화의 진폭은 봄철에서 그 변화가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 1985년부터 2015년까지 31년간의 연

평균은 삿포로, 서울, 쓰쿠바, 그리고 나하의 위도순으로 352 DU, 325 DU, 310 DU, 266 DU로 나타났다.

1985~2015년 사이의 31년간 이들의 경년변화를 그림 3.5.7(b)에 나타냈다. 이 그림에서 보는 바와 같이 경년변화 경향이 거의 비슷함을 알 수 있으며, 2015년에는 서울, 쓰쿠바, 나하의 연평균 증가가 나타나고 있다.

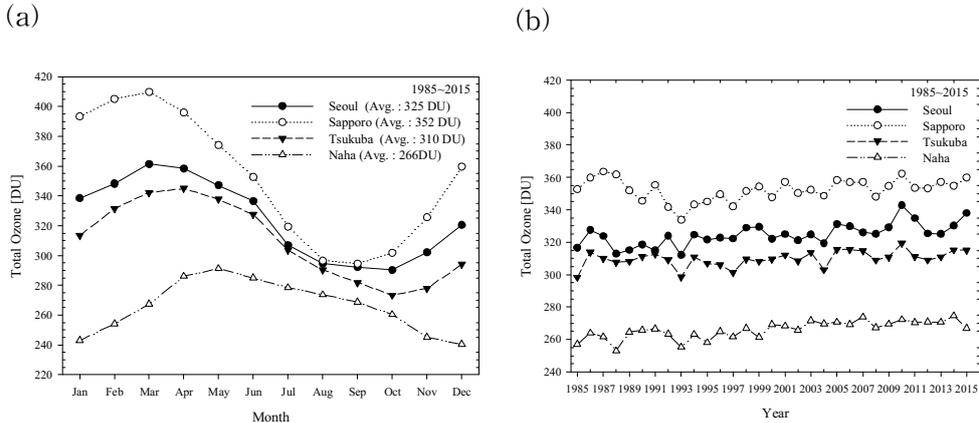


그림 3.5.7 서울과 일본 상공 오존전량의 (a)월평균, (b)경년변화

한반도 전역의 오존의 분포를 파악하기 위해서는 지상 자료만으로는 파악이 불가능하기 때문에 위성자료를 통해서 그 분포를 유추하여야 한다. 지상 자료와 위성자료 간에는 매우 큰 상관성을 보이고는 있으나 자료가 항상 일치하지 않고 시간에 따라 그 일치도에 차이가 있어서 지상 자료로의 환산 과정이 필요하다. 이를 위해 TOMS/OMI(Total Ozon Mapping Spectrometer/Ozon Monitoring Instrument) 자료와 서울 지역의 돕슨 분광광도계의 자료 비교를 통해 한반도 전역에 대해서 돕슨 자료값으로 환산된 오존량의 분포를 얻었으며, 이에 대한 신뢰도를 살펴보기 위해서 2015년의 TOMS/OMI 위성 자료와 서울의 돕슨 위성 자료 간의 상관관계를 그림 3.5.8과 같이 나타내었다.

2015년의 서울 지역에서의 돕슨 지상 자료와 OMI 위성 자료의 비교 결과를 보면, 선형회귀에 의한 상관관계 결과, 결정계수 $R^2 = 0.875$ 로 나타나 비교적 높은 상관성을 보였으며, 돕슨에 대한 OMI 자료의 비는 0.920 ± 0.257 으로 오존전량은 OMI가 돕슨에 비해 약 8% 적게 나타났다. 다만 Y-offset의 증가를 유발하는 원인으로 OMI 위성에서 극단적으로 과소모의 하는 부분이 있을 것으

로 예상된다. 이 부분을 제외하면 대략 1.4% 정도 적게 나타나는 것으로 확인된다. 이는 일본기상청(2009)에서 발간한 OMI 자료의 설명에 대해 2008년 이후 OMI의 오존전량 자료가 1~2% 정도 적다는 결과와 어느 정도 일치하는 것으로 나타났다.

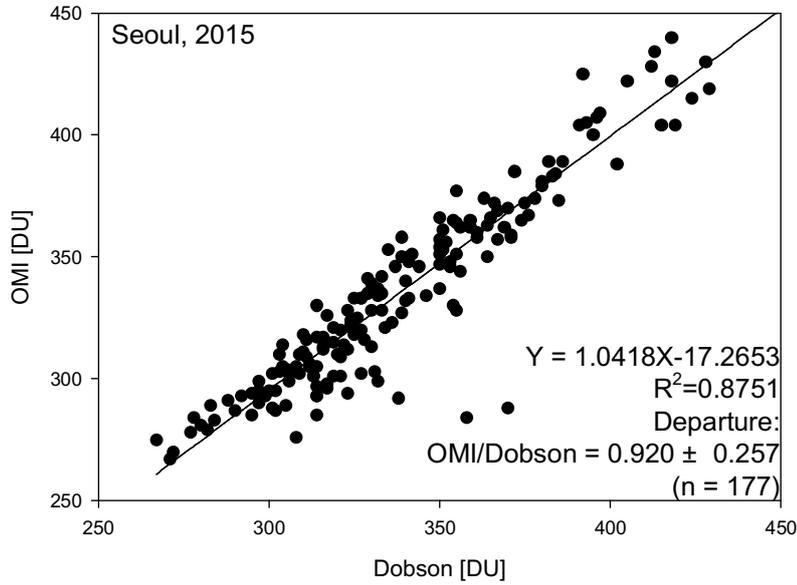


그림 3.5.8 서울 지역 2014년의 Dobson 분광광도계와 OMI 위성과의 오존전량 비교

3.5.2 오존 연직분포

오존 연직분포는 연직 공기기둥에 존재하는 각층의 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. 한반도 오존 연직분포는 기상청의 포항에서 1995년부터 오존존데를 이용해서, 위탁관측소인 숙명여자대학교에서 2008년부터 마이크로파 수신기를 이용하여 관측하고 있다.

가. 포항

1995년 4월부터 포항관측소(WMO/GO3OS Station, #332)에서 매주 1회 ECC 오존존데(Electrochemical Concentration Cell Ozonesonde)를 이용하여 오존의 연직분포를 관측하고 있다. 2015년에는 총 43회 관측이 실시되었으며, 봄 12회, 여름 10회, 가을 11회, 겨울 10회 관측하였다.

그림 3.5.9(a)는 2015년 계절별 오존 연직 평균 고도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 19~28 km 층에서 최대 오존 농도를 보였으며 봄, 겨울이 여름, 가을보다 높았다. 이러한 계절변동은 하부성층권과 상부 대류권에 걸쳐서 가장 뚜렷하게 나타나고 있으며, 상부 성층권은 계절 변동이 뚜렷하지 않았다. 대류권의 오존농도는 봄부터 증가하여 여름에 최댓값을 보였고, 여름이 지나면 감소하였으나 그 양의 변화는 하부 성층권에 비해 크지 않았다.

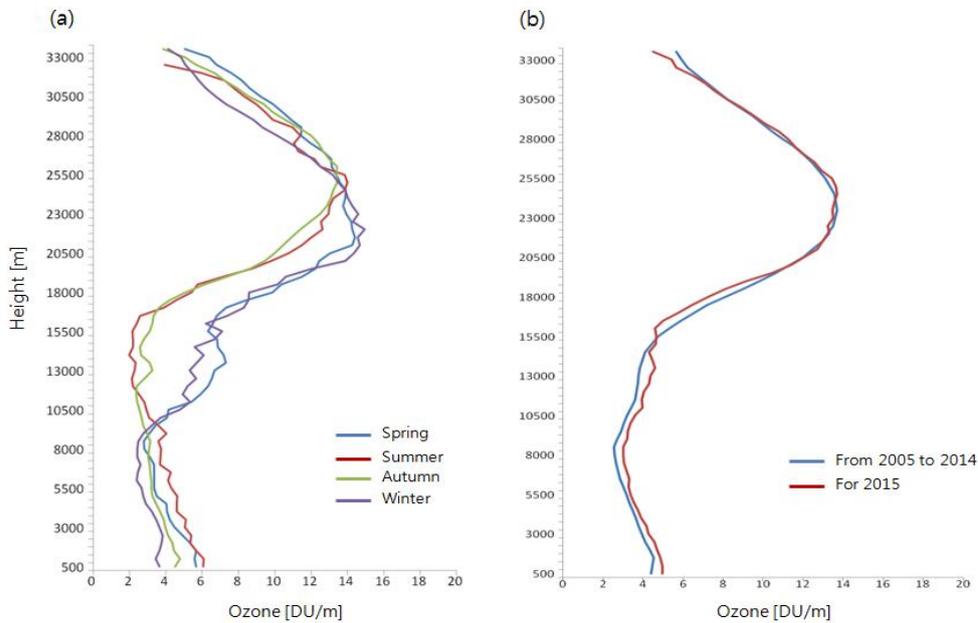


그림 3.5.9 포항 오존 연직분포의 (a)2015년 계절별 평균, (b)장기평균 참조값(2005~2014년)과 2015년 값의 비교

나. 서울

숙명여자대학교에서는 마이크로파 수신기인 SORAS(Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul)을 통해 오존 연직분포를 24시간 연속 관측하고 있다(그림 3.5.10). SORAS는 대기 중의 오존 분자로부터 발산되는 110.836 GHz의 전파를 숙명여자대학교 지구환경연구소(과학관 옥상)에서 스펙트럼 형태로 측정하며, 스펙트럼의 모양 분석을 통해 오존의 연직분포를 부피혼합비(volume mixing ratio, ppmv)의 단위로 측정한다. 2012년에는 성층권에서 중간권에 이르는 중층대기 국제감시네트워크(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC)의 관측소로 공인받았으며, 관측 자료를 NDACC 데이터 서버로 전송하여 국제 대기 모델링 및 기후 분석 연구에 사용되고 있다. 여기에서는 2015년 관측된 서울 상공의 오존 연직분포를 나타내었으며, AURA 위성의 MLS(v4.2) 자료와 비교 분석하였다.

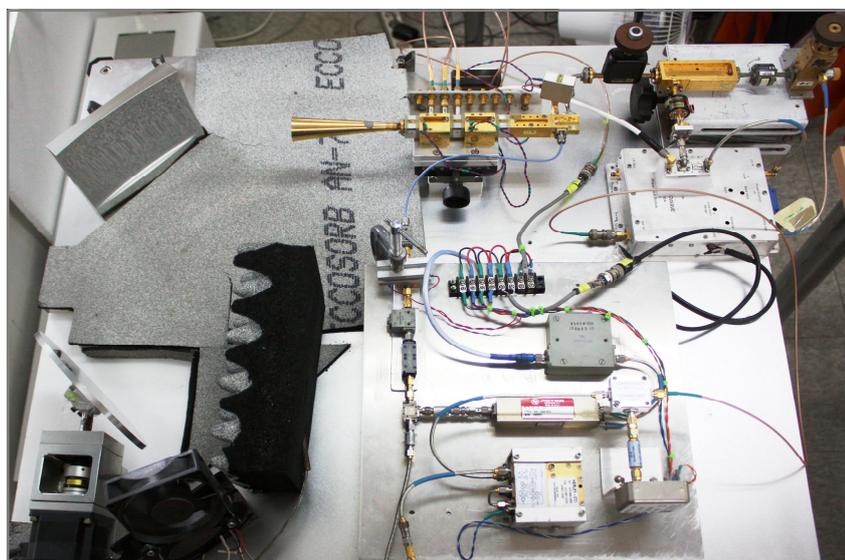


그림 3.5.10 110 GHz 오존전파수신기 SORAS

오존 전파 스펙트럼은 수 초 간격으로 SORAS에서 측정되어 수치자료로 저장된다. 관측된 오존 스펙트럼은 노이즈를 줄이기 위해 수 분~수 시간동안 평균 처리하여 농도 분석에 사용한다. 여기에서는 기본적으로 6시간 동안 평균

처리한 스펙트럼을 이용하여 농도 분석을 하였다. 2015년 3월 10일 14시부터 20시까지 6시간 동안 관측한 스펙트럼과 스펙트럼 분석을 통해 구한 오존 연직분포(ppmv), 그리고 평균 커널을 그림 3.5.11에 나타내었다. 오존 연직분포는 비교를 위해 AURA MLS(Microwave Limb Sonnder) v4.2 데이터와 같이 나타냈으며, 15~70 km 고도 전범위에서 두 연직분포간 0.5 ppmv 이내에서 농도가 일치하는 것으로 나타났다.

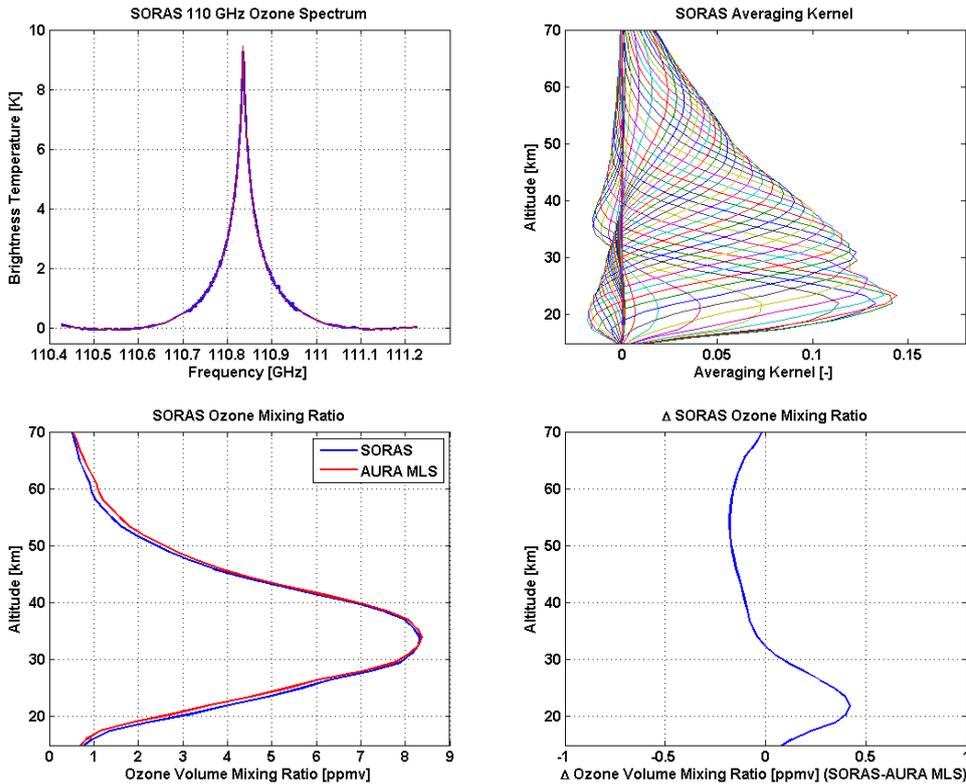


그림 3.5.11 2015년 3월 10일에 관측한 오존 스펙트럼(왼쪽위)과 평균 커널(오른쪽위). 스펙트럼 분석을 통해 도출한 서울 상공의 오존농도 연직분포(왼쪽아래). 오존농도 연직분포 중 파란색은 SORAS의 농도, 빨간색은 AURA위성의 MLS 관측자료, 두 값의 차이는 오른쪽아래 그림에 나타냄

그림 3.5.12는 2015년 서울 상공의 월평균 오존 연직분포를 나타낸다. 마이크로와 수신기의 오존 연직분포를 부피혼합비(volume mixing ratio, ppmv)와 부피혼합비에서 고도별 압력을 고려하여 변환한 분압(mPa)으로 나타내었다. 부피혼합비로 표현한 오존층의 농도는 약 35 km 부근에서 최대 농도를 보였으며, 12월부터 2월까지의 전체적인 부피혼합비가 낮아짐과 동시에 최대 부피혼합비를 보이는 고도가 37 km로 높아진다. 최대 부피혼합비는 4월과 5월에 9.2 ppmv를 보였으며, 1월에 가장 낮은 7.1 ppmv가 관측되었다(표 3.5.3).

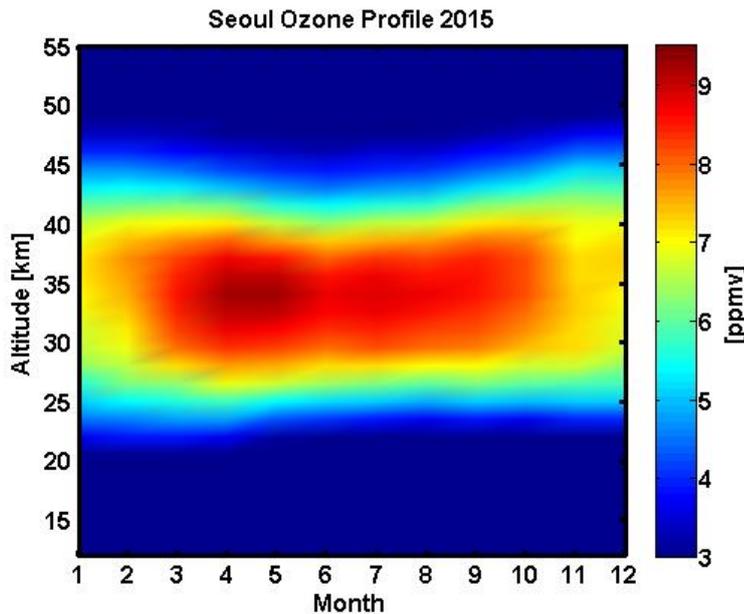


그림 3.5.12 서울 상공의 2015년 오존농도 연직분포

표 3.5.3 혼합부피비 표현 시 월평균 최대 오존농도와 최대 농도가 나타나는 고도

월	1	2	3	4	5	6
최대농도[ppmv]	7.14	7.68	8.51	9.21	9.20	8.71
고도[km]	37	37	34	34	34	34
월	7	8	9	10	11	12
최대농도[ppmv]	8.85	8.69	8.55	8.17	7.28	7.30
고도[km]	34	34	35.5	35.5	34	37

SORAS를 이용하여 측정된 자료는 NASA의 AURA MLS(v4.2) 위성 데이터와 비교·검증하였다. AURA 위성은 하루에 한번 한반도 상공을 통과하면서 성층권에서 중간권 영역의 오존 연직분포 자료를 제공하고 있다. AURA 위성 자료는 SORAS의 오존 연직분포와 비교하기 위해 서울을 기준으로 위경도 ± 5 도 내에서 측정된 평균 연직 분포값을 기준으로 하였으며, 월평균 연직 분포값과의 비교를 그림 3.5.13에 나타내었다. 전 고도 범위에 걸쳐 위성 관측값과 0.5 ppmv 이내로 일치하는 것으로 나타났다.

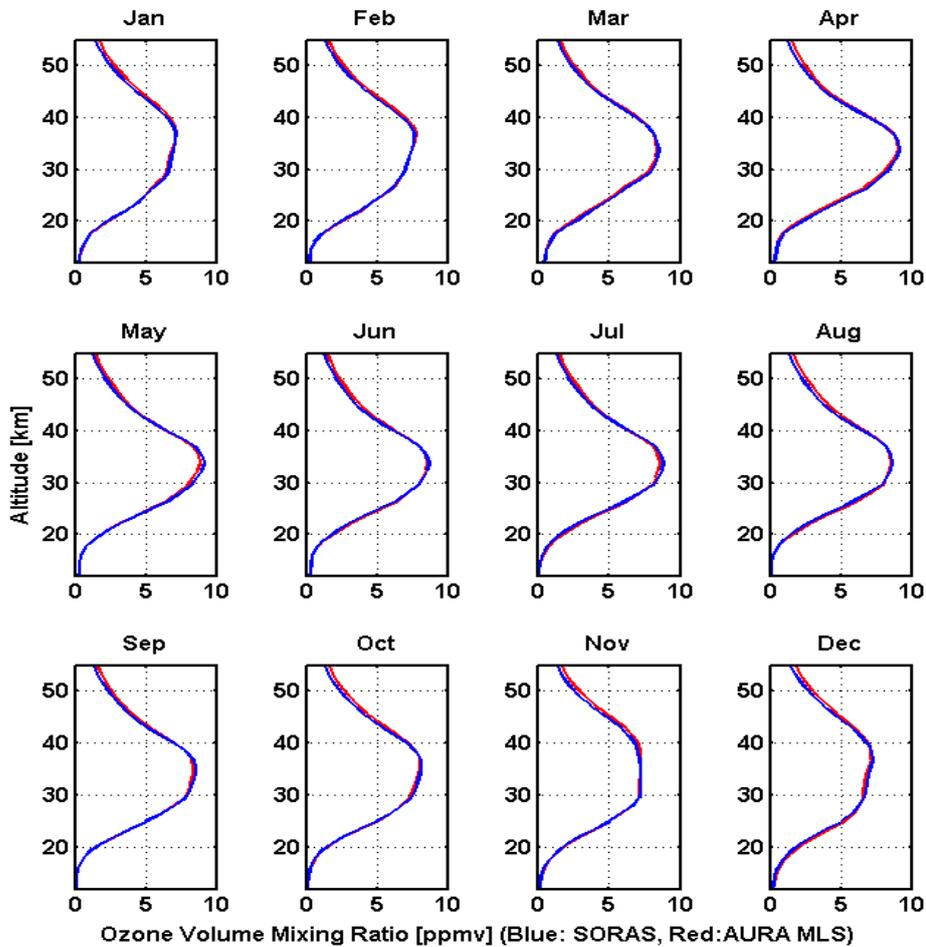


그림 3.5.13 서울의 월별 오존 농도(ppmv)와 AURA 위성의 MLS 자료

오존의 연직분포는 혼합부피비 외에 분압의 단위로 표현하기도 한다. 분압은 부피혼합비에 압력을 곱함으로 변환할 수 있으며, SORAS로 관측한 서울의 오존 농도를 분압으로 표현하면, 오존층은 약 25 km 부근에서 최대농도가 관측되었다. 오존층의 고도 변화를 월별로 살펴보면, 5월부터 10월까지 약 25 km 를 최대 농도층으로 유지하다가 11월 이후 전체적인 오존층의 고도가 낮아지기 시작하여 1월부터 3월까지 최저고도를 나타내고 있으며, 오존 농도는 1월부터 4월에 15 mPa 이상의 가장 높은 농도를 보이며 이후 점차 감소하다가 11월부터 회복하는 것으로 나타난다(그림 3.5.14, 표 3.5.4).

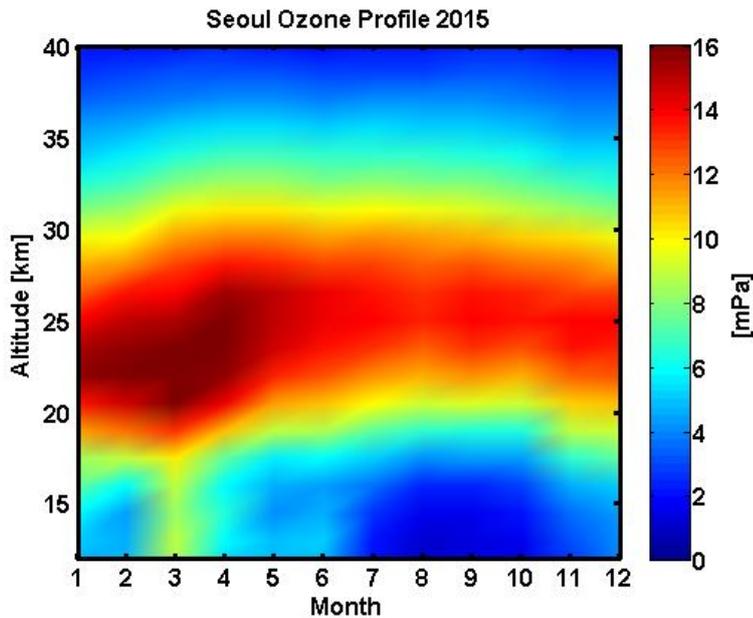


그림 3.5.14 서울 상공의 2015년 오존농도 연직분포

표 3.5.4 분압 표현시 월평균 최대 오존농도와 최대 농도가 나타나는 고도

월	1	2	3	4	5	6
최대농도[mPa]	15.6	16.3	16.2	16.2	14.9	14.2
고도[km]	22	22	22	23.5	25	25
월	7	8	9	10	11	12
최대농도[mPa]	13.9	13.3	13.7	13.6	13.9	14.0
고도[km]	25	25	25	25	25	25

3.5.3 남극 오존홀

오존홀은 오존전량이 220 DU보다 낮은 영역을 의미하며 남극 극 소용돌이에서 제트기류가 강화되는 8~12월 사이에 생성된다. 주로 남극의 봄인 9~10월경에 최대 면적을 보인다. 남극 지역에서의 오존전량은 1980년 이전에는 300 DU 수준을 보였으나, 오존홀의 발견 이후 계속해서 감소하다가 1993년에는 82 DU로 관측 기록 중 최저값을 나타내었다.

미국국립해양대기청(NOAA)은 SBUV(Solar Backscatter Ultraviolet)-2 등의 위성 자료를 활용하여 남극의 오존홀의 면적 변화에 대한 감시를 수행하고 있다. 그림 3.5.15는 남극 오존홀이 자주 발생하는 8~12월에 대해 시계열로 나타낸 것이다. 2015년(빨간선)의 경우, 과거 10년의 평균에 비해 오존홀의 연 최대면적이 비교적 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 11월과 12월에도 과거 1986년부터 2014년도의 평균에 비해서 장기간으로 형성된 것을 알 수 있다.

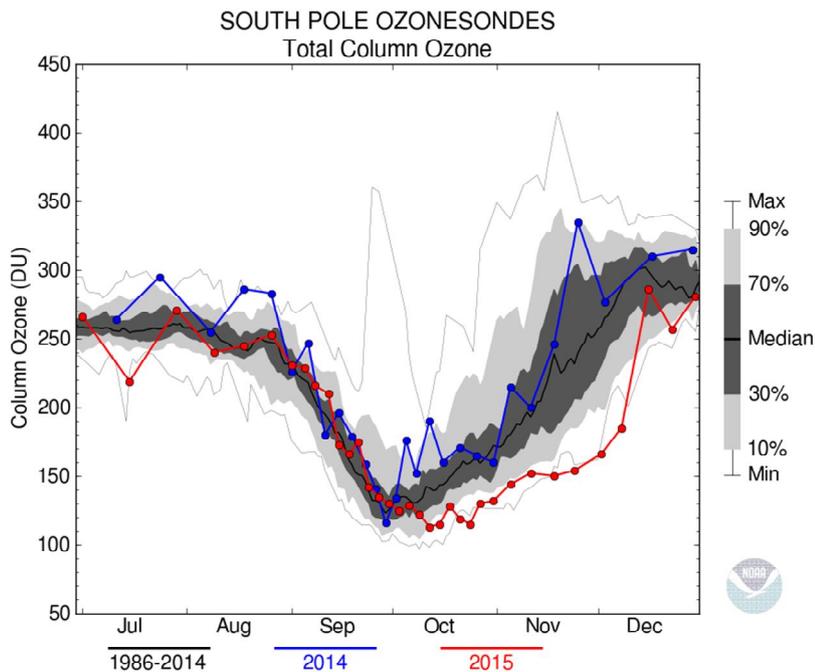


그림 3.5.15 남극 오존 전량 변화
(출처: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/spo_oz/spototal.html)

그림 3.5.16은 오존홀의 연 최대면적에 대한 경년변화를 시계열로 나타낸 그림이다. 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 km²으로 최근 20년 동안 관측된 오존홀의 최대면적 중 가장 적은 값으로 나타났다. 2015년의 오존홀의 연 최대면적은 2,500만 km²으로 2011년의 2,500만 km²에 비슷한 값으로 나타났으며, 2006년보다 가을철에 약 10%정도 넓게 나타났다.

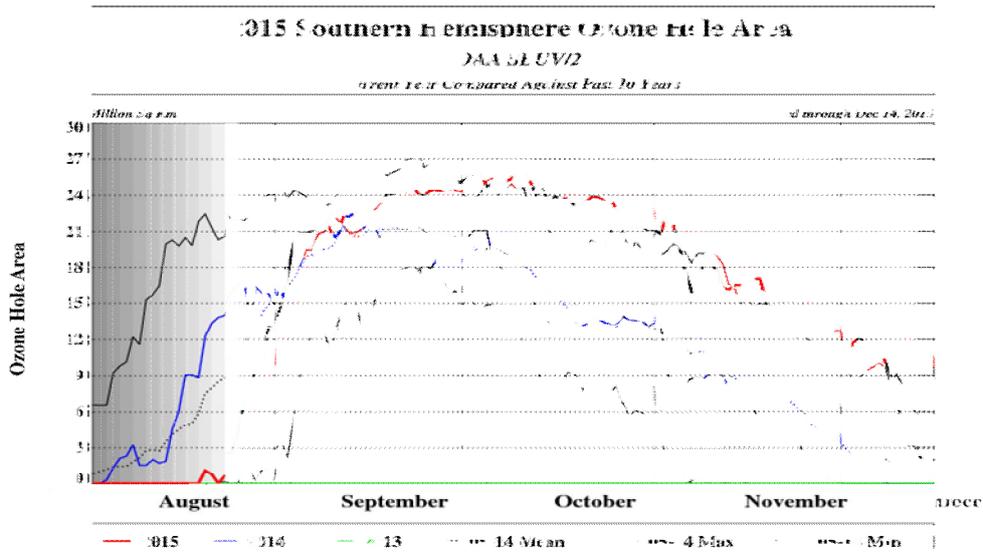


그림 3.5.16 남극 오존홀의 면적(NOAA SBUV/2 위성 관측)
(출처: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar>)

3.6 자외선

지구대기에 도달하는 태양복사는 대략 가시광선 50%, 근적외선 40%, 그리고 자외선 10%의 비율로 구성된다. 자외선 복사는 다시 자외선A(UV-A, 315~400 nm), 자외선B(UV-B, 280~315 nm), 자외선C(UV-C, 100~280 nm)로 나뉘는데, 이 중 자외선A는 약 5%가 성층권 오존층 등에 의해 흡수되고 대부분 지표에 도달하는 반면, 자외선B는 90% 이상이 오존층 이상에서 흡수되고, 가장 파장이 짧은 자외선C는 성층권 오존층 이상에서 모두 흡수되어 지표에 도달하지 않는다.

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

지표 도달 자외선의 양은 오존전량 뿐 아니라 구름, 에어로졸 등 날씨 및 대기 구성 성분 등과도 밀접히 관련되어 있다.

기상청은 1999년에 안면도, 고산, 포항에서 자외선 관측을 시작하여 현재 국내 7개 지점(안면도, 고산, 울릉도, 강릉, 포항, 목포, 서울)에서 자외선 복사량을 관측하고 있으나 서울은 2015년 2월부터 관측이 시작되어 본 보고서에는 다루지 않았다. 위탁관측소인 연세대학교에서는 1993년부터 서울의 자외선 복사량을 관측하고 있다.

3.6.1 자외선A 복사량

자외선A 복사량은 현재 안면도, 강릉, 목포, 포항, 고산, 울릉도, 서울 등 7개 지점에서 관측하고 있는데 지점마다 관측 시작 시기가 달라 자료 분석 기간이 다르다. 각 관측지점별 자료 분석 기간은 안면도 2008년, 포항 2010년, 고산과 울릉도 2012년부터 시작하여 2015년까지이고, 목포와 강릉은 2015년 자료만 존재한다.

그림 3.6.1은 품질관리를 수행한 후 자외선A의 일 최대 복사량을 2008~2015년의 기간에 대해 시계열로 나타낸 것으로, 단위는 mW/cm^2 이다.

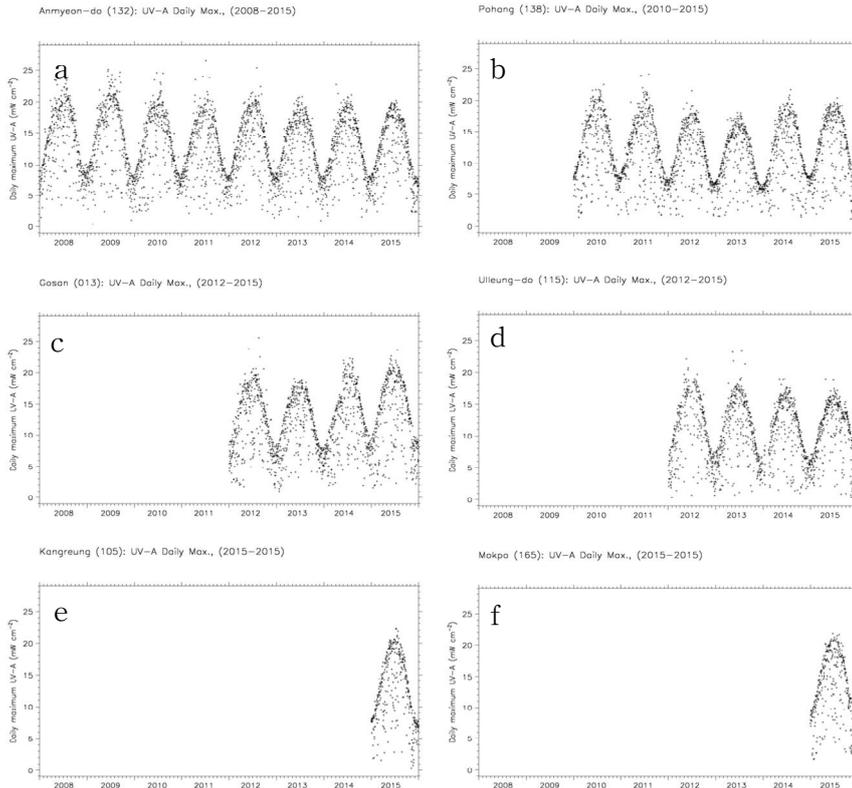


그림 3.6.1 자외선 A 일 최대 복사량
(a) 안면도, (b) 포항, (c) 고산, (d) 울릉도, (e) 강릉, (f) 목포

그림 3.6.2는 자외선A의 일 최대 복사량의 월평균 변화를 보여주고 있다. 여기에서 자료 분석 전체 기간의 월평균 변화는 빨간색 원과 실선으로 나타내었고, 2015년의 월평균 변화는 평균(네모 안 가로선)을 중심으로 위, 아래로 각각 ± 1 표준 편차 만큼 떨어진 거리를 네모로 이어서 나타내고 다시 월 최솟값과 월 최댓값까지를 세로선으로 연결하여 관측된 값의 전체 범위를 나타내었다. 강릉, 목포와 같이 2015년 자료만 있는 경우에는 전체 기간 평균은 의미가 없으므로 생략하였다.

관측지점별로 자외선A 일 최대 복사량의 월평균 변화를 살펴보면, 안면도는 전체 기간(2008~2015년) 평균은 6월이 최대였고, 2015년은 5월과 6월이 최대였다. 포항은 전체 기간(2010~2015년) 평균은 7월이 최대였으나 2015년은 5월이 최대였다. 고산은 전체 기간(2012~2015년) 평균은 8월이 최대였고,

2015년은 5월이 최대였다. 울릉도는 전체 기간(2012~2015년) 평균과 2015년 모두 5월에 최대가 나타났다. 강릉은 2015년 자료만을 분석하였고 8월이 가장 크고 5월이 다음으로 큰 값을 보였다. 목포도 2015년 자료만을 분석하였으며, 5월이 최대였고 8월이 두 번째로 큰 값을 보였다. 전체 기간 평균과 2015년에 대해 각각 월별 분포를 살펴 본 결과 5월과 8월 사이에 최대가 나타났으며, 대체적으로 5월과 8월에 높은 값을 보이는 경우가 많았지만 관측시기와 관측지점에 따라서 다소 차이가 있었다.

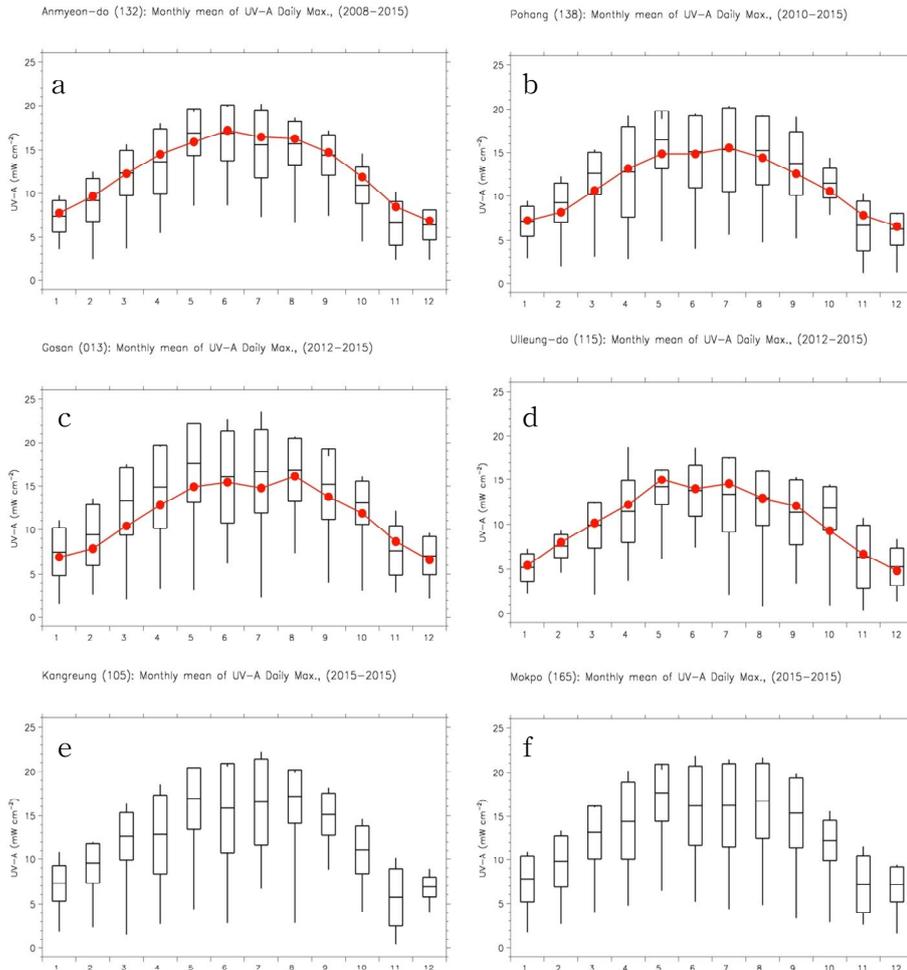


그림 3.6.2 자외선A 일 최대 복사량의 월평균 변화
(a) 안면도 (b) 포항 (c) 고산 (d) 울릉도 (e) 강릉 (f) 목포

그림 3.6.3은 자외선A 일 최대 복사량의 연평균 변화를 보여주고 있다. 안면도는 전체 기간 동안 감소하는 경향을 보였고, 2012~2015년 동안 고산과 포항의 변화 경향은 유사하게 나타났지만 자료 분석 기간이 짧아 경향성을 알 수 없었다. 관측지점별로 자료 분석 기간이 달라 비교가 어렵지만 분석된 결과로는 안면도, 고산, 포항, 울릉도 순으로 값이 작아지고 있었다. 2015년에는 고산, 목포, 강릉, 안면도, 포항, 울릉도 순으로 값이 작아지고 있었으며 울릉도의 값이 다른 지역과 비교했을 때 상당히 작았다.

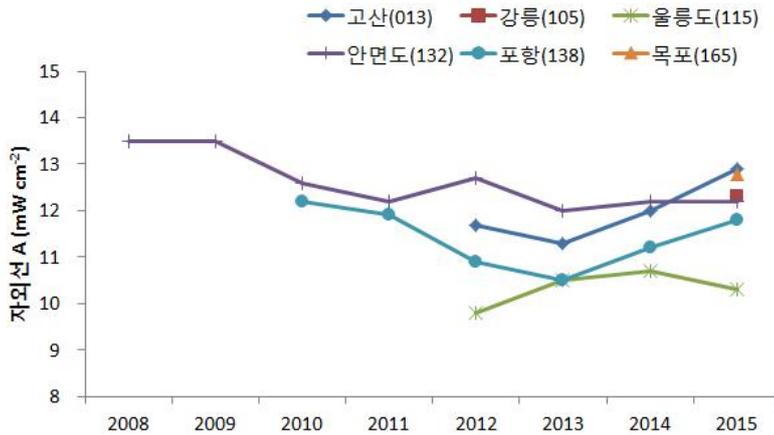


그림 3.6.3 자외선A 일 최대 복사량의 연평균 변화

5.6.2. 홍반자외선B(EUV-B) 복사량

홍반자외선B 복사량은 현재 안면도, 강릉, 목포, 포항, 고산, 울릉도, 서울 등 7개 지점에서 관측하고 있다. 울릉도는 2012년부터 관측된 자료를 이용하였다. 안면도, 강릉, 포항, 고산은 2005~2015년까지의 자료를 분석하였다.

품질관리 결과, 관측값이 0 미만인 경우는 전체 자료의 0.2% 이내였고, 허용된 최고값의 범위를 넘어서 결측으로 제거되는 비율은 전체의 0.2~0.4% 정도였다. 한편 관측센서 온도 오류는 일부 관측지점 또는 특정 관측 시기에 몰려 있는 경향을 보였으며, 무더기 결측 사태와 관련된 경우가 많았다. 결측율이 높아서 월평균 값이 생산되지 못한 경우에 그 원인을 살펴보면, 센서 온도값이 정상 상태가 아닌 경우가 대부분이었다. 전체 기간의 결측율은 결측일이 많았던 목포와 고산의 경우 그 비율이 20% 정도로 높았으나 그 이외의 관측지점에

서는 3.1~6.7% 범위의 결측율을 보여 10% 미만으로 낮은 편이었다.

그림 3.6.4는 품질관리를 수행한 후의 홍반자외선B 일 최대 복사량을 2005~2015년 동안의 기간에 대해 시계열로 나타낸 것으로, 단위는 MED 측정값을 mW/m^2 로 환산한 값이다. 안면도(a)와 강릉(b)은 전 기간에 대한 연평균 자료가 존재하지만, 목포(c), 포항(d), 고산(e)은 2005~2006년 사이에 결측일이 많았고 목포의 경우 2014년에도 결측일이 많았다.

