2016 지구대기감시 보고서 Report of Global Atmosphere Watch 2016



Climate Change Monitoring Division



차 례

요약	1
제1장 머리말	5
제2장 2016년 기상기후 특성	7
2.1 전지구 특성	7
2.2 한반도 특성	12
제3장 분야별 관측·분석 결과 ·····	16
3.1 온실가스 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	16
3.1.1 이산화탄소	16
3.1.2 메탄	30
3.1.3 아산화질소	33
3.1.4 육불화황	34
3.1.5 염화불화탄소류	36
3.1.6 품질관리를 위한 온실가스 관측자료 비교(플라스크 샘플링)	38
3.2 반응가스 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	40
3.2.1 오존 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	40
3.2.2 일산화탄소	42
3.2.3 질소산화물	44
3.2.4 이산화황	46
3.2.5 풍향·풍속에 따른 반응가스 농도분포	47
3.2.6 안면도 기후변화감시소 관측환경 개선	53
3.3 에어로졸	55
3.3.1 에어로졸 물리특성	56
3.3.2 에어로졸 광학특성	61
3.3.3 에어로졸 화학특성 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	82
3.4 대기복사	95
3.4.1 직달일사, 산란일사 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	96
3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사	98
3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사	99
3.4.4 순복사	L00

3.5 성층권오존 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	101
3.5.1 오존전량	102
3.5.2 오존 연직분포 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	105
3.5.3 남극 오존홀 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	112
3.6 자외선 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	115
3.6.1 자외선A	116
3.6.2 자외선B······	118
3.6.3 자외선 복사량(연세대학교, 위탁관측소)	121
3.7 총대기침적 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	125
3.7.1 2016년 강수특성	125
3.7.2 산성도	129
3.7.3 전기전도도	132
3.7.4 강수이온성분	135
3.7.5 강하분진	137
3.8 기타	141
3.8.1 수증기 농도 연직분포(숙명여자대학교, 위탁관측소)	141
3.8.2 라돈 농도(제주대학교, 위탁관측소)	146
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법	155
제4장 지구대기감시 자료 퉁계 방법	155 155
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법	155 155 159
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸	155 155 159 161
제4장 지구대기감시 자료 퉁계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사	155 155 159 161 164
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존	155 155 159 161 164 166
 제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 	155 155 159 161 164 166 168
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적	155 155 159 161 164 166 168 170
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적	155 159 161 164 166 168 170
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성증권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적	 155 159 161 164 166 168 170 172
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적	155 159 161 164 166 168 170 172
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적 참고문헌 부록 1. 지구대기감시 관측자료	155 159 161 164 166 168 170 172 179 180
제4장 지구대기감시 자료 특계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적	155 159 161 164 166 168 170 172 179 180 223
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성증권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적 참고문헌 부록 1. 지구대기감시 관측자료 2. 지구대기감시 연황 3. 기후변화감시 기술노트 목록	155 159 161 164 166 168 170 172 172 180 223 228
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적 **	155 159 161 164 166 168 170 172 179 180 223 228 229
제4장 지구대기감시 자료 통계 방법 4.1 온실가스 4.2 반응가스 4.3 에어로졸 4.4 대기복사 4.5 성층권오존 4.6 자외선 4.7 총대기침적 참고문헌 부록 1. 지구대기감시 관측자료 2. 지구대기감시 관측자료 3. 기후변화감시 기술노트 목록 4. 기후변화감시 기술노트 목록 5. 기후변화감시기술 특어 보유(출원) 현황	155 159 161 164 166 168 170 172 172 180 223 228 229 234

요약

□ 온실가스

2016년 안면도, 제주 고산, 울릉도에서 관측된 온실가스는 이산화탄소 (CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 육불화황(SF₆), 염화불화탄소류(CFC-11, CFC-12, CFC-113)로 총 7종이다. CO₂는 안면도 409.9 ppm, 고산 409.5 ppm, 울릉도 407.5 ppm, 독도 407 ppm 순으로 높았으며, 꾸준히 증가 추세에 있다. 한반도에서 가장 긴 실시간 관측자료를 가진 안면도는 2015년 대 비 2.9 ppm이 증가해 10년 평균 증가값(2007~2016년)인 2.3 ppm/yr 보다 높았다. 미국해양대기청에서 발표한 2016년 전지구 농도는 402.9 ppm으로 한 반도 농도가 약 7 ppm 높다. CH₄, N₂O, SF₆ 또한 꾸준히 증가하고 있으며, 메 탄의 경우 전년도에 비해 13 ppb, N₂O는 1 ppb, SF₆는 0.2 ppt 증가하였다.

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

□ 반응가스

2016년 고산에서 관측한 반응가스 중 오존(O₃)의 농도는 봄과 가을에 높고 겨울과 여름에 낮았고, 그 외 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 이산화황 (SO₂)의 농도는 여름에 낮고 겨울에 높은 계절 변동을 보였다.

최근 5년간(2012~2016년) 고산에서 관측한 O₃은 2015년까지 조금씩 증가 하다가 2016년에 감소하였으며 CO, NOx, SO₂는 매년 큰 증감 없이 비슷한 수 준으로 관측되고 있다. 풍향 풍속에 따른 반응가스 농도분포는 O₃의 경우 봄에 풍향 풍속에 관계없이 50 ppb 이상의 농도가 고르게 분포하였고, CO는 겨울에 바다에 접한 북서풍 계열의 바람이 불 때 비교적 높은 농도를 보였다. NO_x는 여름을 제외하고 동~서 방향으로 비교적 높은 농도를 보였으며 풍속이 강할수 록 농도가 높았다. SO₂는 여름과 가을에 풍향 풍속에 상관없이 매우 낮은 농도 를 보였으며 봄과 겨울에 서풍 계열에서 비교적 높은 농도를 보였다.

□ 에어로졸

2016년 안면도에서 관측한 PM10 질량농도 연평균은 35 μg/m³으로 지난 10년(2006~2015년) 평균(40 μg/m³) 보다 약 12% 낮게 나타났으며, 2005 년 이후 대체로 감소하는 추세를 보이고 있다. 2016년 고산의 PM10 질량농도 연평균은 31μg/m³로 지난 5년(2011~2015년) 평균(29μg/m³)보다 약 7% 높았다.

2016년 고산의 입경별 부피농도는 대부분의 구간에서 지난 7년(2009~2015년) 평균에 비해 낮았다. 그리고 고산에서 응결핵계수기로 관측한 응결핵 수농도는 5월과 6월을 제외하고 지난 2년(2014~2015년) 평균에 비해 낮게 관측되었다.

2016년 안면도의 광산란계수와 광흡수계수는 각각 69.0 Mm⁻¹, 8.8 Mm⁻¹ 로 광산란계수는 최근 10년 중 가장 낮았으며, 광흡수계수는 2015년과 비슷했다.

2015년과 2016년에 안면도, 제주 고산, 울릉도에서 관측된 에어로졸 광학깊 이(AOD)는 대체로 봄철에 큰 값을 보였고 가을철과 겨울철에 적은 값을 보였 다. 옹스트롬지수는 주로 큰 입자로 구성된 황사의 영향을 받는 봄철에 적은 값 을 보이고, 가을철과 겨울철에는 대체로 큰 값을 보였다.

안면도에서 라이다를 이용하여 2016년 11월 27일과 28일에 황사를 관측하 였다. 이를 통해 지상에서 2.5km 고도까지 후방산란강도와 편광소멸도가 높게 나타나 비구형성 황사 에어로졸이 증가함을 확인하였다.

포집방식(저용량 미세먼지채취기)으로 측정한 PM10과 PM2.5의 질량농도 는 각각 41.0±30.4 μg/m³(n=46)과 34.8±22.1 μg/m³(n=49)로 지난 8년 평균(2008~2015년)(PM10: 50.2±35.3 μg/m³(n=285), PM2.5: 36.2±22.5 μg/m³(n=304))보다 낮았다. PM10의 이차오염물질인 nss-SO4²⁻, NO3⁻, NH4⁺의 2016년 농도는 모두 지난 8년 평균보다 낮았다.

□ 대기복사

2016년 고산 기후변화감시소의 연평균은 태양하향복사 149.4 W/m², 직달 일사 104.3 W/m², 산란일사 79.3 W/m²으로 지난 7년간(2009~2015년) 평 균(태양하향복사 156.7 W/m², 직달일사 115.5 W/m², 산란일사 82.0 W/m²) 과 비슷하였고, 안면도 기후변화감시소는 측정기 검정으로 겨울 관측 값이 없어 연평균을 분석하지 않았다. 안면도 기후변화감시소의 2016년 직달일사 월평균 최대는 5월에 207.9 W/m², 최소는 1월에 74.4 W/m²로 나타났다. 산란일사의 월평균 최대는 6월에 130.5 W/m², 최소는 1월에 57.2 W/m²이다. 고산 기후변화감시소의 2016년 월평균 최대는 직달일사가 8월에 173.9 W/m², 산란일사는 6월에 112.4 W/m²이며 최 소는 직달일사가 1월에 30.7 W/m², 산란일사는 12월에 44.1 W/m²이다. 고산 의 10월 직달일사는 지난 7년(2009~2015년) 평균값 대비 약 60% 낮았는데, 2015년 대비 10월 고산 월 강수량은 약 6배 높았고, 일조시간은 약 60% 감소 한 경향과 일치한다.

태양복사의 월평균은 계절변동으로 봄철에 증가하고 겨울로 갈수록 감소하나 여름철에는 구름과 강수로 인해 오히려 값이 낮아진다. 안면도의 2016년 월평 균 최대는 5월에 46.8 W/m²(태양상향복사), 255.0 W/m²(태양하향복사), 최소 는 12월에 20.0 W/m²(태양상향복사), 1월에 87.7 W/m²(태양하향복사)로 관 측되었다.

지구복사는 기온, 습도의 연직분포, 운량, 구름물리성분, 지면온도의 영향을 받아 겨울에 낮고 여름에 높은 계절변동 특성이 나타난다. 2016년 월평균 지구 상향복사의 최대는 8월에 462.0 W/m², 최소는 1월에 313.2 W/m²이며, 지구 하향복사의 최대는 7월에 386.5 W/m², 최소는 2월에 248.3 W/m²으로 나타났다.

□ 성층권오존/자외선

2016년 오존전량은 안면도 321 DU, 고산 291 DU, 서울 324 DU로 나타 났다. 세 지점 모두 2015년 보다 약 3%(안면도), 약 8%(고산), 4%(서울) 각 각 감소하였다. 오존전량 최댓값은 안면도 3월 27일에 433 DU, 고산 3월 27 일 419 DU, 서울 2월 5일 438 DU이다. 2월부터 5월까지 계절변동이 크고 10 월에 가장 낮은 분포를 보였다. 월평균 값이 과거 참조값 대비 봄철은 감소하였 는데, 봄철의 오존전량 감소는 북극에서 나타난 오존전량의 급감과 이에 의한 오존홀 현상이 북반구 중위도 지역까지 영향을 미친 것으로 볼 수 있다.

2016년 지역별 자외선A의 일누적 복사량의 최댓값은 강릉은 6월 1일에 1.55 MJ/m², 서울은 7월 9일에 1.52 MJ/m², 울릉도는 6월 1일에 1.45 MJ/m², 안 면도는 6월 25일에 1.38 MJ/m², 포항은 6월 2일에 1.45 MJ/m², 목포는 7월 23일에 1.52 MJ/m², 고산은 5월 23일에 1.55 MJ/m²로 나타났다. 주로 5월, 6월, 7월에 최댓값이 나타났다. 자외선은 태양천정각과 일조시간 등에 영향을 받기 때문에 자외선 일 누적 값은 하지를 기준으로 남중고도가 높고, 낮 길이가 긴 5월~6월 사이 높게 나타날 수 있고, 7월~8월의 경우는 장마의 영향으로 누 적 복사량이 낮아지는 경향이 있다. 2016년 각 지역별 일 누적 최댓값은 강릉 7월 22일 5.0 KJ/m², 서울 5월 7일 4.15 KJ/m², 울릉도 7월 15일 5.88 KJ/m², 안면도 7월 14일 5.44 KJ/m², 포항 7월 15일 4.79 KJ/m², 목포 5월 30일 5.41 KJ/m², 고산 5월 23일 5.87 KJ/m²이다. 주로 5월, 7월에 최댓값을 보였다. 자외선B의 월변동성을 과거 월 평균값과 비교한 결과 일 누적값의 월변 동성과 일 최댓값의 월변동성은 5월~8월이 높고 강수의 영향을 받은 6월, 7월 에 다소 감소하는 비슷한 경향을 보였다. 울릉도, 안면도, 목포의 경우 5월부터 8월사이의 일 누적 월 평균값이 지난 과거 평균값보다 증가하였고, 그 외 지역 은 큰 차이를 보이지 않았다.