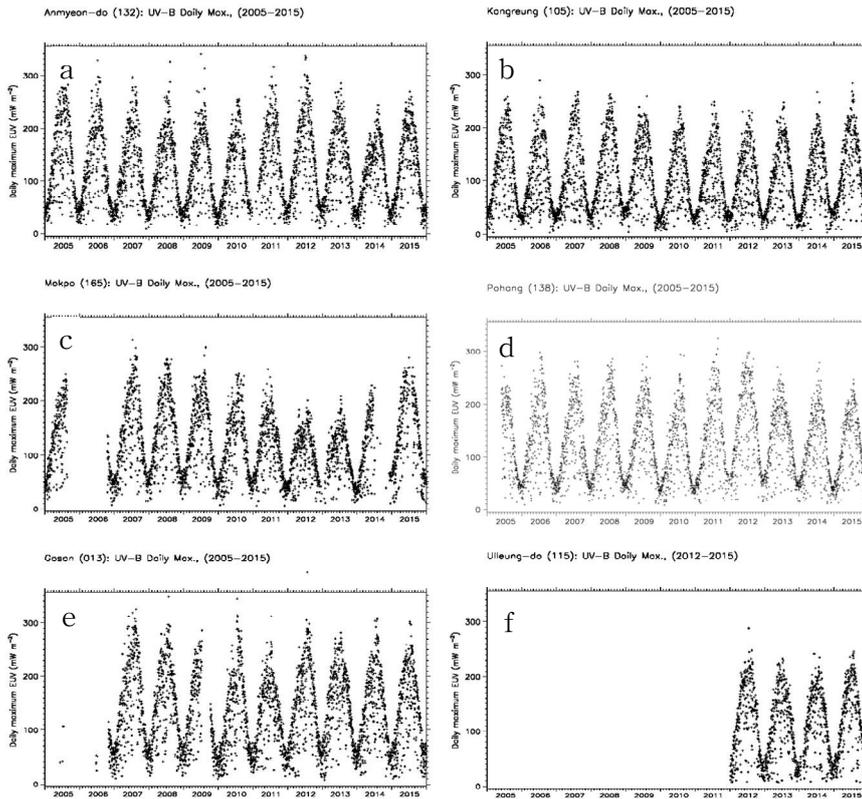


그림 3.6.4 홍반자외선 일 최대 복사량의 시계열
(a) 안면도 (b) 강릉 (c) 목포 (d) 포항 (e) 고산 (f) 울릉

그림 3.6.5는 홍반자외선B의 일 최대 복사량 월평균 변화를 보여주고 있다. 안면도(a)는 최근 10년간(2005~2014년) 평균에서 8월에 최대가 나타났지만 2015년에는 6월에 최대가 나타났고 또 최근 10년간과 달리 8월이 5, 6, 7월 보다 값이 작았다. 강릉(b)는 최근 10년간 평균은 7월에 최대, 다음으로 8월이

큰 값을 보였다. 2015년에도 7월에 최대가 나타나 평년과 같았으나 5월이 6월보다 더 큰 값을 보였다. 목포(c)는 8월에 최대, 다음으로 7월에 큰 값이 나타났다. 또, 5월이 6월보다 더 큰 값을 보였다. 2015년에는 5월에 최대, 다음으로 8월에 큰 값이 나타났다. 포항(d)는 8월에 최대, 다음으로 7월에 큰 값이 나타났다. 2015년에는 7월에 최대, 5월이 두 번째로 컸으며 6월보다 훨씬 큰 값을 보였다. 고산(e)는 7, 8월이 거의 같은 값으로 최대를 보였다. 7, 8월에 이어 5월에도 큰 값이 나타났고 이는 6월보다 더 큰 값이었다. 2015년에는 7월에 최대, 다음으로 8월과 5월이 유사하게 큰 값이 나타났으며 6월보다 훨씬 컸다. 울릉도(f)는 최근 10년간 평균 대신 2012~2014년의 3년 평균과 비교하였다. 3년 평균의 최댓값은 7월에 나타났고 이어서 5월이 두 번째로 높았다. 2015년의 월변화 경향도 이와 유사하여 7월에 최댓값이 나타났고 5월이 두 번째로 크며 다음으로 6월이 8월보다 큰 값을 보여 다른 지역과 차이가 있었다.

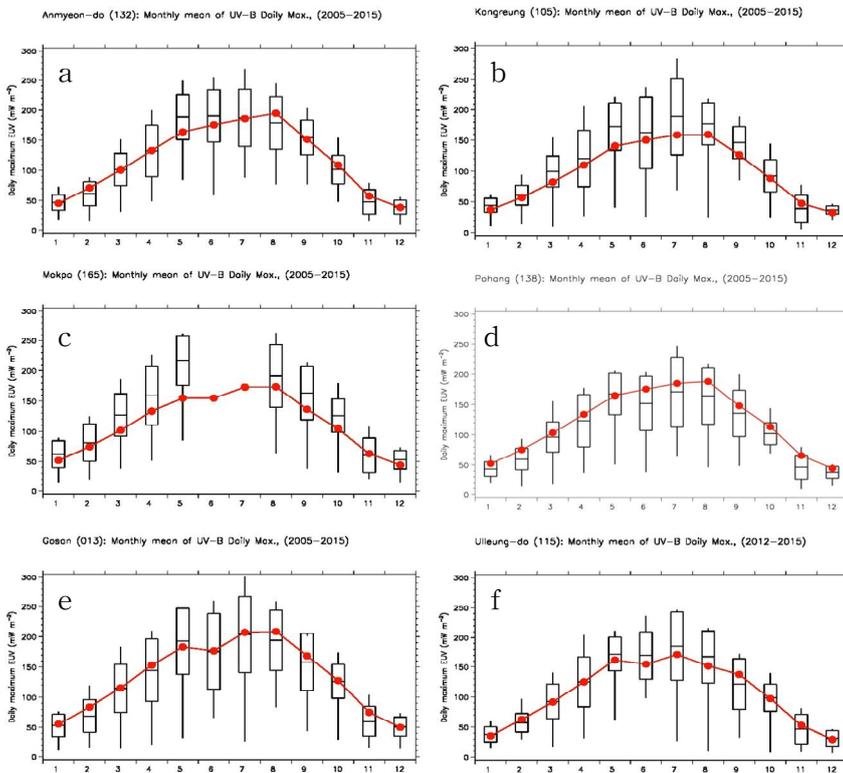


그림 3.6.5 홍반자외선 일 최대 복사량의 월평균 변화
(a) 안면도, (b) 강릉, (c) 목포, (d) 포항, (e) 고산, (f) 울릉도

그림 3.6.6은 홍반자외선 일 누적 복사량의 월평균 변화로 안면도(a)는 최근 10년 동안에는 8월에 최대가 나타났고 2015년에는 5월에 최대가 나타났다. 또 최근 10년간과 달리 8월에 5, 6, 7월보다 작은 값이 나타났다. 강릉(b)는 7월에 최대가 나타났고 6월도 유사하게 높은 값을 보였다. 이에 비해 2015년에는 5월에 최대가 나타나 최근 10년간과 차이가 있었다. 목포(c)는 5월에 최대, 다음으로 8월에도 큰 값이 나타났다.

2015년의 경우에도 5월에 최대, 다음으로 8월에 큰 값이 나타났다. 포항(d)는 7월에 최대가 나타났고, 2015년에는 5월에 최대가 나타나 최근 10년간과 차이가 있었다. 고산(e)는 7월에 최대가 나타났고, 2015년에는 5월에 최대가 나타났다. 울릉도(f)는 2012~2014년의 3년 평균과 비교하였다. 3년 평균의 최댓값은 5월에 나타났고 다음으로 7월에 큰 값이 나타났다. 2015년도 5월에 최댓값을 보여 평균과 유사했다.

홍반자외선 값이 커지는 5월부터 8월까지의 변화를 살펴보면, 최근 10년간의 일 최대 복사량은 관측지점에 따라 7월 또는 8월이 가장 큰 값을 보였고 대체로 5월부터 8월까지 증가하는 추세였지만 목포, 고산, 울릉도는 5월이 6월보다 큰 값을 보여 차이가 있었다. 한편, 일 누적 복사량은 목포, 울릉도와 같이 5월에 최댓값이 나타나는 경우도 있어 일 최대 복사량의 월평균 변화 경향과 차이가 있었고 일 누적 복사량의 경우 구름 등 일기 상태나 대기 상태의 영향을 더 받는 것으로 판단되었다.

2015년에는 일 누적 복사량의 최댓값은 모두 5월에 나타났고 강릉, 포항, 고산, 울릉도는 5, 7, 8, 6월 순으로 값이 작아져 상위 네 달 중 6월이 가장 작았다. 그러나 안면도는 6월이 두 번째로 큰 값을 보였고 5, 6, 7, 8월 순으로 값이 작아졌다. 일 최대 복사량은 강릉, 포항, 고산, 울릉도는 7월, 안면도는 8월에 최댓값이 나타났다. 일 최대 복사량의 월별 순위는 일 누적 복사량보다 관측 지점별로 차이가 컸고 강릉, 포항, 고산은 상위 네 달 중 6월에 가장 작은 값을 보였지만 울릉도는 8월, 안면도는 5월에 가장 작았다. 목포는 6월과 7월이 겹침으로 함께 비교하기 어려웠고 일 누적 복사량, 일 최대 복사량 모두 5월이 8월보다 컸다.

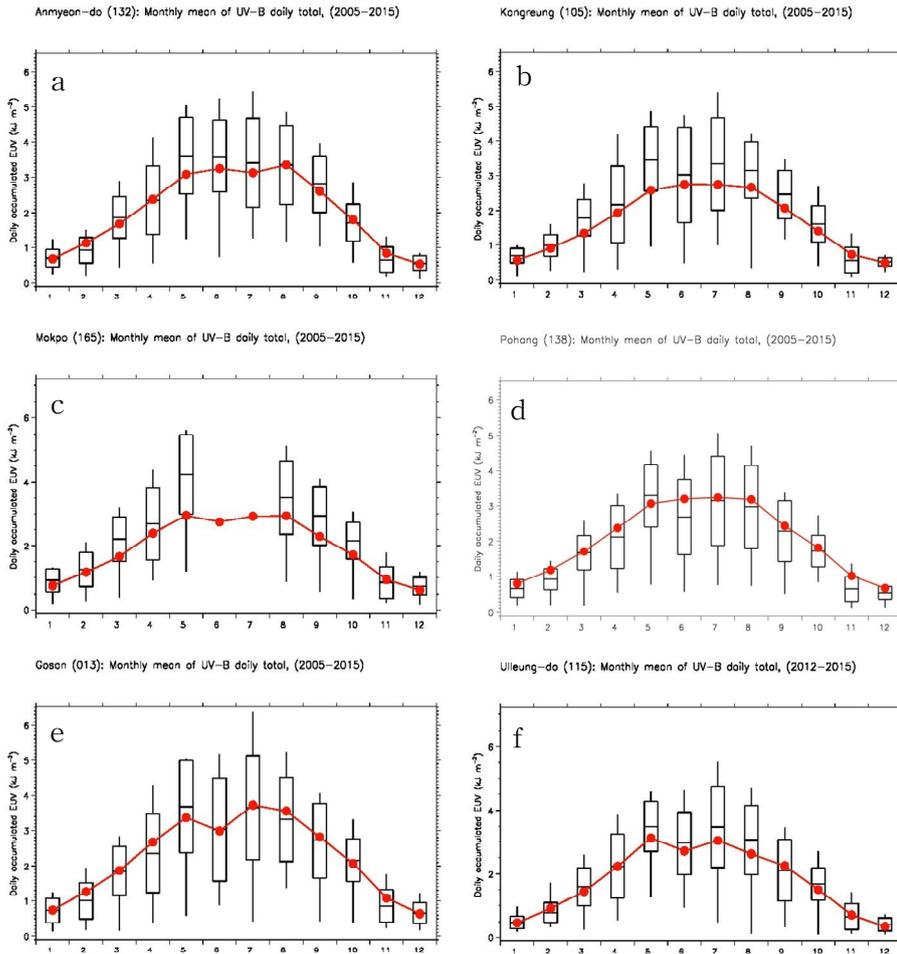


그림 3.6.6 홍반자외선 일 누적 복사량의 월평균 변화
(a) 안면도 (b) 강릉 (c) 목포 (d) 포항 (e) 고산 (f) 울릉도

그림 3.6.7은 홍반자외선 일 최대 복사량의 각 관측 지점에서의 연평균 변화이다. 강릉(b)와 목포(c)는 2015년의 평균이 전체 기간 평균보다 훨씬 컸고, 안면도(a), 고산(e), 울릉도(f)는 2015년의 평균이 전 기간 평균과 유사했지만 포항(d)는 2015년의 평균이 전체 기간 평균보다 훨씬 작아 차이가 있었다. 관측 지점별 전체 기간의 평균을 비교하면, 고산이 가장 컸고 포항, 안면도, 목포, 울릉도, 강릉 순으로 작았다.

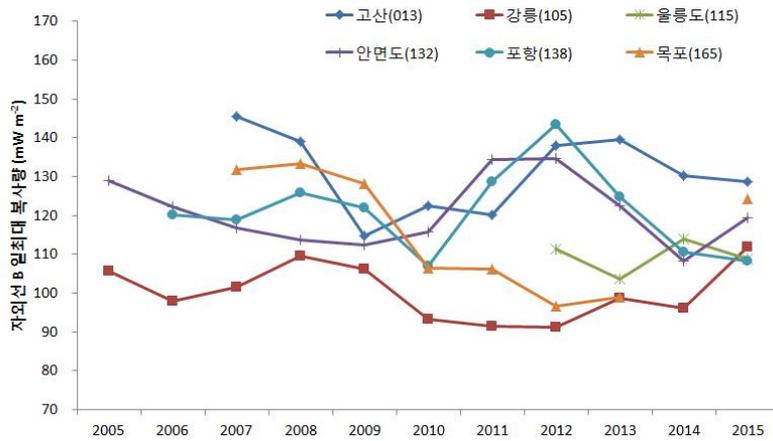


그림 3.6.7 홍반자외선 일 최대 복사량의 연평균 변화

그림 3.6.8은 홍반자외선 일 누적 복사량의 각 관측 지점에서의 연평균 변화를 나타내고 있다. 앞서 살펴 본 일 누적 복사량과 일 최대 복사량의 월평균 변화 경향이 서로 차이가 있었던 것과는 달리 일 누적 복사량과 일 최대 복사량의 연평균 변화 경향은 매우 유사했다. 관측 지점별로 고산이 가장 크고 안면도, 포항, 목포, 울릉도, 강릉 순으로 작았다. 한편, 목포의 경우 여름철에 결측일이 많아 값을 비교할 때 주의가 요구된다.

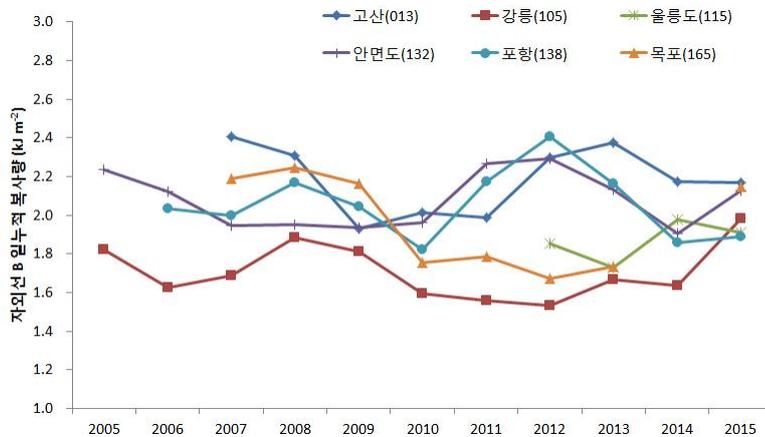


그림 3.6.8 홍반자외선 일 누적 복사량의 연평균 변화

3.6.3 서울의 자외선 복사, 자외선 지수

연세대학교 서울 캠퍼스에서 UV Biometer로 1993년부터 2000년 12월까지 홍반 자외선 복사를 관측하였고 2004년부터 현재까지 브루어(Brewer) 분광광도계 (SCI-TEC #148)로 자외선 복사(287~363nm)를 파장별로 측정하여 이 파장역의 적분값(Total ultraviolet radiation, TUV)과 홍반 자외선(Erythema ultraviolet-B, EUV) 복사량을 구하고 있다. 여기에서 EUV는 파장별로 인체 피부 홍반에 예민한 홍반 작용스펙트럼을 파장별 자외선 복사에 가중시켜 적분한 값이다.

자외선 복사의 일 적산값을 2004년 3월부터 2015년 12월까지 시계열로 전자외선과 홍반자외선을 각각 그림 3.6.9와 그림 3.6.10에 표시하였다.

앞서 서울 에어로졸 광학 깊이에 대한 분석에서도 언급했듯이, 브루어가 태양을 추적하지 못하면서 자동적으로 수은램프 교정이 이루어지지 못하는 오류로 관측을 수행하지 못했다. 특히 4월 3일부터 4월 28일, 6월 19일부터 8월 19일까지는 관측은 되었지만, 신뢰도가 낮기 때문에 그림 3.6.9와 그림 3.6.10의 그래프에서는 제외하였다. 자외선 복사량의 변화는 태양천정각과 일조시간의 천문학적 원인과 날씨에 의해 영향을 주로 받게 되므로 뚜렷한 계절변화를 보이게 된다.

그림 3.6.9와 3.6.10는 각각 TUV와 EUV의 시계열을 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 2005년을 제외한 2011년도까지는 연 최댓값이 TUV에서 6월에 나타나고 있었지만, 2012년과 2013년도에는 연 최댓값이 8월과 7월에 각각 나타났다. 그러나 2013년도에도 5월과 6월에 꾸준히 높은 값이 나타나는 경향성은 일치하고 있으며, 최근 몇 년 동안 EUV에서의 연 최댓값은 7~8월에 나타나고 있으나, 2015년도에는 여름철 관측값의 부재로 5월에 나타났다. 2015년 TUV 최댓값은 5월 27일에 나타났으며 그 값은 1.23 MJ/m^2 이고, EUV의 최댓값은 5월 27일에 나타났으며 그 값은 4.65 kJ/m^2 로 나타났다.

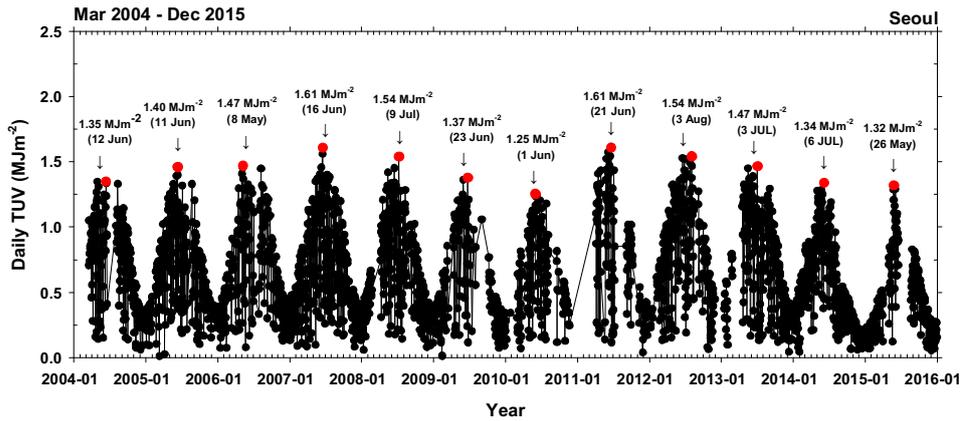


그림 3.6.9 보정 전 전자외선(TUV) 복사량의 일 시계열(2004.3.~2013.12.)

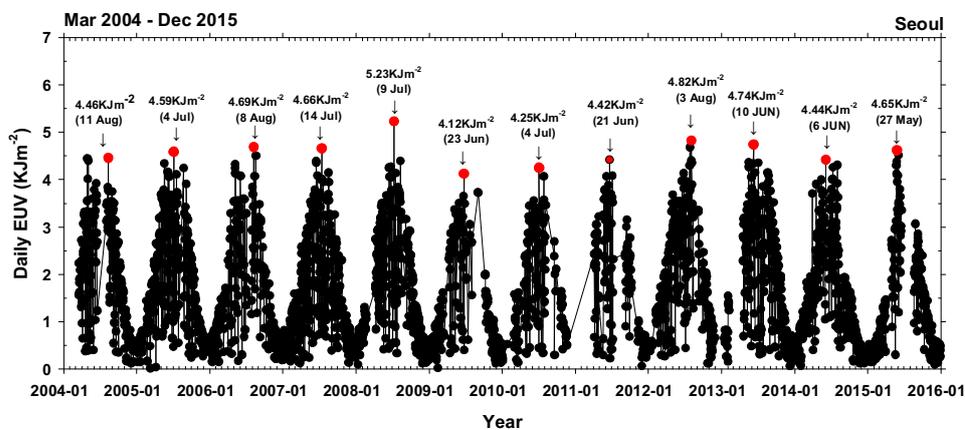


그림 3.6.10 흥반자외선(EUV) 복사량의 일 시계열(2004.3.~2015.12.)

TUV에 대해서 월평균 값의 연변화와 연평균 값의 경년변화를 각각 그림 3.6.11에 나타내었다. 그림(a)에서 TUV는 6월에 최댓값(0.92 MJ/m^2)를 갖고, 1월에 최솟값(0.18 MJ/m^2)을 나타내었다. 2004년부터 2015년까지의 연평균 경년변화를 그림(b)에 표시하였다. 이 그림에서 TUV의 연변화는 2005년에서 2008년까지는 일정한 값을 유지하다가 2009년에 들어 2008년보다 약 13% 감소하였다. 2010년부터 2012년까지 다시 증가하는 경향을 보였고 2014년에 연 평균의 추세를 보이다가 다시 감소했다. 그러나 2015년의 이러한 감소 경향은 연평균 시 브루어 분광기의 봄과 여름철 고장으로 인해 4월과 7월의 값들이 대부분 누락된 것이 영향을 미친 것으로 보인다.

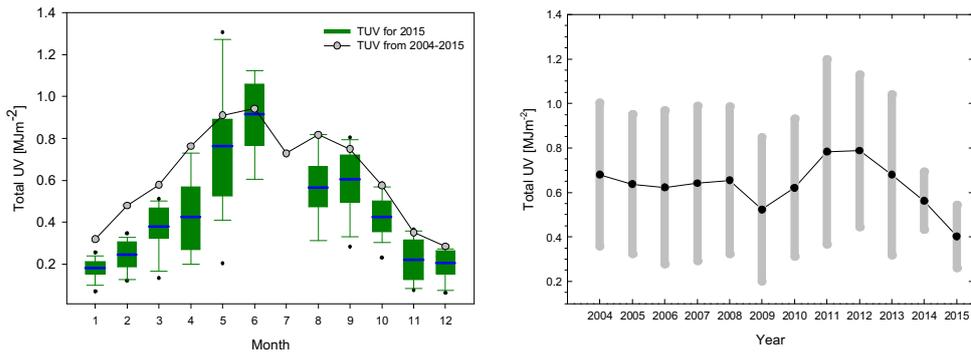


그림 3.6.11 서울의 전자외선(TUV) 복사량의 (a)월평균 연변화, (b)연평균 경년변화 (녹색 박스플롯 2015년의 TUV 복사량; 상자 선의 양끝 10, 90%, 상자 양끝 25, 75%, 상자가운데 선은 중간값, 검은 점은 최댓값과 최솟값)

그림 3.6.12는 EUV의 월 평균의 연변화와 연 평균의 경년변화를 각각 나타낸 것이다. EUV는 6월에 최댓값(3.22 kJ/m^2)을 가지며, 1월에 최솟값 (0.36 kJ/m^2)을 가진다. 그러나 여름철에 TUV와의 차이점은 6월과 8월에 보이는 평균이 TUV는 6월이 8월에 비해 높은 반면, EUV는 8월이 6월에 비해 높게 나타났다. 연평균 EUV의 경년변화를 보면, 2004년부터 2009년까지 2008년을 제외하고 전체적으로 완만한 감소 추세를 보였으나, 2010년부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 2011년과 2012년의 증가 추세는 다소 완만하였고, 2013년은 다시 감소하는 추세가 나타났다. 그림 3.6.11 (b)와 3.6.12 (b)의 TUV와 EUV의 경년변화에서 알 수 있듯이 그 연변화 추세가 어느 정도 일치했다.

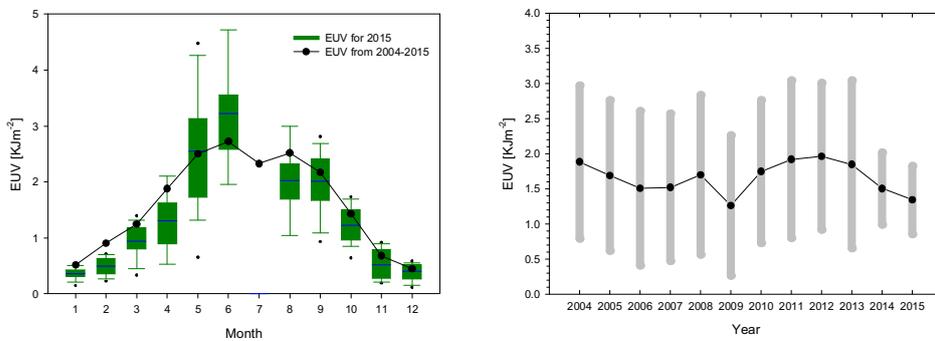


그림 3.6.12 서울의 흥반자외선(EUV) 복사량의 (a)월평균 연변화, (b)연평균 경년변화 (녹색 박스플롯 2015년의 TUV 복사량; 상자 선의 양끝 10, 90%, 상자 양끝 25, 75%, 상자가운데 선은 중간값, 검은 점은 최댓값과 최솟값)

그림 3.6.13은 2004년 3월부터 2015년 12월까지의 자외선 지수(UVI)의 일 최대값을 시계열로 나타낸 그림이다. 연도별로 최대값은 주로 7~8월에 나타나고 있으며, 7~8월에 나타나지 않았던 2004년과 2005년의 경우에도 극대값의 시기가 5월 31일과 9월 1일로 비교적 여름철에 높은 관측값이 나오고 있음을 알 수 있다. 관측 기록 중 최대값은 2008년 7월 20일에 관측된 10.9로 UVI 중 ‘매우 높음’에 해당하는 값이 관측되었다. 2015년의 연 최대값은 5월 27일에 관측한 8.7로 ‘매우 높음’에 해당하는 관측값이다. 이 UVI값은 비상대비가 필요하고 한낮 시간에는 외출을 자제하는 수준이다.

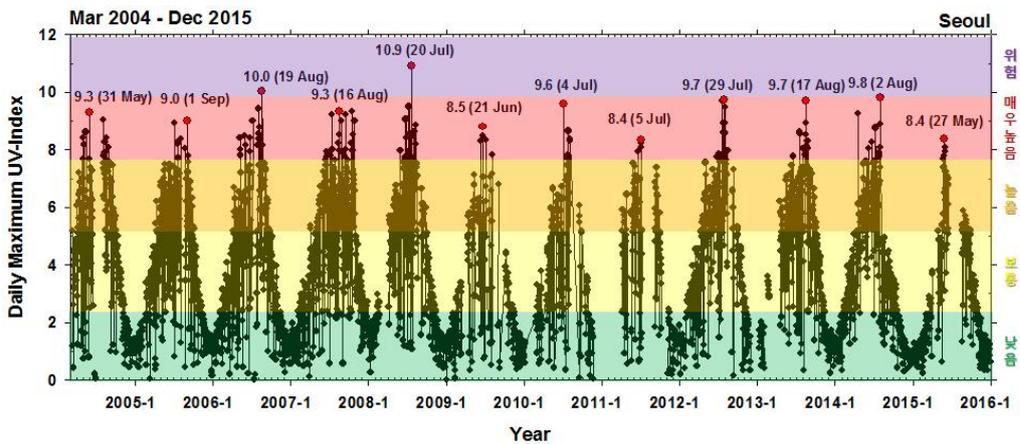


그림 3.6.13 흥반자외선(EUV) 복사량의 일 시계열(2004.3.~2015.12.)

그림 3.6.14는 UVI의 월평균 변화를 나타내고 있다. 월평균 자료에서 UVI는 8월에 5.5로 최대값을 보였으며, 2월에 1.57로 최소값을 보이고 있다. 가장 높은 자외선 지수를 보이는 8월은 ‘높음’에 해당하는 자외선이, 1~2월에 걸쳐서는 ‘낮음’에 해당하는 자외선 강도가 관측되었으며, 일별 UVI는 차이가 보이지만 6월부터 10월을 제외한 봄, 여름, 가을철에는 ‘보통’의 강도가 관측되었다.

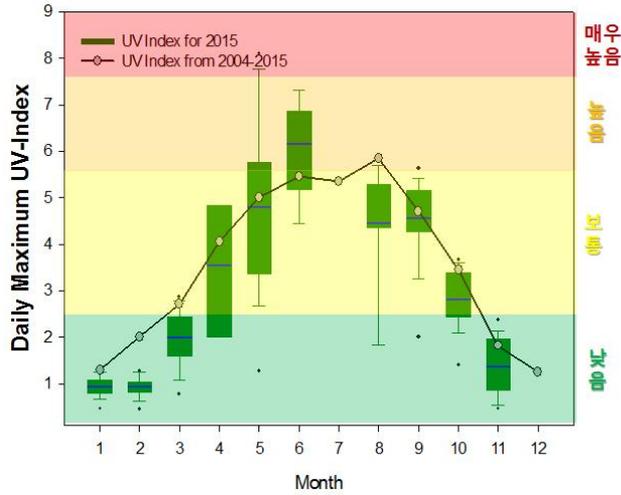


그림 3.6.14 서울의 자외선 지수의 월평균 (녹색 박스 플롯 2015년의 자외선 지수, 상자 선의 양끝 10, 90% 상자 양끝 25, 75% 상자가운데 선은 중간값, 검은 점은 최댓값 및 최솟값)

그림 3.6.15는 기상청 운량 자료를 이용하여 구분한 맑은 날씨에 대한 UVI를 나타낸다. 브루어의 데이터가 적은 4월과 7월을 제외한 경우에도 자외선 지수는 그림 3.6.14에서 보았던 평균한 값보다 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

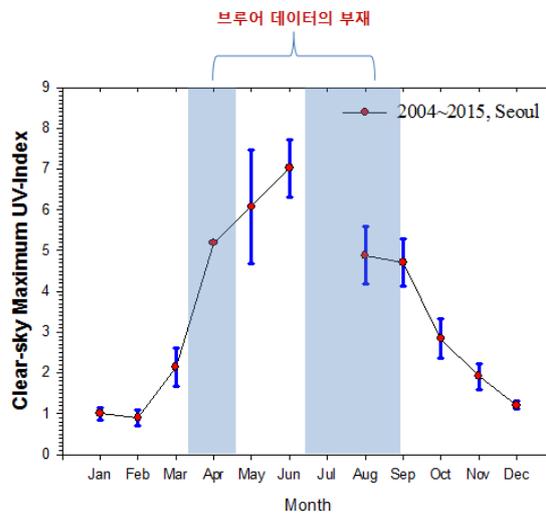


그림 3.6.15 서울의 맑은 날씨(운량 3 이하)의 자외선 지수

3.7 총대기침적

대기 중에 부유하는 오염물질은 습성과 건성의 강하물로 지면에 떨어진다. 습성 강하물은 비, 눈, 우박 등의 강수에 의해 오염물질이 지면으로 떨어지는 것이고, 건성 강하물은 중력에 의해 입자나 가스상의 물질이 지면으로 떨어지는 것이다. 따라서 습성과 건성 강하물의 화학성분을 분석하면 대기 중의 강수 성분이나 오염물질을 감시할 수 있다.

세계기상기구 지구대기감시의 총대기침적 프로그램은 4가지 목적으로 수행되고 있다. 첫째, 지구 및 지역 규모 차원에서 대기의 강수성분에 대한 패턴과 추세를 정량화한다. 둘째, 주요 화학성분과 생화학 주기에 대한 이해를 높인다. 셋째, 산성침적의 지구적 평가를 수행하기 위한 주요 배출원으로부터 장거리 수송을 조사한다. 넷째, 해안, 민감한 지역, 개발제한 지역 등 주요 생태계에 대한 산성침적 피해를 평가하기 위해 주요 이온성분을 분석한다.

총대기침적에서 다루지 않는 건성 강하물을 측정하기 위해 중력으로 낙하하는 입자상 물질을 분진받이로 채취하여 주요 이온성분을 분석한다.

주위 오염원이 없는 배경지역인 안면도, 울진, 울릉도, 고산을 산성비 관측소로 선정하고 1997년에는 안면도와 울릉도, 1998년에는 울진과 고산에서 강수의 화학 특성을 분석하여 왔다. 강수의 산성도는 전일 09시부터 당일 09시까지 채취한 시료로 분석한다. 시료량이 적으면 분석 오류가 발생할 수 있기 때문에 강수량이 0.5 mm 이상인 시료만을 유효시료로 분석하였다. 시료는 전기전도도(EC)와 산성도(pH)를 측정된 후에 여과지로 시료에 포함된 불순물을 제거하여 이온성분을 분석하였다.

3.7.1 2015년 강수특성

연도별 연강수량을 살펴보면 지역에 따라 증가와 감소를 반복하는 등 서로 다른 양상을 보인다. 2014년과 비교할 때 고산을 제외한 안면도, 울진, 울릉도가 모두 2015년에 강수량이 감소하였다(그림 3.7.1). 2015년 지역별 연강수량을 살펴보면 안면도 659.0 mm, 울진 819.1 mm, 고산 1774.5 mm, 울릉도 1370.2 mm로 고산이 가장 많았다(그림 3.7.2(a)). 최근 10년간(2005~2014년) 평균과 비교할 때 안면도, 울진, 울릉도는 적었고, 고산은 많았다(표 3.7.1).

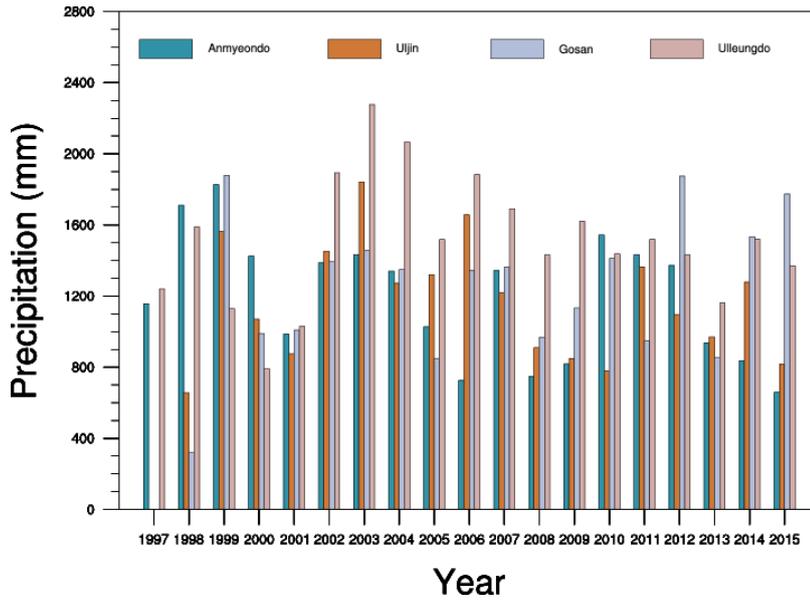
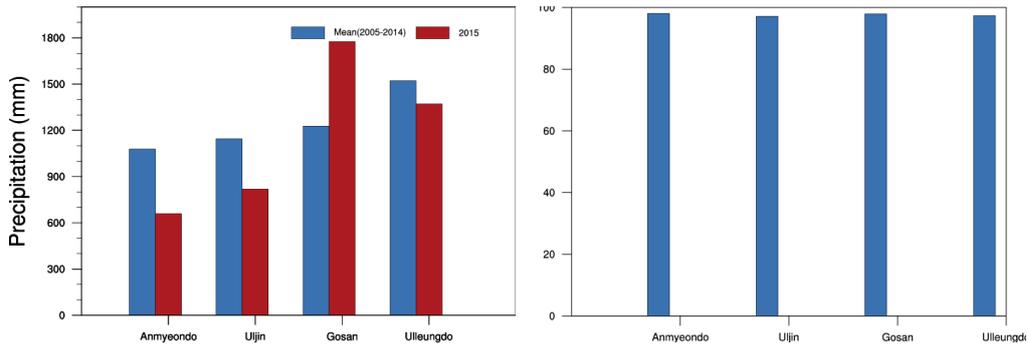


그림 3.7.1 연도별 연강수량(mm)

표 3.7.1. 2015년 총강수량과 최근 10년간 강수량

지점	구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
안면도	2015년	15.5	23.5	18.0	102.5	24.5	59.0	95.0	38.0	36.5	49.0	149.0	48.5	659.0
	평년값	13.2	21.6	37.5	64.0	77.5	123.1	251.6	249.6	138.7	37.5	39.9	24.8	1078.9
울진	2015년	29.8	14.1	29.1	78.3	8.0	99.2	120.1	125.4	41.7	7.1	249.3	17.0	819.1
	평년값	40.6	45.5	59.5	76.3	74.9	112.2	216.5	171.1	199.6	79.5	46.1	22.9	1144.7
고산	2015년	70.0	75.0	115.0	174.5	282.5	231.0	203.5	127.5	227.0	15.5	134.5	118.5	1774.5
	평년값	31.1	60.3	84.9	113.7	96.2	155.1	195.7	195.6	109.9	57.8	84.9	42.7	1227.9
울릉도	2015년	138.0	92.0	35.0	63.0	35.5	103.0	98.0	158.5	73.0	41.0	427.0	101.2	1370.2
	평년값	107.0	84.2	88.8	102.2	121.2	115.9	187.5	147.9	205.6	122.2	110.4	128.4	1521.5

강수채취율은 총강수량 중 채취한 강수량의 비율로, 2015년 강수채취율은 안면도 98.0%, 울진 97.2%, 고산 97.9%, 울릉도 97.3% 이다(그림 3.7.2(b)). 이는 GAW 총대기침적에서 품질목표로 규정한 강수채취율 70%보다 높았다.



(a) 연강수량 (b) 강수채취율
 그림 3.7.2 2015년 지역별 연강수량(mm)과 강수채취율(%)

2015년 강수량과 평년 강수량을 월별로 비교하였다(그림 3.7.3). 고산은 5월에, 나머지 지역은 11월에 최대 강수량을 보였다. 고산은 8월과 10월을 제외하고 모두 평년보다 강수량이 많았다. 그리고 나머지 지역은 대체로 평년과 유사한 강수량을 보였으나, 7~9월은 평년보다 강수량이 적었고, 11월은 모든 지역에서 평년보다 많은 강수량을 기록하였다.

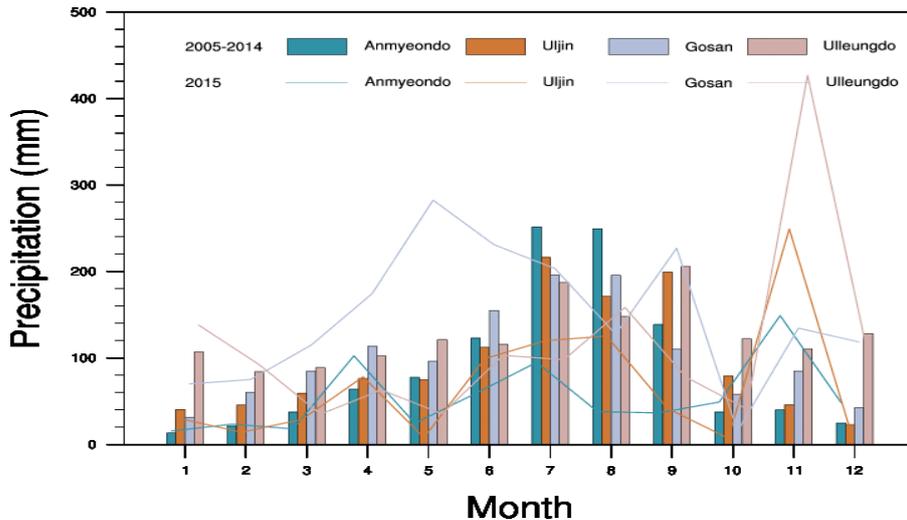


그림 3.7.3 2015년과 최근 10년간 강수량의 월별 분포.
 지역별 월 강수량(실선), 평년 강수량(막대)

총대기침적 분석요소 중 수용성 이온 9종 (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})에 대한 품질관리를 통해 이온분석의 신뢰도뿐만 아니라 함께 측정된 산성도(pH)와 전기전도도의 신뢰도를 함께 확보할 수 있다. 강수량이 0.5 mm 이상인 시료만 이온분석을 실시하였고, 강수 시료의 품질관리를 위해 이온분석기의 검출한계(0.314 ppm) 이하로 측정된 자료는 분석에서 제외하였다.

품질관리를 거친 각 지점별 분석 성공률은 안면도 65.8%, 울진 55.2%, 고산 39.4%, 울릉도 47.2%로, GAW의 총대기침적에서 규정하는 분석 성공률의 품질목표인 90%를 모두 만족하지 못하였다. 이온균형과 전기전도도 균형만 실시하였을 경우 울진(89.6%)을 제외하고 모두 분석 성공률이 90% 이상이지만, 이온수지까지 실시할 경우 4, 5, 6, 7, 8, 11월이 대부분 60% 미만으로 낮게 나타났다. 이는 시료의 변질로 품질관리를 통과하지 못한 것으로 판단된다.