□ 총대기침적

2016년 지역별 연강수량은 안면도 658.0 mm, 고산 1543.5 mm, 울릉도 2079.2 mm, 울진 1196.3 mm로 울릉도가 가장 많았고, 지난 10년(2006~2015년)간의 평균과 비교할 때 2016년에 안면도에서 강수량이 더 적었고, 고 산과 울릉도, 울진에서 더 많았다.

2016년 우리나라 강수의 평균 산성도(pH)는 4.94로, 지난 10년(2006~2015년)간의 평균 산성도인 4.69보다 높았다. 지점별로 산성도를 살펴보면, 안 면도 4.90, 고산 5.08, 울릉도 4.81, 울진 5.12로 울릉도가 가장 낮았고, 울진 이 가장 높았다.

2016년 산성비 발생 비율은 pH 5.6 이하인 경우가 안면도 82.5%, 고산 78.7%, 울릉도 90.5%, 울진 66.2%로 울릉도가 가장 많았고, pH 4.5 이하인 경우가 안면도 19.3%, 고산 10.6%, 울릉도 16.8%, 울진 0.0%로 안면도가 가 장 많았다. 지난 10년간의 평균과 비교할 때 울릉도를 제외하고 모든 지점에서 2016년에 더 낮게 나타났다.

2016년 전체 침적량은 7,898 mg/m²으로, 2010년 이후 대체로 감소하는 경향을 보이며, 2003년 이후 건성 침적량이 습성 침적량에 비해 적었다. 2016 년 월별 침적량을 보면 8월 침적량이 가장 많았고, 건성과 습성 침적량은 각각 5월과 7월에 가장 많았다. 지난 10년(2006~2015년)간의 평균의 경우 전체 침적량과 건성 침적량은 모두 12월에, 습성 침적량은 8월에 가장 많았다.

제1장 머리말

기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC¹⁾)가 발표한 제5차 기후변화 평가보 고서(2013년)에 따르면 지구의 온도가 산업화 이전(1850~1900년) 평균기온 대비 2℃ 이상 오르면 인류에 심각한 위협이 될 것이라고 경고하고 있다.

해수면 상승에 따른 주거지역 감소, 폭염·가뭄·집중호우와 같은 이상기후 발 생과 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 국 제사회 노력의 일환으로 진행되어 왔다.

특히 지난 2015년 12월 12일 파리에서 열린 제21차 유엔기후변화협약 당 사국총회(COP21)에서 교토의정서가 만료되는 2020년 이후의 새 기후변화 체 제를 위해 채택한 파리협정은 195개 당사국의 참여를 이끌어 낸 것과 규제 목 표를 강화하였다는 점에서 의미가 크다.

파리협정의 장기목표는 산업화 이전 대비 지구 평균기온 상승을 '2℃보다 상 당히 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 정 확하게 예측하고 체계적으로 대응해 나가기 위해서는 지구대기 조성에 관한 과 학적 근거자료 확보가 매우 중요하다.

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

¹⁾ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

²⁾ UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

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 기본관 측소와 포항, 목포 등 3개 보조관측소, 그리고 대학, 유관기관에서 운영하는 6개 의 위탁관측소가 한반도 지구대기감시 관측망으로 운영되고 있으며, 이 중 안면 도를 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 관 측하고 있으며, 동북아시아 지역을 대표하는 수준 높은 관측자료 제공과 연구 활동을 통해 국제 네트워크와 프로그램에 활발히 참여하고 있다.

또한, 한반도 기후변화에 대한 국민들의 이해를 높이고, 온실가스 감축 등 미 래 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.

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 국제비교 실험과 온실가스 관측기술 적합성 평가 등에서 세계 최고 수준의 기술을 보유한 것으로 평가 받았다.

2016년에는 신뢰도 높은 자료 생산과 더불어 다양한 정보를 제공하기 위해 온실가스의 품질관리 기법을 개선하고 한미기상협력의 일환으로 수행된 NOAA 의 온실가스 플라스크 관측·분석결과를 추가하였으며, 연직오존자료의 고도별 분석 자료를 새롭게 제시하였다. 제4장 지구대기감시 자료 통계 방법에는 기후 변화감시소별 각 분야에 대한 관측장비와 품질관리 등을 상세하게 수록하였다.

제2장 2016년 기상기후 특성

2.1 전지구 특성

2.1.1 기온 특성

2016년 전 지구 평균기온은 14.84℃로 20세기 평균(13.90℃)에 비해 0.94℃ 높아 1880년 이래 가장 높은 기온으로 기록되었다(2위:2015년/+0.90℃, 3위: 2014년/+0.74℃).

2015/16년 겨울철에 최고조로 발달했던 엘니뇨가 2016년 봄철 동안 약화되 었으나 그 영향이 지속되면서 2016년 전 지구 평균기온 상승에 기여했다. 전 지구 평균기온은 1880년 이래 10년마다 약 0.07℃씩 상승하고 있으며, 전 지 구 평균기온이 20세기 평균보다 높았던 해가 40년째 계속되고 있다. 또한, 지난 137년 동안 기온이 높았던 순으로 1위부터 17위에 해당하는 해를 살펴보면, 1998년(8위)을 제외하고 모두 2000년대 이후의 해인 것으로 나타났다.



그림 2.1.1 2016년 전지구 평균기온 편차 평년: 1981~2010년(출처: 미국국립해양대기청)

전 지구 연평균기온 편차 분포(그림 2.1.1)를 살펴보면, 전 세계 대부분 지 역에서 평년보다 높은 기온이 나타났다. 특히, 러시아 동부, 알래스카, 캐나다 서 부, 미국 동부, 중미 및 남미 북부, 칠레 남부, 아프리카 동부 및 서부, 중앙 시 베리아, 남아시아 일부, 동남아시아의 섬나라와 파푸아 뉴기니, 그리고 호주의 북부와 동부 해안을 따라 기온이 연중 평년보다 높았다. 그리고 6개 대륙의 연 평균기온 모두 최고 5위 안에 들어가는 기록을 보였고, 이 중 북미는 평균 (1910~2000년)보다 1.86℃ 높아 1910년 이래 가장 높은 기온을 기록하였다.

가. 아시아

아시아의 2016년 평균기온은 2015년(1위), 2007년(2위)에 이어 관측 이래 세 번째로 높았다. 태국의 Mae Hong Son에서는 4월 28일에 44.6℃로 가장 높은 기온을 기록하였다. 인도의 Phalodi에서는 5월 19일에 51.0℃로 최고기온 을 기록하였으며, 중동 일부지역에서는 7월 말에서 9월 초 사이에 기록적인 기 온이 관측되었다. 쿠웨이트의 Mitribah에서는 7월 21일에 54.0℃의 기온이 관 측되었으며, 이는 아시아에서 가장 높은 기온으로 기록되었다. 이라크 Basra에 서는 7월 22일에 53.9℃를 기록하였으며, 이란의 Delhoran에서는 53.0℃를 기 록하였다.

나. 북아메리카

북아메리카의 2016년 평균기온은 관측 이래 가장 높았다. 미국에서는 2016 년 평균기온이 지난 122년 중 2012년에 이어 두 번째로 높았다. 알래스카에서 는 2016년 평균기온이 1925년 이래 가장 높은 해로 기록되었다. 캐나다 서부 의 대부분 지역에서는 여름철 평균기온이 관측 이래 가장 높았다.

다. 남아메리카

남아메리카의 2016년 평균기온은 2015년에 이어 관측 이래 두 번째로 높았 다. 브라질 대부분의 지역에서는 계절별 평균기온이 평년보다 높았다. 아르헨티 나에서는 2016년 평균기온이 평년(1961~1990년)보다 0.23℃ 높았다.

라. 아프리카

아프리카의 2016년 평균기온은 2015년에 이어 관측 이래 두 번째로 높았 다. 4월과 8월의 평균기온이 관측 이래 가장 높았고, 그 외 월의 평균기온은 역 대 7위 안에 들었다. 남아프리카의 Pretoria와 Johannesburg에서는 1월 7일 기온이 각각 42.7℃와 38.9℃까지 올라갔으며, 이 값은 가장 높은 기온을 기록 했던 이전 기록보다 3℃ 이상 높은 수치이다.

마. 유럽

유럽의 2016년 평균기온은 2014년(1위), 2015년(2위)에 이어 지난 107년 중 세 번째로 높았다. 2016년 평균기온을 나라별로 살펴보면, 스페인이 평년 (1981~2010년)보다 0.7℃ 높아 1965년 이래 여섯 번째로 높았으며, 영국은 평년보다 0.5℃ 높았다. 프랑스는 평년보다 0.6℃ 높아 1900년 이래 열 번째로 높았고, 독일은 평년보다 0.7℃ 높았다. 오스트리아는 평년보다 1.0℃ 높아 지 난 248년 중 네 번째로 높았고, 덴마크는 평년보다 1.3℃ 높아 1874년 이래 열한 번째로 높았으며, 핀란드는 평년보다 2℃ 높아 따뜻한 해로 기록되었다.

바. 오세아니아

유럽의 2016년 평균기온은 2014년(1위), 2015년(2위)에 이어 지난 107년 중 세 번째로 높았다. 2016년 평균기온을 나라별로 살펴보면, 스페인이 평년 (1981~2010년)보다 0.7℃ 높아 1965년 이래 여섯 번째로 높았으며, 영국은 평년보다 0.5℃ 높았다. 프랑스는 평년보다 0.6℃ 높아 1900년 이래 열 번째로 높았고, 독일은 평년보다 0.7℃ 높았다. 오스트리아는 평년보다 1.0℃ 높아 지 난 248년 중 네 번째로 높았고, 덴마크는 평년보다 1.3℃ 높아 1874년 이래 열한 번째로 높았으며, 핀란드는 평년보다 2℃ 높아 따뜻한 해로 기록되었다.

2.1.2 강수량 특성

2016년 전 지구 육지 강수량은 평년보다 많았던 지역과 가뭄 지역이 세계 곳곳에서 나타났다.

가. 아시아

2016년에 중국의 양쯔 강 유역에서는 1999년 이후 최대의 홍수를 겪었다. 4월부터 7월까지 양쯔 강 유역의 중부와 남부지역에서 강수량이 지속적으로 많 아 평년대비 140%를 기록하였다. 인도의 대부분 지역에서는 2016년 몬순 계절 에 극심한 홍수가 있었으며, 갠지스 강 유역의 일부 지역에서는 강수량이 관측 이래 가장 많았다.

나. 아메리카

아르헨티나 북동부에서는 2016년 4월에 많은 비가 내렸다. 일부 지역에서는 4월 강수량이 관측 이래 가장 많았으며, 평년 강수량의 2~3배를 기록하였다. 특히, Malargüe의 4월 강수량은 145.3 mm로 평년 강수량의 6배 이상을 기록 하였다.

다. 아프리카

남부 아프리카 대부분 지역에서는 2014년부터 2015년까지의 강수량이 평년 보다 적어 가뭄이 지속되었으나, 2016년 강수량은 평년보다 많아 가뭄 해소에 도움을 주었다. 케냐와 탄자니아에서는 3월에서 5월까지 "long rains" 기간에 강수량이 평년보다 적었다. 또한, 10월에 시작된 "short rains"가 12월까지 지 속되면서 12월에 강수량이 평년보다 현저히 적었으며, 이로 인해 남동부 및 연 안 농업 지역의 농작물과 가축 상태를 악화시켰다.

라. 유럽

영국에서는 2016년 1월 강수량이 평년대비 152%를 기록하였으며, 1910년 관측이 시작된 이래 네 번째로 많았다. 10월 강수량이 여섯 번째로 적은 강수량 을 기록하면서 가을철 강수량은 평년(1981~2010년)대비 74%를 기록하였고, 2008년 이후 가장 적었다. 스웨덴에서는 2016년 2월에 강수량이 많았다. 특히, Norrland 북부의 2016년 2월 강수량이 관측 이래 가장 많았으며, 평년 강수량 의 3배를 기록하였다. 덴마크에서는 2016년 4월 강수량이 67.5 mm를 기록하여 1998년 이후 가 장 많은 양이었다. 네덜란드 대부분 지역에서는 2016년 6월 강수량이 200 mm 이상을 기록하였으며, Limburg Ysselsteyn에서는 277 mm를 기록하여 관측 이래 가장 많았다. 핀란드에서는 2016년 10월 강수량이 지난 55년 중 가장 적 었으며, 노르웨이에서는 2016년 10월 강수량이 1900년 관측이 시작된 이래 네 번째로 적었다. 프랑스에서는 2016년 12월 강수량이 1959년 관측이 시작된 이 래 가장 적었으며, 1991~2010년 평균 강수량의 20%에 불과하였다. 오스트리 아에서는 2016년 12월 강수량이 1858년 관측이 시작된 이래 가장 적었으나, 2016년 연 강수량은 평년(1981~2010년)대비 110%를 기록하였다.

마. 오세아니아

호주는 2016년 강수량이 평년대비 33%로, 1900년 관측이 시작된 이래 여 덟 번째로 적었다. 그러나 5월에는 호주 동부의 대부분 지역에서 강수량이 많았 으며, 이로 인해 2012년부터 Queensland 내륙과 Victoria 및 South Australia 의 일부 지역에 나타났던 가뭄이 해소되었다. 호주의 2016년 5월 강수량은 1983년 이후 가장 많았으며, 1900년 관측이 시작된 이래 일곱 번째로 많았고, 9월 강수량은 관측 이래 두 번째로 많았다. 뉴질랜드의 일부 지역에서는 2016 년 11월 강수량이 평년보다 많았으며, Wellington에서는 지난 89년 중 가장 많 은 강수량을 기록하였다.

2.2 한반도 특성

2.2.1 기온, 강수량 특성

2016년 전국의 연평균기온은 13.6℃, 평균최고기온은 18.9℃, 평균최저기온 은 9.0℃로 평년보다 각각 1.1℃, 0.8℃, 1.3℃가 높았다. 1973년 이래 연평균 기온과 연평균최저기온은 첫 번째로, 연평균최고기온은 세 번째로 높았다. 연평 균강수량은 1272.5 mm로 평년대비 97.4%였으며, 강수일수는 109.4일로 평년 보다 5.9일 많았다.

2016년 장마기간은 제주도, 남부지방, 중부지방에서 각각 29일(6.18.~7.16.), 29일(6.18.~7.16.), 37일(6.24.~7.30.)로 제주도와 남부지방에서는 평년보다 짧았으나, 중부지방에서는 평년보다 길었다. 장마기간 강수량은 제주도와 남부지 방에서 각각 347.4 mm와 283.8 mm로 평년(각각 398.6 mm, 348.6 mm)보 다 적었으나, 중부지방에서는 398.2 mm로 평년(366.4 mm)보다 많았다. 지난 30년간(1981~2010년) 장마기간의 전국 평균 강수량은 356.1 mm, 강수일수 는 17.1일이었고, 2016년 장마기간의 전국 평균 강수량은 332.1 mm, 강수일 수는 16.1일을 보였다.



그림 2.2.1 평균기온, 평균최고·최저기온, 평균강수량(1973~2016년) (출처: 2016 기상연감)



그림 2.2.2 2016년 평균기온, 강수량과 평년값 비교 (출처: 2016 기상연보)

2.2.2 계절별 특성

겨울철(2015.12~2016.2) 전국의 평균기온은 1.4℃, 평균최고기온은 6.3℃, 평균최저기온은 -3.0℃로 평년보다 1.8℃, 0.2℃, 1.1℃ 높았다. 강수량은 109.1 mm로 평년의 123.5%였고, 강수일수는 22.8일로 평년보다 3.0일이 많 았다.

봄철의 전국 평균기온은 13.2℃, 평균 최고기온은 19.5℃, 평균 최저기온은 7.4℃로 평년보다 각각 1.5℃, 1.6℃, 1.4℃ 높았다. 강수량은 312.8 mm로 평 년의 131.0% 수준이었고, 강수일수는 25.0일로 평년보다 0.5일 많았다. 봄철의 평균기온과 평균 최저기온은 1973년 이래 최고 2위, 평균최고기온은 최고 1위 를 기록하였다. 여름철 전국 평균기온은 24.8℃, 평균 최고기온은 29.7℃, 평균 최저기온은 20.9℃로 평년보다 각각 1.2℃, 1.3℃, 1.2℃ 높았으며, 최고기온 33℃ 이상 일 수는 1973년 이래 여름철 최고 2위를 기록하였다. 강수량은 445.7 mm로 평년 의 61.6%를 보였고 강수일수는 31.5일로 평년보다 5.8일 적었으며 1973년 이 래 여름철 강수량은 최저 5위를 기록하였다.

가을철 평균기온은 15.1℃, 평균최고기온은 20.0℃, 평균최저기온은 11.0℃ 로 평균기온과 평균최저기온은 평년보다 각각 1.0℃, 1.8℃ 높았고, 평균최고기 온은 0.1℃ 낮았다. 강수량은 381.6 mm로 평년의 150.0% 수준이었으며, 강수 일수는 31.8일로 평년보다 10.0일이 많았다.

1973년 이래 평균최저기온 최고 2위, 강수량 최고 4위, 강수일수 최고 2위 를 기록하였다.

2.2.3 주요 관측지점 기상특성

한반도를 대표하는 안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시 기본관측소의 동 일 지역 내 기상관서에서 2016년에 관측한 기상자료를 아래 표 2.2.1과 그림 2.2.3으로 나타내었다. 안면도는 인근 서산(129)의 자료를 사용하였다.

표 2.2.1 2016년 기후변화감시 주요지점 기상관측 자료

요소	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	전년 (2016)	평년
평균 기온 (°C)	서산	-1.6	0.6	5.9	12.5	17.9	21.9	25.2	26.4	21.7	15.3	7.2	2.2	12.9	11.9
	고산	5.6	6.7	9.7	14.2	17.5	21.1	26.1	27.7	23.4	19.7	13.4	9.4	16.2	15.6
	울릉도	1.3	2.1	6.7	12.3	17.3	20.5	23.0	24.5	20.3	15.5	9.3	5.9	13.2	12.4
강수량 (mm)	서산	21.9	61.7	24.3	87.0	153.7	36.8	295.6	34.0	53.1	73.8	17.5	62.7	922.1	1285.7
	고산	70.1	76.7	89.0	147.3	143.2	193.7	117.2	76.4	128.9	122.2	50.7	77.7	1293.1	1142.8
	울릉도	164.2	134.8	16.1	118.5	64.3	46.3	133.6	491.3	241.3	213.8	189.2	237.0	2050.4	1383.4
평균 습도 (%)	서산	79	76	73	76	76	85	91	86	88	85	80	82	81	74
	고산	70	66	72	84	82	91	89	79	86	80	73	71	78	75
	울릉도	67	65	59	63	58	76	85	79	81	71	68	64	70	74

※ 위치정보: 서산(36°46′N 126°30′E 해발 28.9m), 고산(33°18′N 126°10′E 해발 71.5m), 울릉도(37°29′N 130°54′E 해발 222.4m) 표 2.2.1은 지점별 주요 기상요소의 월별 평균을 나타내며, 그림 2.2.3은 바 람장미로 방위별 풍향 출현 빈도와 풍향별 풍속계급 빈도를 나타낸다.



그림 2.2.3 2016년 바람장미, 막대는 바람이 불어오는 방향, 길이는 해당등급의 바람 빈도, 중앙 원 속의 값은 무풍(0.5 m/s 미만)일 경우를 나타냄 (출처: 2016 기상연보)

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 체류시간으 로 한 번 배출되면 대기에 지속적으로 누적되어 지구온난화를 가속시키는 역할 을 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 교 토, 1997)에서는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄 소(CFCs), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 규제대 상의 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 7종 을 관측하고 있으며, 위탁관측소로 지정된 극지연구소는 세종기지에서 대기 중 이산화탄소 농도를, 서울대학교는 광릉수목원에서 산림 이산화탄소 플럭스를 측 정하고 있다. 기상청은 안면도 기후변화감시소의 관측을 기준으로 1999년부터 현재까지 총 18년간의 온실가스 배경대기농도 관측자료를 확보하고 있다.

3.1.1 이산화탄소(CO₂)

가. 기후변화감시 기본관측소(안면도, 고산, 울릉도독도)

이산화탄소는 지구온난화를 유발하는 주요 원인물질로 인간의 화석연료 소비 증가로 배출되는 대표적인 온실가스이다. 이산화탄소의 전지구 평균농도는 꾸준 히 증가하고 있으며 관측단위는 ppm(part per million, 100만분의 일)이다. 일 반적으로 이산화탄소는 배출되어 대기 중에 머무르는 체류 기간이 100~300년 이나 된다. 모든 온실가스의 전지구 복사강제력이 산업화이전 시기(1750년 이 전)와 비교하여 2.83 W/m²에 이르며 이중 이산화탄소가 차지하는 전지구 복사 강제력은 1.83 W/m²(64.3%)에 이르는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2013).

2016년 안면도에서 관측된 이산화탄소 연평균 배경대기 농도는 409.9 ppm 이다. 안면도에서 처음 이산화탄소 농도를 관측한 1999년 연평균농도 371.2 ppm과 비교하여 최근 18년간(1999~2016년) 38.7 ppm 증가하였으며 1999 년 농도 대비 110%이다. 산업화 이전인 1750년 이산화탄소 전지구 평균농도 278.0 ppm와 비교하면 147% 증가한 값이다.

안면도 이산화탄소는 2015년에 비해 2.9 ppm 증가하였으며, 지난 10년간 관측된 이산화탄소 평균 절대 증가값인 2.3 ppm/yr 보다 0.6 ppm 높았다. 미 국해양대기청에서 발표한 2016년 전지구 이산화탄소 농도는 402.9 ppm으로 전년도에 비해 3.5 ppm 증가했으며, 지난 10년간 평균 증가값인 2.2 ppm/yr 보다도 높았다. 고산은 409.5 ppm으로 2015년 보다 3.0 ppm 증가하였으며 지난 4년간의 평균 절대 증가값인 2.6 ppm/yr 보다 높았다. 울릉도와 독도도 407.5 ppm과 407 ppm으로 전년도보다 각각 3.3 ppm과 2.7 ppm 증가하였 다. 2015년과 2016년 계속된 이산화탄소의 높은 증가율은 전례없던 엘리뇨의 영향의 가능성과 자연이 이산화탄소를 재흡수하는 양이 포화상태에 이르렀을 가 능성을 제시한 바 있다(WMO bulletin, 2016).

	안면도	고산	울릉도	독도	전지구1
2016년 평균값	409.9	409.5	407.5	407	402.9
2015년 대비 절대 증가값 ²	2.9	3.0	3.3	2.7	3.5
지난 10년간 이산화탄소 평균 절대 증가값 (2007~2016년)	2.3 ppm/yr		-	-	2.2 ppm/yr

표 3.1.1 2016년 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 CO₂ 농도(ppm)

¹ 본 보고서에 명시된 전지구 농도는 미국해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 발표값으로 이 값은 NOAA의 플라스크 샘플링 네트워크 자료를 기초함. WMO에서 발표하는 전지구 농도는 통상 10월에 발표됨.

2 절대증가값 = 올해 연평균값 - 전년도 연평균값



그림 3.1.1 1999년부터 2016년까지 안면도(검은색), 고산(붉은색), 울릉도(파란색), 독 도(녹색)의 CO₂ 배경대기 농도



그림 3.1.2 2016년 안면도(검은색), 고산(붉은색), 울릉도(파란색), 독도(녹색)의 CO₂ 계절변동

그림 3.1.1은 1999년부터 2016년까지 안면도의 이산화탄소 배경대기 농도 시계열이다. 안면도의 이산화탄소 농도는 1999년부터 꾸준히 증가하여 2013년 에 처음으로 연평균농도가 400 ppm을 넘었다. 2015년까지 여름철에는 300 ppm 후반이 관측되었으나, 2016년부터는 월평균 전체가 400 ppm을 넘었다. 이는 제주도의 고산에서도 동일한 결과로 나타났다.