표 3.7.2. 2015년 관측지점별 강수시료 분석 성공률(%)

월	지점	안면도	울진	고산	울릉도
1월		100.0	100.0	57.1	77.8
2월		100.0	100.0	60.0	63.6
3월		66.7	100.0	50.0	100.0
4월		44.4	80.0	54.5	50.0
5월		66.7	33.3	44.4	66.7
6월		50.0	16.7	0.0	40.0
7월		55.6	28.6	33.3	25.0
8월		60.0	50.0	40.0	20.0
9월		66.7	57.1	33.3	0.0
10월		50.0	100.0	100.0	33.3
11월		45.5	27.3	33.3	13.3
12월		100.0	0.0	40.0	66.7
2015년		65.8	55.2	39.4	47.2

그림 3.7.4는 2015년 총대기침적 분석 자료의 품질보증/관리(QA/QC) 전후의 이온 균형결과이다. 그림의 가로축은 음이온의 당량 농도 총합이고, 세로축은 양이온의 당량 농도 총합이다. 분석이 우수하면 두 값이 일치하여 기울기가 1인 대각선 위에 자료가 위치한다. QA/QC 전과 후의 분석값이 겹친 데이터는 QA/QC를 통과한 것이다. 안면도, 울진의 기울기는 각각 품질관리 전후 변화가 없었고, 울릉도는 품질관리 전후 1.116에서 1.093으로 1.0에 가까워졌다. 안면

도와 고산의 상관계수는 각각 품질관리 전후 변화가 없었고, 울진과 울릉도는 품질관리 전후 각각 0.97에서 0.99로, 0.95에서 0.99로 향상되었다.

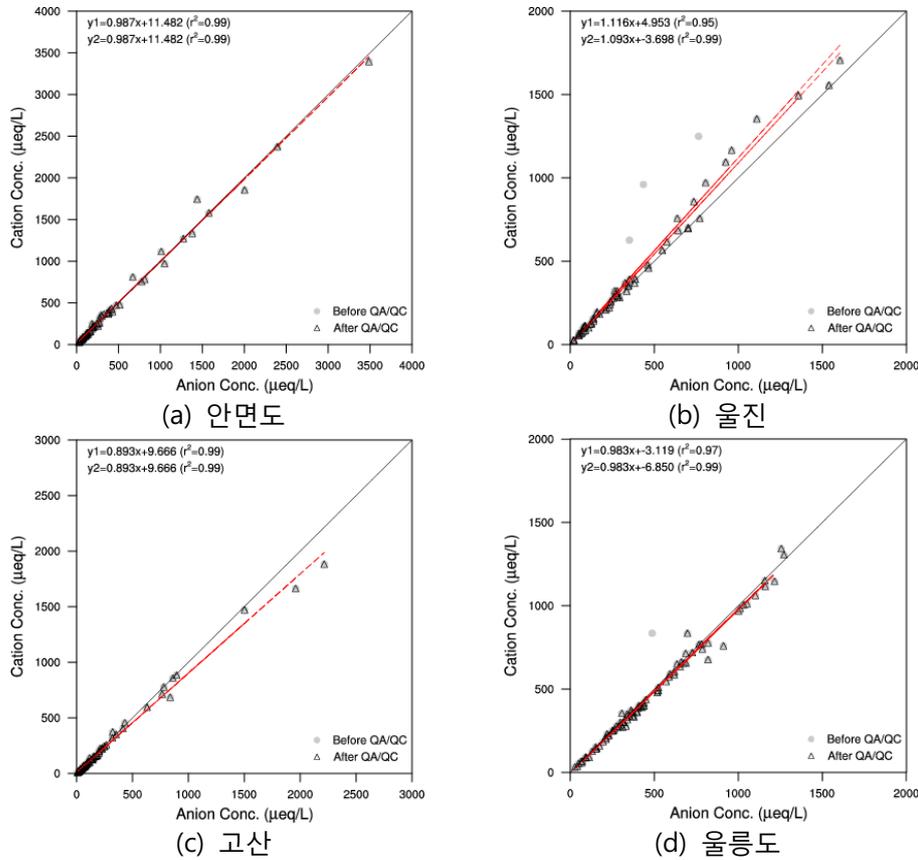


그림 3.7.4 2015년 관측지점별 강수시료의 QA/QC 전후 이온 균형 결과

그림 3.7.5는 2015년 총대기침적 분석 자료의 QA/QC 전후 전기전도도 균형결과이다. 그림의 가로축은 분석된 전기전도도이고, 세로축은 이론적 전기전도도이다. 분석이 우수하면 두 값이 일치하여 기울기가 1인 대각선 위에 자료가 위치한다. 그리고 QA/QC 전후의 분석값이 겹치면 QA/QC를 통과한 것이다. 안면도와 울릉도는 기울기와 상관계수 모두 품질관리 전후 변동이 없었다. 울진은 기울기가 0.772에서 0.929로 1.0에 가까워졌고, 상관계수도 0.73에서 0.99로 크게 향상되었다. 고산도 기울기가 0.928에서 0.930으로 1.0에 가까워졌고, 상관계수가 품질관리 전후 모두 1.0으로 우수하였다.

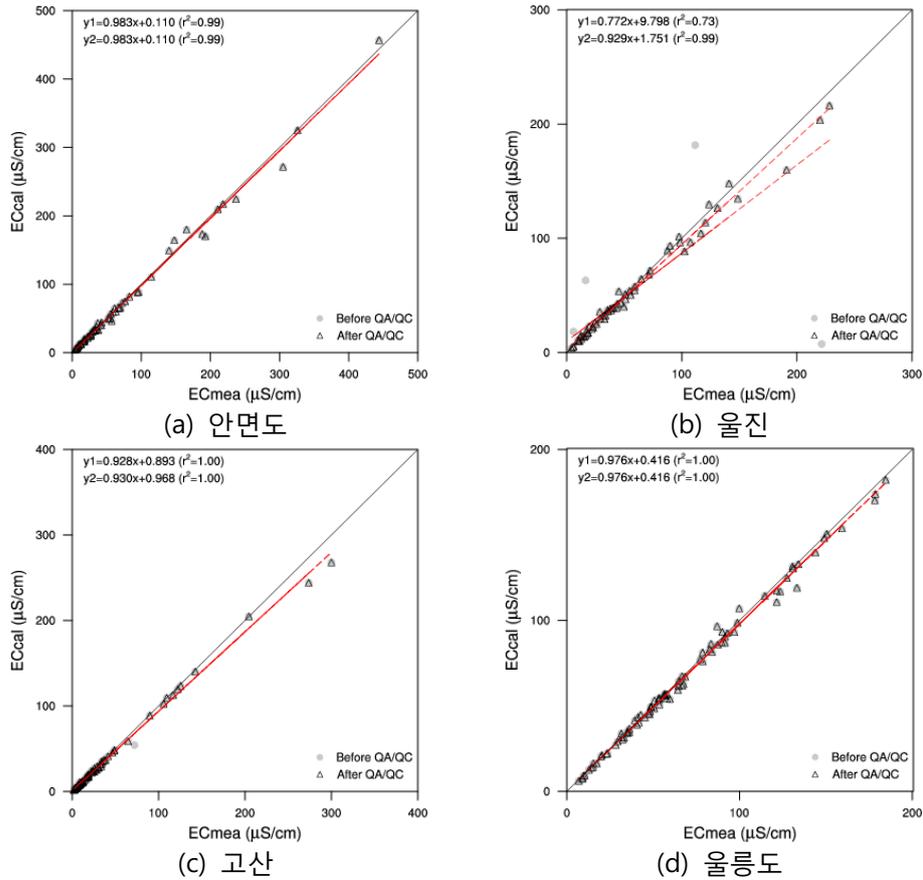


그림 3.7.5 2015년 지점별 강수시료의 QA/QC 전후 전기전도도 균형 결과

2015년 강수시료에 대해 이온 균형과 전기전도도 균형 분석 결과 안면도는 총 73개 시료 중 73개가, 울진은 67개 시료 중 63개, 고산은 94개 시료 중 93개, 울릉도는 89개 시료 중 88개가 품질관리를 통과하였다.

표 3.7.3. 2015년 지점별 강수시료에 대한 이온과 전기전도도 균형 품질관리 결과

구분	안면도	울진	고산	울릉도
강수 시료 개수	73	67	94	89
전기전도도 균형 통과	73	63	93	89
이온 균형 통과	73	64	94	88
QA/QC 통과	73	63	93	88

3.7.2 산성도(pH)

2015년도 한반도 배경지역 4지점(안면도, 울진, 고산, 울릉도) 강수의 평균 산성도(pH)는 4.55로 나타났다. 이 수치는 최근 10년간(2005~2014년) 평균 산성도인 4.52보다 높고, 2014년 평균 4.57보다 낮다. 2015년 지점별 평균 산성도를 보면, 안면도 4.41, 울진 4.71, 고산 4.69, 울릉도 4.52로 안면도가 가장 낮았고, 울진이 가장 높았다. 1997년부터 2015년까지 19년 동안 관측지점별 연평균 pH를 보면 거의 모든 해에서 안면도가 가장 낮게 관측되었다(그림 3.7.6). 1997년 이후 한반도 강수의 산성도는 꾸준히 강해지는 추세이다.

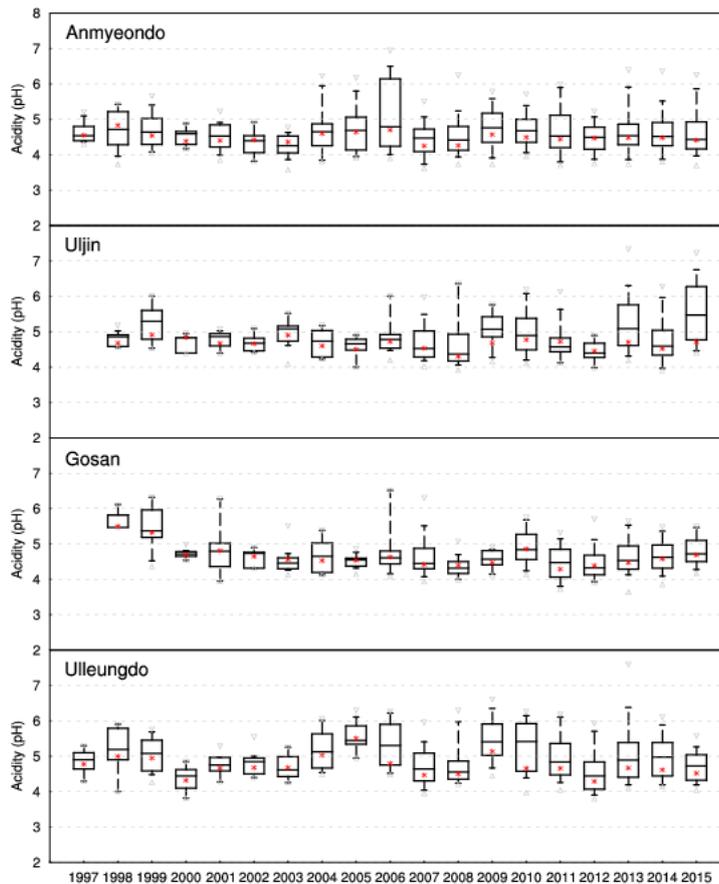


그림 3.7.6 관측지점별 산성도(pH) 연변화

표 3.7.4. 관측지점별 평균 산성도(pH)

기간	지점	안면도	울진	고산	울릉도	한반도 평균
2014		4.48	4.52	4.58	4.62	4.57
2015		4.41	4.71	4.69	4.52	4.55
2005~2014		4.45	4.56	4.51	4.56	4.52

그림 3.7.7은 2015년 각 지점의 월평균 pH이다. 안면도는 8월에, 울진은 1월에, 고산은 11월에, 울릉도는 1월에 pH가 가장 낮았다. 2005년부터 2014년까지의 평균과 비교하면, 안면도, 고산, 울릉도는 평균과 비슷하나, 울진은 4~9월이 평균보다 높게 나타났다.

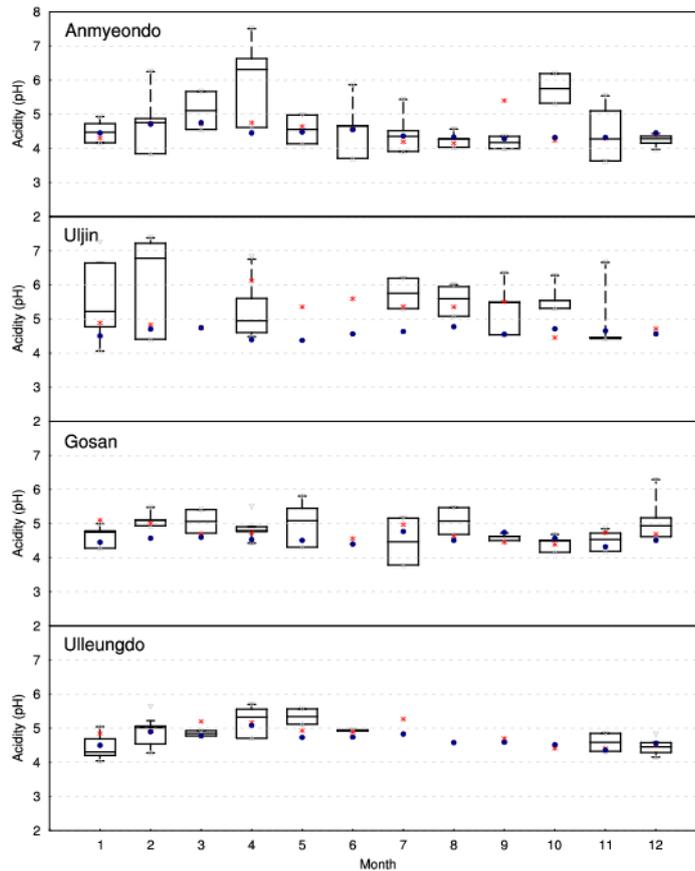


그림 3.7.7 2015년 관측지점별 산성도(pH) 월변화

한반도 강수는 계절별로 다른 기압계의 영향을 받는다. 따라서 pH와 전기전도도의 특성도 계절별로 파악하는 것이 중요하다. 2015년 각 지점의 계절별 평균을 보면 안면도는 봄철에, 나머지 지역은 여름철에 pH가 가장 높고, 모든 지역에서 겨울철에 pH가 가장 낮았다. 2005년부터 2014년까지의 평균과 비교하면, 대부분 2015년 평균과 유사하나, 울진은 산성도가 약해졌는데, 여름에 내린 강수의 pH가 높게 관측되었기 때문이다(그림 3.7.8).

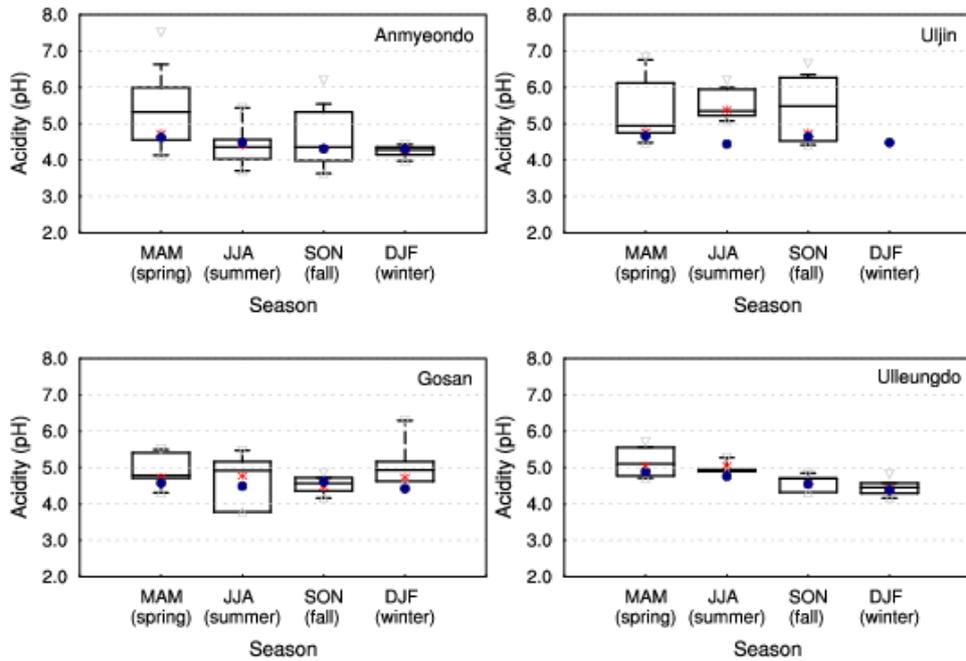


그림 3.7.8 2015년 관측지점별 산성도(pH) 계절변화, 2005~2014년의 분포(파란 점), 2015년 분포(상자 그래프). 상자 그래프는 중앙값과 함께 5%, 10%, 25%, 75%, 90%, 95%에 해당하는 값

관측지점별 강수에 대한 pH 구간별 발생빈도는 그림 3.7.9와 같다. 2005~2014년 평균 분포에서 안면도, 고산, 울릉도는 pH 4.0~4.5 구간에서, 울진은 pH 4.5~5.0 구간에서 최대 빈도가 나타났다. 2015년에 안면도와 울릉도는 2005~2014년 평균 분포와 유사하고, 울진은 pH 6.0 이상 구간의 빈도가 증가하였다. 울릉도는 pH 4.5~5.5 구간에서 빈도가 증가한 반면에, pH 6.0 이상 구간에서 빈도가 감소하였다.

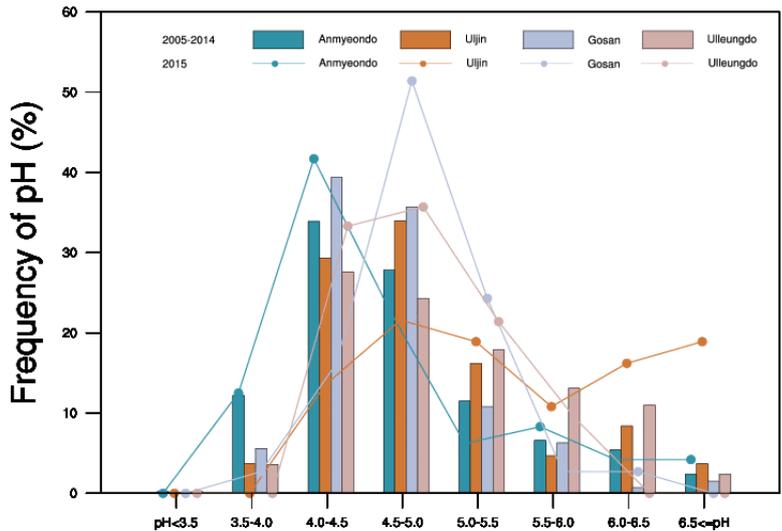


그림 3.7.9 관측지점별 강수의 pH 발생 빈도

강수량과 pH의 관계는 그림 3.7.10에서 보는 바와 같이 강수량이 적으면 pH의 변화폭이 크고 강수량이 많을수록 자연적인 산성도인 pH 5.0~5.6에 수렴하는 경향을 보였다. 2015년의 경우 강수량이 많아질수록 울진, 고산, 울릉도의 pH는 5.0 이상에서 수렴하는 반면, 안면도는 pH 5.0 이하에서 수렴하는 경향을 나타냈다. 안면도와 울진에 비해 고산과 울릉도는 pH의 변화폭이 좁다.

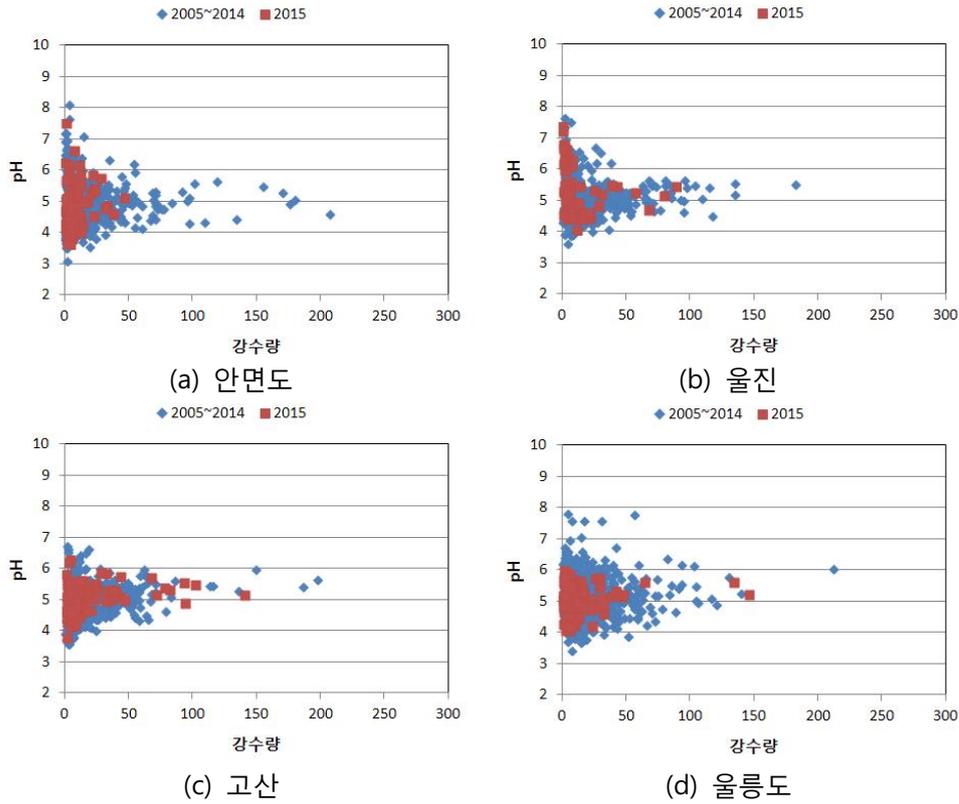


그림 3.7.10 관측지점별 강수량에 따른 산성도(pH) 분포

일반적으로 pH 5.6 이하의 비를 산성비라고 정의한다. 2015년 산성비 경향은 표 3.7.5와 같다. pH 5.6 이하의 산성비는 안면도 41회, 울진 23회, 고산 35회, 울릉도 40회로 안면도가 가장 많이 나타났으며, pH 4.5 이하의 산성비 횟수는 안면도 26회, 울진 5회, 고산 9회, 울릉도 14회로 안면도에서 가장 많이 나타났다.

표 3.7.5. 2015년도 산성비 발생 횟수

	안면도		울진		고산		울릉도	
	pH5.6 이하	pH4.5 이하						
발생 횟수	41	26	23	5	35	9	40	14

2015년 산성비 발생 비율은 표 3.7.6과 같다. pH 5.6 이하는 안면도 85.4%, 울진 62.2%, 고산 94.6%, 울릉도 95.2%로 울릉도가 가장 발생 비율이 높았고, pH 4.5 이하는 안면도 54.2%, 울진 13.5%, 고산 24.3%, 울릉도 33.3%로 안면도에서 발생 비율이 가장 높았다.

표 3.7.6. 2015년도 산성비 발생 비율(%)

	안면도		울진		고산		울릉도	
	05~14년	15년	05~14년	15년	05~14년	15년	05~14년	15년
pH5.6 이하	87.8	85.4	83.8	62.2	92.6	94.6	76.4	95.2
pH4.5 이하	47.6	54.2	33.5	13.5	46.1	24.3	31.9	33.3

산성비 발생 비율을 2014년과 비교할 때 pH 5.6 이하에서 안면도와 울진은 증가하였고, 고산, 울릉도는 감소하였다. pH 4.5 이하에서 안면도는 감소하였고, 나머지 지역은 증가했다.

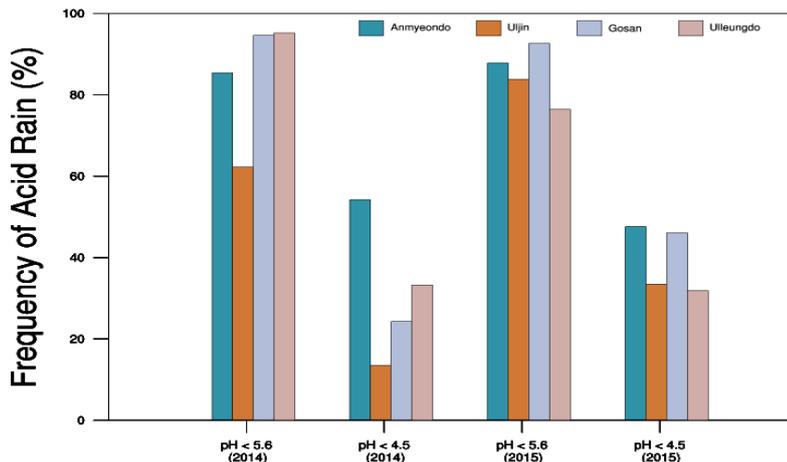


그림 3.7.11 2014년과 2015년 산성비 발생 비율

3.7.3 전기전도도

한반도 강수의 2015년 평균 전기전도도(EC)는 $60.4 \mu\text{S/cm}$ 로 나타났다. 이 수치는 2005년부터 2014년까지의 평균 전기전도도 $61.1 \mu\text{S/cm}$ 보다 높고, 2014년 평균 전기전도도 $60.2 \mu\text{S/cm}$ 보다 높다. 2015년 관측지점별 전기전도도를 보면, 안면도 $62.4 \mu\text{S/cm}$, 울진 $53.0 \mu\text{S/cm}$, 고산 $43.8 \mu\text{S/cm}$, 울릉도 $74.1 \mu\text{S/cm}$ 로 울릉도가 가장 높았고 고산이 가장 낮았다.

1997년부터 2015까지 19년 동안 안면도, 울진, 고산, 울릉도의 연평균 전기전도도 분포는 그림 3.7.12와 같다. 전기전도도는 해염성분이 가장 많이 측정되는 울릉도가 가장 높게 측정되었다. 네 지점 강수의 전기전도도는 1997년 관측 이후 2015년까지 꾸준히 증가하여, 산성도의 강화 추세와 일치한다.

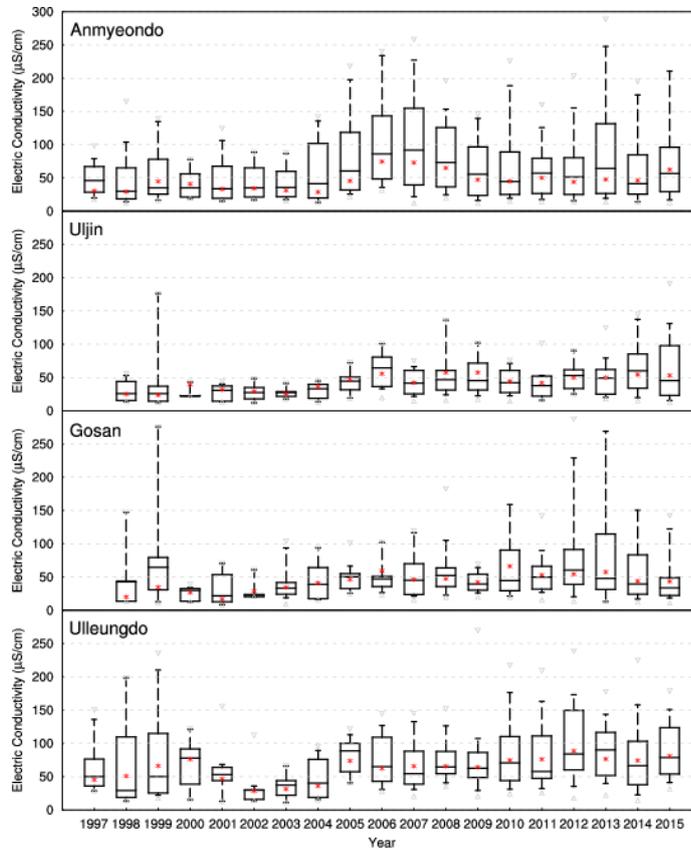


그림 3.7.12 관측지점별 전기전도도의 연변화

표 3.7.7 관측지점별 평균 전기전도도($\mu\text{S}/\text{cm}$)

기간 \ 지점	안면도	울진	고산	울릉도	평균
2014	46.2	54.5	43.8	74.1	60.2
2015	62.4	53.0	43.3	80.8	60.4
2005~2014	53.0	51.3	52.5	74.1	61.1

그림 3.7.13은 2015년 각 지점의 월평균 전기전도도이다. 안면도, 고산, 울릉도는 11월에, 울진은 1월에 전기전도도가 가장 높았다. 2005년부터 2014년까지의 평균과 비교하면, 대체로 평균과 비슷하나, 9~10월은 평균과의 차이가 컸다. 특히, 울릉도의 경우 6월의 전기전도도는 2005~2014년 평균보다 $150 \mu\text{S}/\text{cm}$ 가까이 높게 나타났다.

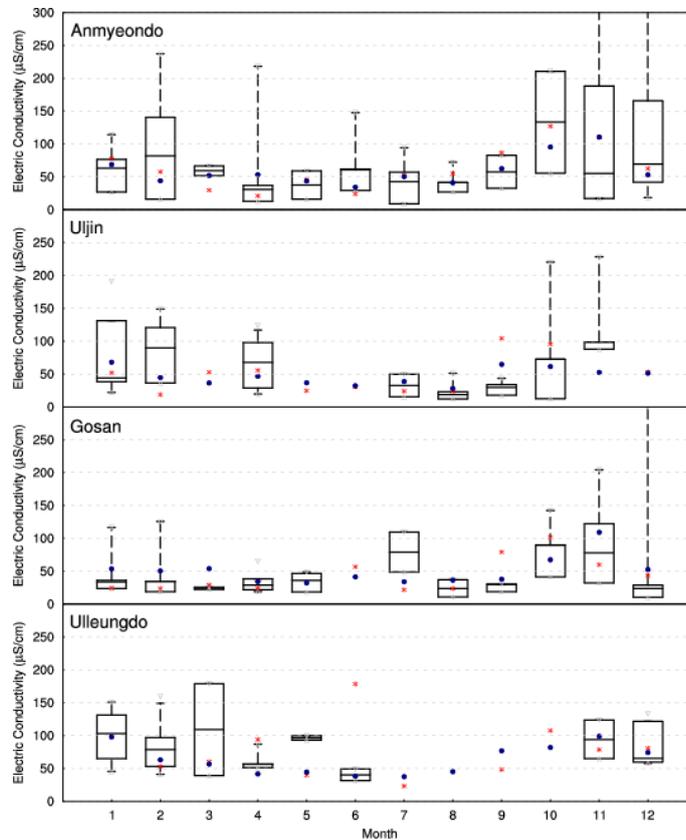


그림 3.7.13 2015년 관측지점별 전기전도도 월변화

전기전도도의 계절변동은 비교적 뚜렷하게 구분되어 겨울에 높고 여름에 낮게 나타났다. 2015년 안면도와 울진, 고산은 최근 10년간(2005~2014년) 평균보다 전기전도도가 낮은 값들이 자주 나타난 반면, 울릉도는 최근 10년간 보다 높은 값들이 자주 나타났다. 이것은 주요 산성화 물질인 SO_4^{2-} 과 NO_3^- 의 농도가 과거보다 높았기 때문이다.

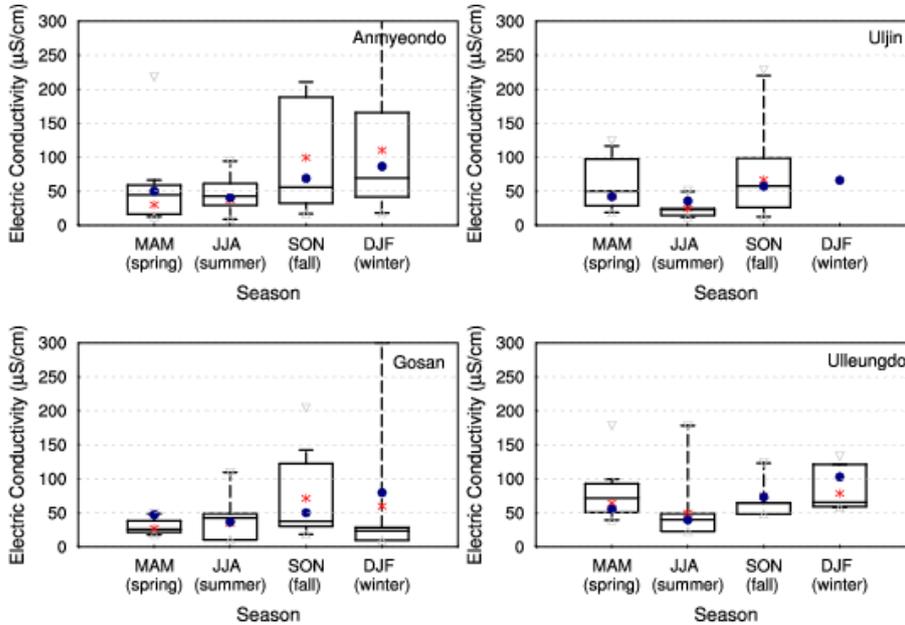


그림 3.7.14 2015년 관측지점별 전기전도도 계절변화, 2005~2014년분포(파란점), 2015년 분포(상자 그래프). 상자 그래프는 중앙값과 함께 5%, 10%, 25%, 75%, 90%, 95%에 해당하는 값

3.7.4 강수이온성분

최근 10년간(2005~2014년) 평균과 2015년 평균의 이온성분의 구성 비율은 그림 3.7.15와 같다. 최근 10년간 평균과 2015년 평균 모두 모든 관측지점이 해안에 접해있어서 해염입자인 Na^+ 와 Cl^- 가 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 특히, 해염입자의 구성비가 안면도에서 가장 낮게, 울릉도에서 가장 높게 나타났다. 해염입자 다음으로 비중이 높은 성분은 주요 산성화 물질인 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 로 안면도와 고산에서 상대적으로 높았다. 모든 지점에서 Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} 순으로 성분비율이 높게 나타났다. 최근 10년간 평균과 2015년의 이온

구성 비율을 비교하면, 안면도는 해염입자가 증가한 반면 다른 이온성분은 감소하였다. 울진은 SO_4^{2-} 비율이 감소하였고, 고산은 평균에 비해 NH_4^+ 비율이 증가하였다. 안면도, 울진, 울릉도는 Na^+ 비율 증가한 반면에 고산은 Na^+ 비율이 감소하였다.

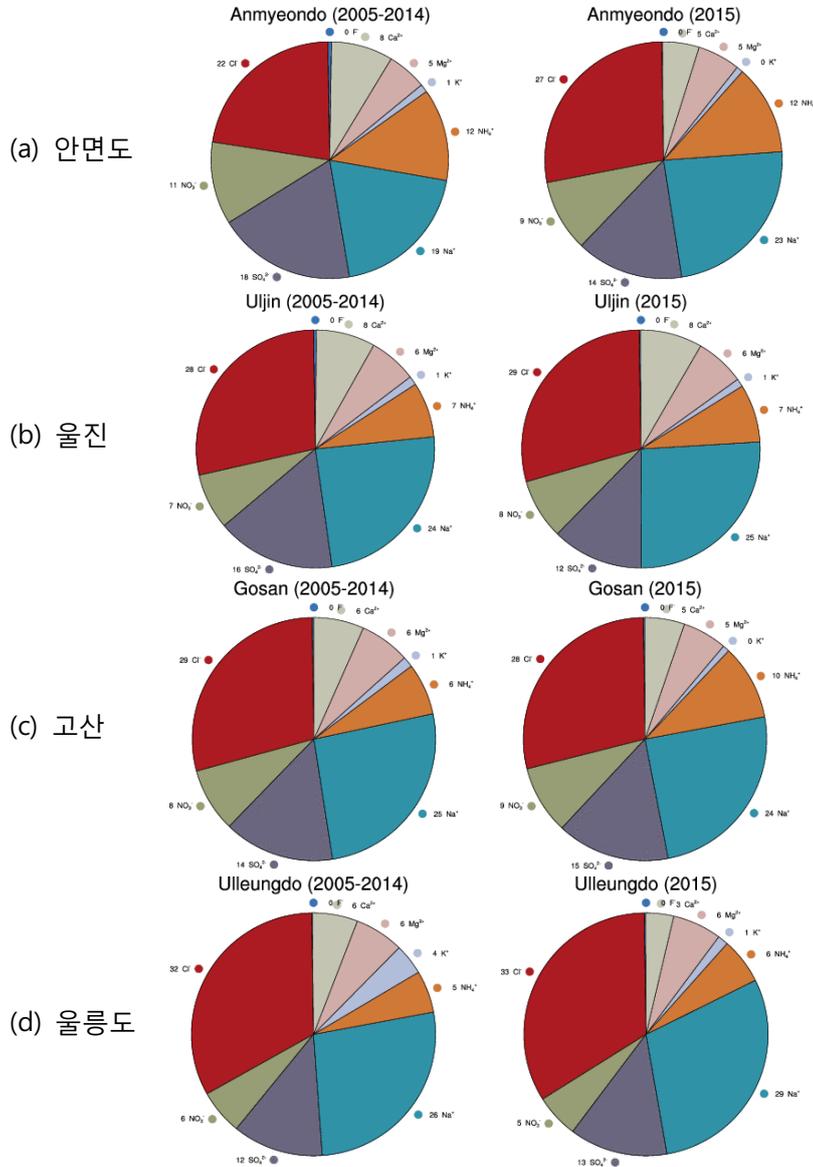


그림 3.7.15 2015년과 2005~2014년 관측지점별 강수의 이온성분 구성 비율

안면도, 울진, 고산, 울릉도에 대한 2013년, 2014년, 2015년과 2005~2014년 이온성분의 분포는 그림 3.7.16과 같다. 안면도의 경우 2015년의 이온농도는 2014년에 비해 높았고, 2005~2014년 평균보다도 대체로 높았다. 울진의 경우 2015년 이온농도는 2014년과 마찬가지로 2013년, 1998~2014년 평균에 비해 Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} 의 이온농도가 높아졌다.

고산의 경우 2015년 이온농도는 2005~2014년 평균보다 높으나, 2013년, 2014년, 2015년으로 해가 바뀌면서 대체로 농도가 낮아졌다. 특히 Cl^- , Na^+ 이온농도가 크게 낮아졌다. 울릉도의 경우 2015년 Cl^- , Na^+ 의 이온농도는 2005~2014년 평균보다 높았고 2014년과 마찬가지로 2013년보다 증가하였으나, Ca^{2+} 는 감소하였다.

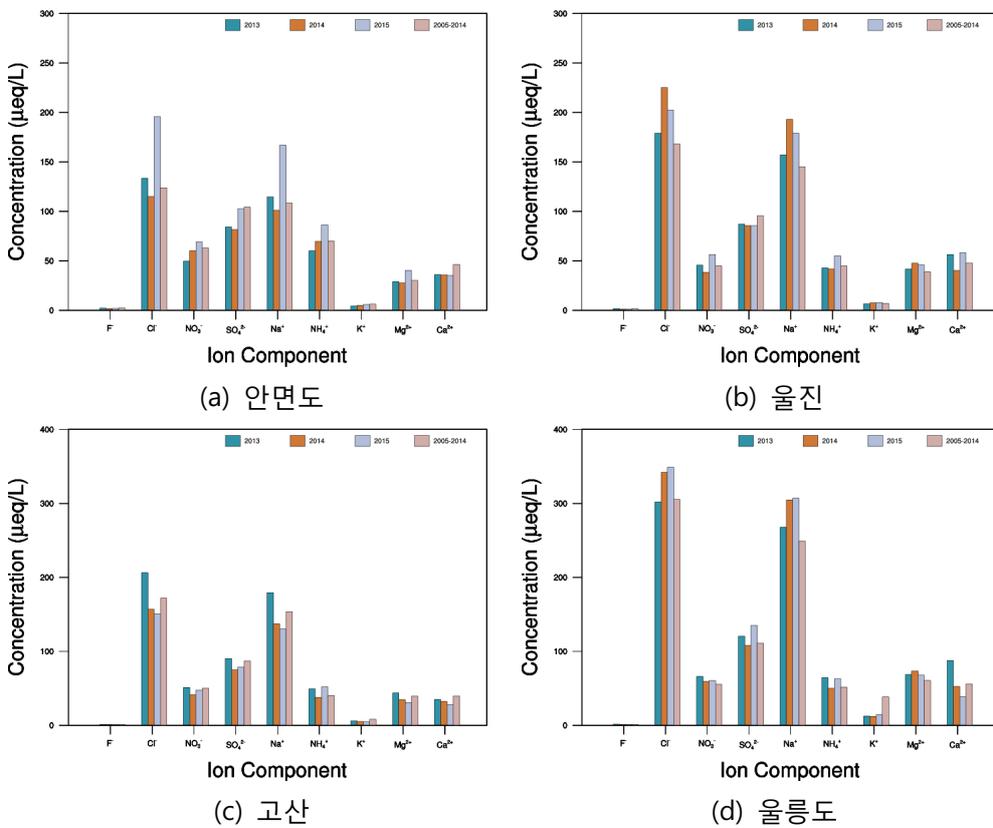


그림 3.7.16 관측지점별 강수의 이온성분

표 3.7.8은 2015년 관측지점별 연평균 이온농도를 나타낸 것이다. F⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Ca²⁺를 제외한 나머지 이온성분들은 울릉도에서 월등히 높게 나타났다. 주요 산성화 물질인 SO₄²⁻는 울릉도 다음으로 안면도에서 높게 측정되었으며, NO₃⁻은 안면도, 울릉도, 울진, 고산 순으로 높게 나타났다.

표 3.7.8 2015년 관측지점별 연평균 이온 농도

요소 지점	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
(μeq/L)									
안면도	2.0	196.0	69.3	102.7	166.9	86.4	6.0	40.6	35.3
울진	1.3	202.3	56.5	85.6	179.0	55.0	7.9	46.1	58.3
고산	1.1	150.8	47.7	78.9	130.4	52.2	4.6	30.9	28.0
울릉도	1.2	348.9	60.5	135.1	307.1	63.1	14.3	67.8	38.8
평균	1.4	22.43	59.3	101.5	195.3	66.0	8.1	46.1	39.1

2015년 강수의 pH 구간별 강수빈도와 이온농도는 그림 3.7.17과 같다. NO₃⁻와 nss-SO₄²⁻는 산성화 물질이고, NH₄⁺와 nss-Ca²⁺는 산성도를 중화시키는 물질이다.

안면도는 두 개의 구간에서(4.0~4.5, 6.5≤pH) 최고농도가 나타나고 있다. pH 6.5 이상의 구간은 NO₃⁻와 nss-SO₄²⁻가 증가하나, NH₄⁺와 nss-Ca²⁺가 더 많이 증가하여 pH를 높이는 것으로 나타났다. pH가 4.0~4.5인 구간은 NO₃⁻와 nss-SO₄²⁻의 농도가 pH 6.5 이상인 구간보다 낮으나, nss-Ca²⁺의 농도가 매우 낮아 pH가 낮아지는 것으로 나타났다.

울진의 경우 pH 6.0 미만의 구간에서 nss-SO₄²⁻ 농도가 가장 높으나, pH가 높아질수록 nss-Ca²⁺가 높아지는 경향을 나타내고 있다.

고산은 pH가 낮은 쪽에서 NO₃⁻와 NH₄⁺의 농도가 높게 나타났으며, pH가 높아질수록 nss-SO₄²⁻가 높았다.

울릉도 경우에는 pH 4.5~5.0 구간에서 nss-SO₄²⁻와 NO₃⁻, NH₄⁺의 농도가 높았다. 이와 같이 pH가 높은 구간에서는 nss-Ca²⁺에 의한 중화작용이 크고 pH가 낮은 구간에서는 주로 NH₄⁺에 의한 중화작용이 큰 것으로 분석되었다.

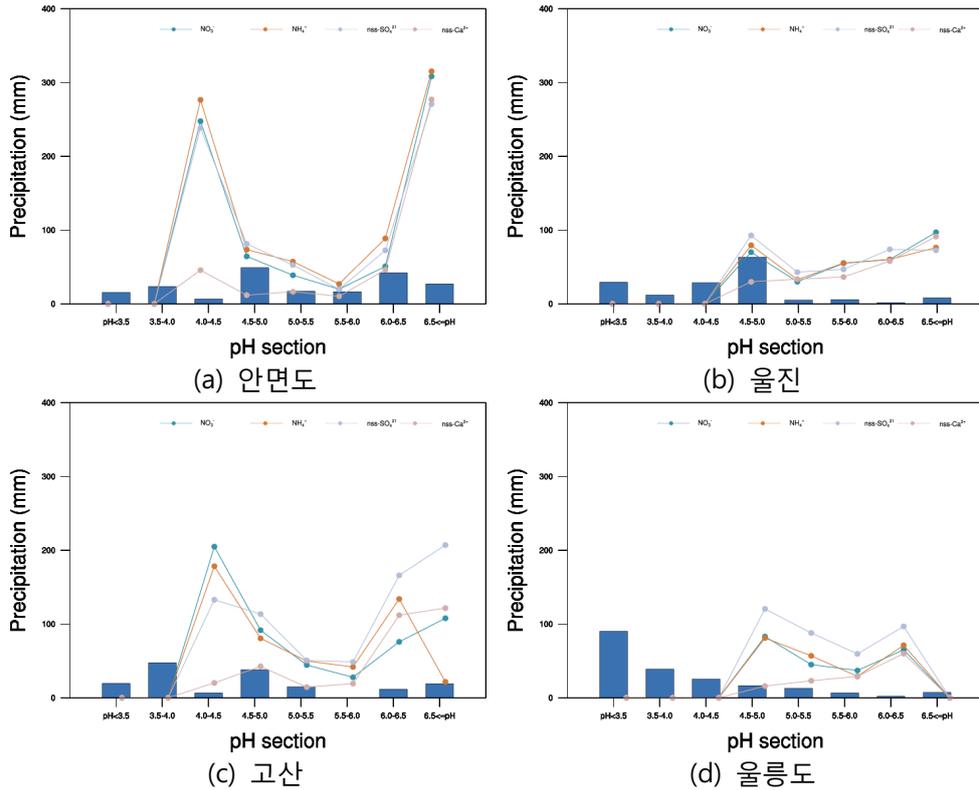


그림 3.7.17 2015년 pH 구간별 강수빈도(파란색 막대)와 이온농도(실선)

3.7.5 강하분진

안면도에서 강수가 있을 때는 24시간 강수시료를, 강수가 없을 때는 한 달 동안의 강하분진을 채취하고 있다. 이렇게 얻은 강수시료와 강하분진에서 각각 월별 건성 침적량과 습성 침적량을 분석한다. 분석시료는 자동 강수·강하분진 채취기를 이용하여 얻는다. 이 기기는 자동 달힘 장치로 강수가 있을 때는 강수를, 강수가 없을 때는 떨어지는 강하분진을 채취한다.

총 침적량에 대한 건성 침적량과 습성 침적량의 비율은 그림 3.7.18과 같다. 2005~2014년 평균 월별 건성 및 습성 침적량의 비율을 보면, 가을과 겨울에는 건성 침적량의 비율이 크고, 봄, 여름에는 습성 침적량의 비율이 큰 것을 알 수 있다. 2015년은 1월, 3월, 5월에 건성 침적량이 많았으며, 나머지 달에는 습성 침적량이 많았다.

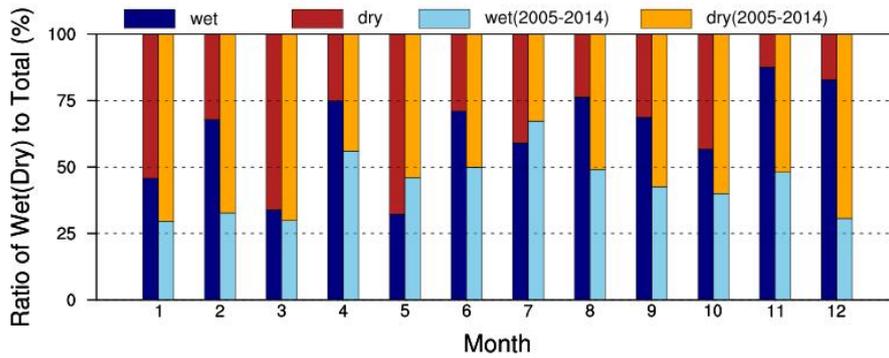


그림 3.7.18 2015년과 2005~2014년의 월별 건성과 습성 침적량의 비율

2015년과 2005~2014년 평균 건성 침적량과 습성 침적량을 보면(그림 3.7.19), 2015년 12월의 총 침적량이 2,025.9 mg/m²로 가장 많았다. 한편 2015년 12월의 건성 침적량과 습성 침적량도 419.2 mg/m²와 1,606.6 mg/m²로 각각 가장 많았다. 2005~2014년 총 침적량과 건성 침적량도 12월이 가장 많았으나, 습성 침적량은 7월과 11월이 가장 많았다.

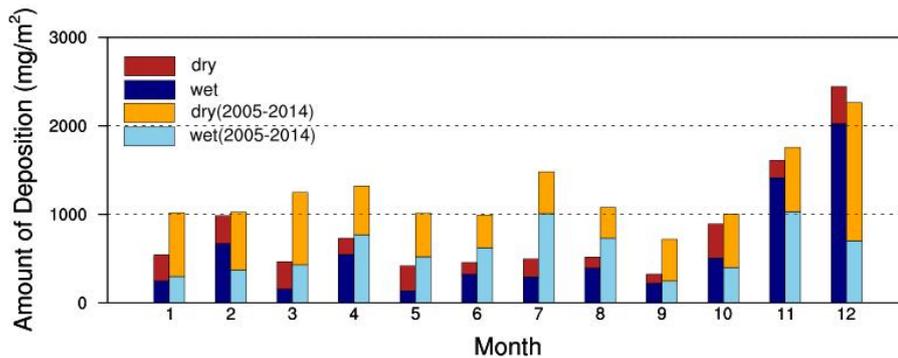


그림 3.7.19 2015년과 2005~2014년의 월별 건성과 습성 침적량

2003~2015년 건성과 습성 침적량을 보면(그림 3.7.20), 2011년까지 전체 침적량이 증가하다 2012년부터 감소하고 있다. 2015년 전체 침적량은 10,600 mg/m²으로 2014년보다 감소하였다. 2009년 이후 건성 침적량이 습성 침적량보다 많았으나, 2015년에는 습성 침적량이 더 많았다.

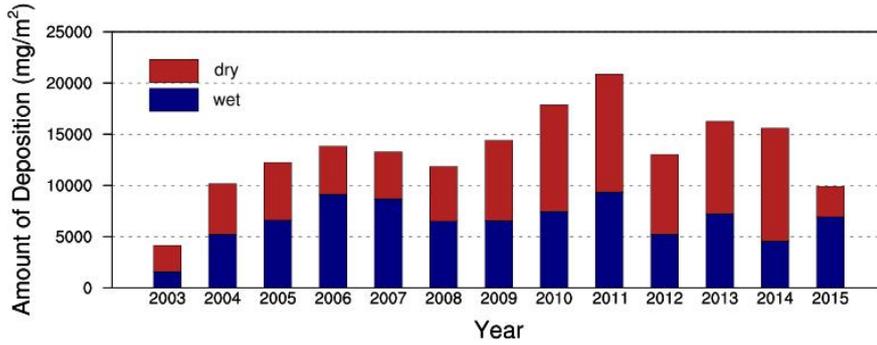


그림 3.7.20 2003년부터 2015년까지 건성과 습성 침적량

2013~2015년 이온 성분별 침적량을 월별로 보면(그림 3.7.21), NO_3^- 와 SO_4^{2-} , NH_4^+ 농도는 건성 침적보다 습성 침적량이 더 많은 반면 Ca^{2+} 는 건성 침적량이 더 많았다. 강수량이 많은 여름과 가을철에 습성 침적량이 높게 나타났고, 12월도 높게 나타났다. 2015년은 대체로 NO_3^- 와 SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} 모두 습성 침적량이 건성 침적량보다 많았고, 월별로 볼 때 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 는 11월, 12월에, NH_4^+ 와 Ca^{2+} 는 4월에 가장 많았다.

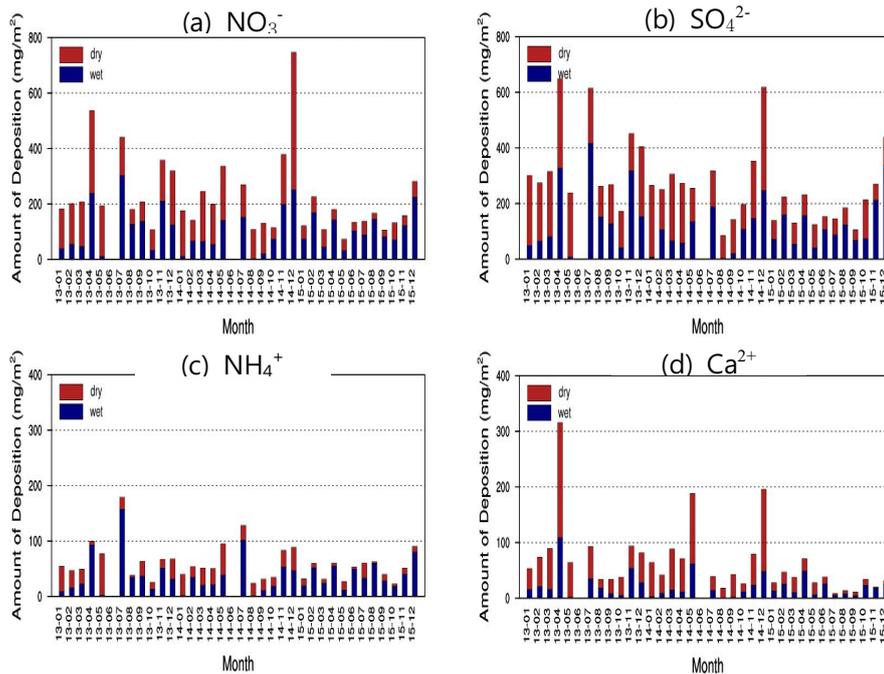


그림 3.7.21 2013~2015년 월별 이온 성분별 침적량

3.8 기타

3.8.1 서울의 수증기 농도 연직분포

수증기는 온실가스 중 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 대기 중 수증기의 농도는 인위적인 방출에 의한 것 보다 대기 자체의 온도 증감에 따라 결정된다. 대기의 온도가 증가할수록 지표면에서 증발되어 대기로 공급되는 수증기의 양은 증가하게 되며, 지구 온난화로 인한 대기 온도의 변동으로 수증기의 농도 또한 변화할 것으로 예상된다.

숙명여대에서는 성층권에서 중간권에 이르는 고도에 대해 수증기 농도 연직 분포를 22 GHz 마이크로파 수신기 SWARA(Seoul Water vapor Radiometer)를 이용하여 관측하고 있다. SWARA는 숙명여대와 스위스의 베른대학교 연구팀과 공동 개발하여 2006년부터 현재까지 서울의 수증기 농도를 관측하고 있으며, 중층대기 국제감시네트워크 NDACC(Network for the Detection of Atmospheric Composition change)의 관측장비로 공인받아 데이터 센터에 관측자료를 보고하고 있다.



그림 3.8.1 22 GHz 수증기전파수신기 SWARA(서울)

그림 3.8.2에서는 SWARA를 이용하여 2015년 9월 14일 관측한 스펙트럼과 스펙트럼 분석을 통해 얻은 수증기 농도 분포, 그리고 평균 커널을 보여주고 있다. 비교 검증을 위해 수증기 농도는 AURA위성의 MLS 관측자료와 같이 표현하였다. 위성자료는 서울위치를 기준으로 위경도 ± 5 도 이내, 시간은 ± 1 일 동안 관측된 자료 평균을 사용하였다.

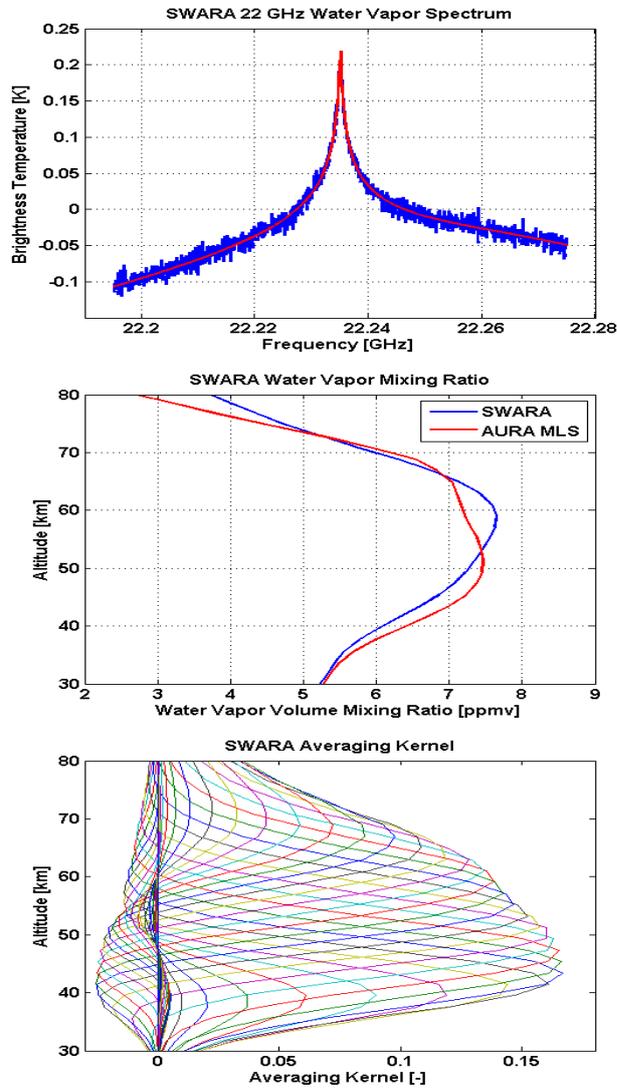


그림 3.8.2 2015년 9월 14일에 관측한 수증기 스펙트럼(상), 수증기 연직분포(중), 평균 커널(하)

수증기의 월평균 최대 농도는 약 6.6~7.2 ppmv 범위에서 변화하며, 6월부터 10월까지 7.0 ppmv 이상의 최대 농도가 관측되었다(표 3.8.1).

표 3.8.1 월평균 최대 수증기 농도와 최대 농도가 나타나는 고도

월	1	2	3	4	5	6
최대농도[ppmv]	6.72	6.62	6.76	6.75	6.74	7.00
고도[km]	55	55	55	55	53	55
월	7	8	9	10	11	12
최대농도[ppmv]	7.21	7.07	7.20	7.01	6.63	6.61
고도[km]	55	55	55	55	55	53

월평균 수증기 관측 농도를 AURA MLS 위성자료와 비교하면, SWARA를 통해 관측한 값이 위성 자료보다 약 0.5 ppmv 낮게 관측되고 있으나, 연중 계절적 변화 추세는 일치하고 있다(그림 3.8.3).

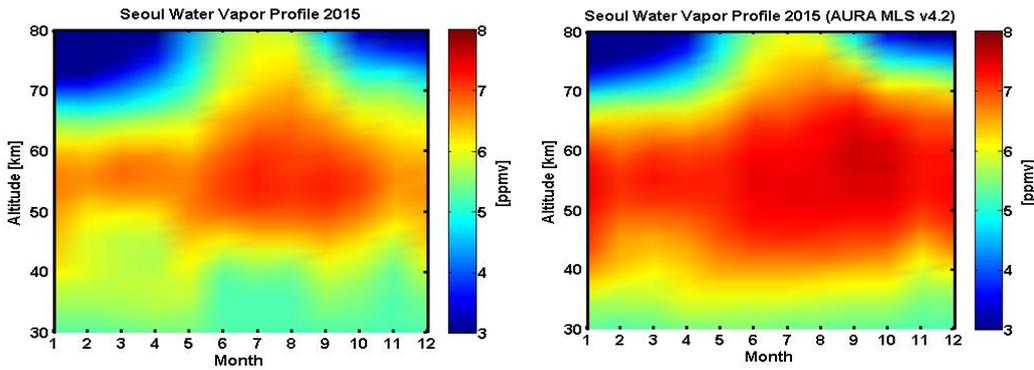


그림 3.8.3 서울 상공의 2015년 수증기 월별 평균 연직분포(ppmv).
SWARA로 관측한 농도(좌)와 AURA MLS 위성자료(우)

광학두께의 변화는 대류권의 수증기나 물분자의 농도 변화를 간접적으로 보여준다고 할 수 있다. 22 GHz와 110 GHz에서의 2015년 광학두께의 변화(그림 3.8.4)와 서울의 일강수량 자료(그림 3.8.5)를 봤을 때 7월 하순에 강수가 집중되었으며, 광학두께 또한 7월 하순에 연중 최고치를 보이고 있다. 광학두께의 월별 평균을 표 3.8.2에 나타내었다.

표 3.8.2 월평균 22 GHz와 110 GHz 광학두께

월	1	2	3	4	5	6
22 GHz 광학두께	0.050	0.054	0.059	0.103	0.117	0.209
110 GHz 광학두께	0.262	0.309	0.274	0.446	0.435	0.638
월	7	8	9	10	11	12
22 GHz 광학두께	0.308	0.285	0.174	0.120	0.106	0.060
110 GHz 광학두께	0.958	0.818	0.532	0.426	0.577	0.294

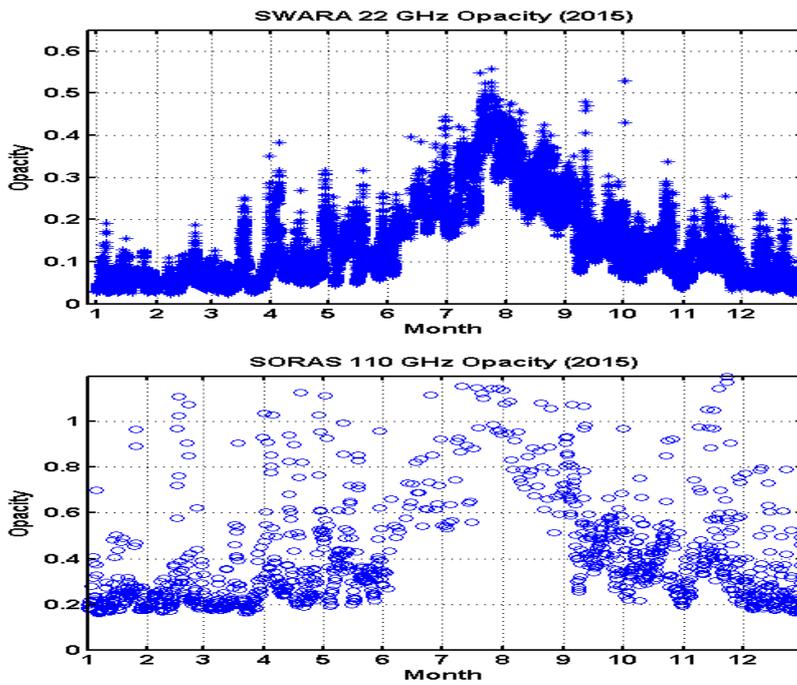


그림 3.8.4 서울의 2015년 22 GHz 광학두께(상), 110 GHz 광학두께(하) 변화

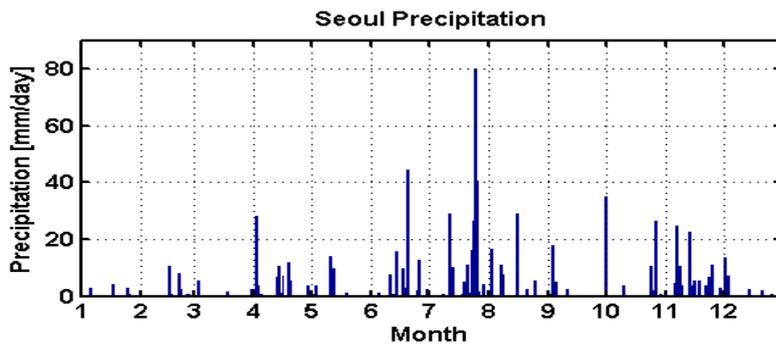


그림 3.8.5 2015년 서울의 일강수량

2006년 10월부터 2015년 12월까지의 22 GHz에서의 광학두께 변화를 그림 3.8.6에 나타내었다. 연중 최대 광학두께의 변화를 살펴보면, 2009년을 제외하고 2006년부터 연중 최대 광학두께가 증가추세를 보이다가, 2012년을 기점으로 다시 감소추세로 변화하였다. 이러한 변화 추세가 일반적인 증감추세인지 아니면 인위적인 원인으로 인한 현상인지는 보다 장기적인 관측자료를 필요로 한다.

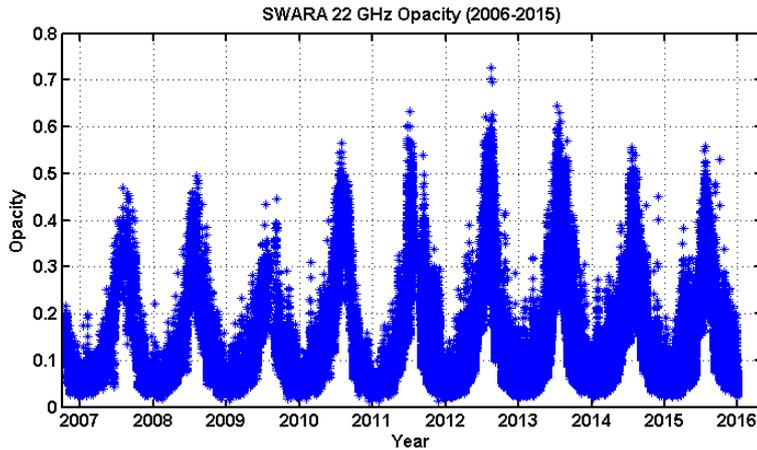


그림 3.8.6 서울의 광학두께 변화(2006.10.~ 2015.12.)

3.8.2 고산의 라돈(^{222}Rn) 농도

대기 중의 주요 방사능 물질은 Radon-222(^{222}Rn), Krypton-85(^{85}Kr), Lead-210(^{210}Pb), Beryllium-7(^7Be) 등이며, 이들 성분들은 WMO/GAW 관측 요소에 포함되어 관리되고 있다. 이 중 라돈은 인체 피폭 방사선량의 50% 이상을 차지하는 대표적인 자연방사능 물질이다. 특히 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 우선적으로 라돈농도 수준을 파악할 필요가 있으며, 특히 아시아 대륙의 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}Rn 은 반감기가 3.82일 정도로 몇몇 주요 대

기오염물질과 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(ANSTO)에서는 오래전부터 주요 WMO/GAW 관측소를 중심으로 세계 30여 지점에 라돈검출기를 설치하여 라돈농도를 지속적으로 모니터링해오고 있다. 제주도 고산관측소에서는 ANSTO에서 제작한 라돈검출기를 이용하여 2001년 초부터 대기 라돈농도를 관측해오고 있고, 2015년말 현재 15년간의 관측 자료를 확보하고 있다.

대기 라돈농도는 제주도 고산관측소 현장에 고감도 라돈검출기를 설치하여 2015년 1월부터 12월까지 30분 간격으로 실시간 측정하였다. 라돈검출기는 2015년 10월 9일에 고산관측소에서 (구)고산기상대 비양실 측면 위치로 이전 설치하였다. 그리고 10월 18~24일에 호주핵과학기술기구(ANSTO)에서 라돈 관측 전문가를 초청하여 노후부품을 교체하고 전체적으로 장비점검을 실시하였다. 따라서 라돈 농도는 1월부터 10월 9일까지는 기존의 고산관측소(그림 3.8.7)에서 관측하였으나 10월 9일 이후에는 제주도 (구)고산기상대 비양실 측면 위치(그림 3.8.8)에서 관측을 실시하였다. 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. 라돈 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 mBq/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}Rn standard source는 $18.5 \pm 4\% \text{ kBq}$ 의 ^{226}Ra source(Pylon Electronic Inc. 모델 RN-2000A, Canada)를 사용하였다. 또한 검출기의 배경(background) 값은 대략 3개월 주기로 공기의 유입을 차단한 상태에서 기기의 지시수치를 24시간 동안 측정하였다. 이 때 배경값은 검출기의 2차 필터에 포집된 ^{210}Pb (반감기 22.3년)의 양에 따라 시간이 경과할수록 서서히 상승하는 경향을 보였다.



그림 3.8.7 제주도 고산관측소의 라돈검출기(ANSTO, Model D1500)



그림 3.8.8 제주도 (구)고산기상대 비양실의 라돈검출기(ANSTO, Model D1500)

국내 배경지역인 제주도 고산관측소(1~10월) 및 (구)고산기상대 비양실(10~12월)에 고감도 라돈검출기를 설치하여 라돈 농도를 실시간으로 관측했다.

그림 3.8.9는 2015년의 라돈농도 시계열변화를 나타낸 것으로 라돈의 시간별 농도변화를 도시한 결과이다. 2015년 고산관측소의 라돈농도는 시간평균 $2,555 \pm 1,177$ mBq/m³를 나타내었고, 이를 일평균농도로 환산한 농도는 $2,574 \pm 935$ mBq/m³이었다. 이 결과를 이전의 고산관측소 측정결과와 비교해보면, 2001~2014년의 평균농도가 $2,692 \pm 1,133$ mBq/m³에 비해 다소 낮은 농도를 나타낸 것으로 조사되었다.

라돈의 계절별 농도는 겨울 > 가을 > 봄 > 여름 순으로, 겨울, 가을, 봄에 높고 상대적으로 여름에 낮은 농도를 나타내었다. 월별 농도는 11월 > 10월 > 12월 > 2월 > 1월 > 9월 > 6월 > 3월 > 8월 > 4월 > 5월 > 7월의 순으로 농도가 가장 높은 11월과 낮은 7월에 약 2.1배 정도의 편차를 보이는 것으로 분석되었다. 또한 일간 농도변화를 조사해 본 결과, 대체적으로 하루 중에는 야간이 낮 시간에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그리고 06시 전후에 2,925 mBq/m³로 가장 높고, 15시 경에 2,138 mBq/m³로 낮은 농도를 보였다. 이를 계절별로 비교해 본 결과 봄, 여름, 가을철에는 오전 4~6시 경에 높은 농도를 보이거나 겨울철은 오후 11시 전후에 높은 농도를 보여 겨울철에 다소 다른 특성을 나타내었다. 이러한 국내 배경지역의 농도를 외국의 배경지역과 비교해 보면, 홍콩의 흑취(Hok Tsui)와 이탈리아의 엘 아퀼라(L' Aquila) 보다 훨씬 낮으나 하와이 마우나로아(Mauna Loa) 보다 대략 25배 더 높고, 일본의 사토아일랜드(Sado Island)와는 서로 비슷한 수준을 보인 것으로 확인되었다(Chambers *et al.*, 2013, 2009; Zahorowski *et al.*, 2005, Pitari *et al.*, 2014).

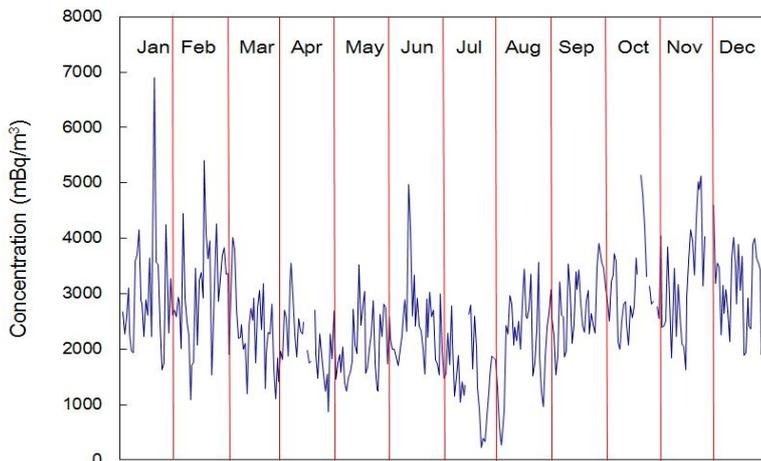


그림 3.8.9 고산의 라돈 농도 시계열 변화(2015년)

고산관측소의 2015년 라돈 농도를 그림 3.8.10에 계절별로 비교하였다. 그림에서 막대그래프는 시간별 라돈 농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 중앙값(median), 90 분위수(90th percentile), 10 분위수(10th percentile) 농도를 나타낸 것이다. 그림 3.8.10의 결과를 보면 계절별 평균농도는 봄에 2,190

mBq/m³, 여름 2,064 mBq/m³, 가을 3,004 mBq/m³, 겨울 3,041 mBq/m³로 4계절 중에서는 겨울철에 가장 높고, 다음으로 가을, 봄, 여름 순으로 나타났다. 또한 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수를 각 계절별 분류하여 비교해 본 결과, 90 분위수에서는 겨울철 높은 농도 값으로 평균농도와 동일한 경향을 보였고, 10 분위수에서는 상대적으로 가을철에 높은 농도를 보였다. 이처럼 계절별 비교에서 겨울, 가을, 봄에 라돈 농도가 높은 것은 이 시기에 북서계열 풍향이 주를 이루고 있고 이 때 대륙으로부터 대기가 유입되었기 때문으로 추정된다. 반면, 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). 대기 혼합고를 계절별로 비교해 보면, 대체적으로 가을과 겨울에는 기온이 낮아서 혼합고 높이가 낮아지는 반면, 봄과 여름에는 대기 혼합고의 높이가 상대적으로 높은 경향을 보이고 있다. 따라서 대기 라돈 농도는 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).

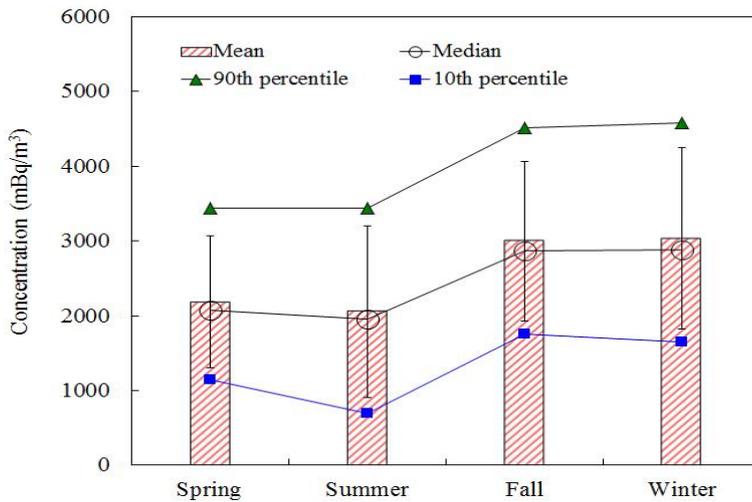


그림 3.8.10 고산의 계절별 라돈 농도 비교

2015년의 라돈 농도를 월별로 비교하였고 그 결과를 그림 3.8.11에 나타내었다. 그림에서 막대그래프로 나타낸 농도는 시간별 농도를 월별로 평균한 결과

이고, 꺾은선 그래프는 각각 중앙값, 90 분위수, 10 분위수 농도를 나타낸 것이다. 이러한 월별 비교에서 라돈 농도는 전체적으로는 11월 > 10월 > 12월 > 2월 > 1월 > 9월 > 6월 > 3월 > 8월 > 4월 > 5월 > 7월 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 11월에 3,228 mBq/m³, 가장 낮은 7월에 1,572 mBq/m³로 월별로는 거의 2.1배 정도의 편차를 보이는 것으로 확인되었다. 또 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수 농도를 월별로 비교해 본 결과, 중앙값과 90 분위수 농도는 8월을 제외한 월평균 농도와 비슷한 변화추세를 보였다. 그리고 10 분위수 농도는 1월, 6월, 11월에 다소 다른 결과를 보였고, 그 외에는 동일한 변화 패턴을 나타내었다.

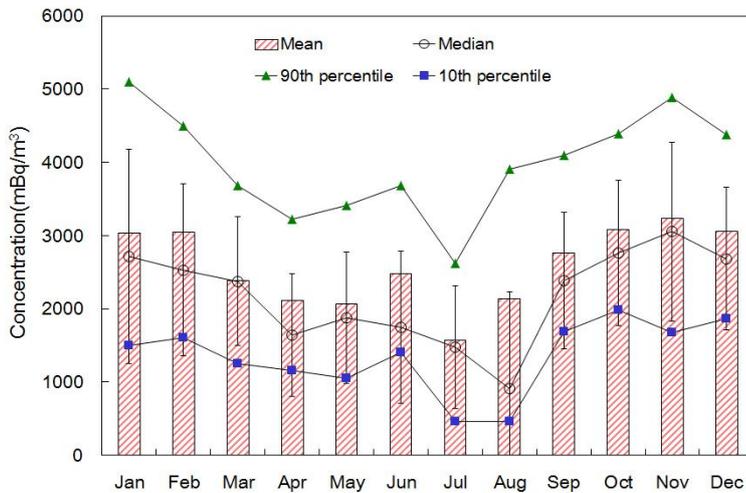


그림 3.8.11 고산의 월별 라돈농도 비교

라돈 농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 비교하였고 그 결과를 그림 3.8.12에 나타내었다. 일간 변화를 비교한 결과에서 라돈 농도는 오전 6시에 2,925±1,295 mBq/m³로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 3시경에 2,138±975 mBq/m³로 가장 낮은 농도를 보였다. 그리고 대체적으로 야간에 높고 주간에 낮은 경향을 보였으며, 일간 변화는 아침부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 3시경까지 감소하고 다시 저녁시간에 상승하여 밤에는 점차 상승하는 추세를 보였다(Omori *et. al.*, 2009). 이러한 경향은 대기의 혼합고 변화에 따라 영향을 받은 것으로 추정된다. 혼합고 높이는 날씨가 맑을 때 낮은 오전이나 오후의 낮 동안에 최고가 되어 대기 경계의 높이까지 이르게 되

고, 이 높이 내의 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 것으로 판단된다.

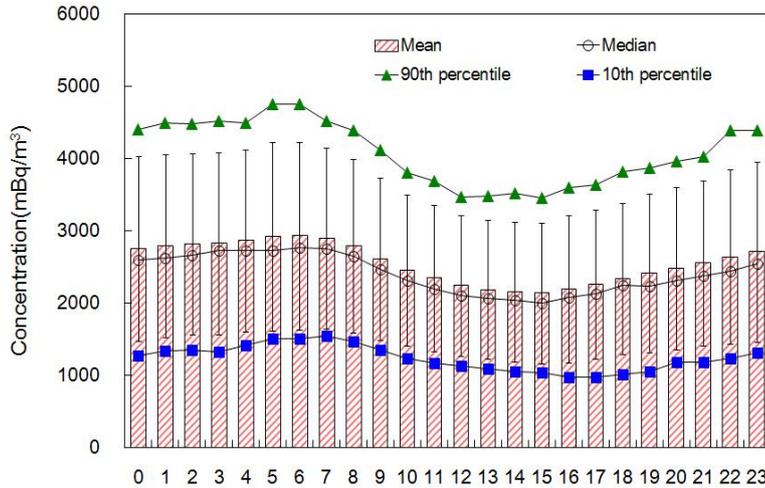


그림 3.8.12 고산의 시간별 라돈 농도 비교

2015년에 측정된 라돈의 일평균 농도를 기준으로 농도가 높은 상위 25%와 상대적으로 농도가 낮은 하위 25%로 분류하여 이 시기의 기류 이동궤적을 역궤적 분석법으로 조사하였다. 그리고 그림 3.8.13과 같이 기류의 유입경로를 제주도 중심을 중심으로 중국대륙(I 구간, 225° ~ 337°), 한반도(II 구간, 337° ~ 45°), 일본 및 동해(III 구간, 45° ~ 135°), 북태평양(IV 구간, 135° ~ 225°)의 4개 구간으로 나누고, 역궤적 분석 결과를 기초로 제주도로 유입된 기단의 이동경로를 조사하였다. 역궤적 분석은 NOAA의 HYSPLIT4 모델을 이용하였다. 또한 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의 북반구 GDAS를 이용하였다. 또 중국대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 4일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사시간은 5일로 설정하였고, 측정지점 좌표는 고산(33.17° N, 126.10° E)을 기점으로 선정하

였다. 또 출발점 고도는 850 mb 면인 500 m, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC를 기준으로 설정하였다. 역궤적 분석을 기초로 기류의 이동 경로를 4개 구간으로 구분한 결과 기류의 이동은 I구간 43.2%, II구간 28.2%, III구간 17.2%, IV구간 11.3%의 빈도를 나타내어 대부분 북서풍을 타고 중국대륙으로부터 제주로 이동한 것으로 확인되었다. 이 때 각 기류 이동경로별 라돈 농도를 비교한 결과, I~IV구간에서 각각 2,868, 2,642, 2,368, 1,597 mBq/m³이었다. 이처럼 라돈 농도는 기류가 중국대륙에서 제주로 이동했을 때 대체적으로 더 높은 경향을 보였다. 반면에 기류가 북태평양에서 제주지역으로 유입되었을 때에는 중국에서 유입되었을 때에 비해 1.8배 정도 더 낮은 농도를 나타내었다. 또 본 연구 기간에 측정된 일평균 라돈농도가 높은 상위 25%와 농도가 낮은 하위 각 25%(각 71개)를 선정하여 두 경우의 평균농도를 비교하였다. 이 때 상위 25%의 평균농도는 3,942 mBq/m³이나 하위 25% 평균농도는 1,380 mBq/m³로 약 2.9배의 차이를 보였다. 이를 계절별로 비교해 본 결과 봄철에는 상위와 하위 25%가 각각 3,599, 1,507 mBq/m³, 여름철 3,725, 1,207 mBq/m³, 가을철 3,976, 1,666 mBq/m³, 겨울철 3,965, 1,580 mBq/m³로 다른 계절에 비해 농도가 낮은 여름철에 더 큰 편차를 보였다. 또한 상위와 하위 각 25%에 대해 역궤적 분석을 실시하여 기류의 이동경로를 비교해 보았다. 그 결과 대체적으로 기단이 대륙에서부터 제주지역으로 이동했을 때 농도가 높고, 북태평양으로부터 제주로 이동했을 때에는 상대적으로 농도가 낮았다. 이러한 현상은 여름철에 더 뚜렷하고, 북서풍이 우세한 겨울철에는 상대적으로 그 편차가 작게 나타났다.

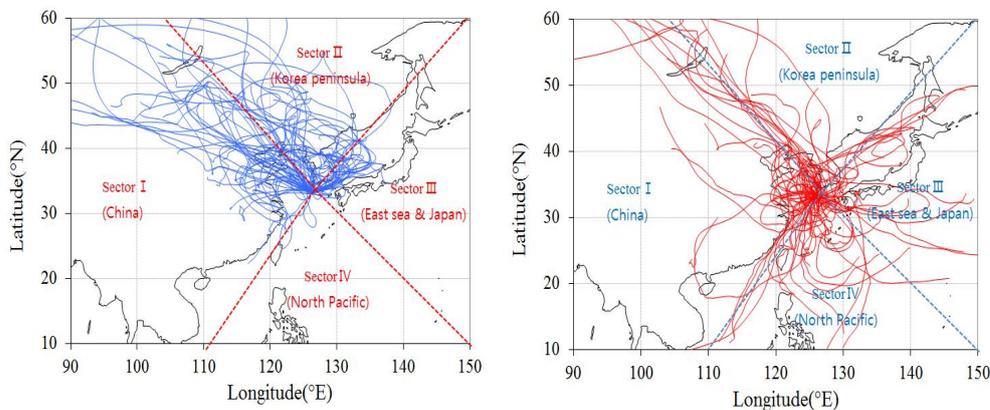


그림 3.8.13 라돈 25% 고농도(좌)와 저농도(우) 시 기단 이동 경로

제4장 지구대기감시 자료 통계 방법

4.1 온실가스, 반응가스

온실가스로는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄소(CFCs)와 육불화황(SF₆) 측정과 반응가스로는 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO₂)과 오존(O₃)을 측정한다.