2016년 안면도, 고산, 울릉도, 독도의 이산화탄소는 4월에 최댓값, 8월에 최 솟값을 기록했다. 이러한 계절변동은 이산화탄소의 발생원과 흡수원, 주풍에 따 른 이동에 의한 영향을 알 수 있는 지표가 된다. 안면도와 고산은 최댓값과 최 솟값의 차이가 각각 12.1 ppm과 10.2 ppm으로 나타났으며 울릉도와 독도에서 는 각각 19.4 ppm, 14.2 ppm을 나타냈다. 이들 값은 바다 한가운데 있는 마우 나로아 관측소의 최댓값과 최솟값의 차이인 5.8 ppm 보다 두배 이상 크다. 최 댓값과 최솟값의 차이는 이산화탄소의 발생원과 식생 등의 흡수원이 분포하고 있는 내륙에 가까울수록 큰 것으로 알려져 있다. 최댓값은 안면도 > 고산 > 울 릉도 > 독도 순으로 나타났으며, 관측소간 차이가 크지 않지만, 최솟값은 고산 > 안면도 > 독도 > 울릉도 순으로 관측소간 차이가 약 9 ppm 나타난다.

그림 3.1.3은 안면도와 비슷한 북반구 위도 대에 위치한 일본 료리(Ryori) 관측소(39.03°N, 141.82°E)와 전지구 평균에 가장 근사한 값을 관측하는 미국 하와이 마우나로아(Mauna Loa) 관측소(19.54°N, 155.58°W)에서 측정된 이산 화탄소 농도의 시계열 그림이다. 특히, 1958년부터 이산화탄소 농도를 측정해 온 마우나로아 관측소는 GAW 지구급 관측소로 지구에서 가장 오래된 이산화탄 소 실시간 관측자료를 확보하고 있다. 북반구에 위치한 3곳의 관측소 모두 관측 이래 지금까지 꾸준히 이산화탄소 농도가 증가하고 있으며, 최근 들어 안면도뿐 만 아니라 다른 두 관측소에서도 이산화탄소 농도가 400 ppm을 넘어 섰다.



그림 3.1.3 마우나로아(녹색), 료리(파란색), 안면도(검정색)의 이산화탄소 농도 비교

나. 울릉도 기후변화감시소의 관측값 보정

울릉도 기후변화감시소는 6월 8일부터 11월 1일까지 약 5개월간 실제 표준 가스의 농도와 교정한 농도가 달라 정확한 관측값을 얻을 수 없었다. 그림 3.1.4(위)는 교정이 잘못된 기간의 원시자료를 나타내며, 잘못 교정된 기간 동 안 값이 연속적이지 않음을 보인다.



그림 3.1.4 울릉도 기후변화감시소의 2016년 1월부터 2017년 3월까지의 보정전 원시 자료(위)와 보정후 자료(아래)

울릉도 기후변화감시소에서 이산화탄소 농도 측정을 위해 사용하는 공동감쇠 분광기(Cavity Ring Down Spectroscopy, Picarro, G2401)의 경우 레이저를 이용하는 장비로 Beer-Lambert 법칙에 의해 농도에 따른 기기의 반응값이 직 선적이다. 따라서 값을 보정할 때 장비의 직선성이 있다고 가정하였다.

보정방법은 정확한 표준가스를 주입하였을 때의 검량성 커브와 잘못된 검량 성 커브의 차이를 이용하여 보정식을 구하였으며, 월 1회 교정(6월 8일, 7월 1 일, 8월 10일, 9월 25일, 10월 11일)하였으므로 각 교정 후 기간에 따른 각기 다른 보정식을 적용하였다. 그 결과는 그림 3.1.4(아래)와 같다. 6월의 경우 관 측은 되었으나 제습장치의 이상으로 관측값 자체가 정확하지 않으므로 이상 기 간을 제외하였다. 그림 3.1.4(아래)를 통해 보정후 자료가 다른 관측기간과 연 속성을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 태하등대(37.523 E 130.796 N)는 울릉도 북서쪽에 위치하며, 직선거리로 울릉도 기후변화감시소에서 약 10 km 떨어져 있다. 태하등대에서도 2015년부터 울릉도 기후변화감시소와의 비교실험을 위해 이산화탄소(Picarro G2301)를 감시하고 있으며, 울릉도 기후변화감시소와 마 찬가지로 한 달에 한번 교정하고, 표준가스의 척도(WMO scale)를 동일하게 사 용한다. 2016년 울릉도 기후변화감시소 보정후 자료를 태하등대에서 관측한 이 산화탄소 농도와 비교하였을 때, 두 자료의 경향성이 동일했으며, 농도가 높을수 록 차이값이 증가하였으나 평균 0.26 ppm의 차이를 보였다. 또한 이 두 값을 상호 비교하였을 때 상관계수(R)는 0.95로 상당히 일치하는 것으로 나타났다 (그림 3.1.5의(우)). 기울기는 전체농도대를 기준으로 약 0.94로 다소 차이를 보였으나, 배경농도 구간인 300~415 ppm을 비교하면, 기울기가 1로 나타나 농도가 같고, 상관계수가 0.97로 상호관계가 높다.

따라서 울릉도에서 보정한 자료들은 신뢰도가 높다고 판단된다. 그러나 6월 8일부터 11월 1일까지는 보정값이므로 공식적인 자료로의 활용은 지양한다. 부 록에도 보정값에 대해서는 괄호를 함께 표기하여 실제 관측값과 구분하여 제공 하였다.



그림 3.1.5 울릉도 기후변화감시소의 보정후 자료(붉은색)와 태하등대 자료(회색) (좌) 와 두 관측소의 이산화탄소 농도값의 상관관계(y = 0.94x + 25.705, r = 0.95)(우)

다. 남극세종기지(위탁관측소)

남극세종과학기지(62°13'S, 58°47'W, 이하 세종기지)에서는 2010년 1월부 터 공동감쇠분광기(Wavelength-scanned cavity ring down spectroscopy, WS-CRDS)를 이용한 이산화탄소 농도 관측이 시작되었다(기상청, 2010). 그 리고 2010년 10월 26일에 이산화탄소 농도를 포함하여 성층권 오존 농도 등의 관측요소에 대해 세계기상기구(WMO) 산하 지구대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램의 지역급 기후변화감시소로 등재되었다.

세종기지에서의 이산화탄소 농도 관측은 WS-CRDS 방식의 CO₂/H₂O 분석 기(G1200, Picarro, Inc., USA, 이하 CRDS)와 제습 장치, 그리고 유량 조절 및 교정 장치로 구성되어 있다. 이산화탄소 농도 관측 시스템은 세종기지 본관 동에서 남서쪽 약 180 m 떨어져 있는 관측동에서 운영된다. 관측동 옥상 약 2.7 m 높이(지표면으로부터 약 6 m)의 흡입구에서 포집된다. 기상청의 온실가 스 측정시스템과 다른 점은 제습장치와 표준가스로 제습장치는 두 개의 네피온 드라이어(25 cm)와 화학시료 트랩(Mg(ClO4)2)으로 이루어져 있어 기상청의 저 온냉각제습법과 차이를 보이며, 표준가스의 경우 기상청은 WMO 척도를 사용하 지만 세종기지에서는 KRISS(한국표준과학연구원)의 척도를 사용하여 측정한다. 2016년 이산화탄소 관측에서 주요 결측 요인은 제습장치의 성능 저하, 펌프 및 부속 장치의 점검, 교정가스의 주입, 관측장비 프로그램 에러 등 관측시스템 관련 요인과 기지시설에 의한 오염 등 환경적 요인으로 구분할 수 있다. 2015 년말 냉각제습 장치의 고장으로 2016년 1월부터 네피온 드라이어와 제습제를 이용한 제습을 시작하여 관측을 지속하였다. 그러나 냉각제습 장치의 정상 가동 이 어려워 2월말부터 제습제를 이용한 제습만을 실시하였다. 남극 중에서도 강 수량이 많고, 하계기간 영상의 기온이 유지되는 세종기지의 기후학적 특성상 흡 입구를 통한 수증기 흡입이 많아 제습제의 교체가 빈번히 이루어졌다. 그러나 동계기간은 최장 두 달 이상 제습제 교체없이 운영이 이루어지기도 하였다. CRDS에 대한 교정은 1월 29일에 실시하였으며, 이후 15~20일 간격으로 표준

가스를 주입하여 농도를 측정하였다. 표준가스 측정값으로부터 도출된 교정식이 원자료에 적용된 후 최종 농도값이 산출되었다. 2016년 남극세종과학기지에서 측정된 월평균 풍속과 기온의 변동을 그림 3.1.6에 제시하였다. 풍속은 하계기간에 상대적으로 약하고, 겨울에 강한 전형적 인 모습을 보인다. 12월의 평균 풍속이 5.1 m/s로 가장 약하였고, 9월이 10.4 m/s로 가장 강하였다. 풍향은 북서풍계열(285°~345°)이 차지한 비율은 약 37%로 가장 우세하였고. 이산화탄소 농도 측정에 영향을 주는 발전동 방향 (355°~55°)의 바람은 약 14%를 차지하였다(그림 3.1.7). 연평균 풍속은 7.6 m/s로 지난 28년간(1988~2015년)의 8.0 m/s보다 다소 약했다. 기온의 경우 3월이 0.5℃로 가장 높았고, 8월이 -6.8℃로 가장 낮았다. 연평균 기온은 -2.0℃ 로 지난 28년간에 비해 0.5℃ 낮았다.



그림 3.1.6 남극세종과학기지에서의 2016년 월평균 풍속, 최대 풍속 및 기온의 변화



그림 3.1.7 남극세종과학기지의 2016년 풍향 분포

관측한 자료는 다음의 절차에 따라 최종 자료가 산출된다. 우선, 30초 동안 관측한 자료로부터 평균과 표준편차를 산출하고, 평균으로부터 표준편차 이상의 편차를 보이는 자료를 제거한 후 중앙값(median)을 30초 대푯값으로 정한다. 그런 후 20개의 30초 대푯값으로부터 10분 평균이 산출된다. 10분 평균 자료 에 대해 다음과 같은 조건에 해당되면 그 값은 제거되었다. 1) 장비의 정상 작 동 범위(cavity 내부의 온도가 44~46℃, 압력은 139~141torr)를 벗어난 경 우, 2) 10분 동안 관측된 원자료의 개수가 200개 이하인 경우, 3) 수증기 평균 농도가 0.02% 이상인 경우(제습장치의 점검 혹은 고장), 4) 풍향이 55도 이하 혹은 355도 이상(발전동의 풍하측에 해당), 5) 블랙카본 농도가 100 ng/m³ 이상인 경우, 6) 평균 산출에 사용한 30초 대푯값의 갯수가 10개 미안인 경우, 7) 10분 동안 표준편차가 0.5 ppm 이상인 경우, 10분 평균 자료는 제거되었 다. 이런 절차를 통해 취득한 2016년 이산화탄소 농도 자료는 약 70%이다. 월 별로 살펴보면, 장비 점검 및 제습장치의 시험 운영 등으로 안정화가 이루어지 지 않았던 1월의 수집율은 54%였고, 제습장비 문제가 있었던 8월과 12월 각각 58%와 45%의 수집율로 상대적으로 낮았으며, 나머지 월은 60~85%이었다.

10분 평균값의 개수가 3개 이상일 때 1시간 평균값이 산출되었고, 1시간 평 균값이 12개 이상인 경우 일평균이 산출되었다. 그림 3.1.8은 일평균 이산화탄 소의 연변동이다. 하계 기간 중 397.3~399.4 ppm 범위의 변동을 보이다가 10월초 402 ppm 근방까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 10월 중순이 후에는 다시 감소하여 12월 말 약 399 ppm 수준으로 관측되었다. 연중 일평균 최솟값은 2월 19일에 관측된 397.3 ppm이었고, 최댓값은 10월 10일에 관측된 402.8 ppm이었다.

그림 3.1.9는 2010~2016년의 7년 동안 월평균 이산화탄소의 연변동이다. 월평균은 월별 일수의 1/2 이상 일평균이 가용한 경우에만 산출되었다. 2016년 12월의 경우, 제습장치의 문제로 수집율이 기준에 미달하여 여기서 사용되지 못 하였다. 2010년부터 세종기지에서 측정된 이산화탄소의 농도 증가는 꾸준히 증 가하고 있다. 이산화탄소의 월평균농도의 연변동은 2.4~3.9 ppm (11개월 이상 의 자료가 가용하지 않은 2014년과 2015년은 제외)으로 2016년도 이와 비슷 한 3.6 ppm이었다. 2016년의 경우 월평균농도가 가장 컸던 달은 10월이었으 며, 가장 작았던 달은 3월이었다. 다른 해의 이산화탄소 농도의 최솟값은 1~3 월 중, 최댓값은 9~10월에 나타나는데 2016년의 경우도 이와 잘 일치한다. 일 평균으로부터 산출한 2016년 연평균은 약 400 ppm이었다. 다만, 12월 자료가 충분하지는 않지만 남극반도 끝단에 위치한 세종과학기지에서 이산화탄소 연평 균농도가 400 ppm과 크게 다르지 않을 것으로 보인다. 2010년부터 2016년까 지 평균적인 이산화탄소 농도의 연증가율은 2.3 ppm/yr로, 같은 기간 전지구 연증가율인 2.4 ppm/yr(출처: NOAA)와 비슷한 수준이었다. 한편, 남극대륙 연 안(74°37.4'S, 164°13.7'E)에 위치한 우리나라의 두 번째 남극기지인 남극장보 고과학기지에서 측정된 연평균 이산화탄소의 농도는 401.0 ppm이었다(극지연 구소, 2017a).



그림 3.1.8 남극세종과학기지에서 측정된 2016년 일평균 이산화탄소 농도의 변동



그림 3.1.9 남극세종과학기지에서 측정된 2010~2016년 월평균 이산화탄소 농도의 변동

라. 산림생태계 이산화탄소(서울대학교(광릉), 위탁관측소)

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

에디 플럭스 관측을 위한 에디 공분산 시스템은 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(footprint), 접근성 등을 고려하여 플럭스 타워의 40 m 높이에 설 치되어 있다(그림 3.1.10). 이산화탄소 농도는 고속반응 폐회로 적외선 기체분석 기(모델 EC155, Campbell Scientific Inc., Utah, USA)를 사용하여 관측하고 있 다. 이산화탄소와 수증기 농도는 10Hz로 관측하였고, 10Hz의 원시자료(raw data) 와 30분 평균자료를 접록기(모델 CR3000, Campbell Scientific Inc.)에 각각 집 록하였다. 에디 공분산 시스템 이외에도 저류항 관측을 위한 프로파일 시스템이 지 면에서 군락 위의 대기 중 이산화탄소 농도를 관측하고 있다. 프로파일 시스템의 노후화로 2013년 7월부터 해당 관측이 중단되었으며, 2014년 10월에 새로운 시 스템(모델 AP200, Campbell Scientific Inc.)을 설치하여 관측을 재개하였다. 새 로운 프로파일 시스템에서는 폐회로 적외선 기체분석기(모델 LI-840, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)를 통해 이산화탄소 농도분석이 초당 2회씩 이뤄 지고, 전체높이 분석시간은 120초/회이며, 30분 평균자료를 집록기(모델 CR1000, Campbell Scientific Inc.)에 저장되고 있다. 기체분석기 보정은 일 1회(자정) 자 동으로 이뤄지며, 추가로 격주마다 현장에 방문해 기체흡입구 청소와 필터 교체 등 을 비롯한 기기 유지보수와 함께 수동 보정을 수행한다. 프로파일 시스템의 경우 이산화탄소 농도의 '평균'을, 에디 공분산 시스템의 경우 이산화탄소 농도의 '분산' 을 정확히 관측하는 것을 목적으로 하기에, 본 보고서에는 프로파일 시스템에서 관 측된 이산화탄소 농도를 보고하였다. 2016년도 프로파일 시스템에서 관측된 이산 화탄소 농도의 자료 수집률은 98%로 지난 10년간(2006~2015년) 평균값에 비 해 높은 수준이었다.



그림 3.1.10 광릉 활엽수림 타워의 모습(왼쪽)과 관측장비 모식도(오른쪽)

그림 3.1.11은 프로파일 시스템의 폐회로 적외선 기체분석기로 관측된 이산 화탄소 농도의 평균 일 변동을 나타낸다. 여기서 이산화탄소 농도는 배경대기농 도 관측과 같이 넓은 수평적 공간을 대표하는 경계층 내의 잘 혼합된 평균적인 농도이기보다는 40 m 높이에서 기체분석기가 관측하는 발자국 영역(예를 들면 200~1000 m) 내의 이산화탄소 농도이다. 식생의 광합성이 활발한 기간(5~9 월)동안 이산화탄소 농도는 밤에는 증가하고, 낮에는 감소하는 뚜렷한 일 변동 을 보였다. 이는 밤에 식생 및 토양의 호흡으로 농도가 증가하고 낮에 광합성 작용으로 농도가 감소한 것에 기인한다.



그림 3.1.11 광릉 활엽수림의 월별 이산화탄소 농도의 평균 일 변동

일평균 탄소 농도는 380~430 ppm의 변동 범위를 보였으며, 5월부터 꾸준히 감소하여, 광합성이 최대로 나타나는 8월말에 최솟값을 보였다(그림 3.1.12). 이산화탄소 농도의 월평균값을 표 3.1.2에 나와 있다.



그림 3.1.12 광릉 활엽수림의 일평균 이산화탄소 농도

표 3.1.2 광릉 활엽수림의 월평균 이산화탄소(CO₂). ()는 월별 표준편차

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
CO2	416.4	415.1	428.9	423.6	412.3	405.9	401.1	395.5	403.9	412.4	420.9	423.4	412.2
ppm	(7.5)	(4.6)	(14.6)	(11.2)	(7.3)	(6.8)	(12.6)	(7.1)	(6.5)	(5.8)	(5)	(8.2)	413.3

이산화탄소 농도의 계절 변동은 식생 변화와 관계가 깊은데, 식생 계절 변화 를 감시하기 위해 낮 동안 한 시간 간격으로 카메라를 이용한 이미지 촬영이 이 뤄졌다. 관측 타워의 15m 높이에 카메라가 설치되어 아래 방향으로 관측지(프 로파일 시스템의 주간 발자국 영역)의 경관을 촬영하였다(그림 3.1.13). 2016년 에는 개엽이 4월 중순부터 시작하여 지난 10년간(2006~2015년)의 평균값과 비슷하거나 조금 빨랐다.



그림 3.1.13 활엽수림 타워에서 촬영한 타워 주변 경관(사진 좌측상단에 촬영 날짜 표기)

광릉 활엽수림의 11년간(2006~2016년) 이산화탄소 농도는 연중 350~ 460 ppm 범위에 있으며, 겨울철(12월, 1월, 2월)에 값이 높게 나타나는 반면 식생의 광합성으로 8월에 최솟값을 보이고 있다(그림 3.1.14). 안면도에서 관측 된 배경대기의 이산화탄소 농도와 비교해 볼 때, 같은 이유로 겨울철에는 두 지 점이 비슷한 농도를 보이지만 여름철에는 광릉 활엽수림의 농도가 20 ppm 정 도 더 낮다. 광릉 활엽수림의 최근 11년간 이산화탄소 농도 평균은 394 ppm이 며, 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. (연평균농도가 2006년에는 391 ppm, 2016년에는 414 ppm).



그림 3.1.14 2006년부터 2016년까지 광릉 활엽수림의 이산화탄소 농도 변화 경향

3.1.2 메탄(CH₄)

메탄은 이산화탄소 다음으로 중요한 온실가스 중 하나로 ppb(part per billion, 10억 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한다. 복사장제력은 0.48 W/m² 으로 전지구 온실가스 복사장제력 대비 17.0% 기여하고 있다(IPCC, 2013). 남 극과 북극에 아이스코어를 분석한 결과 현재 관측되고 있는 메탄의 농도는 지난 650,000년 동안 최고의 농도로 나타났다(IPCC, 2013). 과거 1000 A.D.와 1800 A.D. 사이에 북반구와 남반구의 메탄 농도 차이는 약 24~58 ppb로 나 타났으나, 1984년부터 2012년까지의 자료를 비교하였을 때 그 차이값이 135 ppb에 이르렀다. 이는 북반구의 인위적인 혹은 자연적인 배출량이 명백하게 중 가했기 때문이다(Etheridge et al., 1998). 메탄의 배출원은 습지, 바다, 대지의 사용, 쌀농사, 발효, 화석연료 등 다양한 인위적·자연적 요소가 존재하는 반면, 소멸원은 주로 OH라디칼로 알려져 있다. 메탄은 한번 배출되면 약 9년 정도 대 기 중에 체류하고, 다른 온실가스 종에 비해 체류시간이 짧기 때문에 정책적으 로 배출량을 줄이면 가장 빠른 효과를 볼 수 있다.

메탄의 농도는 그간 꾸준히 증가하여 왔으며, 2016년 연평균농도는 1965 ppb로 전년도에 비해 13 ppb 증가하였으며 1999년에 비해 104 ppb 증가하였 다. 메탄은 지난 10년간(2007~2016년) 평균 절대 증가값이 9.9 ppb/yr로, 전 년도의 절대 증가값은 과거 10년보다 높다(그림 3.1.15). 산업화 이전 메탄의 농도는 700 ppb 수준으로 보고되고 있으며, 산업화 이전대비 281% 증가하였다.



그림 3.1.15 안면도 감시소에서 관측한 메탄의 배경대기농도 변화



그림 3.1.16 안면도 감시소에서 관측한 메탄의 계절변동

메탄의 계절변동은 여러 배출원과 소멸원인 OH라디칼에 의해 일어난다. 특 히 북반구에서 계절변동의 변동폭이 크며, 여름철 OH라디칼의 농도가 높아지면 서 메탄과 반응하여 메탄의 농도는 낮아진다. 안면도는 7월에 가장 낮고 10월 에 가장 높은 값을 보인다(그림 3.1.16). 여름철 낮아지는 농도는 료리와 비슷 하지만, 최댓값은 안면도가 료리에 비해 20~40 ppb가 높아 안면도는 료리보다 배출원의 영향을 더 받을 것으로 추측할 수 있다. 반면 료리와 안면도 모두 마 우나로아보다는 100~200 ppb 높은 값을 보여 내륙에 영향을 받는 관측소의 배경농도 수준이 높음을 알 수 있다(그림 3.1.17).

그림 3.1.17과 같이 마우나로아를 포함하여 전지구적으로 메탄의 농도는 1999~2006년까지 변화가 거의 없었다. 안면도 또한 결측된 기간이 많지만 1999년부터 2006년까지 평균 절대 증가값이 약 4 ppb/yr로 관측되었으나, 2007년부터 2016년까지 8 ppb/yr로 증가하였다. 근래 들어 가파른 증가가 확실시 되고 있으나 이에 대한 과학적 근거는 현재까지 부족한 상황이다.

그러나 과거 메탄의 증가율이 높았던 해를 기준으로 그 원인을 살펴보면, 1991년의 급격한 증가는 메탄을 소멸하는 OH라디칼의 농도가 줄어들었기 때문 으로 피나투보화산에 의해 UV의 양이 감소하면서 OH라디칼의 생성기작이 활발 하지 못해 메탄의 소멸원이 줄어들었기 때문으로 보고된 바 있다(Dlugokencky et al., 1996).



그림 3.1.17 마우나로아(녹색), 료리(파란색), 안면도(검정색)의 메탄 농도 비교
3.1.3 아산화질소(N₂O)

아산화질소는 대기중 체류시간이 약 121년정도 되는 온실가스로 1750년부 터 2012년 사이 복사장제력이 전체 온실가스 중 6%를 차지하였다(IPCC, 2013). 아산화질소는 인위적 온실가스 중 세 번째로 높은 것으로 산업화 이전 에는 270 ppb 수준으로 존재하였다. 아산화질소의 자연기원은 해양, 토양 등이 있으며, 화석연료, 생태소각, 농업비료의 사용, 여러 산업공정에서 배출되는 인 위적 기원 등이 있다. 인위적 배출원과 자연적 배출원의 비율은 거의 같다. 아산 화질소는 광분해에 의해 성층권에서 소멸되며 때론 오존층파괴 과정에서 트리거 로 사용되기도 한다. 그러나 아직도 아산화질소의 전체 순환에 대해서 이해하진 못했다.

2016년 아산화질소의 농도는 안면도에서 330 ppb, 고산에서 330.1 ppb로 각각 전년도에 비해 각각 1 ppb과 0.8 ppb 증가하였으며 두 관측소의 농도차이 가 거의 없다(그림 3.1.18). 산업화 이전 아산화질소의 농도는 270 ppb 수준이 었으며, 산업화이전대비 122% 증가하였다.