○ 관측장비

장 비 명	제 작 사	측정주기	관측요소	관측시작연도
공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	CO ₂ , CH ₄	2012년
가스크로마토그래프-불꽃 이온화검출기 (GC-FID)	Agilent	30분	CH ₄	1999년
가스크로마토그래프-전자 포획형검출기 GC-ECD	Agilent	1시간	N ₂ O, SF ₆ , CFCs,	1999년
일산화탄소분석기 (NDIR)	Thermo	5분	CO	2004년
질소산화물분석기 (gas-phase chemiluminescence analyzer)	Thermo	5분	NO _x	2004년
이산화황분석기 (ultraviolet fluorescence analyzer)	Thermo	5분	SO ₂	2004년
오존분석기 (ultraviolet photometer)	Thermo	5분	O ₃	2004년

○ 온실가스 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
이산화탄소(CO ₂)	2초	<p><입력자료 선정></p> <ol style="list-style-type: none"> ① 이산화탄소 1시간 평균자료 수집(공동감쇠분광기) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단되는 플래깅 내용을 1시간 자료에서 제거 ③ 이산화탄소 표준가스 교정(공동감쇠분광기는 장비에서 이루어짐) ④ 시간자료에서 이전 이후시간과 차이와 표준편차가 1.8 ppm 이상 차이가 나거나, 1시간 자료의 표준편차가 1.8보다 크면 자료의 연속성이 없다 판단될 때 시간자료 제거 ⑤ 일평균 자료 선정은 하루 24개의 시간자료 중 자료 개수가 15(62.5%)개 이상일 때 평균하여 선정 <p><월평균 확정, 배경대기농도 및 추세 산출></p> <ol style="list-style-type: none"> ⑥ 일평균 자료에 대해 1차 추세를 구하고 일평균 자료에 추세값을 뺀 잔차에 대해 low frequency pass filter를 통하여 2.6개월 이하 단주기성분 제거함, 필터한 잔차를 퓨리에 변환하여 다시 1차 추세선과 합하여 배경대기농도 확정 ⑦ ⑥과정의 잔차가 추세선 보다 클 때 2σ보다 큰 경우 삭제, 추세선보다 작을 때 3σ보다 작은 경우 삭제하여 너무 크거나 작은 일평균 값을 제거 ⑧ ⑥과정의 배경대기 농도에서 계절변동성분을 포함한 1.8년 이하 주기성분을 low frequency pass filter로 제거하여 추세선 확정 ⑨ 월평균 농도는 일자료 개수가 6개 이상일 때 산출 ⑩ ⑥~⑩과정을 5번 반복하여 최종 월평균, 배경대기농도, 추세 확정
메탄(CH ₄)	2초	<p><입력자료 선정></p> <ol style="list-style-type: none"> ① 메탄 1시간 평균자료 수집(공동감쇠분광기) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단되는 플래깅 내용을 1시간 자료에서 제거 ③ 메탄 표준가스 교정(공동감쇠분광기는 장비에서 이루어짐) ④ 시간자료 농도가 1700 ppb보다 낮거나 2100 ppb보다 큰 시간자료 제거 ⑤ 일평균 자료의 선정은 하루 24개 시간자료 중 12개(50%)보다 많고 시간자료의 하루 표준편차가 170 ppb보다 작을 때 일평균 자료로 선정 <p><월평균 확정, 배경대기농도 및 추세 산출></p> <ol style="list-style-type: none"> ⑥ 일평균 자료에 대해 1차 추세를 구하고 일평균 자료에 추세값을 뺀 잔차에 대해 low frequency pass filter를 통하여 2.6개월 이하 단주기성분 제거함, 필터한 잔차를 퓨리에 변환하여 다시 1차 추세선과 합하여 배경대기농도 확정 ⑦ ⑥과정의 잔차가 추세선 보다 클 때 3σ보다 큰 경우 삭제, 추세선보다 작을 때 3σ보다 작은 경우 삭제하여 너무 크거나 작은 일평균 값을 제거 ⑧ ⑥과정의 배경대기 농도에서 계절변동성분을 포함한 1.8년 이하 주기성분을 low frequency pass filter로 제거하여 추세선 확정 ⑨ 월평균 농도는 일자료 개수가 3개 이상일 때 산출 ⑩ ⑥~⑩과정을 3번 반복하여 최종 월평균, 배경대기농도, 추세 확정
아산화질소(N ₂ O)	1시간	<p><입력자료 선정></p> <ol style="list-style-type: none"> ① 아산화질소 자료수집(가스크로마토그래프)

		<p>② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단되는 플래깅 내용을 1시간 자료에서 제거</p> <p>③ 아산화질소 표준가스 교정</p> <p>④ 시간자료 농도가 전시간 농도와 같지 않고, 300 ppb보다 낮거나 340 ppb보다 큰 시간자료 제거</p> <p>⑤ 일평균 자료의 선정은 하루 24개 시간자료 중 12개(50%)보다 많고 시간자료의 하루 표준편차가 25 ppb보다 작을 때 일평균 자료로 선정</p> <p><월평균 확정, 배경대기농도 및 추세 산출></p> <p>⑥ 일평균 자료에 대해 1차 추세선을 구하고 일평균 자료에 추세값을 뺀 잔차에 대해 low frequency pass filter를 통하여 2.6개월 이하 단주기성분 제거함, 필터한 잔차를 퓨리에 변환하여 다시 1차 추세선과 합하여 배경대기농도 확정</p> <p>⑦ ⑥과정의 잔차가 추세선 보다 클 때 3σ보다 큰 경우 삭제, 추세선보다 작을 때 3σ보다 작은 경우 삭제하여 너무 크거나 작은 일평균 값을 제거</p> <p>⑧ ⑥과정의 배경대기 농도에서 계절변동성분을 포함한 1.8년 이하 주기성분을 low frequency pass filter로 제거하여 추세선 확정</p> <p>⑨ 월평균 농도는 일자료 개수가 3개 이상일 때 산출</p> <p>⑩ ⑥~⑩과정을 3번 반복하여 최종 월평균, 배경대기농도, 추세 확정</p>
염화불화탄소류(CFCs)	1시간	<p><입력자료 선정></p> <p>① 염화불화탄소류(CFCs) 자료수집(가스크로마토그래프)</p> <p>② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단되는 플래깅 내용을 1시간 자료에서 제거</p> <p>③ 염화불화탄소류(CFCs) 표준가스 교정</p> <p>④ 시간자료 농도가 시간당 5 ppt(염화불화탄소-113은 10 ppt) 이상 차이 나지 않고 농도가 다음 범위일 때 시간자료로 선택 ※염화불화탄소-11: 228~275 ppt, 염화불화탄소-12: 480~550 ppt, 염화불화탄소-113: 50~100 ppt</p> <p>⑤ 일평균 자료의 선정은 하루 24개 시간자료 중 1개(4%)(염화불화탄소-12: 3개(13%), 염화불화탄소-113: 15개(63%))보다 많고 시간자료의 하루 표준편차가 2 ppt(염화불화탄소-113: 25 ppt)보다 작을 때 일평균 자료로 선정</p> <p><월평균 확정, 배경대기농도 및 추세 산출></p> <p>⑥ 일평균 자료에 대해 1차 추세선을 구하고 일평균 자료에 추세값을 뺀 잔차에 대해 low frequency pass filter를 통하여 12개월(염화불화탄소-113: 2.9개월) 이하 단주기성분 제거함, 필터한 잔차를 퓨리에 변환하여 다시 1차 추세선과 합하여 배경대기농도 확정</p> <p>⑦ ⑥과정의 잔차가 추세선 보다 클 때 3σ보다 큰 경우 삭제, 추세선보다 작을 때 3σ보다 작은 경우 삭제하여 너무 크거나 작은 일평균 값을 제거</p> <p>⑧ ⑥과정의 배경대기 농도에서 계절변동성분을 포함한 1.8년 이하 주기성분을 low frequency pass filter로 제거하여 추세선 확정</p> <p>⑨ 월평균 농도는 일자료 개수가 6개(염화불화탄소-113: 3개) 이상일 때 산출</p> <p>⑩ ⑥~⑩과정을 3번 반복하여 최종 월평균, 배경대기농도, 추세 확정</p>
육불화황(SF ₆)	1시간	<p><입력자료 선정></p> <p>① 육불화황 자료수집(가스크로마토그래프)</p> <p>② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단되는 플래깅 내용을 1시간 자료에서 제거</p> <p>③ 육불화황 표준가스 교정</p> <p>④ 시간자료 농도가 시간당 2 ppt 이상차이 나지 않고, 5 ppt보다 낮</p>

	<p>거나 12 ppt보다 큰 시간자료 제거</p> <p>⑤ 일평균 자료의 선정은 하루 24개 시간자료 중 5개(21%)보다 많고 시간자료의 하루 표준편차가 2 ppt보다 작을 때 일평균 자료로 선정</p> <p><월평균 확정, 배경대기농도 및 추세 산출></p> <p>⑥ 일평균 자료에 대해 1차 추세를 구하고 일평균 자료에 추세값을 뺀 잔차에 대해 low frequency pass filter를 통하여 2.6개월 이하 단주기성분 제거함, 필터한 잔차를 푸리에 변환하여 다시 1차 추세선과 합하여 배경대기농도 확정</p> <p>⑦ ⑥과정의 잔차가 추세선 보다 클 때 3σ보다 큰 경우 삭제, 추세선보다 작을 때 3σ보다 작은 경우 삭제하여 너무 크거나 작은 일평균 값을 제거</p> <p>⑧ ⑥과정의 배경대기 농도에서 계절변동성분을 포함한 1.8년 이하 주기성분을 low frequency pass filter로 제거하여 추세선 확정</p> <p>⑨ 월평균 농도는 일자료 개수가 3개 이상일 때 산출</p> <p>⑩ ⑥~⑩과정을 5번 반복하여 최종 월평균, 배경대기농도, 추세 확정</p>
--	---

○ 반응가스 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
오존(O ₃)	5분	<ul style="list-style-type: none"> ○ 통계 최소자릿수: 0.1 ○ 생산자료→시간통계→일통계→월통계→연통계 < 시간 통계 > ○ 자료기간 : 생산자료를 이용하여 해당 시간의 00분 이후부터 55분까지의 1시간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 시간평균자료 ○ 산출방법 <ul style="list-style-type: none"> - 이전 시간 평균값과 비교하여 5배 이상시 제거 - 제거 후 생산자료가 시간당 75% 이상일 때 산출(5분 자료 9개 이상) - 소수 두 번째 자리까지 계산하여 반올림 - 산출식
일산화탄소(CO)		$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1} + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$
질소산화물(NOx)		<ul style="list-style-type: none"> < 일 통계 > ○ 자료기간 : 시간평균자료가 하루 75% 이상일 때 산출(시간자료 18개 이상) ○ 자료종류 : 일평균값 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음 < 월 통계 > ○ 자료기간 : 일자료가 50% 이상일 때 산출 ○ 자료종류 : 월평균값 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음 < 연 통계 > ○ 자료기간 : 해당 연의 1월부터 12월까지의 1년간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 연평균값 ○ 산출방법 : 시간통계와 같음
이산화황(SO ₂)		

4.2 에어로졸

에어로졸 광산란계수는 4가지 과정을 거쳐 자료 처리를 수행하였다. 첫 번째로 관측기기의 오류를 제거하였다. 기기에 의한 오류가 없을 경우 '0000' 으로 표시된다. 두 번째로 제로 모드(ZBXX, BBXX)일 때의 자료를 제거하였다. 세 번째로 음의 값을 제거하였다. 마지막으로, 에어로졸은 미 산란(Mie scattering) 영역에서는 파장이 작아질수록 산란 효율이 증가하는데, 이를 만족하지 않을 경우 자료를 제거하였다.

원시자료(5분 자료)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균을 계산했으며, 시간평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균, 월 최소 시간평균, 월 최대 시간평균, 시간평균의 표준편차를 산출하였다

에어로졸 이온성분은 다음과 같은 과정을 거쳐 자료 처리를 수행하였다. PM10, PM2.5 에어로졸 이온성분 분석요소는 수용성 이온 9종(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})의 농도이며, 이때 에어로졸 시료의 용출은 초순수를 사용하였다.

이온성분 분석 데이터를 가지고 정확도를 확인하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 모든 수용액 성분은 전기적으로 중성을 띄고 있으며, 이론적인 양이온의 당량농도 합($\sum [\text{Cation}]_{\text{eq}}$)과 음이온의 이론적 당량농도 합($\sum [\text{Anion}]_{\text{eq}}$)은 정확히 일치해야 한다. 하지만 실제적으로 차이가 나는 경우가 많으며, 이는 분석의 오차가 있거나 측정되지 않은 주요 이온이 있을 경우에는 일치하지 않게 된다. 따라서 에어로졸의 수용성 성분은 이온수지(ion balance)를 비교함으로써 간접적으로 분석 데이터의 신뢰도를 평가할 수 있다. 양이온의 당량농도 합($\sum [\text{Cation}]_{\text{eq}}$)과 음이온의 이론적 당량농도의 합($\sum [\text{Anion}]_{\text{eq}}$)의 상관계수가 1에 가까울수록 신뢰도가 높다고 할 수 있으며, 본 연구에서는 주요 양이온과 음이온을 분석하였기 때문에 대체적으로 상관계수가 높을 것으로 추정되어진다. T_{Cation} 과 T_{Anion} 은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다. 여기서 C_i 는 이온 i 의 농도($\mu\text{eq/L}$), Z_i 는 이온 i 의 당량수, W_i 는 이온 i 의 분자량이며, m 은 양이온의 수, n 은 양이온과 음이온의 수이다(심상규 등, 1994).

$$T_{\text{Cation}} = \sum_{i=1}^m C_i Z_i / W_i \quad (1)$$

$$T_{\text{Anion}} = \sum_{i=m+1}^n C_i Z_i / W_i \quad (2)$$

$$0.7 < \frac{\Sigma[\text{Cation}]_{\text{eq}}}{\Sigma[\text{Anions}]_{\text{eq}}} < 1.3 \quad (3)$$

이온성분들의 농도인 경우, 양이온 당량농도 합($\Sigma[\text{Cation}]_{\text{eq}}$)과 음이온 당량농도 합($\Sigma[\text{Anion}]_{\text{eq}}$) 간의 이온균형(ion balance)을 비교하여 두 값 간 차이가 너무 큰 데이터를 배제함으로써 데이터의 유효성을 확보하기 위한 선별 과정을 식 (3)에 따라 양이온과 음이온 당량 농도합의 비가 30% 이상 차이 나는 자료는 최종 결과에서 제외하였다(Park *et al.*, 2003).

○ 관측장비

장 비 명	제 작 사	관측주기	관측요소	관측시작연도
부유분진측정기 (β -ray PM ₁₀)	Thermo Anderson	5초	10 μm 이하 질량농도	2003년
공기역학입자계수기 (APS)	TSI	3분	0.5~20 μm 부피농도	2006년
전자기유도입자계수기 (SMPS)	TSI	3분	0.01~0.5 μm 입자크기별 수농도	2005년
응결핵계수기 (CPC)	TSI	5분	0.01~3 μm 응결핵 수농도	2010년
에어로졸 라이다	EN3엔지니어링	5분	연직 12 km까지 에어로졸 분포	2010년
광산란계수측정기 (Nephelometer)	TSI	5분	광산란계수	2003년
광흡수계수측정기 (Aethalometer)	Magee Scientific	5분	광흡수계수	2001년
광학입자계수기 (PM _x)	GRIMM	5분	입자별 질량농도	2007년
태양광도계 (Sunphotometer)	PMOD, Switzerland	GAW-PFR	AOD, 옹스트롬지수	2011년

○ 에어로졸 물리·광학 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
PM ₁₀ 질량농도 (β-ray 흡수법)	5분	- 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거
크기별 수농도(0.5~20μm)	3분	- DB 시스템과 실시간 그래픽으로 자료를 확인
미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5μm)	3분	- 모든 시간값에 비해 비정상적으로 크거나 작은 값 제거
응결핵 수농도 (0.01~0.3μm)	5분	- 유사 장비들간의 관측결과 비교 후 이상 판단 시 자료 제거
광산란계수	5분	- 원시자료(3분 또는 5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균, 연평균 산출(PM ₁₀ 질량농도는 75% 기준으로 산출)
광흡수계수	5분	- PM ₁₀ 질량농도를 제외한 각 요소별 시간평균으로부터 월평균, 표준편차, 최댓값(월 최대 시간평균), 최솟값(월 최소 시간평균) 산출

○ 에어로졸 화학 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
TSP 에어로졸 포집	주 1회	- 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.
PM ₁₀ 에어로졸 포집		
PM _{2.5} 에어로졸 포집		
Cyclone PM ₁₀ 에어로졸 포집		
Cyclone PM _{2.5} 에어로졸 포집		
TSP 에어로졸 화학성분 분석	-	$0.7 < \frac{\Sigma[\text{Cation}]_{\text{eq}}}{\Sigma[\text{Anions}]_{\text{eq}}} < 1.3$
PM ₁₀ 에어로졸 화학성분 분석	-	-양이온과 음이온 당량 농도합의 비가 30% 이상 차이 나는 자료는 최종 결과에서 제외.
PM _{2.5} 에어로졸 화학성분 분석	-	
Cyclone PM ₁₀ 에어로졸 화학성분 분석	-	
Cyclone PM _{2.5} 에어로졸 화학성분 분석	-	

4.3 대기복사

관측자료는 1분 간격으로 생산되며 단위는 W/m^2 이다. 자료 QC를 위해 BSRN(Baseline Surface radiation network)에서 권고하는 QC방법을 따랐다. QC방법은 3단계로 진행되며 QC1, QC2 단계는 Long and Dutton(2002)을 참고하였다. 일평균은 Solar Zenith Angle $< 75^\circ$ 인 데이터 중 QC를 거친 데이터가 75 % 이상인 날의 일평균을 계산하였으며, 그달의 일평균이 50% 이상 존재한 날의 월평균을 구하였다(Roesch et al, 2011).

○ 관측장비

장비명	제작사	모델명	관측요소	관측시작연도
직달일사계 (Pyrheliometer)	EKO, Japan	MS-54	직달일사	1999년
전천일사계 (Pyranometer)	EKO, Japan	MS-802F	산란일사	1999년
전천일사계 (Pyranometer)	EKO, Japan	MS-802F	태양복사	1999년
지구복사계 (Pyrgeometer)	EKO, Japan	MS-202F	지구복사	1999년
순복사계 (Net-Pyradiometer)	EKO, Japan	MS-11	순복사	1999년

○ 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
직달일사/산란일사	1분	- BSRN에서 권고하는 QC 3단계 적용
태양복사	1분	[일평균] - 태양복사 : 태양천정각(Solar Zenith Angle) $< 75^\circ$ 인 데이터 중 QC를 거친 데이터가 75 % 이상인 날 - 지구복사 : 24시간 인 데이터 중 QC를 거친 데이터가 75 % 이상인 날
지구복사	1분	[월평균] - 각 달의 일평균이 전체 날수의 50% 이상 존재한 달에 한해 월평균을 구하였다
순복사	1분	

○ Quality Check 방법 (BSRN 기준)

1단계 QC (Physically Possible Limits)

- Global Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 1.5 X μ ₀ ^{1.2} + 100 W/m ²
- Reflected Solar Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 1.2 X μ ₀ ^{1.2} + 50 W/m ²
- Direct Solar Irradiance	Min : -4 W/m ² Max : Sa
- Diffuse Solar Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 0.95 X μ ₀ ^{1.2} + 50 W/m ²
- Downwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m ² Max : 700 W/m ²
- Upwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m ² Max : 900 W/m ²

2단계 QC (Comparisons)

- Ratio of Global Radiation over SUM	Global / SUM -> within +/- 8% of 1.0 (for SZA < 75°, SUM > 50 W/m ²) Global / SUM -> within +/- 15% of 1.0 (for 75° < SZA < 93°, SUM > 50 W/m ²)
- Ratio of Diffuse over Global Radiation	SWDIFF / Global < 1.05 (for SZA < 75°, Global > 50 W/m ²) SWDIFF / Global < 1.10 (for 75° < SZA < 93°, Global > 50 W/m ²)
- Reflected Solar Radiation comparison	SWUP < SUM (SUM > 50 W/m ²)
- Air Temperature comparison (Infrared Radiation)	σ(Ta-15K) ⁴ < LWUP < σ(Ta+25K) ⁴ 0.4XσTa ⁴ < LWUP < σTa ⁴ +25
- Infrared Radiation comparison	LWDOWN < LWUP + 25 W/m ² LWDOWN > LWUP - 300 W/m ²

3단계 QC (NET Comparison)

- NET & Cal. NET	NET < 50 W/m ² -> NET - Cal. NET < 25 W/m ² NET ≥ 50 W/m ² -> (NET - Cal. NET) / Cal. NET < 0.5
------------------	---

* 태양상향복사(SWUP), 태양하향복사(전천일사/Global), 직달일사(SWDIR), 산란일사(SWDIFF), 지구상향복사(LWUP), 지구하향복사(LWDOWN)
 * SUM : SWDIFF + SWDIR × μ₀
 * SZA : Solar Zenith Angle
 * μ₀ : Cos(SZA)
 * Sa : S_o / AU² (S_o : Solar constant at mean Earth-Sun distance
 AU : Earth - Sun distance in Astronomical Units)
 * σ : 5.67 × 10⁻⁸
 * Ta : air temperature in Kelvin (170K < Ta < 350K)

4.4 성층권오존

오존전량은 태양광 중 6개 파장에 대한 광도를 참조 값과 비교하여 오존전량을 산출하며 태양의 위치에 따라 하루 10회 이상 관측하여 오차가 가장 적은 관측 값을 그날의 오존전량으로 산출한다. 월평균 값은 그달의 일 오존 값이 10일 이상 존재할 때 월평균 값을 구하였다.

○ 관측장비

장비명	관측지점	제작사	모델명	관측시작 연도	관측요소
오존 분광도계 (Brewer Ozone Spectrophotometer)	안면도(#213) 고 산(#196) 포 항(#95) 연세대학교(#252)	Kipp & Zonen Kipp & Zonen SCI-TEC SCI-TEC	MKIII MKIII MKII Mark-IV	2013 2011 1994 2004	오존전량 오존전량 오존전량 오존전량
오존존데	포항	Vaisala	ECC	1995	오존연직분포
Dobson 분광광도계	연세대학교(#252)	Ealing	Beck #124	1984	오존전량

○ 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
오존전량 (total ozone)	상시	<ul style="list-style-type: none"> < 오존 브루어 / 오존전량 > - 태양광 중 6개 파장에 대한 광도를 참조값과 비교하여 오존전량 산출 - 태양의 위치에 따라 하루 10회 이상 관측하여 오차가 가장 적은 관측값을 그날의 오존전량으로 산출
성층권 오존연직분포	1회/1주	<ul style="list-style-type: none"> - 매월 10일 이상의 일 자료가 있을 경우 월평균값 산출 < 오존연직분포 > - 관측일 중 베스트 프로파일 선택하여 월별, 계절별 분석 수행

4.5 자외선

자외선 복사량은 10분 간격으로 매일 144회의 관측이 이루어진다. 관측값의 범위는 최저값은 0으로 하고 최고값은 매일의 시간에 따른 변화값을 통계적으로 계산하여 결정하였다. 매 10분마다 관측된 자외선 복사량이 허용된 최저값과 최고값의 범위를 벗어나면 이를 결측으로 처리하였다. 관측기기 상태는 관측 센서 온도값을 이용하여 판단하였고 관측 센서 온도가 정상값이 아닐 경우 결측으로 처리하였다. 매일의 정상적인 관측 횟수를 조사하여 일 관측 횟수가 48회 미만이면 결측일로 결정하였다.

○ 관측장비

장비명	관측지점	관측요소	관측시작연도	제작사
자외선 측정기 (UV biometer)	안면도(#132)	자외선A	2008	Solarlight
		홍반자외선B	1999	
	고 산(#013)	자외선A	2012	Solarlight
		홍반자외선B	1999	
	울릉도(#115)	자외선A	2012	Solarlight
		홍반자외선B		
	포 항(#138)	자외선A	1999	Solarlight
		홍반자외선B	1999	
	목 포(#165)	자외선A	2015	Solarlight
		홍반자외선B	2001	
강릉(#105)	자외선A	2014	Solarlight	
	홍반자외선B	2001		
서울(#108)	자외선A	2015	Solarlight	
	홍반자외선B	2015		

○ 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법
자외선A	10분	<ul style="list-style-type: none"> - 매일 10분 평균 자료 144개 원시 파일 생산 - 원시자료 품질관리 수행: <ul style="list-style-type: none"> • 관측 값이 허용범위를 벗어날 때 결측 처리 0 < 관측 값의 허용 범위 < 통계적으로 구한 최고값 ※ 최고값: 과거 10년 자료를 이용하여 (월평균 + 2.5 * 표준편차) 값을 기준으로 하여 월별 일변화 및 시간 변화 경향을 고려하여 결정함 • 기기상태 오류(관측센서온도 ≠ 25°C)일 때 결측 처리 • 일 관측횟수 ≤ 48회 일 때 결측일로 간주 - 일 최댓값과 일 누적값 산출 - 매월 21일 이상의 일 자료가 있을 경우 월평균값 산출 - 매년 9개월 이상의 월 자료가 있을 경우 연평균값 산출
홍반자외선B		

4.6 총대기침적

○ 관측장비

장 비 명	제 작 사(모델)	관측주기	관측요소	관측시작년도
산성도측정기	Thermo, Orion (Orion 3STAR)	강수시	산성도	2009년
전기전도도측정기	Thermo, Orion (Orion 3STAR)	강수시	전기전도도	2009년
이온크로마토 그래프(IC)	Dionex(ICS-2000)	강수시	강수이온성분 9종 (F, SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	2005년

○ 통계방법

관측요소	관측주기	자료통계 방법										
산성도	강수시	<ul style="list-style-type: none"> - 당일 09시부터 익일 09시까지 강수량이 0.5 mm이상인 시료만을 유효 - 시료 측정 질량농도가 이온성분 총 질량농도보다 작을 경우 제거 - 아래의 이온밸런스법과 전기전도도 밸런스법을 동시에 만족하는 경우에 최종 분석에 이용함. <p>< 이온 밸런스법 ></p> <ul style="list-style-type: none"> - 양이온의 당량농도(Cation Equivalents, CE) 총합과 음이온의 당량농도(Anion Equivalents, AE) 총합은 같음. - 총 이온농도 (CE+AE) 크기에 따른 이온 차의 허용 범위 (Acceptable Ion Difference, AID)를 기준으로 자료의 타당성 판단 $\text{Ion Difference (\%)} = \frac{(CE - AE)}{(CE + AE)} \times 100$ <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⁻¹)</th> <th>Acceptable Ion Difference(AID, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[CE+AE] ≤ 50</td> <td>AID ≤ ±60</td> </tr> <tr> <td>50 < [CE+AE] ≤ 100</td> <td>AID ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>100 < [CE+AE] ≤ 500</td> <td>AID ≤ ±15</td> </tr> <tr> <td>500 < [CE+AE]</td> <td>AID ≤ ±10</td> </tr> </tbody> </table>	CE+AE (μeq L ⁻¹)	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 ⁻¹)	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"> - 이온 비의 허용범위(25%)를 기준으로 타당성 판단 $0.75 < \text{IonRatio}(\%) = \frac{CE}{AE} \times 100 < 1.25$ <p>< 전기전도도 밸런스법 ></p> <ul style="list-style-type: none"> - 직접 측정된 전기전도도(EC_{mea}) 와 이론적으로 계산한 전기전도도(EC_{cal}) 비교 - 전기전도도 차의 허용범위(Acceptable Conductivity Difference, ACD)를 기준으로 타당성 판단 $\text{Conductivity Difference (\%)} = \frac{EC_{cal} - EC_{mea}}{EC_{mea}} \times 100$ <p>표 2. 측정된 전기전도도에 따른 전기전도도 차의 허용범위(ACD) (WMO GAW Report No. 160)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>EC mea (μS cm⁻¹)</th> <th>Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EC mea ≤ 5</td> <td>ACD ≤ ±50</td> </tr> <tr> <td>5 < EC mea ≤ 30</td> <td>ACD ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>30 < EC mea</td> <td>ACD ≤ ±20</td> </tr> </tbody> </table>	EC mea (μS cm ⁻¹)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)	EC mea ≤ 5	ACD ≤ ±50	5 < EC mea ≤ 30	ACD ≤ ±30	30 < EC mea	ACD ≤ ±20		
EC mea (μS cm ⁻¹)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)											
EC mea ≤ 5	ACD ≤ ±50											
5 < EC mea ≤ 30	ACD ≤ ±30											
30 < EC mea	ACD ≤ ±20											
강수이온성분	강수시	<ul style="list-style-type: none"> - 이온 비의 허용범위(25%)를 기준으로 타당성 판단 $0.75 < \text{IonRatio}(\%) = \frac{CE}{AE} \times 100 < 1.25$ <p>< 전기전도도 밸런스법 ></p> <ul style="list-style-type: none"> - 직접 측정된 전기전도도(EC_{mea}) 와 이론적으로 계산한 전기전도도(EC_{cal}) 비교 - 전기전도도 차의 허용범위(Acceptable Conductivity Difference, ACD)를 기준으로 타당성 판단 $\text{Conductivity Difference (\%)} = \frac{EC_{cal} - EC_{mea}}{EC_{mea}} \times 100$ <p>표 2. 측정된 전기전도도에 따른 전기전도도 차의 허용범위(ACD) (WMO GAW Report No. 160)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>EC mea (μS cm⁻¹)</th> <th>Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>EC mea ≤ 5</td> <td>ACD ≤ ±50</td> </tr> <tr> <td>5 < EC mea ≤ 30</td> <td>ACD ≤ ±30</td> </tr> <tr> <td>30 < EC mea</td> <td>ACD ≤ ±20</td> </tr> </tbody> </table>	EC mea (μS cm ⁻¹)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)	EC mea ≤ 5	ACD ≤ ±50	5 < EC mea ≤ 30	ACD ≤ ±30	30 < EC mea	ACD ≤ ±20		
EC mea (μS cm ⁻¹)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)											
EC mea ≤ 5	ACD ≤ ±50											
5 < EC mea ≤ 30	ACD ≤ ±30											
30 < EC mea	ACD ≤ ±20											

참고문헌

□ 제2장 2015년 기상기후 특성

- IPCC, 2013: climate change 2013. The Physical Basis Working Group I Contribution to the 5th Assessment Report.
기상청, 2015 기상연감, 8-15, 155-159
기상청, 2015 기상연보, 16-18, 69, 81, 156

□ 제3장 분야별 관측·분석결과

3.1 온실가스

- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The physical science basis, Report of the IPCC, 1-572.
극지연구소, 2016a. 남극 과학기지 포괄적 환경모니터링 및 장기환경자료 DB 구축(장보고기지), pp456
극지연구소, 2016b. 남극 과학기지 포괄적 환경모니터링 및 장기환경자료 DB 구축(세종과학기지), pp320
기상청, 2010. 2010 지구대기감시 보고서, pp228
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.
Yoo, J.-I., D.-H. Lee, J.-K. Hong, J. Kim, 2009. Principles and Applications of Multi-Level H₂O/CO₂ Profile Measurement System. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 11(1), 27-38.

3.2 반응가스

- 기상청, 2015 : 2014 지구대기감시보고서. pp292
IPCC, 2013: climate change 2013. The Physical Basis Working Group I

Contribution to the 5th Assessment Report.

3.3 에어로졸

Anderson, T. L., D. S. Covert, S. F. Marshall, M. L. Laucks, R. J. Charlson, A. P. Waggoner, J. A. Ogren, R. Caldow, R. L. Holm, F. R. Quant, G. J. Sem, A. Wiedensohler, N. A. Ahlquist, and T. S. Bates, 1996: Performance Characteristics of a High-Sensitivity, Three-Wavelength, Total Scatter/Backscatter Nephelometer, American Meteorological Society, 13, 967–986.

Hansen, A. D. A., H. Rosen, and T. Novakov, 1984: The aethalometer – an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Sci. Total Environ.*, 36, 191–196.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I.

Schmid, O., P. Artaxo, W. P. Arnott, D. Chand, L. V. Gatti, G. P. Frank, A. Hoffer, M. Schnaiter, and M. O. Andreae, 2006: Spectral light absorption by ambient aerosols influenced by biomass burning in the Amazon Basin. I: Comparison and field calibration of absorption measurement techniques. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3443–3462.

Zhuang, B. L., T. J. Wang, J. Liu, Y. Ma, C. Q. Yin, S. Li, M. Xie, Y. Han, J. L. Zhu, X. Q. Yang, and C. B. Fu, 2015: Absorption coefficient of urban aerosol in Nanjing, west Yangtze River Delta, China, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 13633–13646

3.4 대기복사

A. Roesch¹, M. Wild¹, A. Ohmura¹, E. G. Dutton², C. N. Long³, and T. Zhang, 2011 : Assessment of BSRN radiation records for the computation of monthly means. *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 339–354,

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.

3.6 자외선

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), The Global Climate System Review: Climate System Monitoring, June 1991 - November,

1993, WMO No. 819, pp. 150, 1995.

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

3.7 총대기침적

심상규, 강창희, 김용표, 1994: 제주도에서의 빗물 이온 농도 분석, 한국대기보전학회지, 10(2), 98-104.

Ho, K. F., S. C. Lee, C. K. Chan, J. C. Yu, J. C. Chow, X. H. Yao, 2003: Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong-Kong, Atmospheric Environment, 37(1), 31-39.

Keene, W. C., A. A. P. Pszenny, J. N. Galloway, and M. E. Hawley, 1986: Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. J. Geophys. Res, 91, 6647-6658.

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.

Vet, R. J., 1991: Wet deposition: measurement techniques. The Handbook of Environmental Chemistry, Springer-Verlag, Berlin, pp252
Olsen, A. R., E. C. Voldner, D. S. Bigelow, W. H. Chan, T. L. Clark, M. A. Lusic, 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, 661-672.

Wayne, R. P., 1991: Chemistry of atmosphere(2nd Edition.). oxford science publication, New York. pp417.

WMO, 2004: Manual for the GAW Precipitation Chemistry Programme. (WMO TD No. 1251)

3.8 기타

Chambers, S. W. Zahorowski, K. Matsumoto, 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.
- 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.
- 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.
- Chambers, S., W. Zahorowski, A. G. Williams, J. Crawford, A. D. Griffiths (2013) Identifying tropospheric baseline air masses at Mauna Loa Observatory between 2004 and 2010 using Radon-222 and back trajectories, *J. Geo. Res.*, 118, 992–1004, doi:10.1029/2012JD018212
- Pitari G., E. Coppari, N. De Luca, P. Di Carlo (2014) Observations and boc model analysis of radon-222 in the atmospheric surface layer at L'Aquila, Italy: March 2009 case study, *Environ. Ear. Sci.*, 71(5), 2353–2359.
- WMO/GAW, GLOBAL ATMOSPHERE WATCH MEASUREMENTS GUIDE (No. 143), WMO TD No. 1073, July 2001.
- Zahorowski, W., S. Chambers, T. Wang, C.H. Kang, I. Uno, S. Poon, S.N. Oh, S. Wercqynski, J. Kim, 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. 지구대기감시 현황
3. 기후변화감시 기술노트 목록
4. 기후변화감시 관측자료 활용논문 목록
5. 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황
6. 지구대기감시 보고서 작성자

1. 지구대기감시 관측자료

□ 온실가스 평균 자료

○ 안면도

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
이산화탄소 (CO ₂) [단위 : ppm]	1999	373.1	374.0	374.9	375.1	374.0	370.8	366.6	363.8	365.3	370.0	372.8	373.8	371.2
	2000	375.3	376.3	377.1	377.6	375.8	372.1	368.1	365.7	367.5	372.0	375.2	376.7	373.3
	2001	377.8	378.8	379.5	379.8	378.8	375.2	370.2	367.8	369.7	374.2	377.6	378.3	375.6
	2002	379.4	380.5	380.6	381.0	380.3	376.9	372.7	369.9	371.8	376.9	380.0	380.9	377.6
	2003	381.9	382.9	384.1	384.7	383.2	379.4	374.7	372.1	374.0	378.6	381.4	382.3	379.9
	2004	384.1	385.6	385.9	386.2	384.9	381.4	376.9	374.1	376.1	380.8	383.7	385.4	382.1
	2005	386.6	387.5	388.2	387.9	387.0	384.0	378.9	376.3	378.3	382.7	386.3	387.5	384.3
	2006	388.3	389.1	390.0	391.0	389.9	386.4	381.8	378.6	380.6	385.2	387.9	389.5	386.5
	2007	390.5	391.0	392.2	393.0	391.7	388.1	383.3	381.0	383.0	387.1	390.2	391.6	388.6
	2008	392.5	393.5	394.6	395.2	393.9	390.5	385.7	382.8	384.8	389.2	392.3	393.7	390.7
	2009	394.4	395.2	396.4	397.0	395.4	391.6	387.3	384.9	386.8	391.6	394.9	396.0	392.6
	2010	397.1	397.9	398.0	398.3	397.8	394.8	390.3	387.8	389.5	393.6	396.6	397.6	394.9
	2011	398.6	399.4	399.8	400.5	400.0	396.9	392.1	388.8	390.9	395.9	398.6	399.9	396.8
	2012	401.3	402.2	403.4	404.3	403.2	399.6	394.9	392.2	393.9	398.9	402.3	403.1	399.9
	2013	404.2	405.3	406.0	406.8	405.5	401.9	397.9	394.8	396.3	400.8	403.9	405.6	402.4
	2014	406.6	407.7	409.2	409.1	407.5	404.3	399.3	396.9	398.9	402.6	405.8	407.8	404.6
2015	409.2	410.2	410.6	411.1	410.0	406.3	402.0	399.2	400.8	405.5	409.0	410.4	407.0	
메탄 (CH ₄) [단위 : ppb]	1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1918	-
	2001	1925	1923	1912	1906	1912	1912	1908	1913	1923	1926	1919	1916	1916
	2002	1922	1919	1906	1898	1904	1909	1904	1910	1924	1922	1913	1913	1912
	2003	1918	1915	1904	1901	1908	1906	1901	1906	1917	1920	1913	1911	1910
	2004	1916	1913	1903	1897	1904	1906	1895	1899	1916	1918	1911	1910	1907
	2005	1913	1913	1902	1896	1904	1905	1900	1904	1915	1919	1912	1910	1908
	2006	1916	1913	1903	1899	1906	1909	1899	1911	1932	1914	1903	1930	1911
	2007	1927	1904	1905	1904	1904	1911	1895	1898	1930	1926	1912	1923	1912
	2008	1920	1918	1926	1911	1905	1920	1903	1875	1894	1926	1923	1915	1911
	2009	1929	1936	1927	1917	1909	1911	1921	1931	1940	1929	1922	1937	1926
	2010	1928	1919	1929	1905	1901	1939	1929	1911	1937	1943	1930	1924	1925
	2011	1925	1930	1917	1906	1921	1920	1914	1932	1947	1949	1943	1939	1929
	2012	1947	1943	1931	1930	1932	1937	1930	1932	1956	1949	1939	1962	1941
	2013	1962	1959	1968	1953	1953	1963	1945	1953	1976	1962	1953	1957	1959
	2014	1957	1959	1951	1945	1958	1965	1964	1977	1989	1980	1971	1979	1966
2015	1980	1972	1969	1958	1961	1977	1968	1970	1991	1989	1990	1995	1977	

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
아산화질소 (N ₂ O) [단위 : ppb]	1999	-	315.2	314.6	314.2	314.6	315.6	316.3	316.4	314.0	312.1	313.7	313.8	314.6
	2000	312.6	313.4	313.6	314.1	315.4	315.4	315.0	314.5	314.9	316.3	316.5	316.5	314.9
	2001	315.8	314.3	314.3	315.3	316.0	317.0	317.3	316.6	315.7	315.7	316.7	317.6	316.0
	2002	317.8	317.7	317.7	318.3	318.8	319.0	318.9	318.2	318.0	318.0	318.3	319.0	318.3
	2003	318.5	318.7	320.2	320.2	320.2	320.8	320.4	319.4	318.5	318.8	319.6	319.3	319.6
	2004	319.4	319.8	319.4	319.4	319.5	319.5	319.7	319.8	319.9	319.8	319.9	320.4	319.7
	2005	320.5	320.3	320.1	320.1	320.8	320.6	320.2	320.7	320.7	320.9	321.3	321.1	320.6
	2006	321.1	321.6	322.1	322.2	321.8	321.2	320.7	321.1	321.8	321.7	321.7	322.0	321.6
	2007	322.9	323.5	322.4	321.3	321.0	320.7	321.9	322.4	321.0	321.4	321.9	321.8	321.9
	2008	322.3	321.9	321.3	320.9	321.6	324.1	323.7	321.6	323.8	325.3	323.3	322.7	322.7
	2009	323.3	323.3	323.6	323.8	323.4	323.6	324.5	324.4	323.9	324.2	324.1	323.8	323.8
	2010	323.2	323.3	324.4	324.4	324.3	325.3	325.4	325.7	326.4	326.6	325.8	324.3	324.9
	2011	324.5	325.3	324.5	324.5	324.9	324.8	325.5	324.5	322.6	322.8	322.9	324.1	324.2
	2012	326.6	326.7	326.2	326.9	326.9	326.2	326.5	327.2	326.0	324.9	325.6	325.9	326.3
	2013	325.8	326.2	325.6	324.8	325.4	325.2	324.4	324.9	325.8	325.7	325.5	326.6	325.5
2014	329.0	330.6	328.9	327.3	327.4	326.1	324.9	325.2	324.5	324.4	324.4	324.2	326.4	
2015	326.5	328.1	327.5	327.2	327.0	327.4	328.1	327.2	326.8	327.8	327.9	327.6	327.4	
염화불화탄소 11 (CFC-11) [단위 : ppt]	1999	-	270.4	270.2	270.1	270.0	269.8	269.6	269.3	268.9	268.5	268.0	267.6	269.3
	2000	267.3	267.2	267.2	267.2	267.4	267.5	267.6	267.6	267.5	267.3	267.1	266.9	267.3
	2001	266.8	266.7	266.6	266.5	266.4	266.3	266.0	265.6	265.2	264.8	264.5	264.3	265.8
	2002	264.2	264.3	264.5	264.7	264.8	264.9	264.7	264.3	263.6	262.9	262.0	261.3	263.9
	2003	260.7	260.4	260.3	260.5	260.8	261.1	261.4	261.6	261.5	261.3	260.9	260.4	260.9
	2004	259.9	259.5	259.1	258.9	258.9	259.0	259.2	259.6	260.0	260.5	261.0	261.5	259.8
	2005	261.9	262.2	262.3	262.2	261.9	261.3	260.5	259.6	258.7	257.9	257.3	256.9	260.2
	2006	256.8	256.8	256.9	257.0	256.8	256.4	255.6	254.5	253.3	252.0	250.8	250.0	254.7
	2007	249.6	249.7	250.0	250.7	251.3	251.7	251.7	251.3	250.4	249.1	247.8	246.5	250.0
	2008	245.6	245.1	245.3	245.9	246.9	248.1	249.3	250.1	250.5	250.5	250.1	249.4	248.1
	2009	248.7	248.1	247.6	247.5	247.6	247.7	247.9	247.8	247.4	246.7	245.6	244.4	247.3
	2010	243.0	241.8	240.8	240.1	239.8	239.6	239.6	239.7	239.6	239.3	238.9	238.4	240.1
	2011	237.8	237.5	237.3	237.4	237.9	238.5	239.3	239.9	240.3	240.3	239.9	239.0	238.8
	2012	237.9	236.7	235.6	234.6	233.9	233.7	233.8	234.1	234.7	235.3	235.9	236.3	235.2
	2013	236.6	236.6	236.6	236.4	236.2	235.9	235.7	235.4	235.2	235.0	234.7	234.4	235.7
2014	234.2	233.9	233.7	233.5	233.4	233.2	233.1	232.9	232.6	232.2	231.8	231.4	233.0	
2015	231.0	230.7	230.4	230.2	230.0	229.9	229.7	229.4	229.1	228.6	228.1	227.5	229.6	