그림 3.1.18 안면도(검정색), 고산(붉은색)의 아산화질소 농도 비교



그림 3.1.19 마우나로아(녹색), 료리(파란색), 안면도(검정색)의 아산화질소 농도 비교

안면도와 비슷한 위도의 관측소인 료리의 자료는 2014년까지 등재되어 있으 며, 온실가스 관측의 대표관측소인 마우나로아의 경우 2016년 6월까지만 등재 되어 있으나, 우리나라와 비슷한 수준으로 관측되며, 우리나라 관측소와 비슷하 게 매년 약 1 ppb씩 증가하는 것으로 나타났다. 지난 10년간(2006~2015년) 전 지구의 연평균 증가율 또한 0.9 ppb로 안면도의 0.8 ppb와 유사하다(그림 3.1.19). 안면도와 고산 뿐 아니라 다른 전지구의 관측소들도 이산화탄소와 메 탄과는 다르게 명확한 계절변동을 보이지 않고 있다. 그 이유는 대류권내에 소 멸원이 존재하지 않기 때문으로 여겨진다.

3.1.4 육불화황(SF₆)

육불화황은 ppt(part per trillion, 1조 분의 1) 수준으로 대기 중에 존재한 다. 100년을 기준으로 지구온난화지수가 이산화탄소보다 22800배가 높아 향후 기후변화에 영향을 줄 수 있는 잠재력 높은 온실가스이다(IPCC, 2013). 주로 전기의 절연체등으로 사용되며 적은 양이지만 마그네슘과 알루미늄 산업, 반도 체 산업에서도 배출되어 대부분 산업에 기원한다. 대류권에는 소멸기작이 거의 없고 중간권에서 처음으로 분해가 시작되기 때문에 대류권에서 육불화황의 체류 시간은 약 3200년으로 길며, 한번 대기로 배출되면 거의 선형으로 누적되어 빠



그림 3.1.21 안면도(검정색)과 마우나로아(녹색)의 육불화황 월평균농도 비교

그림 3.1.20 안면도의 육불화황 월평균농도

15



르게 증가한다. 2016년 육불화황의 산출방법은 O´Dorthy et al.(2001)에서 제 시한 AGAGE 배경농도 산정 기법으로 처리하였으며, 자세한 산출기법에 대해서 는 부록에 정리하였다.

2016년 육불화황의 농도는 9.5 ppt로 2015년에 비해 0.2 ppt 증가하였으며 관측을 시작한 2007년에 비해 3.2 ppt 증가했다. 지난 9년간 평균 0.36 ppt/yr 증가한 것과 같다(그림 3.1.20). 한반도에서도 역시 선형적으로 증가하는 양상 을 보였으며, 이러한 양상은 마우나로아와도 같다. 안면도의 육불화황 농도는 마 우나로아에 비해 약 0.4 ppt 수준으로 높으며, 마우나로아 또한 지난 10년간 0.3 ppt/yr로 증가한 것으로 증가경향성이 한반도와 같다(그림 3.1.21).

3.1.5 염화불화탄소류(CFC₅)

염화불화탄소류는 주로 성층권에서 자외선에 의해 분해되며 대기 중 체류시 간이 CFC-11은 50년, CFC-12는 110년으로, CFC-113은 85년으로 나타난 다. 염화불화탄소류는 냉매제로 주로 사용되며, 성층권의 오존층을 파괴하는 염 소와 브로민이 포함되어 있어, 1990년대 몬트리얼 의정서를 채택하여 규제를 시작하였으며, 북반구의 관측소에서는 CFC-11는 1992년에 최댓값을 보였다가 감소추세 나타내며, CFC-12는 2005년에 최댓값을 보이고 감소추세를 보이고 있다. CFC-12의 경우 대기 중 체류시간이 다른 두 물질에 비해 상대적으로 길 기 때문에 규제에 대한 실제 반응속도는 늦고, 따라서 감소추이가 상대적으로 늦다. 2016년 염화불화탄소류의 농도산정의 방법은 약간 수정되었으며, 그간 과 도하게 과소평가되었던 값들이 보정되었다. 이에 대한 방법은 부록에 정리하였다. 한반도 또한 염화불화탄소류는 감소하고 있다. CFC-11은 점차 감소해 관측

을 시작한 1999년에 비해 약 28 ppt 감소하였다. CFC-12는 전세계 추세와 마찬가지로, 한반도 또한 2002~2005년에 최댓값을 보였으며, 그 때보다 약 13 ppt 감소하였다. 마지막으로 CFC-113은 2007년부터 관측하였으며, 2016년 72.6 ppt로 나타났다. 관측초기와 비교하면 약 8.8 ppt 감소했다(그림 3.1.22).

세 요소 모두 다른 관측소와 비교하면, 안면도, 료리, 마우나로아가 비슷한 농도대를 보이고, 점차 감소하는 것으로 나타나 몬트리올 의정서 규제에 따른 결과가 주목된다.





3.1.6 품질관리를 위한 온실가스 관측자료 비교(플라스크 샘플링)

WMO GAW에서는 온실가스 관측의 자료 품질관리와 관측의 불확도 산정을 돕기 위해 플라스크 샘플링과 실시간 관측자료를 같은 관측소에서 이행하여 상 호 비교하도록 권고하고 있다(WMO, 2016). 안면도는 한반도에서 가장 오래된 온실가스 실시간 관측 역사를 가지고 있으며, 2014년부터 플라스크 샘플링 자 료와 비교를 진행하고 있다. 플라스크 샘플링의 분석은 WMO GAW의 주요 시 설 중 하나인 중앙교정실험실(Central Calibration Laboratory, CCL)이 진행하 였으며, 이 시설은 미국해양대기청에서 운영하고 있다. 플라스크 샘플링은 안면 도에서 주1회 실시간 장비의 인렛과 동일한 높이에서 포집하고, 중앙교정실험실 로 보내지며 분석 후 안면도의 1시간 평균자료와 비교한다.

2016년 안면도의 실시간 이산화탄소와 메탄 자료를 CCL에서 분석한 플라스 크 샘플링 자료를 비교하였다. 이 두 자료는 상당히 좋은 상관관계를 보인다. 이 산화탄소의 경우 상관계수(R)가 0.99로 나타났으며, 기울기는 0.97을 나타냈 다. 또한 절대값의 차이가 평균 0.08 ppm으로 WMO GAW에서 정하는 DQO (Data Qaulity Objection, 자료품질목표치)인 ±0.2 ppm 보다 작았다(그림 3.1.23). 따라서 이산화탄소는 플라스크 샘플링 자료와 거의 차이가 없다고 할 수 있다.



그림 3.1.23 안면도 이산화탄소 시간평균농도(회색)과 CCL에서 분석한 플라스크 샘플 링 농도(분홍색) (좌), 실시간 시간평균값과 플라스크 샘플링 값의 비교 y= 0.97x + 13, R=0.99 (우)

반면 메탄의 경우 상관계수(R)가 0.95로 높았고, 기울기가 1.05로 좋았지만, 절대값의 차이는 -7.1 ppb로 WMO GAW의 DQO 범위인 ±5 ppb를 벗어났다. 메탄은 실시간 관측값의 시간표준편차가 클수록 CCL과의 차이가 높았으며, 현 재 안면도의 시간평균 선별 기준인 9 ppb를 기준하여 선별된 자료만 비교한 결 과 절대값의 차이가 -3.5 ppb로 떨어졌다. 따라서 현재 안면도에서 배경농도산 출을 위해 품질관리를 통한 자료는 WMO의 DQO 안에 있는 것으로 나타났으 며, 품질관리를 통한 자료와 플라스크 샘플링 자료의 상관계수는 0.99로 상향조 정되었다(그림 3.1.24).



그림 3.1.24 안면도 메탄 시간평균농도(회색)과 CCL에서 분석한 플라스크 샘플링 농 도(파란색) (좌), 실시간 시간평균값과 플라스크 샘플링 값의 비교, 검은 색 점은 원시자료와의 비교, 파란색 점은 안면도 시간평균 선별 기준인 시간표준편차

9 ppb 이하의 자료만을 선별하여 비교함. y= x + 0.14, R=0.99 (우)

3.2 반응가스

반응가스에는 오존(O₃), 일산화탄소(CO), 휘발성유기화합물(VOCs), 질소화 합물(NOx, NOy), 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, 고 산에서 2012년부터 오존, 일산화탄소, 질소산화물, 이산화황을 관측해왔다.

2016년도에는 반응가스 측정 장비를 1회/한달마다 교정하였고(4시간 소요) 장비 점점, 소모품 교체 등은 연중 2~3회로 최대 2일이 소요되었다. 고산에서 는 장비장애로 인한 결측이 2일 이상 지속되지 않았으며 이러한 날의 자료는 시 간평균 및 일평균값을 계산할 때 제외하였다.

고산에서 관측한 O₃의 월평균농도 분포는 봄과 가을에 농도가 높고 여름과 겨울에 낮은 계절 분포를 보였다. 2012~2015년 동안 O₃ 연평균농도는 조금씩 증가하다 2016년에 다시 감소하였다.

CO, NO_x, SO₂의 연중 농도분포는 겨울에 높고 7, 8월에 낮았다. 2012~ 2016년의 연변화 경향을 보면 CO는 점차 증가하지만 NO_x와 SO₂는 연평균농 도의 변화를 거의 보이지 않았다. NO_x의 연평균농도는 최근 5년간 3~4 ppb 수준으로 유지하였고, SO₂는 NO_x보다 더 변화가 없이 최근 5년간 연평균이 증 가하거나 감소하지 않고 0.5 ppb의 수준을 유지하였다.

안면도에서는 관측환경의 문제로 2014년 3월부터 2017년 3월까지의 자료 를 신뢰하기 어려워 본 보고서 부록의 통계표에서 이 기간의 자료를 삭제하였으 며 본 보고서에는 고산에서 관측한 자료를 중심으로 실었다.

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 광 화학반응에 의해서 생성되어 광화학스모그의 원인물질일 뿐 아니라 장파복사에 너지를 흡수하는 온실가스로도 작용하며, 시각장애와 폐수종, 폐충혈 등을 일으 킨다.

고산에서 측정한 O3의 2016년 농도는 봄철(5월)과 가을철(10월)에 상대적

으로 농도가 높고 여름과 겨울에 농도가 낮은 쌍봉분포를 보이고 있다(그림 3.2.1). 시간평균값으로 나타낸 월별 O₃농도 월분포의 폭은 겨울에 20~50ppb 로 좁았고 봄과 가을에 10~80 ppb로 넓었다. 따라서 봄과 가을에는 O₃이 높은 농도로 나타나기도 하지만 겨울철에 나타나는 농도 수준과 비슷하거나 낮은 경 우도 많다는 것을 알 수 있다. 2016년 여름철(7,8월) 오존 농도는 겨울철보다 낮으며 이는 낮은 대류권에서 여름철 수증기 농도가 높아 전구물질의 광화학반 응에 의한 생성보다 오존과 수증기가 우선적으로 광화학 반응을 하여 오존의 대 기 내 수명이 짧아지기 때문이다(Parrish et al., 2012).



그림 3.2.1 2016년 고산 O₃의 월평균농도(상자는 전체 자료의 25~75%, 실선 끝은 5%, 95% 수준을 나타냄. 상자 안 실선은 중앙값)

고산에서 최근 5년(2012.6.~2016) 동안 관측한 O₃의 연변화 경향을 일평 균값으로 계산한 월평균값, 월최댓값, 월최솟값으로 그림 3.2.2에 나타내었다. 월평균값과 월최솟값은 매년 봄, 가을에 높은 쌍봉분포를 보이며 2013~2015년 동안 월평균값이 봄에는 최고 60 ppb 수준으로, 가을에는 최고 40 ppb 수준으 로 나타나 봄에 O₃ 농도가 더 높았다. 월최댓값은 매년 봄철에 80 ppb 이상으 로 관측되었으나 2014~2016년 가을에는 여름철과 비슷한 수준으로 나타나 월 평균값과는 다른 계절분포를 보였다. 월최댓값은 겨울에 50 ppb 이하로 낮게 분포하였다. 2016년에는 월평균값이 봄에 60 ppb이하, 가을에 40 ppb 이하로 다른 해보다 낮았고 월최댓값도 80 ppb보다 낮았으며 2016년 O₃ 연평균값은 39.3 ppb로 지난 해 연평균값인 45.7 ppb 보다 낮았다.



그림 3.2.2 고산 O₃의 최근 5년간 연변화 경향

3.2.2 일산화탄소(CO)

CO의 복사강제력은 0.23 W/m²으로 OH라디칼과의 반응으로 이산화탄소 등 온실가스 농도를 변화시켜 지구온난화에 영향을 미친다(IPCC, 2013). 주로 화 석연료나 탄소화합물의 불완전연소, 메탄 등 탄화수소 계열 물질의 산화과정, 화 산폭발, 산불, 해수 중의 미생물 작용 등에 의해 생성된다.

2016년에 고산에서 측정한 월평균농도의 범위가 136~295 ppb 사이로 분 포하였다(그림 3.2.3). 2016년 월평균농도의 최댓값은 1월(295 ppb)에, 최솟 값은 7월(136 ppb)에 나타났다. 7, 8월을 제외하고 월별 농도 분포 범위는 200 ppb 이상으로 분포하였다.

그림 3.2.8은 고산에서 최근 5년간(2012.6.~2016년) 동안 관측한 SO₂의 연변화 경향을 일평균값으로 계산한 월평균값, 월최댓값, 월최솟값이다. 세 값 모두 여름에 낮고 가을, 겨울, 봄에 높은 계절 분포를 보였다. 월평균값과 월최 솟값은 매년 7월에 가장 낮은 농도로 관측되었으나, 월최댓값은 8, 9월경에 낮 게 나타났다. 고산은 일차 오염원의 배출원이 드문 곳으로 이러한 고농도는 국 외 혹은 내륙에서 이동해온 장거리 오염물질의 영향을 받았을 것으로 추측된다.



그림 3.2.3 2016년 고산 CO의 월평균농도(boxplot 설명은 그림 3.2.1과 같음)



그림 3.2.4 고산 CO의 최근 5년간 연변화 경향

3.2.3 질소산화물(NOx)

NOx는 지구온난화를 일으키는 O₃의 주요 전구물질임과 동시에 지구 냉각화 를 일으키는 질산에어로졸의 전구물질이다(IPCC, 2013). 그러나 O₃의 온난화 보다 질산에어로졸의 냉각화 영향으로 NOx의 복사강제력은 -0.15 W/m²이다. NOx는 주로 산업활동과 차량 등에 의한 연소활동, 생체소각이나 토양의 미생물 활동 등에 의해 배출된다.

고산에서 관측한 NOx의 월평균농도는 2016년 1월부터 10월까지 큰 변화를 보이지 않았다. 겨울철에 2016년 월평균농도의 범위가 2.3~4.5 ppb 사이로 분 포하였다. 2016년의 최대 농도는 4월(4.5 ppb), 최소 농도는 2월에 2.3 ppb로 나타났다(그림 3.2.5).

고산에서 최근 5년간(2012.6.~2016년) 동안 관측한 NO_x의 연변화 경향을 일평균값으로 계산한 월평균값, 월최댓값, 월최솟값으로 그림 3.2.6에 나타내었 다. 월평균값과 월최솟값은 농도분포 패턴이 유사하였고, 특히 월평균값은 최근 5년 동안 5 ppb 이내로 뚜렷한 계절 변화를 보이지 않았다. 월최댓값은 여름철 에 10ppb에 가까이 낮은 농도로 분포하였고 그 외 계절에는 10~30 ppb의 범 위로 분포하였다.



그림 3.2.5 2016년 고산 NOx의 월평균농도(boxplot 설명은 그림 3.2.1과 같음)



그림 3.2.6 고산 NOx의 최근 5년간 연변화 경향



3.2.4 이산화황(SO₂)

SO₂은 황산에어로졸의 전구체로 복사강제력이 -0.41 W/m²로 나타나며 태 양빛을 산란시켜 지구 냉각화에 기여한다(IPCC, 2013). SO₂은 석탄, 기름 연 소, 난방 등에서 주로 배출된다. 무색의 자극성이 강한 기체로 액화되기 쉬우며, 기관지염, 천식, 폐기종, 폐쇄성 질환을 일으킨다.

고산에서 관측한 SO₂의 월평균농도는 연중 1 ppb 이내의 범위에 있으며, 봄 철 이후 농도분포가 상대적으로 좁게 분포하였다(그림 3.2.7). 2016년의 최대 월평균농도는 2월(1 ppb)에, 최소 월평균농도는 4월(0.4 ppb)에 나타났다.

고산에서 최근 5년간(2012.6.~2016년) 동안 관측한 SO₂의 연변화 경향을 일평균값으로 계산한 월평균값, 월최댓값, 월최솟값으로 그림 3.2.8에 나타내었 다. 월평균값과 월최솟값은 농도수준에 큰 차이가 없이 비슷하였다. 월최댓값은 여름철에 1~3 ppb로 낮게 분포하였고 그 외 계절에는 4~18 ppb의 범위로 분 포하였다.

고산의 최근 5년간(2012~2016년) SO₂ 농도 평균은 0.5 ppb이며, 연평균 농도가 증감없이 0.5 ppb의 수준을 유지하였다.



그림 3.2.8 고산 SO2의 최근 5년간 연평균농도 변화 경향

3.2.5 풍향·풍속에 따른 반응가스 농도분포

고산 기후변화감시소에서 2016년 동안 관측한 AWS(지점번호 185)의 시간 평균 풍향, 풍속에 대한 바람장미를 그림 3.2.9에 나타내었다. 고산 기후변화감 시소는 제주도의 서쪽 해안 절벽에 위치하였으며 남서~북동 방향은 바다를 접 하고 있다. 2016년 고산 기후변화감시소에 영향을 준 바람의 방향은 주로 북서 ~북풍 계열이 많았고, 제주도 내륙에서 부는 남서풍도 전체 풍향의 20% 가까 이 되었다. 고산에는 바다에서 부는 북서풍일 때 10 m/s 이상의 강한 바람이 가장 많이 불었다.



JGS (2016)

그림 3.2.9 고산 기후변화감시소의 2016년 풍향 풍속의 바람장미

고산의 풍향 풍속을 계절별로 나누어 살펴보았다(그림 3.2.10) 겨울은 2016 년 1, 2월과 12월을 뜻하며 이 시기에 10 m/s 이상의 강한 바람이 가장 잦았 다. 또, 여름에 제주도 내륙에서 부는 바람의 빈도수가 다른 계절에 비해 많았다.



그림 3.2.10 고산 기후변화감시소의 2016년 계절별 풍향 풍속의 바람장미

풍향 풍속에 따른 O₃의 농도분포를 계절별로 살펴보았다(그림 3.2.11). O₃ 은 봄에 풍향과 풍속에 상관없이 대부분 50 ppb 이상으로 나타났으며, 다른 계 절에 비해 높은 농도 분포를 고르게 보였다. 여름에 NO_X 등의 전구 물질 농도 가 낮고 대기 중 수분이 많아 O₃가 H₂O와 광화학 반응을 먼저 하게 되어 여름 철 O₃ 농도가 연중 가장 낮게 나타난다. 그러나 2016년 여름에 서쪽에서 15~ 20 m/s 강한 바람이 불 때 90 ppb 이상의 고농도 O₃이 관측되었다. 이는 광화 학 반응에 의한 생성보다는 국외에서 장거리 이동된 사례로 볼 수 있다.



O₃

그림 3.2.11 고산 기후변화감시소의 2016년 계절별 풍향 풍속에 따른 O₃의 농도분포

풍향 풍속에 따른 CO의 농도분포를 계절별로 살펴보았다(그림 3.2.12). CO 는 봄과 겨울에 서~북서 방향에서 바람이 불 때 300 ppb이상의 높은 농도가 많이 관측되었다. CO의 계절 분포형태는 연중 여름철에 가장 낮게 관측되는데 2016년 여름에 서쪽에서 15~20 m/s 강한 바람이 불 때 600 ppb 이상의 고농 도 CO가 관측되었다. 2016년 여름철 고농도 CO 사례는 O₃과 같은 풍향 풍속 일 때 나타나 국외에서 장거리 이동된 사례로 볼 수 있다.



CO

그림 3.2.12 고산 기후변화감시소의 2016년 계절별 풍향 풍속에 따른 CO의 농도분포

풍향 풍속에 따른 NO_X의 농도분포를 계절별로 살펴보았다(그림 3.2.13). NO_X는 여름을 제외하고 동~서 방향으로 비교적 높은 농도를 보였으며 풍속이 강할수록 농도가 높았다. NO_X는 여름철에 가장 낮은 농도로 분포하였고 O₃과 CO와는 달리 여름철 고농도 사례는 나타나지 않았다. NO_X는 반응성이 강하여 대기 내 수명이 수 초~수 시간으로 국지적 오염원의 영향을 잘 반영하며, 상대 적으로 장거리 이동된 사례를 반영하지 못하여 여름철 고농도 사례를 보이지 않 은 것으로 생각된다.



NO_x

그림 3.2.13 고산 기후변화감시소의 2016년 계절별 풍향 풍속에 따른 NOx의 농도분포

풍향 풍속에 따른 SO₂의 농도분포를 계절별로 살펴보았다(그림 3.2.14). SO₂는 여름과 가을에 풍향 풍속에 상관없이 매우 낮은 농도를 보였으며 봄과 겨울에 서풍 계열에서 비교적 높은 농도를 보였다. SO₂는 O₃과 CO와 같이 여 름철에 서쪽에서 조금 높은 농도를 보이긴 하였으나, 농도 수준이 1.5 ppb 이하 로 매우 낮아 사례를 분별하기가 어렵다.



SO₂

그림 3.2.14 고산 기후변화감시소의 2016년 계절별 풍향 풍속에 따른 SO₂의 농도분포

3.2.6 안면도 기후변화감시소 관측환경 개선

기후변화감시소의 반응가스 장비는 주 1회 교정을 하고, 측정 데이터의 신뢰 성 확보를 위해 측정기기의 정확도를 확인하는 정도검사를 연 1회 받는다.

안면도에서 장비관리는 정해진 지침에 따라 이루어지고 있으며 현재 장비를 2007년에 도입한 이후 대부분의 경우 교정과 정도검사에서 기기 이상이 없었다. 그러나 최근 3년간 반응가스 중 반응성이 강한 O₃, NO_x, SO₂의 연평균값이 급격히 감소하였다(그림 3.2.15). 2017년 3월 반응가스의 관측환경을 점검한 결과, 장비는 정상이나 인렛에서 농도 손실이 있는 것으로 나타났다.



그림 3.2.15 정상자료(2011.3~2014.2)와 비정상 자료(2014.3~2017.3)의 계절별 농도 비교

GAW 관측지침에 따르면, 반응가스 중 O₃이 인렛 재질에 가장 민감하므로 반응가스 통합 인렛은 O₃ 포집에 적합한 인렛 재질(예. PFA TeflonTM)을 사 용한다(WMO Report No.209, 2013). 또 GAW 관측지침에는 인렛의 길이가 10m 이내로 짧을수록 좋으며 국지 오염원의 영향을 받지 않는 곳에 설치하도록 권고한다.

이러한 지침을 기준으로 안면도의 반응가스 관측환경을 점검하였다. 인렛은 PFA가 아닌 일반 Teflon 재질로 40 m 관측탑에 설치되어 인렛 끝에서 장비까 지의 길이가 약 100 m 였다. 또, O₃의 경우 인렛 내 머무르는 시간(residence time)이 (< 30초) 짧아야 하며 이는 아래의 식으로 구할 수 있다.

Residence time = (Inlet diameter \times Inlet length)/ air flow

반응가스 장비에 3 way 밸브를 달아 통합 인렛과 실험실 창 밖 외기를 빨아 들이는 대체 인렛을 교대로 사용하여 농도변화를 확인하였다. 그 결과 대체 인 렛의 농도가 통합 인렛보다 높게 나타났다.

반응가스의 농도를 정상화하기 위하여 통합 인렛 길이, 총 유량, 분배 인렛 (manifold) 등을 점검하였고 인렛 길이를 100m에서 10m로 짧게 하고 총 유량 을 6 LPM에서 25 LPM으로 늘였으며, 분배인렛에 복잡하게 연결되어 있던 교 정라인을 단순하게 정리함으로써 정상화하였다.



그림 3.2.16 안면도 기후변화감시소 인렛 개선 전과 개선 후

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 직 접적으로 연관된 중요한 지구대기감시 요소이다. 또한 에어로졸에 의한 대기질 은 인간 건강에 직접 영향을 주면서 관심이 더욱 커지고 있다.