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
염화불화탄소 12 (CFC-12) [단위 : ppt]	1999	-	537.0	536.9	536.9	537.0	537.1	537.3	537.4	537.6	537.7	537.7	537.8	537.3
	2000	537.8	537.8	537.8	537.8	537.8	537.9	537.9	537.8	537.8	537.8	537.7	537.7	537.8
	2001	537.7	537.8	537.8	537.9	537.9	538.0	538.0	537.9	537.9	537.8	537.7	537.7	537.8
	2002	537.6	537.6	537.6	537.7	537.7	537.7	537.7	537.7	537.6	537.5	537.5	537.4	537.6
	2003	537.4	537.4	537.3	537.3	537.3	537.3	537.2	537.2	537.1	537.0	536.9	536.8	537.2
	2004	536.7	536.7	536.7	536.7	536.6	536.6	536.5	536.4	536.3	536.2	536.1	536.1	536.5
	2005	536.0	536.0	535.9	535.9	535.9	535.8	535.7	535.6	535.5	535.3	535.2	535.1	535.7
	2006	535.1	535.0	535.0	535.0	535.0	534.9	534.8	534.7	534.6	534.5	534.4	534.3	534.8
	2007	534.3	534.4	534.4	534.5	534.5	534.6	534.6	534.5	534.4	534.3	534.1	533.9	534.4
	2008	533.6	533.4	533.1	532.8	532.5	532.2	531.9	531.5	531.3	531.0	530.8	530.7	532.1
	2009	530.6	530.5	530.4	530.2	530.0	529.6	529.2	528.7	528.2	527.8	527.4	527.3	529.2
	2010	527.3	527.5	527.7	528.1	528.4	528.7	528.9	528.9	528.7	528.4	528.0	527.5	528.2
	2011	527.1	526.7	526.4	526.3	526.2	526.3	526.4	526.5	526.7	526.8	526.8	526.7	526.6
	2012	526.5	526.1	525.6	524.9	524.1	523.2	522.2	521.2	520.4	519.7	519.3	519.2	522.7
	2013	519.3	519.7	520.2	520.8	521.4	521.9	522.1	522.2	522.0	521.6	521.1	520.6	521.1
2014	520.2	519.9	519.6	519.5	519.5	519.5	519.4	519.2	518.9	518.5	518.0	517.5	519.1	
2015	517.0	516.6	516.3	516.2	516.1	516.1	516.1	516.1	516.0	515.7	515.3	514.8	516.0	
염화불화탄소 113 (CFC-113) [단위 : ppt]	2007	-	79.6	79.4	79.4	79.2	79.2	79.1	78.9	79.0	79.0	78.9	78.7	79.1
	2008	78.6	78.6	78.2	77.6	77.6	78.0	78.2	78.4	78.3	78.1	78.2	78.1	78.2
	2009	77.4	77.4	77.7	77.4	77.4	77.7	77.6	77.1	77.0	77.0	76.7	76.5	77.2
	2010	76.7	76.7	76.6	76.8	76.8	76.6	76.7	76.6	76.0	75.4	75.2	75.4	76.3
	2011	75.6	75.6	75.6	75.6	75.4	75.4	75.3	75.1	75.3	75.6	75.3	74.8	75.4
	2012	74.6	74.2	74.3	74.9	75.6	75.2	74.3	74.0	73.9	73.2	72.6	72.7	74.1
	2013	72.7	73.1	74.3	74.4	73.6	73.5	73.3	73.0	73.1	72.9	72.8	73.2	73.3
	2014	73.1	72.6	72.6	72.5	72.4	72.4	72.2	72.1	72.1	71.7	71.7	71.8	72.3
2015	71.6	71.5	71.3	71.0	71.1	71.4	71.3	71.1	71.1	71.0	71.0	71.0	71.2	
육불화황 (SF ₆) [단위 : ppt]	2007	-	-	7.2	7.2	7.0	7.0	6.8	6.4	6.6	6.9	6.8	7.0	6.9
	2008	6.7	6.5	6.7	6.6	6.7	7.1	7.0	6.9	7.0	6.9	7.1	7.2	6.9
	2009	7.1	7.3	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5	7.6	7.4	7.4	7.4	7.3	7.4
	2010	7.4	7.4	7.5	7.6	7.8	7.8	7.5	7.2	7.5	7.9	7.9	7.8	7.6
	2011	7.8	7.7	7.7	7.8	7.8	8.0	8.1	8.0	8.0	8.0	8.3	8.5	8.0
	2012	8.1	7.9	7.9	8.0	8.2	8.1	8.1	8.4	8.4	8.3	8.4	8.4	8.2
	2013	8.3	8.4	8.4	8.4	8.7	8.8	8.4	8.5	8.7	8.6	8.7	8.7	8.6
	2014	8.6	8.8	8.8	9.0	9.3	9.4	9.3	9.4	9.4	9.4	9.3	9.2	9.2
2015	9.2	9.4	9.5	9.5	9.8	9.9	9.6	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
이산화탄소 (CO ₂) [단위 : ppm]	2012	400.3	401.4	401.9	403.4	402.9	399.4	395.7	392.7	393.3	398.0	401.0	401.4	399.3
	2013	402.9	404.4	405.1	405.9	405.0	402.0	398.1	394.7	395.5	400.0	402.7	403.3	401.6
	2014	404.4	405.5	406.5	407.4	406.8	404.3	400.5	397.2	397.5	401.5	404.9	405.8	403.5
	2015	406.9	408.5	409.6	410.3	409.6	406.9	403.2	399.8	400.4	405.0	408.3	409.5	406.5
	2012	322.5	324.8	325.4	325.9	326.1	326.3	326.5	325.8	327.0	325.9	325.1	325.2	325.5
아산화질소 (N ₂ O) [단위 : ppb]	2013	326.4	327.0	324.5	324.3	325.2	325.2	324.1	326.0	326.5	326.9	327.1	327.3	325.9
	2014	327.5	327.9	329.0	329.1	329.0	328.3	327.5	326.3	326.6	325.6	325.7	326.5	327.4
	2015	327.0	326.9	327.6	328.1	328.0	328.0	327.1	328.2	329.5	330.4	329.4	327.4	328.1

○ 울릉도

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
이산화탄소 (CO ₂) [단위 : ppm]	2014	405.1	406.0	407.2	407.7	405.9	400.5	392.8	389.8	394.4	401.1	405.0	406.6	401.8
	2015	407.7	408.8	409.6	410.3	409.2	402.9	395.2	392.2	395.4	402.9	407.5	409.0	404.2

○ 독도

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
이산화탄소 (CO ₂) [단위 : ppm]	2014	404.0	405.3	406.4	406.9	406.0	402.1	396.0	391.7	393.5	399.4	404.0	405.6	401.7
	2015	406.4	407.5	408.8	409.5	408.5	404.8	398.6	394.3	396.2	402.0	406.5	408.1	404.3

□ 반응가스 평균자료

○ 오존(O₃) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균	
안면도	2004	42.4	52.8	65.2	48.1	41.9	34.2	21.9	22.5	27.5	33	32	27.2	37.4	
	2005	28.4	-	-	-	27.5	34.7	34.6	27.5	-	50.5	46.5	34.3	35.5	
	2006	39	45.1	57.2	48.3	56	49.4	27.4	36.9	55.2	55	38.1	29.4	44.8	
	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	39.3	
	2008	32.6	45.5	50.4	67.3	58.2	53.4	32.3	42.6	49.1	45	30.9	27.9	44.6	
	2009	29.5	32.1	39.5	55.5	56	50.9	38.6	36.8	46.0	45.0	29.4	15.7	39.6	
	2010	33.5	35.4	42.7	49.3	56.8	60.7	40.3	36.6	40.5	44.8	42.3	34.1	43.1	
	2011	36.9	40.5	47.9	54.9	58.3	53.8	37.5	38.8	45.8	42.7	34.2	28.0	43.3	
	2012	28.7	35.7	44.8	50.7	58.2	42.8	33.1	30.7	50.6	41.5	29.3	23.5	39.1	
	2013	33.5	36.5	44.2	51.5	56.8	50.3	34.3	39.9	42.2	32.6	26.9	26.3	39.6	
	2014	23.5	28.2	34.7	47	51.3	29.5	24.3	22.8	44.9	39.2	36.1	21.9	33.6	
	2015	14.9	36.8	34.6	35.5	30.6	40.6	22.2	19.5	36.2	23.7	23.0	17.2	27.9	
	고산	2012*	-	-	-	-	-	40.8	33.7	25.2	33.8	45.6	29.4	32.2	34.4
		2013	47.2	43.9	56.2	64	52	33.2	15.1	14.9	44.8	39.8	39.3	35.3	40.3
		*2012년 6월부터 관측시작	2014	36.7	42	46.8	64.2	63.2	55.2	32.6	33.2	42.9	39.8	39.3	44.3
2015		39.5	50	57.2	62.5	51	49.4	38.9	-	43.9	48.1	34.6	27.5	45.7	

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 일산화탄소(CO) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균	
안면도	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	240.8	
	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	271.8	
	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	223.4	
	2009	243.3	352.5	256.0	301.0	216.8	198.1	182.6	268.3	237.6	219.6	212.0	290.0	248.2	
	2010	269.9	286.9	244.0	242.8	287.8	229.5	159.6	179.8	232.3	234.8	277.7	302.6	245.7	
	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	293.7	
	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	284.3	
	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	307.9	
	2014	324.2	382.6	296.1	298.1	310.9	279.9	254	256.2	256	271.4	310.1	301.1	295.1	
	2015	358.3	367.1	354.1	317.2	241.8	262.0	214.3	240.5	232.4	290.3	298.6	345.0	293.5	
	고산	2012	-	-	-	-	-	145.0	118.8	93.6	163.0	180.1	212.0	168.4	154.4
		2013	264.5	227.7	234.6	222.1	241.9	167.2	94.3	118.6	163.6	173.2	249.3	249.7	200.6
		*2012년 6월부터 관측시작	2014	266.6	278	226.6	221.6	280.6	215.1	160.8	154	191.4	174.6	222.9	217.0
		2015	238.7	245.6	246.9	237.4	179.3	191.9	159.3	-	236.3	301.5	265.3	283.4	235.1

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 질소산화물(NO_x) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
안면도	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	10.6
	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	10.1
	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	8.5
	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	7.4
	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	8.3
	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	7.8
	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	7.6
	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	8.8
	2012	8.4	8.8	5.8	4.4	7.5	5.4	5.8	8.2	4.9	5.5	8.7	11.4	7.1
	2013	7.5	6.7	4.9	4.6	7.6	7.1	3.7	2.5	5.5	7.1	7.4	11.2	6.3
	2014	7.8	12.6	7.5	5.6	-	1.7	1.9	2.1	2.2	3.5	6.3	6.7	5.3
	2015	7.3	5.5	4.7	4.0	3.2	3.8	8.8	4.2	2.8	2.5	2.9	4.2	4.5
고산	2012	-	-	-	-	-	3.5	2.5	2.4	3.1	3.4	3.6	3.3	3.1
	2013	3.3	2.9	4.0	3.5	4.1	5.0	1.6	2.3	4.9	3.2	3.5	4.4	3.5
	*2012년 6월부터 관측시작	2014	3.7	3.9	3.4	3.7	3.3	2.8	2.8	2.9	4	3.8	3	3.4
	2015	3.9	3.3	5.2	4.5	4.4	3.3	3.4	-	4.1	4.7	4	4.2	4.1

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 이산화황(SO₂) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
안면도	2004	5.2	4.3	3.7	1.4	1.4	1.0	-	0.6	0.7	1.5	2.5	2.1	2.2
	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	2.9
	2006	4.8	3.9	4.4	0.9	1.6	0.8	-	2.2	2.3	2.8	3.9	6.0	3.1
	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	3.3
	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	3.3
	2009	3.9	3.9	2.6	3.7	2.5	1.5	1.1	1.5	2.3	2.8	1.9	2.3	2.5
	2010	4.7	2.9	2.0	2.2	2.7	1.7	1.0	0.9	1.7	2.4	3.3	4.0	2.5
	2011	5.2	5.6	3.1	3.2	3.7	1.5	0.9	1.3	2.1	3.0	2.9	4.5	3.1
	2012	7.5	3.6	2.0	1.4	2.0	1.4	1.2	1.3	1.3	1.7	3.1	3.5	2.5
	2013	5.8	4.0	2.6	2.4	2.2	2.0	0.9	1.0	1.6	1.4	1.9	4.0	2.5
	2014	4.5	4.2	1.6	1.6	1.5	0.6	0.5	0.5	1.2	1.1	1.2	1.9	1.7
	2015	2.4	1.4	1.7	1.5	1.1	1.2	0.5	0.9	0.7	1.1	1.4	2.4	1.4
고산	2012*	-	-	-	-	-	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.8	0.6	0.5
	2013	1.3	0.8	0.5	0.4	0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	0.5	0.5	1.2	0.5
	*2012년 6월부터 관측시작	2014	1.4	0.7	0.7	0.5	0.6	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	0.8	0.5
	2015	0.2	-	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	-	0.3	0.6	0.3	0.7	0.5

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 에어로졸 평균자료

○ 안면도 PM10 질량농도 [단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$]

PM ₁₀	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	-	-	-	46 (86)	53 (94)	47 (84)	33 (92)	24 (96)	34 (93)	39 (96)	34 (97)	54 (97)	-
2004	51 (99)	54 (100)	80 (100)	55 (97)	64 (97)	52 (80)	-	28 (95)	-	49 (100)	45 (99)	42 (100)	49
2005	45 (97)	39 (97)	57 (99)	75 (98)	50 (99)	39 (99)	44 (86)	-	44 (90)	59 (80)	69 (100)	40 (99)	51
2006	48 (83)	59 (93)	71 (96)	101 (91)	51 (99)	41 (99)	24 (94)	34 (96)	35 (99)	53 (98)	44 (99)	47 (100)	50
2007	49 (100)	63 (96)	53 (99)	70 (95)	72 (92)	26 (91)	34 (96)	19 (91)	25 (93)	36 (100)	49 (100)	49 (100)	46
2008	44 (99)	46 (100)	55 (100)	54 (91)	42 (97)	30 (99)	25 (97)	29 (94)	36 (96)	46 (100)	-	42 (100)	41
2009	33 (100)	55 (99)	44 (99)	52 (100)	41 (99)	35 (99)	28 (98)	26 (99)	35 (87)	41 (100)	28 (98)	43 (99)	38
2010	34 (91)	28 (98)	44 (97)	36 (99)	39 (96)	31 (98)	24 (84)	26 (96)	29 (93)	37 (99)	63 (94)	53 (100)	37
2011	33 (100)	59 (99)	56 (100)	50 (99)	78 (96)	32 (96)	24 (95)	26 (97)	29 (96)	39 (100)	37 (98)	31 (99)	41
2012	49 (82)	37 (96)	38 (99)	39 (98)	46 (100)	28 (98)	21 (98)	24 (98)	34 (99)	30 (94)	41 (99)	34 (100)	35
2013	51 (100)	38 (100)	44 (100)	47 (99)	46 (99)	33 (99)	31 (98)	34 (96)	37 (99)	32 (96)	35 (100)	40 (84)	39
2014	45 (100)	49 (99)	43 (100)	44 (100)	61 (99)	39 (90)	34 (97)	25 (96)	26 (99)	29 (96)	32 (99)	30 (99)	38
2015	37 (99)	52 (98)	51 (98)	34 (97)	33 (99)	31 (100)	27 (99)	28 (99)	26 (99)	39 (100)	26 (95)	32 (99)	35

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 괄호 안의 숫자는 평균값 산출에 사용된 유효자료 비율(%)로, 유효한 시간평균값이 해당 월의 75% 이상일 때만 월평균 산출

○ 고산 PM10 질량농도 [단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$]

PM ₁₀	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2011	22 (100)	41 (100)	35 (100)	37 (100)	65 (97)	25 (97)	23 (98)	23 (98)	25 (93)	24 (100)	21 (98)	20 (97)	30
2012	28 (100)	23 (99)	31 (98)	30 (99)	-	-	17 (97)	17 (91)	21 (98)	25 (93)	30 (99)	19 (99)	25
2013	32 (100)	25 (98)	40 (99)	32 (99)	41 (99)	22 (97)	22 (98)	20 (98)	19 (97)	25 (98)	37 (96)	31 (99)	29
2014	41 (97)	-	37 (98)	33 (98)	52 (98)	35 (97)	24 (92)	23 (88)	24 (99)	23 (96)	24 (98)	29 (97)	32
2015	33 (97)	45 (100)	40 (99)	34 (98)	29 (99)	29 (98)	27 (97)	27 (99)	22 (98)	34 (99)	25 (93)	30 (99)	31

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 괄호 안의 숫자는 평균에 사용된 유효자료 비율로, 유효한 시간평균값이 해당 월의 75% 이상일 때만 월평균을 산출

○ 안면도 크기별 수농도(0.5-20 μm) [단위: $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$]

월	통계요소	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1월	자료비율	100%	100%	98%	97%	100%	×	100%	100%	96%
	평균	27.65	21.91	22.84	15.28	12.94	-	40.43	27.50	35.60
	표준편차	18.98	14.60	17.29	11.32	8.96	-	43.56	26.82	26.69
	최댓값	118.58	115.18	219.33	119.47	99.40	-	211.80	221.97	246.02
	최솟값	4.28	1.64	5.01	0.35	3.92	-	3.37	2.78	5.68
2월	자료비율	71%	99%	72%	100%	99%	46%	100%	90%	100%
	평균	32.95	22.27	51.08	14.76	35.19	15.63	26.60	39.81	39.50
	표준편차	25.37	15.31	53.48	10.13	26.80	11.72	21.48	38.20	47.44
	최댓값	151.33	109.51	452.24	68.90	120.86	62.32	169.69	196.59	446.58
	최솟값	4.30	1.90	5.80	0.47	0.80	4.19	0.56	0.60	1.39
3월	자료비율	100%	100%	94%	100%	98%	95%	100%	100%	99%
	평균	29.01	32.35	26.56	21.46	28.55	15.64	29.30	33.80	42.46
	표준편차	27.15	17.77	21.30	18.68	39.75	9.83	29.38	23.90	37.72
	최댓값	216.05	97.47	144.85	179.02	368.99	71.87	200.70	168.44	276.06
	최솟값	2.22	4.05	1.65	0.71	3.70	1.08	1.80	0.67	6.20
4월	자료비율	55%	100%	86%	100%	100%	98%	100%	100%	100%
	평균	43.41	27.33	30.13	17.13	20.90	19.06	31.06	38.07	32.31
	표준편차	65.03	12.13	22.29	9.92	12.99	18.13	22.61	28.30	22.77
	최댓값	538.61	81.21	97.10	66.23	76.93	275.94	122.58	155.96	147.53
	최솟값	1.21	2.11	1.55	1.19	0.48	0.92	0.34	2.36	1.16
5월	자료비율	×	100%	0%	100%	99%	100%	100%	100%	100%
	평균	-	22.04	-	14.39	29.45	31.75	31.06	45.64	32.06
	표준편차	-	20.67	-	11.39	42.32	26.01	22.61	34.49	24.09
	최댓값	-	166.56	-	70.40	280.65	143.84	122.58	314.47	169.39
	최솟값	-	0.91	-	0.78	0.57	3.56	0.34	0.50	1.32
6월	자료비율	67%	100%	0%	95%	100%	100%	8%	100%	100%
	평균	26.35	23.30	-	18.57	13.32	11.65	-	45.81	41.89
	표준편차	25.24	19.53	-	26.32	13.60	7.71	-	36.17	30.50
	최댓값	160.71	113.09	-	191.42	85.28	47.50	-	268.15	169.46
	최솟값	0.84	1.15	-	1.00	0.98	1.04	-	2.22	0.91

월	통계요소	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
7월	자료비율	100%	100%	82%	100%	100%	95%	24%	93%	100%
	평균	54.17	25.31	15.98	12.36	11.57	16.06	-	36.19	37.07
	표준편차	59.03	23.87	12.16	9.80	10.54	13.37	-	36.55	48.92
	최댓값	475.85	347.98	62.78	64.07	98.19	94.83	-	400.83	328.44
	최솟값	1.39	0.81	0.93	1.50	0.69	0.87	-	1.33	0.73
8월	자료비율	97%	100%	100%	99%	100%	100%	97%	96%	98%
	평균	27.46	23.29	13.53	12.66	13.64	13.41	30.48	18.52	41.00
	표준편차	25.06	15.96	12.75	10.23	11.68	11.52	25.09	21.59	42.03
	최댓값	143.26	87.02	147.00	56.92	63.01	63.46	140.14	132.26	253.89
	최솟값	1.28	1.38	1.10	1.60	1.69	0.57	3.04	0.28	1.05
9월	자료비율	95%	100%	74%	99%	97%	100%	98%	99%	72%
	평균	15.91	26.21	13.35	9.18	10.20	16.34	21.20	16.31	13.58
	표준편차	21.20	15.08	10.04	8.67	9.18	20.25	20.36	13.15	11.04
	최댓값	138.80	94.35	58.62	70.14	118.89	114.76	127.90	105.57	59.61
	최솟값	0.66	1.71	1.29	0.49	0.65	0.47	2.21	0.81	1.80
10월	자료비율	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	95%	30%
	평균	18.03	36.01	12.58	10.49	14.13	10.14	14.76	23.86	35.21
	표준편차	15.85	34.94	9.54	7.72	9.87	5.91	12.13	100.43	30.95
	최댓값	109.96	189.16	77.69	58.47	57.77	53.62	129.42	2010.16	211.13
	최솟값	2.44	3.84	1.77	0.78	2.90	2.36	1.30	1.28	6.03
11월	자료비율	100%	100%	100%	100%	99%	95%	97%	95%	89%
	평균	26.60	23.82	11.60	19.28	17.39	18.51	25.12	28.32	36.38
	표준편차	22.12	25.15	12.42	32.63	14.83	19.92	22.45	29.77	31.31
	최댓값	164.16	177.96	118.85	465.86	85.01	130.13	149.96	456.87	166.23
	최솟값	4.74	1.70	0.55	2.25	0.65	0.57	2.40	4.87	2.36
12월	자료비율	100%	100%	100%	97%	65%	96%	100%	98%	100%
	평균	32.99	25.80	20.22	20.35	11.35	20.09	23.85	27.18	50.85
	표준편차	30.88	26.59	30.71	22.58	8.75	19.16	20.55	32.68	53.28
	최댓값	186.91	192.91	419.82	194.96	91.88	340.48	149.28	281.89	907.15
	최솟값	5.08	1.93	1.38	1.98	0.89	2.13	4.01	3.11	3.76

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산 크기별 수농도(0.5~20 μm) [단위: $\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$]

월	통계요소	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1월	자료비율	×	100%	100%	×	100%	0%	100%
	평균	-	28.68	11.59	-	20.18	-	23.32
	표준편차	-	25.97	11.64	-	21.54	-	21.00
	최댓값	-	154.07	134.47	-	135.18	-	144.76
	최솟값	-	3.68	2.73	-	1.74	-	1.91
2월	자료비율	×	99%	99%	50%	100%	67%	99%
	평균	-	18.56	28.89	12.80	17.47	28.94	28.51
	표준편차	-	14.90	22.91	10.89	18.20	27.27	32.78
	최댓값	-	107.13	148.73	67.89	142.49	126.63	240.19
	최솟값	-	0.73	1.35	0.48	0.55	1.33	1.40
3월	자료비율	×	99%	100%	100%	100%	86%	99%
	평균	-	39.13	24.22	19.19	39.67	28.50	24.94
	표준편차	-	121.37	14.87	16.00	35.82	22.70	26.22
	최댓값	-	1879.02	166.68	119.18	218.64	164.38	171.18
	최솟값	-	0.57	1.88	0.21	2.64	1.68	1.24
4월	자료비율	×	99%	97%	98%	100%	90%	97%
	평균	-	23.44	26.03	19.22	25.36	24.87	20.52
	표준편차	-	17.33	15.95	13.58	15.86	10.74	14.29
	최댓값	-	139.65	104.78	96.80	120.56	67.02	81.82
	최솟값	-	0.27	0.65	0.27	1.78	5.24	0.34
5월	자료비율	×	99%	98%	100%	100%	91%	100%
	평균	-	32.74	47.50	20.20	33.03	29.99	16.59
	표준편차	-	24.93	93.49	15.03	21.48	25.33	11.86
	최댓값	-	201.21	637.68	80.14	98.27	155.06	76.63
	최솟값	-	0.58	0.19	0.69	0.14	1.47	0.76
6월	자료비율	×	100%	99%	100%	100%	97%	84%
	평균	-	27.03	23.40	11.32	15.68	31.61	20.71
	표준편차	-	22.98	20.15	6.76	9.30	21.68	18.14
	최댓값	-	124.92	140.12	36.30	51.03	120.29	91.68
	최솟값	-	0.62	0.45	0.16	0.27	1.50	0.00

월	통계요소	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
7월	자료비율	×	99%	99%	99%	99%	96%	×
	평균	-	33.82	18.47	13.98	26.06	21.01	-
	표준편차	-	30.53	10.78	11.01	14.69	15.86	-
	최댓값	-	341.93	63.34	96.62	107.16	103.87	-
	최솟값	-	1.97	0.52	0.21	1.45	0.58	-
8월	자료비율	×	99%	98%	100%	100%	98%	×
	평균	-	32.40	14.16	13.00	17.62	20.77	-
	표준편차	-	27.58	8.83	8.48	11.53	16.81	-
	최댓값	-	132.08	58.81	62.32	91.24	110.14	-
	최솟값	-	0.91	0.30	0.92	1.66	1.43	-
9월	자료비율	69%	21%	100%	100%	11%	89%	×
	평균	21.06	-	12.40	9.65	-	17.38	-
	표준편차	12.85	-	7.73	4.97	-	11.12	-
	최댓값	99.14	-	47.38	30.87	-	112.56	-
	최솟값	1.09	-	1.18	0.59	-	2.14	-
10월	자료비율	99%	37%	100%	100%	30%	95%	×
	평균	32.80	17.30	13.25	11.94	17.79	15.07	-
	표준편차	25.93	11.84	11.79	10.51	8.54	7.81	-
	최댓값	210.04	63.48	124.86	103.48	59.85	83.96	-
	최솟값	1.50	1.16	1.00	2.56	7.75	3.26	-
11월	자료비율	100%	100%	100%	96%	99%	99%	×
	평균	17.77	38.20	12.73	16.03	27.64	15.38	-
	표준편차	16.12	69.07	15.57	14.96	43.39	9.02	-
	최댓값	101.06	545.95	220.05	106.04	520.73	79.23	-
	최솟값	1.52	4.34	0.53	0.20	3.02	1.77	-
12월	자료비율	97%	100%	65%	96%	73%	92%	71%
	평균	29.01	24.39	9.23	10.14	13.87	20.59	15.78
	표준편차	37.81	27.13	6.71	10.83	13.36	17.02	14.39
	최댓값	332.19	228.95	52.88	137.74	87.29	113.52	98.39
	최솟값	1.41	0.40	1.09	0.33	1.90	2.20	0.91

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 안면도 미세먼지 크기별 수농도(0.01~0.5 μm) [단위: 개 cm^{-3}]

월	통계요소	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1월	자료비율	51%	91%	100%	81%	100%	97%	100%	21%	100%	99%	98%
	평균	6113	4358	4308	3181	4237	3858	4048	-	4677	4384	4545
	표준편차	2857	1956	2237	1677	2211	1607	1773	-	2037	1806	2306
	최댓값	17745	17293	15449	9922	30838	11420	12604	-	11887	12658	14978
	최솟값	1385	775	675	36	841	826	674	-	1246	1053	860
2월	자료비율	100%	77%	100%	98%	100%	100%	100%	91%	100%	100%	96%
	평균	6406	4028	3938	3459	3064	4098	4020	4405	4905	4485	3920
	표준편차	2935	1890	1714	1694	1401	1686	1779	1459	2021	2035	1983
	최댓값	28277	12348	12113	10688	10441	10964	14699	10053	14762	12225	14779
	최솟값	458	1071	874	534	495	830	659	1555	1184	833	154
3월	자료비율	100%	91%	98%	81%	96%	100%	100%	100%	90%	100%	98%
	평균	6028	4385	3768	3435	3360	3703	4645	3790	3988	3924	2135
	표준편차	3043	2163	2650	1529	1805	1518	1926	1640	1853	1562	2189
	최댓값	46021	23451	51614	9570	11539	9149	17607	11909	12857	13384	11067
	최솟값	1340	875	560	907	689	839	1314	412	745	980	41
4월	자료비율	100%	100%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	97%	98%
	평균	5408	3914	3511	3591	3564	4194	3581	4108	4788	3450	3825
	표준편차	2934	1993	1932	1608	1334	1581	1287	3206	1978	1483	1617
	최댓값	27274	13611	11919	21080	10277	11597	9535	41252	17071	13623	12590
	최솟값	1187	1152	689	821	557	922	1016	662	1149	568	921
5월	자료비율	76%	58%	100%	100%	28%	100%	100%	100%	100%	100%	99%
	평균	5571	3992	4841	3563	-	3858	4154	3511	3805	3822	4493
	표준편차	2360	2317	2091	1909	-	1692	2351	2042	1829	2062	2244
	최댓값	22162	12827	15041	13607	-	15367	17482	15626	12452	18091	19451
	최솟값	1689	471	1400	858	-	596	829	879	843	1021	842
6월	자료비율	96%	48%	100%	100%	51%	100%	100%	93%	100%	100%	100%
	평균	3807	3441	4635	3882	2013	3466	2528	2899	4367	3375	4983
	표준편차	1738	1544	2719	2570	1012	1857	1445	1953	1845	1744	2836
	최댓값	15617	14494	26309	19133	7840	20963	11962	16406	14829	13851	21250
	최솟값	953	805	1058	628	494	347	630	593	1081	986	524

월	통계요소	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
7월	자료비율	94%	75%	92%	100%	77%	98%	100%	30%	97%	100%	100%
	평균	4373	3390	3724	2342	2043	2722	2974	2651	2484	3694	4820
	표준편차	2333	2214	2566	1437	864	1474	2100	1171	2029	2620	2839
	최댓값	31804	17900	27939	9808	5484	13646	20937	7726	12246	24001	19336
	최솟값	789	681	760	201	347	490	387	332	302	630	340
8월	자료비율	53%	76%	70%	79%	96%	100%	100%	88%	81%	99%	100%
	평균	4885	3182	3478	2316	3893	2566	3264	4209	3259	1649	3859
	표준편차	8487	3227	2801	2521	2537	1722	1498	3418	2431	1570	2806
	최댓값	154125	55529	26143	16471	16472	17572	10670	32464	20958	12716	23900
	최솟값	673	465	740	230	858	74	809	305	312	227	386
9월	자료비율	13%	70%	65%	100%	100%	99%	100%	59%	100%	98%	100%
	평균	-	3131	3985	5472	4270	3494	3413	4302	5148	4433	4742
	표준편차	-	1852	2209	2829	2348	2501	2211	2292	3661	2956	2913
	최댓값	-	16055	16216	21387	20129	19736	17423	17293	34550	26238	20063
	최솟값	-	569	912	889	594	368	559	515	544	439	1020
10월	자료비율	69%	99%	97%	97%	100%	100%	79%	×	100%	21%	94%
	평균	4609	2410	4834	4762	3595	3837	3402	-	4870	-	4785
	표준편차	2640	1515	3604	2697	1824	2389	1997	-	2883	-	2558
	최댓값	14965	21286	33326	22421	14613	39727	14305	-	20967	-	19386
	최솟값	914	601	538	1146	696	417	547	-	1076	-	1107
11월	자료비율	95%	100%	32%	92%	96%	100%	23%	89%	100%	×	100%
	평균	5136	4503	3751	4138	2429	3240	-	4345	4177	-	3283
	표준편차	2414	2839	2130	2054	1796	1635	-	2007	2315	-	1714
	최댓값	15393	22630	13729	16265	26757	10763	-	14679	16403	-	14414
	최솟값	1044	522	697	1143	337	877	-	738	437	-	647
12월	자료비율	100%	99%	85%	97%	100%	99%	97%	96%	100%	52%	100%
	평균	3848	3529	3008	4285	3315	3039	3467	5255	3646	4483	3878
	표준편차	1684	1568	1754	1818	1464	1693	1667	2461	1861	2024	1709
	최댓값	10437	12189	12462	12108	7628	10654	10129	15241	13174	11602	11676
	최솟값	1037	841	346	976	587	497	681	1258	611	938	877

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산 응결핵 수농도(0.01~3 μm) [단위: 개 cm-3]

월	통계요소	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1월	자료비율	×	100%	100%	100%	84%	100%
	평균	-	5281	4332	2402	2933	1815
	표준편차	-	210	187	106	110	89
	최댓값	-	5816	4810	2677	3234	2060
	최솟값	-	4817	3936	2182	2701	1632
2월	자료비율	×	100%	100%	100%	100%	100%
	평균	-	7684	5164	3145	2240	1716
	표준편차	-	270	182	109	85	80
	최댓값	-	8387	5640	3430	2465	1951
	최솟값	-	7068	4747	2911	2051	1555
3월	자료비율	×	100%	100%	100%	99%	100%
	평균	-	9521	6292	3115	2651	2196
	표준편차	-	283	218	135	106	161
	최댓값	-	10252	6872	3475	2934	2707
	최솟값	-	8884	5814	2849	2429	1941
4월	자료비율	×	100%	100%	100%	96%	100%
	평균	-	7056	5250	3135	3016	2255
	표준편차	-	253	187	125	165	109
	최댓값	-	7697	5721	3489	3440	2549
	최솟값	-	6512	4852	2885	2695	2040
5월	자료비율	×	100%	100%	100%	100%	100%
	평균	-	7903	3552	2697	3781	2833
	표준편차	-	320	136	104	206	141
	최댓값	-	8662	3905	2957	4323	3191
	최솟값	-	7236	3269	2470	3400	2553
6월	자료비율	×	100%	100%	100%	100%	99%
	평균	-	6565	3008	2901	2790	2318
	표준편차	-	300	216	115	145	139
	최댓값	-	7342	3538	3199	3162	2707
	최솟값	-	5970	2630	2662	2508	2071

월	통계요소	2010	2011	2012	2013	2014	2015
7월	자료비율	×	100%	100%	99%	99%	99%
	평균	-	6307	3277	2609	3154	2892
	표준편차	-	432	226	146	284	180
	최댓값	-	7415	3783	2987	4002	3452
	최솟값	-	5522	2837	2331	2682	2589
8월	자료비율	59%	100%	100%	100%	100%	92%
	평균	6609	9532	3572	2849	2960	2283
	표준편차	448	482	270	171	174	220
	최댓값	7571	10744	4208	3279	3440	3036
	최솟값	5795	8633	3088	2530	2639	1973
9월	자료비율	100%	100%	100%	11%	97%	52%
	평균	10869	11799	4771	-	3305	2486
	표준편차	499	447	216	-	208	219
	최댓값	12084	12884	5310	-	3933	3183
	최솟값	9905	10877	4359	-	2950	2153
10월	자료비율	100%	100%	100%	30%	100%	×
	평균	11469	11211	4706	3512	2916	-
	표준편차	597	410	150	110	117	-
	최댓값	13037	12340	5101	3802	3215	-
	최솟값	10432	10425	4390	3257	2661	-
11월	자료비율	100%	100%	99%	100%	100%	×
	평균	11032	8251	3434	3453	2470	-
	표준편차	450	309	133	147	117	-
	최댓값	12138	8998	3794	3833	2796	-
	최솟값	10127	7595	3174	3149	2232	-
12월	자료비율	100%	100%	100%	96%	100%	×
	평균	7503	5480	2446	2916	1896	-
	표준편차	388	229	108	126	83	-
	최댓값	8466	6047	2731	3300	2118	-
	최솟값	6782	4999	2224	2662	1715	-

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 안면도 광산란계수 [단위: M/m]

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	자료비율(%)	99.7	100.0	96.4	100.0	99.5	100.0	98.3	75.3	49.0	96.1	99.0	99.2	92.7
	평균	132.4	190.9	200.6	128.0	221.7	212.3	170.2	132.7	191.6	108.8	100.2	123.6	158.4
	표준편차	128.1	141.4	133.9	72.5	134.7	134.1	116.9	175.9	181.7	101.4	81.1	131.1	134.2
	최댓값	707.5	621.1	738.0	448.2	700.8	849.5	664.1	2234.0	1875.3	516.5	564.8	788.1	2234.0
	최솟값	3.8	15.9	13.4	7.4	3.6	18.2	6.9	4.5	12.9	4.5	5.2	16.9	3.6
2004	자료비율(%)	99.9	99.4	60.6	98.1	99.3	100.0	99.6	96.8	95.7	100.0	99.7	95.8	95.4
	평균	123.2	96.2	96.7	91.9	138.0	133.3	66.1	67.9	42.4	59.1	35.9	18.6	80.5
	표준편차	109.3	88.2	62.9	64.7	101.7	119.3	57.3	49.5	34.5	56.7	24.7	12.4	82.3
	최댓값	585.8	668.2	374.8	331.2	543.7	812.1	340.6	285.3	206.8	351.1	169.4	116.4	812.1
	최솟값	19.9	13.7	9.5	4.1	3.0	0.4	0.5	1.3	0.7	5.2	2.7	2.3	0.4
2005	자료비율(%)	65.5	99.6	99.6	99.4	98.9	100.0	99.9	64.0	24.4	99.2	94.0	100.0	87.0
	평균	90.2	89.5	121.9	115.5	122.5	196.8	276.1	130.5	-	123.3	95.4	70.1	130.7
	표준편차	124.5	78.6	91.4	75.8	84.4	139.6	204.7	108.7	-	160.2	93.7	62.3	131.3
	최댓값	636.0	379.8	546.6	469.8	561.4	793.1	922.9	549.8	-	805.8	822.1	337.1	922.9
	최솟값	1.9	4.8	6.7	3.1	5.8	13.7	2.5	5.5	-	9.1	12.5	14.0	1.9
2006	자료비율(%)	92.6	99.3	96.6	92.5	99.9	98.8	99.1	83.3	97.4	89.4	99.2	94.5	95.2
	평균	122.2	129.8	114.3	98.7	151.2	197.2	87.7	146.4	94.6	146.5	76.3	131.0	124.4
	표준편차	84.9	113.1	93.2	60.6	106.9	130.6	81.0	105.7	72.7	110.2	82.2	96.6	101.8
	최댓값	482.4	603.2	546.2	430.5	928.2	692.8	632.1	677.6	418.1	606.9	562.6	446.4	928.2
	최솟값	17.4	16.9	21.6	5.4	5.4	4.4	4.4	7.7	9.4	5.5	8.8	15.9	4.4
2007	자료비율(%)	95.3	85.7	78.9	96.0	96.2	35.3	14.4	10.6	62.6	78.8	91.1	82.5	68.8
	평균	142.1	158.6	120.5	135.4	122.8	85.9	-	-	54.2	101.1	107.3	121.4	117.0
	표준편차	95.6	157.0	95.3	93.7	81.1	79.5	-	-	65.4	112.6	110.3	102.3	106.1
	최댓값	572.2	1004.9	687.7	459.9	532.4	446.9	-	-	419.1	752.2	747.6	588.2	1004.9
	최솟값	20.0	9.2	1.0	1.3	8.5	1.0	-	-	2.2	13.4	14.1	12.8	0.8
2008	자료비율(%)	72.3	92.1	82.5	89.4	70.2	24.3	10.6	6.1	8.1	35.4	92.2	4.7	48.7
	평균	81.2	70.6	122.9	155.3	79.8	-	-	-	-	76.8	90.9	-	97.4
	표준편차	68.6	56.4	74.7	75.9	57.5	-	-	-	-	100.8	100.7	-	81.4
	최댓값	443.2	449.6	455.8	444.5	533.5	-	-	-	-	695.0	727.2	-	727.2
	최솟값	16.5	13.0	21.1	24.6	2.7	-	-	-	-	11.0	9.0	-	1.4

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	자료비율(%)	0.0	0.0	86.4	96.7	76.9	53.5	5.8	4.6	55.4	95.0	85.0	97.9	65.6
	평균	-	-	85.0	144.1	95.6	124.9	-	-	75.6	75.6	59.7	92.9	93.4
	표준편차	-	-	75.7	117.7	56.9	103.1	-	-	65.3	68.5	61.8	96.4	87.4
	최댓값	-	-	372.6	526.3	298.5	613.3	-	-	389.2	419.9	372.3	548.3	613.3
	최솟값	-	-	1.5	0.8	3.5	4.6	-	-	6.6	6.6	0.0	8.3	0.0
2010	자료비율(%)	91.1	72.2	42.6	61.4	71.1	48.6	48.5	25.9	52.4	94.0	98.5	93.0	66.6
	평균	84.9	69.1	74.8	77.4	62.0	98.4	58.4	-	59.7	83.6	132.9	91.1	83.6
	표준편차	64.3	53.6	54.1	56.9	45.6	110.4	54.2	-	55.7	64.0	164.4	108.5	90.2
	최댓값	297.0	429.1	435.5	261.9	254.1	737.6	270.5	-	262.1	378.7	786.4	736.7	786.4
	최솟값	1.1	0.6	0.8	0.8	0.5	0.1	4.8	-	1.9	6.9	12.1	13.4	0.1
2011	자료비율(%)	52.4	48.1	8.9	58.2	58.2	89.0	62.5	67.5	59.4	80.1	72.6	95.7	62.8
	평균	58.9	172.7	-	99.8	88.9	91.0	57.1	66.7	63.7	98.1	91.5	76.8	85.8
	표준편차	42.4	123.7	-	96.4	94.4	94.3	57.5	53.3	59.5	76.4	74.3	66.3	82.1
	최댓값	289.5	591.8	-	822.1	708.5	515.5	311.8	267.7	290.4	375.8	412.1	487.8	822.1
	최솟값	16.7	0.8	-	0.5	0.1	0.1	0.5	0.6	3.0	10.6	12.0	2.7	0.1
2012	자료비율(%)	100.0	100.0	97.3	55.0	6.9	47.9	0.0	0.0	13.2	11.4	60.4	84.0	57.5
	평균	134.9	97.3	94.7	62.9	-	87.1	-	-	-	-	31.6	87.7	91.6
	표준편차	107.6	93.6	69.0	47.9	-	64.0	-	-	-	-	41.9	68.7	85.5
	최댓값	596.2	537.3	401.0	268.7	-	475.4	-	-	-	-	305.0	378.1	857.3
	최솟값	12.9	15.4	14.5	0.6	-	1.4	-	-	-	-	1.0	5.9	0.6
2013	자료비율(%)	99.7	100.0	93.6	100.0	100.0	99.9	94.8	98.0	99.9	99.9	99.3	99.7	98.7
	평균	115.9	84.3	82.2	84.0	101.2	101.5	100.5	95.0	73.9	60.7	86.7	90.6	89.8
	표준편차	101.5	62.8	76.9	63.9	65.9	62.3	105.8	68.9	68.4	53.7	92.9	76.8	77.9
	최댓값	457.1	444.6	486.4	409.9	367.6	336.3	441.0	335.1	408.3	468.8	545.5	479.3	545.5
	최솟값	11.8	3.2	10.9	11.7	1.7	8.6	2.6	8.1	9.1	6.7	8.3	11.1	1.7
2014	자료비율(%)	99.3	100.0	100.0	99.9	100.0	92.2	99.3	99.5	99.2	21.5	0.0	0.0	90.9
	평균	104.8	140.4	103.2	122.7	117.7	131.6	102.0	83.7	69.6	-	-	-	106.5
	표준편차	93.7	131.0	69.2	89.2	67.5	89.9	92.7	83.8	53.2	-	-	-	89.4
	최댓값	577.0	629.7	363.9	485.2	362.9	698.9	463.6	447.7	349.6	-	-	-	698.9
	최솟값	6.8	9.3	11.9	8.8	4.0	9.6	3.9	3.3	4.4	-	-	-	3.3
2015	자료비율(%)	68.0	78.4	73.7	98.3	99.7	99.3	97.5	99.5	99.7	100.0	99.6	80.7	91.2
	평균	96.5	114.4	140.1	90.3	83.9	111.7	112.0	110.6	65.5	100.5	101.0	99.4	101.2
	표준편차	88.4	83.5	111.5	63.3	60.8	72.8	122.2	97.1	57.6	120.0	106.2	82.1	93.0
	최댓값	579.1	417.1	694.2	404.6	339.9	451.6	728.2	574.4	318.1	644.4	685.9	364.9	728.2
	최솟값	13.8	14.0	14.9	9.0	8.1	2.7	2.9	3.2	7.7	6.4	3.5	10.0	2.7

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 안면도 분동 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 ~ 2015년)

○ 안면도 광흡수계수 [단위: M/m]

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2001	자료비율(%)	0.0	0.0	0.0	94.3	100.0	98.9	80.5	100.0	99.6	97.3	80.6	98.1	71.2
	평균	-	-	-	10.0	9.0	9.5	16.0	9.9	9.7	18.0	13.6	9.9	11.6
	표준편차	-	-	-	5.3	4.2	5.6	34.5	6.1	6.5	14.3	11.8	7.3	13.6
	최댓값	-	-	-	46.0	35.3	50.6	397.6	50.7	42.7	81.8	92.2	63.4	397.6
	최솟값	-	-	-	2.7	0.6	1.2	0.5	1.2	1.6	0.1	1.3	1.7	0.5
2002	자료비율(%)	97.3	54.6	8.1	96.7	96.9	97.2	97.0	83.6	77.8	15.1	10.4	0.0	61.2
	평균	16.2	11.6	-	15.2	13.8	14.3	9.3	9.6	1.4	-	-	-	11.5
	표준편차	17.2	5.6	-	9.8	9.5	9.8	6.3	10.5	0.6	-	-	-	11.1
	최댓값	173.6	34.4	-	57.2	60.0	56.0	82.9	163.1	4.6	-	-	-	173.6
	최솟값	2.1	2.3	-	0.3	0.9	0.5	0.8	0.9	0.0	-	-	-	0.0
2003	자료비율(%)	75.3	98.2	98.5	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.2
	평균	15.7	18.7	18.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.9
	표준편차	13.3	12.2	9.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.7
	최댓값	75.3	67.7	66.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75.3
	최솟값	4.4	5.7	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.5
2004	자료비율(%)	80.8	83.6	60.8	96.7	93.4	89.3	88.2	50.4	93.6	90.2	80.0	78.0	82.0
	평균	17.0	9.0	9.4	9.6	13.3	13.5	6.3	12.6	15.4	15.3	12.6	11.8	12.2
	표준편차	15.3	6.0	6.0	5.8	8.1	8.0	4.5	6.4	16.1	12.7	9.5	8.2	10.3
	최댓값	99.0	51.6	39.2	47.1	40.1	50.7	30.9	44.1	196.1	105.5	62.5	66.1	196.1
	최솟값	2.9	1.8	1.5	0.7	0.8	0.5	0.5	2.0	0.4	1.3	1.0	2.3	0.4
2005	자료비율(%)	85.5	75.2	64.9	83.8	24.1	0.6	0.0	35.6	0.0	0.0	0.0	56.3	35.3
	평균	10.7	7.4	8.7	9.9	-	-	-	4.7	-	-	-	7.5	8.6
	표준편차	9.3	6.3	5.6	6.8	-	-	-	5.7	-	-	-	5.6	7.2
	최댓값	59.7	40.4	28.8	39.2	-	-	-	60.5	-	-	-	26.6	86.4
	최솟값	1.3	0.3	1.5	0.6	-	-	-	0.6	-	-	-	1.2	0.3
2006	자료비율(%)	95.3	83.9	74.2	96.5	99.9	92.1	95.7	99.6	96.9	88.6	72.9	17.5	84.4
	평균	10.8	17.0	10.2	8.9	11.3	9.0	4.8	8.5	11.0	11.8	8.3	12.5	10.1
	표준편차	6.7	14.7	8.2	5.5	6.3	5.8	3.6	5.5	6.7	6.1	7.9	10.5	7.8
	최댓값	33.8	140.5	41.4	34.6	42.1	35.9	21.3	73.6	57.4	40.5	44.7	42.2	140.5
	최솟값	1.5	1.6	1.5	1.4	0.8	0.9	0.6	0.6	1.2	1.9	0.9	1.9	0.6
2007	자료비율(%)	99.9	100.0	92.2	97.9	60.5	1.8	81.9	92.5	87.2	86.8	98.1	99.5	83.2
	평균	13.8	12.9	8.7	10.0	7.5	-	7.8	4.1	9.0	10.3	10.9	13.3	10.0
	표준편차	8.9	9.7	6.8	6.3	4.8	-	5.8	3.0	8.3	8.0	8.6	9.7	8.1
	최댓값	59.0	67.9	44.7	56.0	26.1	-	38.2	25.9	48.1	43.9	50.8	77.8	77.8
	최솟값	2.0	1.0	0.7	0.8	0.8	-	1.2	0.9	1.0	1.8	1.6	1.5	0.7
2008	자료수(%)	99.9	98.3	99.9	100.0	99.6	98.9	98.7	96.0	96.7	89.7	90.3	96.0	97.0
	평균	8.6	6.6	10.6	13.9	8.4	8.0	6.2	8.3	10.2	11.5	9.4	4.4	8.9
	표준편차	6.4	4.2	5.8	6.1	6.0	6.0	3.6	6.8	6.6	10.0	7.5	4.2	6.7
	최댓값	41.6	33.6	38.7	35.6	42.0	46.5	25.7	98.6	43.5	47.0	48.7	35.5	98.6
	최솟값	1.9	2.2	2.0	2.8	1.3	1.1	0.9	1.4	1.0	0.8	0.9	0.6	0.6

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	자료비율(%)	96.6	95.2	98.1	96.4	99.7	96.5	97.5	96.6	94.9	94.0	96.3	99.2	96.8
	평균	4.7	3.1	7.0	11.8	8.8	9.6	7.8	6.9	12.2	9.1	7.2	10.8	8.3
	표준편차	4.5	3.4	5.8	8.6	5.4	6.9	4.3	3.9	9.1	5.9	5.7	9.3	6.9
	최댓값	42.7	32.2	34.9	39.7	34.5	57.7	23.7	33.4	56.8	33.3	28.2	52.7	57.7
	최솟값	0.2	0.2	0.9	0.8	0.7	0.7	0.7	0.9	0.7	1.0	0.6	1.2	0.2
2010	자료비율(%)	98.7	99.4	99.2	6.0	0.0	0.0	16.4	38.4	97.9	99.1	99.6	97.0	62.5
	평균	9.1	9.1	7.4	-	-	-	-	5.7	7.1	9.4	11.2	8.6	8.6
	표준편차	5.9	7.1	4.5	-	-	-	-	2.6	4.7	6.6	10.3	8.6	7.0
	최댓값	35.3	41.5	36.4	-	-	-	-	21.4	30.6	33.4	54.7	59.4	59.4
	최솟값	1.4	1.0	1.3	-	-	-	-	1.1	0.5	0.9	1.2	0.9	0.5
2011	자료비율(%)	98.9	97.6	95.0	98.6	97.5	98.2	97.5	98.9	98.8	99.2	98.1	99.6	98.2
	평균	5.5	12.0	5.7	7.4	8.0	8.6	6.1	7.3	8.8	12.7	11.5	9.0	8.5
	표준편차	3.6	8.1	3.7	3.9	16.0	6.3	3.8	4.3	5.6	8.1	8.1	6.0	7.6
	최댓값	28.1	40.5	25.8	36.9	409.7	48.5	21.8	29.6	33.4	41.6	48.3	40.1	409.7
	최솟값	1.4	0.4	1.1	0.4	0.3	1.5	1.0	1.4	1.1	0.5	1.4	1.7	0.3
2012	자료비율(%)	96.5	99.7	97.6	76.8	0.0	0.0	0.0	15.3	87.6	33.9	69.2	70.8	53.7
	평균	13.2	10.0	8.6	7.0	-	-	-	-	11.7	9.2	5.4	13.0	10.0
	표준편차	8.4	7.1	6.0	4.7	-	-	-	-	29.2	5.3	5.6	9.3	12.7
	최댓값	43.4	39.0	37.5	33.3	-	-	-	-	453.2	30.1	32.7	47.1	453.2
	최솟값	2.7	1.8	1.0	0.4	-	-	-	-	1.1	1.9	0.1	0.4	0.1
2013	자료비율(%)	99.5	95.5	99.7	93.9	99.3	99.3	96.8	94.5	97.8	97.6	98.5	84.4	96.4
	평균	14.8	10.9	11.1	10.5	11.0	9.3	5.6	7.2	9.7	10.1	9.8	12.1	10.2
	표준편차	10.9	6.5	9.3	6.5	5.5	3.9	4.4	5.2	6.0	6.3	7.4	9.9	7.4
	최댓값	53.1	58.5	62.8	49.6	30.3	24.7	22.9	24.5	36.8	36.6	49.3	60.7	62.8
	최솟값	1.7	1.4	1.9	1.9	2.4	2.0	1.0	0.3	1.9	1.5	1.3	2.2	0.3
2014	자료비율(%)	99.2	99.6	99.5	98.5	99.3	98.8	98.9	98.8	98.9	98.8	98.6	99.1	99.0
	평균	12.5	14.1	11.7	13.2	11.6	8.4	6.6	7.3	7.6	8.1	8.8	7.7	9.8
	표준편차	8.7	9.6	6.1	7.8	6.8	5.0	5.5	24.9	4.2	5.7	5.8	6.7	10.0
	최댓값	55.1	46.7	35.2	49.0	44.2	32.6	38.3	673.5	26.2	46.1	38.9	49.2	673.5
	최솟값	1.3	1.0	1.5	1.9	0.9	1.2	0.6	0.7	0.9	1.6	1.0	1.1	0.6
2015	자료비율(%)	99.3	99.4	98.1	97.5	96.8	99.0	97.0	98.4	55.0	0.0	86.7	97.6	85.3
	평균	10.3	10.2	10.8	7.7	7.0	6.9	6.3	5.8	4.9	-	12.0	12.4	8.7
	표준편차	7.6	6.8	7.4	4.5	3.8	3.2	4.7	3.8	2.7	-	6.5	7.3	6.2
	최댓값	50.3	33.9	45.6	22.8	26.4	20.3	42.3	23.7	18.5	-	44.0	38.1	50.3
	최솟값	1.3	1.9	1.9	1.0	1.8	1.3	0.8	0.9	1.6	-	4.2	1.8	0.8

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 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 ~ 2015년)

○ 안면도 응스트롬 지수

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	자료비율(%)	99.7	100.0	96.4	100.0	99.5	100.0	98.3	75.3	49.0	96.1	99.0	99.2	92.7
	평균	1.44	1.52	1.52	1.55	1.57	1.36	1.21	1.45	1.96	1.58	1.58	1.36	1.49
	표준편차	0.29	0.30	0.28	0.22	0.22	0.33	0.41	0.77	0.95	0.27	0.36	0.31	0.42
	최댓값	2.08	2.54	2.24	2.16	2.44	3.11	4.40	9.14	9.70	2.36	2.17	2.00	9.70
	최솟값	0.68	0.79	0.24	0.61	0.37	0.39	0.17	0.19	0.33	0.63	0.32	0.19	0.17
2004	자료비율(%)	99.9	99.4	60.6	98.1	99.3	100.0	99.6	96.8	95.7	100.0	99.7	95.8	95.4
	평균	1.42	1.32	1.27	1.57	1.72	1.84	1.82	2.00	2.03	2.00	2.03	1.91	1.76
	표준편차	0.28	0.29	0.48	0.32	0.39	0.34	0.43	0.27	0.26	0.22	0.22	0.24	0.41
	최댓값	1.94	2.23	2.44	2.68	2.97	3.06	5.08	2.77	3.82	2.49	2.77	2.78	5.08
	최솟값	0.56	0.43	0.04	0.05	0.08	1.12	0.37	1.33	0.29	1.17	0.71	0.86	0.04
2005	자료비율(%)	65.5	99.6	99.6	99.4	98.9	100.0	99.9	64.0	24.4	99.2	94.0	100.0	87.0
	평균	1.64	1.38	1.38	1.33	1.65	1.44	1.31	1.36	-	1.53	1.41	1.43	1.45
	표준편차	0.39	0.31	0.35	0.40	0.38	0.30	0.32	0.30	-	0.29	0.34	0.26	0.35
	최댓값	2.59	2.30	2.79	2.33	2.58	2.42	2.38	2.02	-	2.15	2.05	2.04	2.79
	최솟값	0.68	0.64	0.17	0.05	0.05	0.27	0.40	0.13	-	0.40	0.09	0.49	0.05
2006	자료비율(%)	92.6	99.3	96.6	92.5	99.9	98.8	99.1	83.3	97.4	89.4	99.2	94.5	95.2
	평균	1.32	1.22	1.27	1.18	1.61	1.41	1.28	1.55	1.68	1.38	1.37	1.40	1.39
	표준편차	0.23	0.35	0.34	0.39	0.33	0.30	0.37	0.26	0.21	0.22	0.34	0.24	0.34
	최댓값	2.01	1.93	2.10	2.14	2.29	2.34	2.34	2.28	2.15	1.85	2.34	1.92	2.34
	최솟값	0.71	0.05	0.09	0.02	0.74	0.44	0.12	0.18	0.57	0.61	0.20	0.70	0.02
2007	자료비율(%)	95.3	85.7	78.9	96.0	96.2	35.3	14.4	10.6	62.6	78.8	91.1	82.5	68.8
	평균	1.32	1.37	1.39	1.51	1.53	1.73	-	-	1.63	1.73	1.52	1.41	1.50
	표준편차	0.22	0.30	0.45	0.32	0.39	0.26	-	-	0.23	0.19	0.27	0.31	0.33
	최댓값	1.93	2.26	2.83	2.73	2.75	3.10	-	-	2.22	2.36	1.97	2.10	3.10
	최솟값	0.61	0.13	0.06	0.11	0.21	1.22	-	-	0.85	0.90	0.22	0.21	0.06
2008	자료비율(%)	72.3	92.1	82.5	89.4	70.2	24.3	10.6	6.1	8.1	35.4	92.2	4.7	48.7
	평균	1.41	1.41	1.52	1.61	1.68	-	-	-	-	1.78	1.77	-	1.58
	표준편차	0.25	0.26	0.25	0.19	0.30	-	-	-	-	0.32	0.28	-	0.30
	최댓값	2.29	2.26	2.66	2.20	2.88	-	-	-	-	2.80	2.55	-	2.92
	최솟값	0.47	0.32	0.70	0.78	0.52	-	-	-	-	0.76	0.60	-	0.27

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	자료비율(%)	0.0	0.0	86.4	96.7	76.9	53.5	5.8	4.6	55.4	95.0	85.0	97.9	65.6
	평균	-	-	1.48	1.72	1.69	1.49	-	-	1.82	1.55	1.50	1.31	1.56
	표준편차	-	-	0.38	0.23	0.37	0.28	-	-	0.27	0.41	0.25	0.30	0.36
	최댓값	-	-	2.98	2.99	2.99	2.27	-	-	3.29	2.76	4.35	2.16	4.35
	최솟값	-	-	0.15	1.08	0.36	0.30	-	-	0.50	0.21	0.25	0.22	0.11
2010	자료비율(%)	91.1	72.2	42.6	61.4	71.1	48.6	48.5	25.9	52.4	94.0	98.5	93.0	66.6
	평균	1.43	1.45	1.52	1.60	1.72	1.77	1.78	-	1.65	1.63	1.37	1.23	1.53
	표준편차	0.34	0.38	0.42	0.41	0.41	0.48	0.46	-	0.28	0.23	0.35	0.29	0.40
	최댓값	2.70	3.23	2.59	3.11	4.48	3.41	3.07	-	2.31	2.36	2.19	2.34	4.48
	최솟값	0.24	0.36	0.49	0.38	0.64	0.72	0.48	-	0.58	0.61	0.25	0.40	0.24
2011	자료비율(%)	52.4	48.1	8.9	58.2	58.2	89.0	62.5	67.5	59.4	80.1	72.6	95.7	62.8
	평균	1.31	1.48	-	1.66	1.65	1.71	1.89	1.79	1.74	1.67	1.56	1.44	1.63
	표준편차	0.19	0.37	-	0.47	0.47	0.53	0.52	0.43	0.28	0.27	0.25	0.25	0.41
	최댓값	1.96	3.45	-	3.94	3.85	4.67	4.95	3.81	2.77	2.26	2.44	2.57	4.95
	최솟값	0.59	0.86	-	0.40	0.12	0.63	0.22	0.75	0.90	0.60	0.75	0.75	0.12
2012	자료비율(%)	100.0	100.0	97.3	55.0	6.9	47.9	0.0	0.0	13.2	11.4	60.4	84.0	57.5
	평균	1.34	1.42	1.51	1.58	-	1.63	-	-	-	-	1.92	1.48	1.53
	표준편차	0.19	0.27	0.32	0.53	-	0.38	-	-	-	-	0.38	0.25	0.37
	최댓값	1.85	1.99	3.50	3.73	-	3.22	-	-	-	-	3.04	2.13	3.73
	최솟값	0.82	0.54	0.72	0.53	-	0.23	-	-	-	-	0.12	0.64	0.12
2013	자료비율(%)	99.7	100.0	93.6	100.0	100.0	99.9	94.8	98.0	99.9	99.9	99.3	99.7	98.7
	평균	1.42	1.58	1.60	1.70	1.67	1.70	1.25	1.57	1.51	1.59	1.29	1.42	1.52
	표준편차	0.31	0.25	0.25	0.29	0.34	0.33	0.37	0.30	0.29	0.26	0.32	0.22	0.33
	최댓값	2.25	2.26	2.09	2.67	2.59	2.69	2.16	2.11	2.06	2.12	1.99	1.95	2.69
	최솟값	0.68	0.96	0.86	0.66	0.93	0.75	0.15	0.10	0.44	0.41	0.39	0.70	0.10
2014	자료비율(%)	99.3	100.0	100.0	99.9	100.0	92.2	99.3	99.5	99.2	21.5	0.0	0.0	90.9
	평균	1.33	1.51	1.55	1.62	1.61	1.45	1.63	1.78	1.95	-	-	-	1.61
	표준편차	0.31	0.33	0.22	0.25	0.36	0.32	0.27	0.25	0.23	-	-	-	0.33
	최댓값	1.89	2.35	2.45	2.15	2.61	3.57	2.30	2.46	2.42	-	-	-	3.57
	최솟값	0.22	0.32	0.98	0.98	0.49	0.62	0.44	0.94	1.04	-	-	-	0.22
2015	자료비율(%)	68.0	78.4	73.7	98.3	99.7	99.3	97.5	99.5	99.7	100.0	99.6	80.7	91.2
	평균	1.50	1.58	1.72	1.82	1.86	1.74	1.66	1.67	1.82	1.61	1.80	1.56	1.71
	표준편차	0.26	0.36	0.30	0.30	0.35	0.28	0.35	0.28	0.22	0.33	0.29	0.26	0.32
	최댓값	2.00	2.75	2.27	2.44	2.70	2.52	2.74	2.43	2.36	2.26	2.63	2.03	2.75
	최솟값	0.51	0.15	0.16	0.54	0.76	0.96	0.46	0.72	1.27	0.45	0.63	0.78	0.15

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 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 ~ 2015년)

□ 대기복사 평균자료

○ 직달일사 [단위: W/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
안면도	1999	-	-	-	-	-	336.2	291.2	163.8	350.8	378.1	380.0	448.8	335.6
	2000	288.4	446.9	484.1	422.9	263.9	299.7	233.5	351.9	368.3	400.3	411.9	449.3	368.4
	2001	362.8	427.9	458.0	471.4	325.1	137.8	240.9	344.1	-	460.5	446.4	396.7	370.1
	2002	349.7	443.6	391.6	376.3	291.0	391.6	240.3	141.3	329.8	477.6	342.9	396.4	347.7
	2003	346.4	406.6	284.3	327.4	340.7	198.1	116.8	173.9	282.6	529.2	320.1	285.8	301.0
	2004	361.6	498.7	434.1	433.6	328.8	223.7	183.8	337.2	379.9	570.9	204.2	467.5	368.7
	2005	379.0	393.0	478.9	395.5	473.6	169.9	154.2	279.0	290.7	430.3	381.9	265.1	340.9
	2006	379.7	386.6	443.6	302.3	305.1	219.2	88.3	402.4	374.3	412.3	326.8	306.8	329.0
	2007	367.0	466.9	274.1	402.1	367.8	244.7	148.3	179.0	-	-	-	-	306.2
	2008	387.1	543.7	420.8	326.8	290.0	209.9	208.3	376.0	-	-	399.4	407.0	356.9
	2009	451.2	341.5	452.8	432.9	365.8	340.7	236.0	343.5	374.3	431.7	213.6	272.0	354.7
	2010	344.6	349.0	287.9	356.4	338.9	314.7	285.2	340.4	-	-	388.2	292.7	329.8
	2011	463.9	446.5	611.3	508.9	466.5	354.7	199.9	183.3	436.3	461.6	323.0	367.5	402.0
	2012	434.7	520.3	408.3	418.2	366.8	350.6	330.7	291.7	392.6	501.9	371.7	374.5	396.8
	2013	332.8	410.7	407.8	428.3	391.0	352.5	151.6	-	-	736.3	-	-	401.4
2014	-	-	425.0	356.2	427.7	293.4	208.0	175.5	434.2	525.8	363.7	322.0	353.2	
2015	465.3	343.1	560.6	381.4	450.1	379.6	269.2	340.8	474.5	441.6	205.2	407.2	393.2	
고산	2008	-	-	-	-	-	106.1	-	-	-	-	177.9	123.5	-
	2009	122.6	202.3	267.9	401.5	437.6	251.2	145.3	290.8	321.1	438.4	211.8	104.6	266.3
	2010	78.5	210.9	205.0	290.1	280.3	178.6	133.4	263.8	301.0	311.5	317.2	195.2	230.5
	2011	129.8	312.0	422.6	427.0	259.8	71.2	212.3	-	-	555.5	275.5	119.9	278.6
	2012	75.9	125.0	288.6	358.5	308.1	192.6	225.3	352.7	377.6	450.4	264.4	118.0	261.4
	2013	134.4	256.9	252.8	-	-	150.4	198.2	362.2	388.4	446.0	284.0	192.4	266.6
	2014	222.1	267.3	334.3	353.1	395.9	155.3	144.7	161.0	266.3	512.1	380.1	184.1	281.4
2015	205.0	241.4	343.5	285.3	382.6	225.7	187.4	272.2	402.9	505.7	162.0	92.6	275.5	

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

○ 산란일사 [단위: W/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
안면도	1999	-	212.9	211.6	213.4	238.7	240.4	267.5	364.8	226.8	183.0	167.7	138.9	224.2
	2000	152.8	192.7	216.7	232.9	263.6	260.6	264.0	196.9	191.0	179.7	147.2	148.8	203.9
	2001	163.6	178.6	204.9	235.8	220.3	247.2	244.5	214.2	-	167.5	151.7	139.5	197.1
	2002	156.1	167.2	205.2	214.2	203.7	200.1	260.7	219.7	225.7	173.1	151.0	137.6	192.9
	2003	158.7	178.2	253.7	212.0	254.0	236.5	233.2	205.7	206.3	147.5	134.6	149.4	197.5
	2004	166.7	169.2	217.6	208.5	205.6	262.7	210.8	223.3	180.6	145.3	227.8	133.0	195.9
	2005	168.5	189.8	199.0	222.9	210.0	272.1	250.2	216.1	193.8	170.7	167.9	143.2	200.4
	2006	157.9	186.0	213.7	244.3	235.1	274.5	218.7	239.0	205.7	179.3	160.5	153.7	205.7
	2007	162.5	175.8	211.6	244.2	239.1	244.0	259.1	276.4	-	-	-	-	226.6
	2008	156.0	179.1	213.8	247.3	240.8	253.3	218.7	240.4	-	-	166.0	127.3	204.3
	2009	126.5	159.4	209.1	223.7	220.9	214.1	234.4	208.2	188.8	187.8	168.1	151.0	191.0
	2010	165.7	150.5	201.1	218.6	228.2	247.9	236.4	192.7	-	-	214.1	209.1	206.4
	2011	155.5	173.1	165.6	187.7	208.2	213.3	177.5	213.0	177.6	161.1	149.3	131.7	176.1
	2012	124.4	155.0	166.8	187.8	244.8	243.2	189.3	198.5	182.5	151.1	136.4	127.3	175.6
	2013	155.6	160.8	239.3	181.6	206.7	240.9	212.7	25.9	0.0	63.8	78.6	-	142.4
2014	119.5	204.9	188.7	231.9	237.2	285.3	259.0	231.8	194.0	136.3	144.4	157.3	199.2	
2015	139.0	193.5	197.7	215.9	218.5	261.5	224.5	232.4	181.0	185.7	143.3	135.0	194.0	
고산	2008	71.5	-	-	-	-	198.9	-	-	-	-	147.5	147.9	-
	2009	149.9	190.3	219.0	207.9	197.1	224.4	235.2	222.3	206.4	201.4	175.6	156.1	198.8
	2010	177.8	174.5	190.5	209.8	231.6	235.9	254.5	226.5	223.8	212.1	201.6	151.0	207.5
	2011	165.7	192.6	209.0	211.1	232.2	240.6	248.5	-	-	205.8	167.5	142.4	201.5
	2012	191.4	192.1	189.1	198.9	254.0	254.5	209.9	208.4	218.6	178.9	178.4	153.1	202.3
	2013	168.0	159.4	240.5	-	-	242.3	255.7	230.2	185.0	193.3	183.7	159.0	201.7
2014	189.8	208.0	193.5	205.6	230.0	266.9	241.0	246.1	215.7	150.8	161.8	168.3	206.5	
2015	169.2	171.4	223.0	215.1	224.3	207.6	253.6	229.5	174.4	172.5	165.0	155.9	196.8	

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

○ 태양상향복사 [단위: W/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
안면도	1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2000	-	-	62.1	109.7	86.9	80.2	71.6	77.9	75.2	74.6	56.5	56.7	75.1
	2001	76.0	60.7	87.1	112.9	93.9	66.7	70.9	79.0	-	85.6	76.9	75.7	80.5
	2002	58.6	75.0	85.6	91.9	70.5	90.9	69.8	55.2	87.5	90.1	62.3	64.3	75.1
	2003	96.3	69.6	77.6	78.1	87.3	66.1	52.2	56.5	75.0	96.1	59.7	56.1	72.6
	2004	98.3	92.6	106.9	91.2	75.1	73.1	59.7	86.8	85.6	102.6	63.5	69.5	83.7
	2005	80.4	88.6	98.1	91.8	96.4	63.2	63.1	75.1	74.0	86.7	76.2	109.9	83.6
	2006	57.5	78.9	87.9	76.4	75.7	64.8	41.0	80.7	75.6	65.2	50.2	45.4	66.6
	2007	52.5	68.3	60.0	78.2	78.1	60.7	53.1	67.0	55.2	78.3	-	-	65.1
	2008	75.2	87.5	85.5	79.6	77.7	64.9	57.7	82.2	-	-	70.1	71.6	75.2
	2009	76.5	63.3	88.4	94.5	90.5	85.7	71.5	83.2	88.3	90.6	52.3	78.8	80.3
	2010	115.6	66.1	71.1	81.4	83.9	85.4	76.6	74.6	100.4	90.2	86.7	88.1	85.0
	2011	98.5	83.2	104.9	100.0	95.9	82.2	54.5	64.2	92.7	90.0	63.3	63.3	82.7
	2012	79.7	96.2	84.0	90.2	96.4	88.9	72.4	71.6	80.1	90.5	66.7	104.2	85.1
	2013	92.1	88.4	100.5	89.1	87.7	89.4	59.2	111.8	124.8	144.2	-	-	98.7
2014	-	95.9	88.8	89.3	101.4	85.8	68.0	61.8	88.3	91.5	67.9	77.6	83.3	
2015	68.6	69.0	101.7	81.8	101.9	104.0	72.8	86.5	92.2	84.5	39.9	51.4	79.5	

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

○ 태양하향복사(전천일사) [단위: W/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	-	-	-	502.0	481.6	461.4	420.4	374.0	344.7	319.9	414.9
	2000	259.2	427.0	498.1	527.4	450.0	469.8	428.8	446.0	409.4	394.2	324.3	337.0	414.3
	2001	313.8	392.9	512.5	581.3	482.2	368.9	418.8	467.8	-	443.4	360.7	309.6	422.9
	2002	313.9	395.9	447.4	482.6	414.9	495.4	409.2	318.0	442.7	451.8	313.8	312.8	399.9
	2003	315.6	388.9	429.2	439.5	507.4	384.7	320.2	331.0	391.7	450.6	291.1	272.6	376.9
	2004	329.8	434.6	492.4	511.2	449.2	430.0	344.4	471.0	435.8	473.6	317.0	338.1	418.9
	2005	336.3	393.4	487.2	492.9	553.3	382.8	363.6	415.5	386.8	419.0	346.8	264.6	403.5
	2006	333.2	395.2	496.1	462.0	468.1	435.7	285.1	521.7	456.0	414.4	312.9	285.8	405.5
안면도	2007	320.2	414.7	388.6	535.1	511.9	433.4	372.1	397.2	325.7	407.9	281.0	-	398.9
	2008	323.9	472.0	476.0	478.0	462.1	415.6	377.3	511.0	-	-	311.8	279.9	410.8
	2009	327.0	341.8	488.5	523.9	490.2	471.6	409.0	452.1	435.2	430.8	266.3	268.2	408.7
	2010	319.7	330.3	384.6	459.5	475.0	481.9	445.2	439.5	557.6	475.5	403.1	338.0	425.8
	2011	364.5	415.2	540.2	549.7	572.0	513.4	323.6	338.7	458.1	424.5	305.1	290.7	424.6
	2012	320.3	427.2	415.4	477.9	518.0	512.5	435.2	405.0	416.6	439.9	313.7	290.2	414.3
	2013	303.5	378.7	492.8	479.0	495.5	507.5	329.3	-	-	509.1	-	-	436.9
	2014	-	433.7	444.6	477.3	558.2	512.4	417.4	358.0	473.2	433.1	305.3	259.8	424.8
	2015	316.7	339.6	503.0	439.0	538.3	544.6	415.9	471.0	485.9	423.8	208.5	264.9	412.6
	2008	77.7	-	-	-	-	286.1	-	-	-	-	242.1	210.3	-
	2009	214.8	308.4	401.6	502.4	534.7	424.1	351.7	439.3	427.1	470.7	280.8	206.8	380.2
	2010	230.9	293.2	325.9	423.9	453.2	377.8	366.5	423.2	431.2	399.5	368.4	243.2	361.4
	2011	231.8	372.4	484.5	516.8	439.9	292.5	419.1	-	-	531.1	305.5	198.2	379.2
고산	2012	226.9	265.8	381.6	465.1	498.0	407.0	387.5	466.2	477.9	449.1	318.6	207.1	379.2
	2013	235.8	313.9	415.1	-	-	363.5	415.8	496.3	447.7	458.5	334.1	254.4	373.5
	2014	306.9	347.4	413.2	457.7	535.2	390.3	351.2	371.8	396.5	458.8	363.0	257.5	387.5
	2015	274.5	314.0	445.8	418.0	514.2	389.3	406.8	433.8	450.1	488.2	247.2	198.4	381.7

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

○ 지구상향복사 [단위: W/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	405.5	433.2	468.1	491.5	503.6	513.5	500.4	465.6	437.4	407.4	462.6
	2000	374.2	387.7	415.6	446.0	452.2	480.2	497.6	511.1	484.9	469.8	426.4	403.2	445.7
	2001	367.5	373.0	342.2	376.7	406.3	430.6	456.9	465.5	-	406.8	357.2	320.9	391.2
	2002	326.4	331.3	357.4	387.4	401.3	433.6	448.5	445.7	427.2	388.7	343.8	330.8	385.2
	2003	313.2	330.2	347.4	377.5	410.4	425.1	440.2	443.3	428.0	395.5	366.2	330.1	383.9
	2004	315.6	334.5	349.3	381.3	404.3	433.9	446.5	460.7	429.3	395.5	364.6	350.6	388.8
	2005	-	314.4	345.0	386.7	409.2	434.8	449.3	451.9	440.9	-	361.6	306.3	390.0
	2006	315.9	308.4	357.8	371.9	405.7	430.9	440.7	469.3	431.7	412.4	363.7	336.5	387.1
안면도	2007	328.1	341.1	351.7	375.3	409.0	437.5	445.1	459.5	427.6	395.0	382.2	-	395.6
	2008	313.2	316.9	356.0	385.2	413.5	439.6	456.8	462.7	-	-	357.7	332.3	383.4
	2009	315.5	333.6	356.6	386.2	415.3	442.0	450.7	454.7	430.5	403.3	359.1	320.7	389.0
	2010	308.9	334.3	346.3	368.0	408.5	440.1	458.6	465.7	-	-	-	317.4	383.1
	2011	-	324.1	-	-	-	-	448.5	450.9	431.4	391.8	374.2	323.8	392.1
	2012	312.2	318.7	346.7	382.4	417.4	453.3	455.5	463.3	425.6	395.9	351.5	305.2	385.6
	2013	307.3	320.1	347.4	370.6	409.2	442.0	448.6	507.8	393.3	386.9	352.6	320.9	383.9
	2014	-	327.2	353.5	382.4	409.7	440.2	450.5	440.1	432.5	393.5	357.6	313.2	390.9
	2015	316.7	327.9	349.1	378.1	410.4	-	447.2	452.6	433.3	396.9	362.3	330.7	382.3

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

○ 지구하향복사 [단위: W/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	336.2	365.6	397.9	431.0	452.9	458.0	442.3	391.7	359.9	326.4	396.2
	2000	316.8	316.2	344.4	377.6	402.2	430.8	455.4	461.2	421.0	394.7	350.1	324.5	382.9
	2001	305.0	321.8	341.6	376.0	404.9	429.2	454.4	462.9	-	400.9	284.1	261.5	367.5
	2002	270.0	257.7	286.7	320.9	348.7	367.8	410.7	415.6	368.5	319.7	286.1	280.2	327.7
	2003	255.9	266.0	284.1	314.5	340.6	373.6	403.1	404.6	374.6	319.6	311.5	271.9	326.7
	2004	256.8	264.7	277.4	305.6	344.0	380.1	413.3	407.0	373.5	317.9	298.6	278.2	326.4
	2005	-	262.2	274.7	314.0	336.3	395.3	416.1	417.2	402.5	-	291.3	271.6	338.1
	2006	262.0	265.1	280.6	310.9	348.7	375.6	415.8	410.6	361.7	345.8	309.1	280.6	330.5
안면도	2007	267.7	272.8	298.2	305.3	343.2	380.8	410.2	420.0	393.2	336.8	304.0	-	339.3
	2008	253.7	243.9	280.1	312.9	347.6	389.2	419.6	398.5	-	-	293.0	278.5	321.7
	2009	246.4	271.8	275.4	299.3	332.1	364.7	388.1	385.1	348.9	319.9	302.8	269.0	317.0
	2010	258.9	282.1	285.2	286.8	327.5	359.9	392.0	404.6	-	-	-	267.5	318.3
	2011	-	258.6	-	-	-	-	404.7	399.1	351.5	307.4	313.9	267.2	328.9
	2012	254.8	250.0	276.2	305.0	328.3	356.8	393.0	403.6	356.0	315.8	294.1	259.6	316.1
	2013	253.2	257.4	266.7	293.7	328.2	361.2	397.3	393.7	272.8	288.3	283.9	262.0	304.9
	2014	-	245.8	267.8	290.7	308.4	351.7	383.9	379.1	341.6	307.7	291.5	259.9	311.6
	2015	252.9	264.9	260.2	305.6	318.1	-	385.0	384.4	343.4	312.2	315.8	269.2	310.2

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

○ 순복사 [단위: W/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	43.1	24.1	74.9	108.0	140.6	145.9	127.8	100.9	53.5	32.1	6.4	77.9
	2000	15.2	51.6	77.5	109.9	120.4	140.9	144.2	134.0	84.3	54.0	24.1	14.7	80.9
	2001	19.8	50.7	92.2	125.5	133.0	114.7	145.5	150.1	-	69.3	24.6	14.5	85.4
	2002	20.7	38.6	74.6	109.9	114.4	136.0	130.6	94.8	85.3	63.2	20.2	16.9	75.4
	2003	9.9	48.3	75.2	99.9	135.7	111.0	98.5	90.4	81.1	55.4	21.4	5.9	69.4
	2004	11.3	49.7	74.5	111.2	119.9	127.1	107.4	125.2	89.7	55.5	11.3	9.9	74.4
	2005	-	44.7	84.9	107.5	137.8	108.4	110.9	111.3	88.6	51.3	13.4	0.5	78.1
	2006	16.6	33.3	83.8	99.4	118.4	123.0	90.3	144.5	87.4	56.2	19.4	7.6	73.3
안면도	2007	11.5	39.4	63.8	102.4	120.7	117.5	113.2	109.4	71.4	52.8	12.4	-	74.0
	2008	12.9	34.8	74.0	100.1	117.9	125.4	111.7	141.1	-	-	24.3	11.9	75.4
	2009	21.6	37.9	102.5	121.5	123.7	132.5	122.4	118.1	80.5	53.1	20.0	6.1	78.3
	2010	9.7	41.6	68.3	99.7	128.8	143.3	147.4	129.4	-	-	-	19.0	87.5
	2011	-	47.7	-	-	-	-	103.1	97.2	97.5	50.2	26.8	13.5	62.3
	2012	21.4	52.0	72.7	113.1	130.9	137.2	133.6	116.4	87.2	63.8	26.1	7.2	80.1
	2013	12.9	44.2	83.4	103.6	126.1	150.7	111.4	114.9	81.0	57.9	-1.0	-17.9	72.3
	2014	-	33.9	73.9	101.7	145.0	154.0	134.1	100.6	98.3	53.9	21.6	6.4	83.9
	2015	16.6	38.5	80.7	100.2	158.2	-	138.7	131.6	97.6	60.2	19.7	8.4	77.3

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

□ 성층권오존 평균 자료

○ 서울 오존전량 [단위: Dobson Unit (DU)]

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

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 괄호()안의 값은 결측으로 인하여 OMI-TOMS 자료를 Dobson 관측값으로 환산한 자료임

○ 포항, 안면도 오존전량 [단위: Dobson Unit (DU)]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
포항	1994	-	335	352	334	336	325	285	282	289	275	261	268	304
	1995	297	330	339	323	327	323	279	272	273	273	292	317	304
	1996	336	350	346	352	346	301	286	278	286	283	269	301	311
	1997	326	320	318	324	327	320	291	275	284	285	288	297	305
	1998	328	345	338	343	321	336	292	287	281	284	-	281	312
	1999	296	336	297	349	358	319	300	284	281	309	315	333	315
	2000	323	350	354	379	355	335	306	294	294	274	265	290	318
	2001	364	342	389	365	384	354	-	305	293	284	315	306	336
	2002	321	337	359	353	354	362	297	279	292	291	309	311	322
	2003	345	333	344	319	320	318	-	275	271	274	253	278	303
	2004	318	306	340	333	337	327	301	287	273	-	272	293	308
	2005	321	331	346	369	349	333	311	294	281	282	289	318	319
	2006	319	321	366	358	323	339	298	290	300	289	313	313	319
	2007	332	340	359	376	359	336	313	295	291	281	281	307	323
	2008	298	319	343	337	325	320	290	295	290	288	299	303	309
	2009	319	304	354	356	336	330	310	283	286	289	287	323	315
	2010	-	351	362	-	-	-	299	273	277	286	-	-	308
	2011	324	356	369	359	327	317	291	287	290	287	289	310	317
	2012	311	300	327	346	330	323	-	-	-	283	306	-	316
	2013	-	318	343	349	335	324	303	298	-	273	306	328	318
안면도	2013	-	322	340	329	347	325	299	301	300	279	307	331	316
	2014	327	348	361	344	346	338	305	297	293	283	294	333	322
	2015	329	379	381	361	342	339	308	304	307	297	306	317	331

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

□ 자외선 평균 자료

○ 안면도 흥반자외선 [단위: mW/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	82.3	113.4	143.7	160.7	191.7	219.4	206.3	158.1	99.8	58.1	37.9	133.8
2000	44.4	68.2	101.0	130.2	148.9	185.9	231.8	218.3	162.8	-	69.5	45.4	127.9
2001	42.1	75.1	94.2	143.6	160.6	170.8	223.4	208.6	183.1	104.8	58.4	42.5	125.6
2002	46.4	71.3	98.6	147.8	168.5	191.4	211.8	190.6	146.8	103.5	55.2	38.5	122.5
2003	41.7	57.7	97.0	-	159.3	148.1	172.9	171.0	149.1	107.9	61.3	42.5	109.9
2004	46.8	72.2	105.0	145.7	148.5	177.7	170.1	201.6	154.4	104.5	54.1	38.4	118.3
2005	43.5	63.2	106.9	147.9	195.8	181.9	192.4	209.6	180.4	121.8	64.8	40.5	129.1
2006	50.4	81.3	109.1	131.2	172.3	180.3	190.7	216.2	144.7	97.6	54.9	39.3	122.3
2007	42.9	75.8	94.0	126.7	155.1	174.6	181.5	213.0	133.2	110.9	59.2	35.7	116.9
2008	44.9	71.2	94.8	126.8	148.1	172.8	181.0	192.6	145.0	95.6	52.7	37.6	113.6
2009	43.8	64.7	98.6	128.4	153.0	164.1	177.3	189.4	145.0	98.1	52.0	33.9	112.4
2010	40.8	52.8	76.4	120.6	147.8	151.8	183.0	201.7	137.5	103.0	57.0	-	115.7
2011	-	-	106.1	135.0	162.7	170.4	180.1	191.3	175.1	114.6	62.6	44.6	134.3
2012	48.3	88.7	106.8	153.6	191.3	204.8	244.1	192.2	162.5	120.9	60.4	42.7	134.7
2013	51.8	79.6	123.6	140.4	173.5	209.1	174.2	176.1	137.3	112.6	54.5	36.4	122.4
2014	42.5	65.3	90.9	121.3	142.8	148.2	156.6	165.2	156.9	113.3	59.4	36.9	108.3
2015	46.9	61.2	101.8	132.5	188.6	190.5	187.3	179.2	154.7	101.6	47.9	39.3	119.3
월평균	45.1	70.7	101.1	136.0	163.4	177.3	192.8	195.5	154.5	106.9	57.8	39.5	121.6

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 강릉 흥반자외선 [단위: mW/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	38.1	63.9	88.1	126.4	140.2	151.6	212.9	-	157.4	109.4	55.2	37.1	107.3
2002	39.7	64.8	88.7	142.0	169.6	180.5	-	161.5	129.8	89.7	47.2	31.2	104.1
2003	36.0	52.4	-	125.1	135.4	-	156.6	183.8	116.0	87.1	45.4	-	104.2
2004	35.1	59.3	92.3	122.6	154.4	170.6	171.3	-	-	99.2	52.4	34.5	99.2
2005	37.3	54.9	88.8	120.8	148.3	158.4	168.9	180.6	123.9	95.4	55.8	34.5	105.6
2006	35.9	63.5	81.9	100.9	146.2	143.0	131.2	174.0	137.1	82.8	44.8	34.3	98.0
2007	37.9	55.3	79.9	106.0	148.7	171.8	154.4	173.8	102.5	99.9	54.5	33.8	101.5
2008	40.8	65.5	86.0	120.5	147.7	157.8	179.8	182.3	147.0	92.6	54.0	41.5	109.6
2009	44.1	68.8	93.9	139.3	163.4	149.7	163.1	158.5	137.1	89.7	38.0	27.9	106.1
2010	33.4	42.8	64.4	102.2	132.0	155.9	159.6	144.3	123.7	86.8	46.4	29.5	93.4
2011	37.0	51.3	84.2	104.4	109.5	146.6	136.1	155.9	115.5	81.6	42.5	32.3	91.4
2012	35.6	58.1	76.1	104.4	123.0	133.0	154.9	120.6	125.7	88.2	46.5	29.2	91.3
2013	35.3	58.9	85.3	106.0	138.6	154.2	153.3	169.2	123.0	87.7	47.1	27.5	98.8
2014	34.7	48.9	82.0	97.6	148.4	131.6	184.4	132.7	130.8	80.4	44.6	38.5	96.2
2015	44.4	60.9	99.4	120.5	172.9	162.9	188.9	177.3	146.5	92.5	39.1	37.0	111.9
월평균	37.7	58.0	85.1	115.9	145.2	154.8	165.4	162.7	129.7	90.9	47.6	33.5	101.2

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 목포 흥반자외선 [단위: mW/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	48.3	73.5	86.4	123.9	133.0	125.5	173.2	-	164.4	109.1	64.8	46.4	104.4
2002	49.6	77.3	98.9	131.0	130.4	155.7	181.3	178.4	-	99.0	-	42.4	114.4
2003	45.3	65.4	95.7	125.1	145.7	147.8	141.9	165.3	145.4	109.2	63.5	48.3	108.2
2004	52.3	76.5	107.3	134.9	138.1	156.3	192.4	202.4	140.3	110.2	63.8	44.4	118.2
2005	47.2	70.5	106.1	131.9	156.2	153.3	169.0	191.7	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64.3	46.3	-
2007	48.8	79.3	106.3	145.2	181.7	179.7	208.1	226.9	144.4	130.9	80.7	47.9	131.7
2008	55.8	95.5	114.4	161.3	174.6	183.3	212.0	205.0	156.5	117.2	73.2	50.9	133.3
2009	60.4	89.2	120.6	154.4	179.0	172.4	180.2	195.9	158.9	116.3	66.9	43.0	128.1
2010	51.1	59.8	78.7	126.4	145.6	153.2	177.3	-	158.3	111.2	64.5	45.8	106.5
2011	59.7	68.4	112.8	136.5	153.0	154.6	164.0	122.9	121.2	88.4	51.8	39.9	106.1
2012	47.5	71.3	85.3	110.6	120.3	115.8	134.1	132.7	108.4	84.0	54.0	-	96.7
2013	-	-	-	102.3	113.2	116.0	141.6	141.2	108.0	81.9	51.4	34.6	98.9
2014	43.9	66.6	90.2	132.6	169.6	166.9	-	-	-	-	-	-	-
2015	62.2	81.7	127.3	159.3	217.3	-	-	191.4	163.7	126.2	60.4	53.1	124.3
월평균	51.7	75.0	102.3	134.0	154.1	152.3	172.9	177.6	142.7	107.0	63.3	45.3	114.2

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 포항 흥반자외선 [단위: mW/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	112.7	144.3	170.1	191.7	199.8	210.1	142.6	96.2	60.2	43.8	137.2
2000	57.2	69.0	115.0	-	173.7	164.7	217.7	201.2	152.1	110.8	72.7	49.4	125.8
2001	43.2	76.0	95.5	143.3	149.9	-	233.1	204.7	170.7	110.9	64.7	49.1	121.9
2002	47.4	78.3	110.2	167.0	190.6	176.7	190.5	179.5	152.9	106.7	63.8	41.3	125.4
2003	44.9	61.4	97.6	142.8	144.0	140.6	157.5	172.9	144.1	110.2	65.0	50.2	110.9
2004	49.8	79.8	109.7	153.5	158.6	174.7	199.5	179.2	138.4	-	-	-	138.1
2005	-	-	-	-	-	184.3	163.4	178.4	129.3	97.7	61.7	44.9	-
2006	47.8	83.2	105.9	122.5	169.6	170.3	167.1	205.8	155.5	113.4	56.1	44.4	120.1
2007	46.3	69.1	98.7	131.1	166.7	185.2	173.9	196.7	134.1	112.3	69.2	43.4	118.9
2008	53.2	85.9	102.9	140.0	163.6	166.8	208.3	211.2	156.7	108.7	63.4	49.5	125.9
2009	50.9	76.1	105.0	139.7	159.8	177.8	178.8	192.3	154.2	120.2	66.7	41.5	121.9
2010	47.4	53.8	74.4	107.2	140.6	160.7	186.1	177.2	141.9	100.7	55.4	37.4	106.9
2011	49.6	53.3	93.8	123.6	145.8	172.2	192.6	197.9	174.3	135.6	76.9	-	128.7
2012	61.2	96.4	121.3	163.9	210.5	213.8	212.0	201.8	168.3	140.9	79.7	50.5	143.4
2013	60.5	96.4	135.3	158.3	169.6	184.8	180.4	164.3	124.7	107.4	70.2	45.4	124.8
2014	54.2	67.1	94.2	120.3	161.6	142.4	189.5	157.9	141.6	97.1	60.0	40.7	110.6
2015	43.2	60.0	96.6	123.6	167.6	151.9	171.3	164.7	135.6	102.2	46.4	37.5	108.4
월평균	50.5	73.7	104.3	138.7	165.1	172.4	189.5	188.0	148.1	110.7	64.5	44.6	123.0

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산 흥반자외선[단위: mW/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	85.5	109.3	129.3	130.6	184.3	210.0	153.3	127.3	78.9	58.2	126.7
2000	57.9	93.2	123.5	157.8	166.2	168.1	217.1	236.2	178.0	-	-	55.8	145.4
2001	-	108.8	-	-	195.5	166.2	-	-	191.4	130.2	92.7	59.9	135.0
2002	-	124.3	140.6	182.1	193.7	207.6	283.8	189.1	170.5	-	73.5	45.1	161.0
2003	48.6	70.6	111.7	142.5	-	-	-	158.9	140.6	105.7	63.0	42.9	98.3
2004	45.6	73.8	104.4	134.5	123.8	149.5	188.4	-	132.3	101.4	66.5	40.2	105.5
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75.0	53.2	-
2007	50.9	91.5	126.8	152.8	182.5	196.8	206.7	259.8	184.6	150.8	88.3	54.9	145.5
2008	53.2	95.9	121.3	173.0	197.4	164.3	232.4	211.2	171.5	123.3	72.0	54.3	139.2
2009	56.8	92.2	123.9	158.6	198.5	184.7	-	-	-	108.1	67.4	42.8	114.8
2010	44.8	58.9	84.4	132.0	155.2	151.3	204.0	223.9	175.3	123.0	68.6	49.1	122.5
2011	51.2	81.9	120.7	151.2	174.6	157.8	198.3	147.1	142.7	106.4	68.5	42.7	120.3
2012	61.8	86.0	108.9	142.4	177.5	189.8	214.7	227.4	174.5	143.2	77.9	51.4	138.0
2013	62.6	90.9	138.5	164.3	200.5	184.1	200.7	199.0	164.6	137.7	79.3	51.6	139.5
2014	62.4	74.2	100.3	149.8	179.1	185.2	194.6	192.1	166.9	129.6	80.8	49.1	130.3
2015	53.0	69.0	114.7	144.7	192.4	175.7	204.0	194.0	158.4	126.4	59.9	51.1	128.6
월평균	54.1	86.5	114.7	149.6	176.2	172.3	210.8	204.1	164.6	124.1	74.2	50.1	130.0

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

□ 총대기침적 관측자료

○ 안면도

연도	개수	강수량	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(mm)											
1997	22	602.7	4.76	21.6	5.2	61.3	16.8	43.2	68.9	28.0	3.8	11.0	15.9
1998	39	1094.0	5.00	21.8	2.5	60.1	18.0	49.5	52.7	29.8	3.5	13.5	15.1
1999	49	1199.9	5.03	18.8	0.9	61.3	16.8	31.1	60.1	17.7	2.9	13.1	16.5
2000	21	208.3	4.56	28.4	0.5	54.8	33.8	66.3	54.4	34.0	3.8	16.1	31.1
2001	27	311.5	4.71	18.9	1.0	31.6	21.9	48.9	34.7	35.7	2.2	7.6	15.9
2002	25	406.0	4.73	17.7	0.5	23.5	24.4	35.6	30.9	31.0	1.7	5.6	11.1
2003	35	302.5	4.44	26.1	4.2	28.2	32.0	57.1	28.4	39.0	2.1	8.5	18.1
2004	57	1074.5	4.75	18.4	1.0	35.6	24.2	44.4	34.5	25.2	2.2	9.3	16.2
2005	56	956.0	4.58	32.8	2.0	70.3	44.7	52.5	62.0	33.0	4.0	16.8	24.3
2006	50	532.5	4.78	48.7	2.3	142.5	54.3	105.5	124.0	57.4	8.0	35.1	64.0
2007	76	1261.0	4.52	32.6	3.0	48.9	36.0	69.6	43.3	39.0	3.0	12.4	21.2
2008	62	687.5	4.41	40.1	1.3	74.2	40.4	66.1	65.0	38.5	3.9	17.3	22.9
2009	49	735.5	4.66	32.5	2.5	91.0	36.3	57.7	77.7	36.8	3.9	19.8	20.8
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	70	1300.5	4.64	26.7	1.1	43.5	34.1	54.2	37.8	46.9	2.4	12.3	22.5
2012	71	1316.5	4.75	21.0	0.5	55.5	19.0	33.7	48.0	22.1	1.4	13.1	12.8
2013	67	948.0	4.57	31.4	1.8	68.8	35.2	58.1	57.9	45.6	3.0	15.5	21.8
2014	76	789.0	4.69	23.8	1.2	46.2	31.9	45.2	39.3	45.1	2.4	11.3	15.9
2015	73	646.0	4.62	35.7	1.3	102.2	43.0	61.6	86.0	55.6	3.4	21.4	20.8
연평균		860.4	4.68	26.7	1.7	59.2	30.0	51.6	53.2	35.1	3.0	13.9	19.9

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				(μS cm ⁻¹)									
겨울	2005~2014	96	4.30	86.5	3.2	279.4	98.7	139.3	244.4	81.1	10.9	63.2	65.7
	2015	11	4.29	110.2	1.6	486.2	75.5	146.2	415.4	92.3	10.9	86.6	26.3
봄	2005~2014	95	4.62	50.2	3.4	87.3	75.3	122.6	78.8	75.1	6.5	28.9	91.9
	2015	8	4.73	30.2	1.8	48.3	48.9	71.9	39.4	68.7	3.5	15.5	44.7
여름	2005~2014	114	4.48	40.5	1.7	68.9	43.8	85.5	59.5	69.4	4.3	15.9	20.1
	2015	11	4.41	37.0	2.3	35.2	63.3	77.0	25.6	92.3	2.9	9.4	22.5
가을	2005~2014	112	4.31	68.9	2.5	212.4	77.6	108.3	184.3	60.7	7.1	47.1	43.6
	2015	9	4.31	99.4	1.9	420.2	78.4	130.6	364.3	85.2	10.0	84.7	40.8

○ 올진

연도	개수	강수량	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(mm)											
1998	23	581.2	5.08	18.8	0.4	75.4	8.3	25.4	70.5	8.6	4.1	16.4	9.4
1999	50	1456.8	5.20	13.7	0.4	50.2	9.4	20.9	52.8	9.9	3.1	10.9	12.1
2000	30	612.3	4.86	17.3	0.2	57.8	12.2	31.5	53.9	5.2	1.7	12.3	13.9
2001	20	470.1	4.98	13.2	1.0	43.4	9.2	28.1	42.0	9.6	1.4	11.5	12.0
2002	26	731.2	4.95	26.8	0.1	135.0	19.3	40.7	133.6	18.5	5.3	31.0	24.3
2003	39	957.1	4.88	16.9	1.0	56.7	15.7	36.4	51.7	16.2	2.9	12.2	19.7
2004	39	1173.9	4.71	20.5	0.6	61.0	19.1	42.0	52.8	16.7	2.5	13.7	16.3
2005	48	1142.0	4.80	26.6	0.7	95.4	25.1	33.3	82.7	14.6	4.4	20.1	17.7
2006	55	1548.1	5.05	30.0	1.0	144.7	13.8	43.6	117.2	12.6	4.7	27.9	20.6
2007	45	1057.7	4.89	18.6	1.7	47.8	17.9	40.4	41.0	19.3	2.5	11.3	22.0
2008	37	809.6	4.54	32.0	0.9	77.3	22.9	51.3	64.7	19.7	4.2	16.6	19.6
2009	38	734.9	4.92	23.8	1.3	68.0	22.9	47.0	57.8	24.7	3.0	16.4	22.1
2010	35	588.8	4.86	23.8	1.2	68.7	24.3	47.0	60.3	21.8	3.6	18.6	27.8
2011	45	1003.1	4.93	14.4	0.3	41.2	11.3	21.8	36.3	10.8	2.2	10.5	12.1
2012	40	860.3	4.90	17.2	0.3	47.7	15.0	29.8	40.4	14.2	2.2	12.1	15.1
2013	61	947.4	4.78	30.2	1.4	116.5	21.3	44.7	99.8	23.0	4.2	24.9	24.6
2014	81	1261.5	4.72	30.3	0.8	122.2	20.6	46.1	104.6	21.9	4.1	25.7	21.2
2015	60	769.6	4.90	32.1	0.6	142.6	23.8	42.0	128.1	18.9	4.2	30.5	26.5
연평균		1034.6	4.86	22.9	0.8	83.2	17.3	37.3	73.4	15.9	3.4	18.2	18.7

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				($\mu\text{S cm}^{-1}$)									
겨울	2005~2014	51	4.48	66.2	1.8	238.9	51.2	115.5	207.5	42.8	9.7	54.3	64.3
	2015	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
봄	2005~2014	56	4.66	42.1	1.6	112.2	44.1	92.7	97.7	49.0	5.7	29.7	55.1
	2015	10	4.78	42.8	1.4	167.1	46.7	72.6	142.1	45.7	6.4	37.4	56.0
여름	2005~2014	42	4.44	35.8	1.3	50.7	44.0	75.	42.8	49.9	4.8	13.9	30.1
	2015	7	5.38	24.8	0.7	41.5	62.0	49.6	43.0	61.6	5.4	18.8	52.1
가을	2005~2014	49	4.64	57.4	1.3	238.3	43.8	90.6	205.2	37.8	8.0	51.0	39.2
	2015	10	4.74	67.1	1.0	302.5	60.2	89.2	277.2	62.3	12.1	64.6	44.6

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

연도	개수	강수량 (mm)	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	($\mu\text{eq L}^{-1}$)								
					F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1998	7	271.2	5.47	19.5	0.4	76.2	16.8	39.0	64.8	18.7	3.3	17.9	17.4
1999	41	1139.3	5.36	32.3	0.6	157.1	17.3	38.7	170.4	12.4	6.1	32.5	23.8
2000	20	240.2	4.70	22.4	0.3	55.7	24.0	45.8	55.5	16.2	3.4	18.9	18.6
2001	22	448.9	4.85	18.4	0.3	72.8	11.0	36.4	65.9	17.4	2.8	13.6	8.0
2002	30	503.9	4.78	24.0	0.0	79.4	21.5	42.7	93.6	16.7	3.2	21.8	15.9
2003	37	544.9	4.61	30.7	2.7	101.8	25.0	59.8	99.0	31.3	3.9	26.6	18.0
2004	41	1092.3	4.81	22.5	0.6	95.0	15.2	34.5	84.2	10.7	4.0	20.6	11.9
2005	42	664.6	4.68	30.9	1.1	94.0	32.5	45.0	82.8	15.2	4.8	24.7	20.4
2006	48	1055.4	5.00	23.4	1.3	73.3	20.9	44.9	62.4	12.6	3.1	18.7	30.1
2007	51	1052.2	4.79	41.8	1.2	233.4	15.3	50.1	211.0	14.3	6.0	36.7	17.4
2008	52	745.8	4.57	31.4	0.8	85.9	23.1	45.6	75.5	17.9	4.0	17.8	13.9
2009	49	1045.2	4.81	20.4	1.0	54.2	18.1	33.9	47.2	13.6	2.8	12.1	12.0
2010	57	1140.7	5.05	38.8	0.9	188.3	29.8	49.3	171.6	15.6	8.9	42.0	29.7
2011	43	737.1	4.64	34.3	0.5	128.4	27.7	40.5	110.9	17.0	7.5	27.5	20.3
2012	82	1710.0	4.92	21.3	0.4	87.5	12.4	27.2	75.2	11.4	2.3	18.2	11.9
2013	74	852.0	4.68	33.8	1.1	123.4	28.1	50.9	106.7	26.9	3.6	25.9	19.0
2014	101	1466.0	4.90	19.5	1.1	67.1	18.4	32.5	57.6	18.2	2.3	14.8	15.5
2015	93	1737.6	5.07	13.2	0.5	38.6	14.7	23.8	32.9	16.6	1.4	7.7	7.9
연평균		1047.0	4.85	26.1	0.8	102.2	19.7	38.8	93.3	15.9	4.0	21.7	17.0

계절	기간	개수	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	($\mu\text{eq L}^{-1}$)								
					F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
겨울	2005~2014	80	4.42	79.8	1.6	320.8	66.8	116.4	293.1	43.8	10.0	70.8	50.1
	2015	4	4.73	59.9	1.5	279.6	40.4	84.3	234.0	24.8	6.9	38.5	29.2
봄	2005~2014	77	4.57	47.2	1.6	140.3	45.7	91.0	121.5	43.9	8.3	33.6	50.8
	2015	12	4.73	27.4	1.4	40.6	49.2	71.2	32.8	58.9	3.5	12.7	29.2
여름	2005~2014	64	4.49	36.9	1.6	73.8	41.5	66.6	66.9	40.9	5.6	18.0	17.6
	2015	4	4.77	34.9	0.4	113.9	41.8	59.2	101.0	63.8	2.7	24.3	12.5
가을	2005~2014	53	4.61	50.3	1.1	190.5	52.1	71.0	168.2	31.3	8.8	42.9	35.8
	2015	10	4.47	71.4	1.5	296.9	62.5	101.6	260.3	56.8	7.3	60.6	33.8

※ 2012년 이전까지 (구)고산기상대에서, 2012년부터 고산 기후변화감시소로 이전하여 관측함

○ 울릉도

연도	개수	강수량	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
		(mm)											
1997	16	569.7	4.96	34.2	1.5	188.0	16.3	44.4	165.2	14.4	9.9	33.2	27.2
1998	24	888.5	5.18	40.1	0.9	201.3	18.3	54.8	157.1	14.2	12.5	36.8	33.0
1999	84	1677.1	5.18	42.2	0.9	201.2	20.5	53.9	193.5	11.3	10.3	38.4	29.4
2000	26	518.5	4.52	41.9	0.1	126.7	39.2	78.9	127.7	29.1	8.2	31.3	41.9
2001	17	390.4	4.88	28.0	0.1	137.0	13.6	46.3	132.1	17.0	7.6	27.9	23.7
2002	11	551.5	4.89	16.9	0.0	50.4	17.3	35.2	57.2	20.4	4.2	12.0	12.2
2003	16	493.8	4.85	23.6	0.7	83.9	20.5	49.4	79.6	26.3	5.4	23.8	25.3
2004	33	850.7	5.08	35.2	0.7	169.4	21.3	63.8	149.8	25.7	11.3	35.2	30.1
2005	51	858.9	5.36	65.2	1.1	367.4	54.4	33.3	295.8	9.7	53.9	67.1	80.3
2006	89	1639.9	5.08	39.3	1.2	178.9	22.6	62.9	136.9	18.4	28.5	33.5	37.2
2007	67	1266.2	4.71	41.4	1.9	146.9	34.0	67.3	105.0	31.2	34.1	25.9	31.4
2008	86	1278.0	4.66	39.3	0.8	144.6	25.7	58.9	125.7	21.2	13.0	26.4	22.4
2009	54	1250.7	5.19	42.7	1.1	209.2	21.5	58.5	148.7	20.4	45.0	34.8	37.2
2010	66	1225.6	4.82	51.6	0.8	239.0	26.8	67.6	174.4	25.5	52.3	42.1	34.2
2011	69	1344.0	4.86	55.2	0.9	255.7	28.5	70.3	189.2	35.4	56.2	43.2	35.6
2012	87	1628.4	4.43	64.1	0.8	256.1	38.9	84.2	224.3	32.3	8.0	53.6	32.3
2013	62	1126.1	4.93	57.2	1.3	233.9	45.1	83.4	206.9	35.7	10.6	53.6	93.8
2014	91	1490.9	4.69	56.9	1.1	267.2	40.7	79.8	236.1	34.7	9.4	56.2	37.5
2015	88	1328.6	4.93	50.1	0.6	272.0	19.7	62.1	238.4	16.7	9.4	50.8	19.6
연평균		1204.8	4.83	46.3	0.9	209.7	28.6	63.6	175.1	23.7	22.4	40.4	36.6

계절	기간	개수	pH	EC	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
				($\mu\text{S cm}^{-1}$)									
겨울	2005~2014	184	4.38	103.0	1.7	457.7	70.7	137.6	391.1	54.5	34.4	91.4	56.2
	2015	6	4.41	78.6	1.0	326.7	47.9	113.9	279.9	36.2	10.6	45.2	8.3
봄	2005~2014	96	4.88	55.7	1.9	194.9	55.4	110.6	152.1	58.8	36.5	42.2	76.3
	2015	8	5.04	64.6	1.6	286.9	54.6	131.6	261.3	83.0	14.9	62.5	49.2
여름	2005~2014	67	4.76	39.8	1.1	128.0	29.2	67.5	76.3	49.0	52.6	19.8	32.3
	2015	4	5.05	49.8	1.2	198.8	48.1	89.4	181.5	50.7	8.1	52.9	59.6
가을	2005~2014	94	4.55	73.4	1.4	314.1	50.6	104.2	257.9	41.8	33.9	61.9	50.5
	2015	3	4.55	75.0	1.9	298.8	80.1	102.6	262.3	76.8	13.4	61.7	29.2

2. 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 활동하여 왔다.

세계기상기구 과학기술 프로그램 중의 하나인 지구대기감시 프로그램(GAW)은 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비 등과 같은 환경 문제에 대처하기 위해 1989년에 전지구오존관측망(GO3OS)과 배경대기오염감시망(BAPMoN)을 통합하여 시작되었다. 이 프로그램은 첫째, 지구대기의 화학 조성에 대한 과학적이고 신뢰할 수 있는 관측자료를 제공하고, 둘째, 지구대기의 자연적·인위적인 조성 변화 정보를 제공하며, 셋째, 대기·해양·생물 간의 상호작용 과정에 대한 이해를 높이는 것을 목적으로 한다.

지구대기감시 프로그램에는 세계기상기구의 모든 회원국이 참여하고 있다. 현재, 지구급 관측소(global station) 36개소, 지역급 관측소(regional station) 650여개소, 그리고 협력 관측소(contributing station) 280여개소가 운영되고 있다.

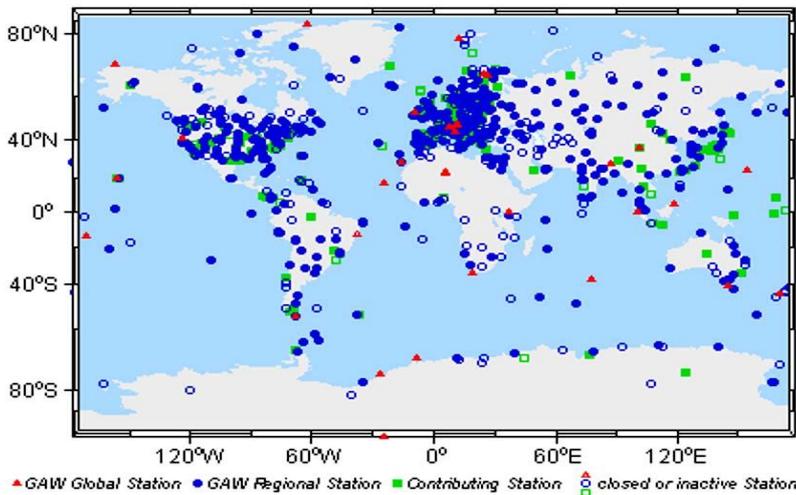


그림 2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 관측소 현황

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. 과학자문단(SAG)은 프로그램의 과학적 정책 방향을 결정하고 지구대기감시 프로그램 사무국은 중앙기구와 지구대기감시관측소 간의 협력과 운영을 돕는다.

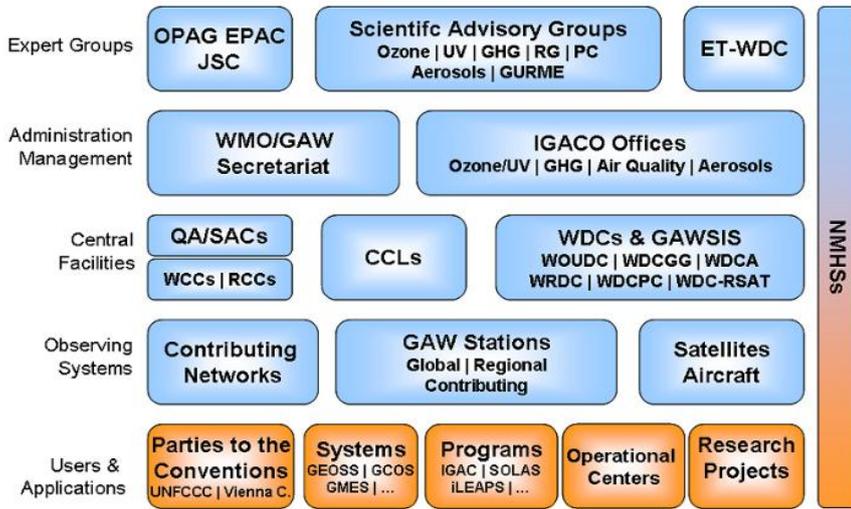


그림 2.2 세계기상기구 지구대기감시(GAW) 프로그램의 운영 구조

표 2.1 세계기상기구 지구대기감시 세계자료센터 현황

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

2.2 한반도 기후변화감시망

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

1990년부터 기상연구소는 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.

1998년 5월에 배경대기관측소는 세계기상기구에 지역급 지구대기감시관측소로 등록되었고, 2000년 8월에 지구대기감시관측소로 명칭이 변경되었다. 이때까지 국립기상연구소 소속이었던 지구대기감시관측소는 2008년 3월에 기상청 기후변화감시센터로 소속과 명칭이 변경되었다.

빠른 속도의 기후변화로 지구 온난화가 사회·경제적인 이슈가 되면서 기상청도 한반도에서 기후변화 유발물질의 유·출입을 감시하기 위한 지구대기감시 관측망의 확대가 추진되었다.

한반도에서 기후변화 유발물질의 유입 지역에 해당하는 중부 서해안에 안면도 기후변화감시소가 위치하고 있다. 그리고 남부 서해안 제주도에 고산 기후변화감시소가 2008년 11월에 신설되었다. 또한 2011년 10월에 기후변화 원인물질의 유출 지역에 해당하는 최동단인 독도에 온실가스를 관측하기 시작하였고, 2013년 12월에 울릉도에 울릉도독도 기후변화감시소가 신설되었다. 이로써 한반도를 삼각형으로 감시하는 지구대기감시 관측망이 구축되었다.

2015년 현재 안면도, 고산, 울릉도독도의 기후변화감시 기본관측소 3소와 포항, 목포, 울진, 강릉의 보조관측소 4소, 대학, 관련기관 등 위탁관측소 6소가 운영되고 있다.

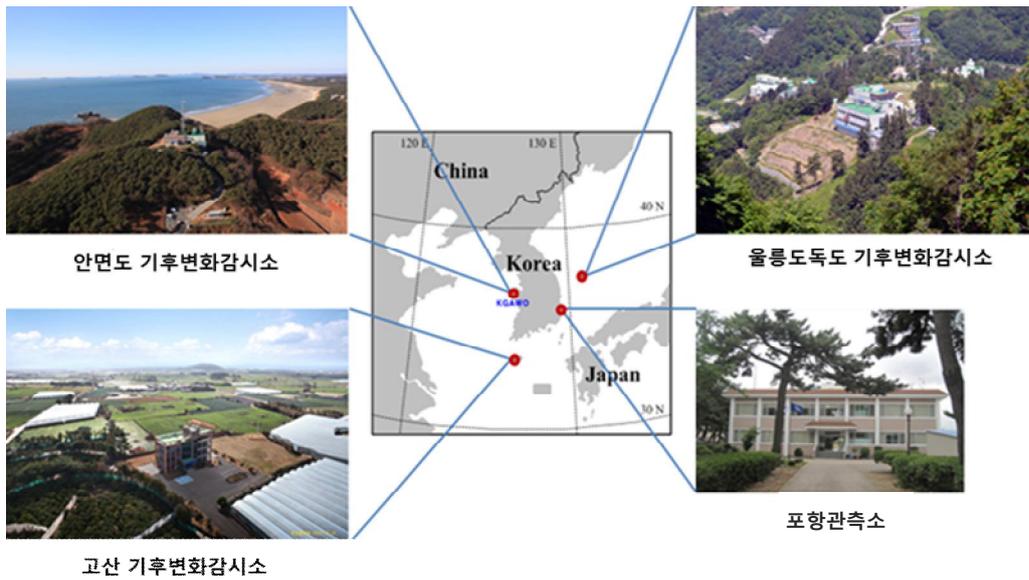


그림 2.3 한반도 기후변화감시망의 구성

표 2.2 안면도 기후변화감시소 관측시설의 공간정보

시설명	용도	위·경도	해발고도	비고
40 m 타워	온실가스 측정	36.538 86°N 126.329 95°E	85.119 m	관측탑
오존브로워	성층권 오존 측정	36.538 65°N 126.330 05°E	56.496 m	본관 옥상
AWS	풍향 풍속 측정	36.538 79°N 126.330 22°E	57.697 m	연구동 옥상
대기복사	대기복사 측정	36.538 46°N 126.329 95°E	47.026 m	지상 노장
FTS	이산화탄소	36.538 22°N 126.331 02°E	23.810 m	

표 2.3 기상청 지구대기감시 관측망(기본, 보조 관측소)의 공간정보

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
울진지역서비스센터 (울진)	36.98°N 129.42°E	49.4 m	총대기침적(1998)	보조관측소
강원지방기상청 관측과 (강릉)	37.80°N 128.85°E	79.0 m	자외선(2001)	보조관측소

표 2.4 위탁관측소 운영 현황

관측지점명	위탁기관명	위·경도	관측요소	위탁지정일
서울	연세대학교	37.57°N 126.95°E	성층권오존, 자외선	2004. 11. 6.
광주	광주과학기술원	35.22°N 126.83°E	에어로졸 연직분포	2007. 1. 1.
광릉	서울대학교	37.45°N 127.9°E	산림 이산화탄소	2008. 11. 5.
남극 세종 과학기지	극지연구소	62.22°S 58.78°W	이산화탄소	2010. 10. 26.
제주	제주대학교	33.29°N 126.16°E	라돈	2012. 4. 1.
서울	숙명여자대학교	37.32°N 126.57°E	중층대기 수증기, 성층권오존	2015. 4. 1.

3. 기후변화감시 기술노트 목록

○ 발간 목록

- 기술노트 2014-01 통합지구대기화학관측(IGACO)의 오존 및 자외선 이행 계획
- 기술노트 2014-02 GC- μ ECD를 활용한 대기 농도 수준의 SF₆ 분석 가이드라인
- 기술노트 2014-03 건조 공기 포집 및 안정도 평가를 위한 가이드라인
- 기술노트 2014-04 강수화학 국제비교실험 참가방법 및 결과
- 기술노트 2014-05 WMO 지구대기감시(GAW) 전략계획(2012-2015) :
WMO GAW 전략계획(2008-2015) 보강
- 기술노트 2014-06 표준 에어로졸 샘플링 시스템
- 기술노트 2014-07 총자외선지수 산출기법 및 프로그램
- 기술노트 2014-08 강수화학 측정자료의 분석 절차
- 기술노트 2015-01 오존층에 관한 질문과 답변 20가지
- 기술노트 2015-02 WMO 육불화황 세계표준센터의 3차 표준가스 제조 방법
- 기술노트 2015-03 Various Methods for Atmospheric SF₆ Using GC- μ ECD
(WMO/GAW Report NO. 222)
- 기술노트 2015-04 강수화학(대기 침적) 측정 및 분석 매뉴얼
- 기술노트 2015-05 WMO Guideline 2014 Atmospheric Composition :
MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC COMPOSITION

※ 기상청 기후정보포털(www.climate.go.kr)의 홍보·열린마당에서 열람 가능

4. 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.
- 김정식, 최재천, 2001: 배경대기 중 CO₂ 자료 선정 방법에 따른 안면도 자료의 분석. 한국대기환경학회지, **17**, 277-288.
- 김만구, 강미희, 홍영민, 박기준, 이보경, 이동수, 김산 2001: 필터팩을 이용한 서울과 춘천, 안면도의 건성 강하량 측정. 한국대기환경학회지, **17**, 19-29.
- 문병관, 김준, 류상범, 윤용훈, 임중환 2001: 안면도 지구대기감시 관측소에서 순복사 비교 관측과 복사계 보정. 대기, **11**, 176-180.
- 박기준, 최재천, 박상순, 오성남 2002: 안면도에서 측정된 온실가스(CH₄, N₂O, CFCs)의 변동 특성 연구. 대기, **12**, 502-505.
- 조경숙, 방소영, 최재천, 최병철, 차주완, 박기준, 최성철, 노영민, 김영준 2003: 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 다파장 라만 라이다 시스템을 이용한 안면도 지역에서의 라이다 비 연구. 한국대기환경학회지, **22**, 1-14.
- 구태영, 홍기만, 김상백, 공종웅, 김명수 2008: 2006년 4월 안면도에서 발생한 황사, 안개, 청명, 구름 사례에 대한 에어러솔 특성 분석. 대기, **18**, 99-111.

- 노영민, 이한림, Detlef Muller 2010: 다과장 라만 라이다를 이용한 발생지에 따른 안면도 지역 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성. 한국대기환경학회지, **26**, 554-566.
- 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, Y. M., S. C. Yoon, S. W. Kim, K. Y. Kim, H. C. Lim, and J. G. Ryu, 2013: Observation of new particle formation and growth events in Asian continental outflow. *Atmospheric Environment*, **64**, 160-168.
- Matsui, H., M. Koikel, N. Takegawa, Y. Kondol, A. Takami, T. Takamura, S. Yoon, S. W. Kim, H. C. Lim, and J. D. Fast, 2013: Spatial and temporal variations of new particle formation in East Asia using and NPF-explicit WRF-cham model: North-south contrast in new particle formation frequency. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 11,647-11,663.
- Panicker, A. S., S. H. Park, D. I. Lee, D. C. Kim, W. S. Jung, S. M. Jang, J. H. Jeong, D. S. Kim, J. g. Yu, and Harrison Jeong, 2013: Observations of black carbon characteristics and radiative forcing over a global atmosphere watch supersite in Korea. *Atmospheric Environment*, **77**, 98-104.
- Park, S. Y., J. G. Park, C. S. Kim and I. C. Shin 2013: Clarification of methane emission sources using WDCGG data: Case study of Anmyeon-do observatory, Korea. *Asian journal of Atmospheric Environment*, **7-2**. 85-94.

5. 기술 특허 보유(출원) 현황

- 제 0495483호 표준가스 증량법 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.)

6. 지구대기감시 보고서 작성자

1장	머리말	기후변화감시과	기상연구관	이 철 규
2장	2015년 기상기후 특성	기후변화감시과	기상주사보	이 은 혜
		환경기상연구과	기상연구사	임 한 철
		"	연 구 원	최 홍 우
	3.1 온실가스	"	연 구 원	고 미 영
		"	연 구 원	이 동 현
		서울대학교	교 수	김 준 진
		극지연구소	선임연구원	최 태 진
	3.2 반응가스	환경기상연구과	기상연구사	김 수 민
		"	연 구 원	최 홍 우
		환경기상연구과	기상연구사	김 정 은
		"	연 구 원	고 희 정
	3.3 에어로졸	"	연 구 원	이 혜 은
		"	연 구 원	최 은 영
		연세대학교	교 수	김 준 민
		광주과학기술원	교 수	노 영 민
3장	3.4 대기복사	환경기상연구과	기상연구사	이 상 삼
		"	연 구 원	송 승 주
		환경기상연구과	기상연구사	이 상 삼
		"	연 구 원	송 승 주
	3.5 성층권오존	"	연 구 원	고 미 영
		"	연 구 원	문 세 영
		연세대학교	교 수	김 준 진
		숙명여자대학교	교 수	오 정 진
	3.6 자외선	환경기상연구과	기상연구관	김 영 아
		"	연 구 원	문 세 영
		연세대학교	교 수	김 준 진
	3.7 총대기침적	환경기상연구과	기상연구사	신 범 철
		"	연 구 원	고 희 정
		"	연 구 원	김 은 실
	3.8 기타	숙명여자대학교	교 수	오 정 진
		제주대학교	교 수	강 창 희
4장	지구대기감시 자료 통계 방법	환경기상연구과	기상연구관	한 상 옥
		"	기상연구관	차 주 완

2015 지구대기감시 보고서

발행일 : 2016년 6월

작성 : 기상청 국립기상과학원 환경기상연구과
63568 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

편집·발간 : 기상청 기후과학국 기후변화감시과
07062 서울특별시 동작구 여의대방로 16길 61