에어로졸은 황사, 화산재, 해염같이 자연적 요인에 의해 생성되기도 하고 인 간 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 다 르고 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. 에이트켄 모드는 확산 이나 응축 과정을 거치며, 수 시간에서 수 일 동안 공기 중에 잔존하는 반면, 조 대 모드는 쉽게 침착되면서 수 시간에서 수 일 간 대기 중에 잔류하게 된다. 핵 화모드는 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. 에어 로졸 복사강제력은 평균적으로 음(-)의 강제력인 -0.9(-1.9~-0.1) W/m² (1750~2011년) 수준으로 알려져 있다(IPCC, 2014). 그 밖에 대기에서 구름 이나 강수형성에 중요한 응결핵이나 빙정핵의 역할을 함으로써 구름 형성과 물 리특성을 변화시킨다. 이것을 에어로졸 간접효과라고 하는데 에어로졸 간접효과 는 지구알베도를 바꾸어 기후변화를 초래하는 원인이 된다.

기상청은 안면도, 고산, 울릉도독도 기후변화감시소에서 PM10 질량농도, 이 온성분, 광산란계수 등 에어로졸 분야 11종을 관측하고 있으며, 위탁관측소인 연세대학교에서 에어로졸 광학깊이를, 광주과학기술원에서 에어로졸 광학깊이와 연직분포를 관측하고 있다.

3.3.1 에어로졸 물리특성

한반도 배경대기 에어로졸 물리특성 감시를 위해 에어로졸 질량농도와 수농 도를 측정하여 분석한다. 질량농도는 부유분진측정기로 관측하며 이 장비는 국 내 황사관측망의 기본 관측장비로 운영되고 있다. 에어로졸 총수농도는 응결핵 계수기(condensation particle counter, CPC), 에어로졸 입경별 수농도는 공기 역학입자계수기(aerodynamic particle sizer, APS)와 전자기유도입자계수기 (scanning mobility particle sizer, SMPS)를 이용하여 관측한다.

가. PM10 질량농도

부유분진측정기는 대기에 부유하는 직경 10 μm 이하 에어로졸의 질량농도 를 연속 측정한다. 탄소의 방사성 동위원소인 탄소-14(C¹⁴)에서 방출되는 β 선 을 에어로졸이 포집된 필터에 투과시킬 때 에어로졸이 흡수·산란하여 감쇠된 측 정률(count rate)로부터 에어로졸 질량 m_R으로 다음과 같이 환산한다.

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

여기서 *R*₀은 필터의 순측정률이고 *R*은 에어로졸이 쌓인 필터의 측정률로써 단위는 *s*⁻¹이다. *F_{cal}*은 질량 교정인자로 단위는 μ*g*이며, 장비를 포일(foil)로 교정할 때 기기로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 A는 필터 스폿(spot)의 면적(cm²)이며, μ/ρ는 C¹⁴의 질량감쇠계수 (cm²/mg)이다.

2016년 안면도에서 측정한 PM10 질량농도의 월평균은 23~50 μg/m³ 사 이에 분포하며 지난 10년간(2006~2015년)의 월별 평균과 비교했을 때 8월을 제외하고는 대체로 낮거나 비슷했다. 4월에는 황사로 인해 월평균이 상승하여 지난 10년간 4월에 최대였다(그림 3.3.1). 2016년 7월 농도가 최소였으며, 지 난 10년간의 평균보다도 낮았다. 안면도 PM10 질량농도 연평균은 2006년 이 후 대체로 감소하는 추세이며, 지난 10년간(2006~2015년)의 평균은 40 μg/m³이고, 2016년의 연평균은 35 μg/m³로 지난 10년간의 평균값보다 약 12% 낮았다(그림 3.3.2). 연평균 농도는 2005년 이후 대체로 감소하는 추세 이다.

2016년의 고산 PM10 질량농도 월평균은 18~44 μg/m³ 사이에 분포하며 지난 5년간 월별 평균과 비교할 때 4월을 제외하고는 대체로 비슷했다(그림 3.3.3). 고산의 2016년 PM10 질량농도 연평균은 31μg/m³로 지난 5년간 (2011~2015년)의 평균(29 μg/m³)보다 약 7% 높았다. 2011년 이후 PM10 질량농도 연평균은 안면도와 고산 모두 2012년에 최저였고, 고산의 경우 2013 년부터 유사한 수준을 보이고 있다(그림 3.3.4).



그림 3.3.1 안면도 PM10 질량농도의 월변화(µg/m³)(점-선은 2006~2015년 평균 세로 실선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 점선은 평균)



그림 3.3.2 안면도 PM10 질량농도의 지난 10년간 연평균 변화(µg/m³)



그림 3.3.3 고산(기후변화감시소) PM10 질량농도의 월변화(µg/m³). 점-선은 2011~ 2015년 평균. 세로실선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값, 점선은 평균



그림 3.3.4 고산(기후변화감시소) PM10 질량농도의 지난 6년간 연평균 변화(µg/m³)

나. 에어로졸 수농도

고산에서는 공기역학입자계수기(APS), 응결핵계수기(CPC)를 이용해 각각 0.5 µm부터 20 µm까지 에어로졸의 입경별 수농도와 0.01~3.0 µm 구간의 에 어로졸 총수농도(#/cm³)를 관측하고 있다. 공기역학계수기는 다음과 같은 원리 로 52개 입자크기별 에어로졸 수농도를 측정한다. 에어로졸을 포함한 공기가 노 즐을 통과하면서 가속될 때 작은 입자일수록 빠른 속도로 가속되어 노즐 끝 부 분에서의 입자속도가 크므로, 입자가 일정한 간격을 유지하고 있는 2개의 Laser 빔을 통과하면서 산란시키는 2개의 펄스 간격(Time of Flight)을 측정 하여 입자의 속도를 구하고 공기역학적 입경으로 변환된다. 1 µm 이상으로 비 교적 큰 입자의 크기별 분포를 표현할 때는 에어로졸의 부피농도를 사용한다. 에어로졸 부피농도는 관측으로부터 얻은 에어로졸 수농도를 다음 식에 대입하여 입자 크기별 부피농도를 얻을 수 있다.

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

여기서 D_n는 에어로졸 입자의 직경, N은 수농도이다.

2016년 고산에서 측정한 연평균 에어로졸의 입경별 부피농도는 대부분의 구 간에서 지난 7년간(2009~2015년)의 평균에 비해 낮았다(그림 3.3.5). 4~6월 에 각 한 차례씩 고농도가 관측되었고 7~9월 사이에는 다른 달에 비해 모든 입 경 구간의 농도가 낮았다(그림 3.3.6).



그림 3.3.5 고산에서 측정한 크기별 에어로졸(0.5~20 μm, 52 채널)의 2016년 박스플 롯과 지난 7년(2009~2015년) 부피농도 평균. 세로실선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값



응결핵계수기는 광학적인 방법으로 측정이 불가능한 작은 크기의 입자를 열 역학적 특성을 이용해 광학적으로 측정 가능한 크기로 성장시켜 입자의 수농도 를 측정한다. 고산에서 관측한 에어로졸 응결핵 수농도의 월변동을 그림 3.3.7 에 보였다. 5월과 6월을 제외하고는 대부분의 자료가 지난 2년간(2014~2015 년)의 평균에 비해 낮게 관측되었다.

안면도에서는 에어로졸 수농도 측정을 위해 공기역학입자계수기와 전자기유 도입자계수기³⁾를 운영하고 있으나 2016년의 경우 잦은 장애 발생으로 관측자 료 신뢰도가 낮아 본 보고서에 수록하지 않았다.



그림 3.3.7 2016년 고산의 에어로졸 응결핵 총수농도(0.01~3 μm)의 월변동(점-선 그 래프는 2010~2015년 평균) 세로실선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 실선은 중간값

3.3.2 에어로졸 광학특성

안면도 기후변화감시소에서는 광산란계수측정기(Nephelometer)와 광흡수계 수측정기(Aethalometer)를 이용하여 10년 이상 에어로졸 지상 광학특성을 측 정하고 있다. 이러한 장기간 관측은 대기 중 자연적/인위적 배출원과 대기 반응 및 침적 등의 변화를 알 수 있게 해준다. Collaud Coen et al. (2013)은 북반 구와 남극에 위치한 배경대기 관측소에서 측정된 광산란계수와 광흡수계수의 장 기간 변화경향을 연구하였다. 유럽에서는 내륙에 위치한 관측소의 경우 뚜렷한 변화경향을 보이지 않았으나, 해양에 위치한 관측소는 위치와 에어로졸 성질에 따라 다른 경향을 보였다. 북아메리카에 위치한 대부분의 관측소는 광산란계수 와 광흡수계수 모두 뚜렷한 감소경향을 보였고, 극지방 관측소는 광산란계수의 변화경향은 없었으나, 북극 관측소는 광흡수계수가 감소경향을 보였다. 안면도 기후변화감시소에서 관측한 지상 광학자료는 동아시아의 에어로졸의 특성을 파 악 할 수 있다.

3) 직경 0.01~0.5 µm 범위의 크기별 수농도 측정장비

가. 에어로졸 광산란계수

광산란계수측정기(TSI model 3563)는 가시영역 세 파장(450, 550, 700 nm) 의 입자 산란정도를 Beer-Lambert 법칙을 적용하여 5분 간격으로 에어로졸 광산란계수(Total scattering coefficient)와 에어로졸 후방산란계수(Back scattering coefficient)를 산출한다. 광산란계수측정기는 흡입부, 산란부, 측정부 로 구분된다. 흡입부는 자동밸브(automated valve)와 HEPA(high efficiency particulate air) 필터로 구성되며, 55분 동안 에어로졸이 포함된 공기의 산란계 수를 측정하고, 나머지 5분은 HEPA 필터를 통해 에어로졸이 제거된 공기의 산 란계수를 측정하여 에어로졸의 광산란계수를 산출한다. 산란부는 할로겐 램프, 후방산란셔터, 참조변환기로 구성되며, 흡입된 공기를 할로겐 램프로 산란시키 고, 후방산란셔터로 광산란계수와 후방광산란계수로 구별한다.

본 보고서에 제시한 에어로졸 광산란계수 (σ_{sp}) 는 Anderson et al.(1996)에 서 제시한 방법으로 아래와 같이 구하였다.

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

위 식에서 K₂는 보정계수, C_m은 광자 수, W는 기기 내부에 의한 산란, σ_{s-air}(T,P)는 건조대기 온도(T), 압력(P) 상태에서 알려진 대기(공기)에 의한 광산란계수이다. 산란계수를 알고 있는 스팬(span) 가스인 이산화탄소(CO₂)의 광자 수를 측정하여 K₂를 구하여 기기에 대한 검·교정을 정기적으로 실시한다.

원시자료(5분 자료)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균을 계산했으며, 시 간평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 일평균, 월평균, 연평균 을 산출하였다.

2016년 안면도 기후변화감시소에서 관측한 550 nm의 월평균 에어로졸 광산 란계수를 그림 3.3.8에 나타내었다. 2016년 안면도 에어로졸의 월평균 광산란 계수는 40.8~102.0 Mm⁻¹를 보였으며, 월평균 최댓값과 최솟값은 각각 5월과 7월이었다. 5월을 제외하고 모든 월에서 지난 10년(2006~2015년) 평균보다 12~53% 낮았고, 특히 2, 7, 10, 11월에 과거의 약 50%로 매우 낮았다. 5월 은 과거보다 낮았으나 차이가 5%로 비슷했다.

2006~2015년 동안 에어로졸 광산란계수는 2006년에 최대(124.4 Mm⁻¹), 2010년에 최소(83.6 Mm⁻¹)였다. 2016년의 연평균 에어로졸 광산란계수는 69.0 Mm⁻¹으로 최근 10년 중 가장 낮았다(그림 3.3.9).



그림 3.3.8 2016년 안면도에서 관측한 월별 에어로졸 광산란계수(550 nm) (파선의 양끝은 10, 90% 값, 상자 양끝은 25, 75% 값, 상자 가운데 가로 선은 평균값, 점-선은 2006~2015년 평균값을 나타냄)



나. 지상 에어로졸 옹스트롬지수

지상 에어로졸 옹스트롬지수(Å)는 광산란계수의 파장 의존도를 나타내는 것 으로 다음과 같은 관계가 있다.

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

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

$$\mathbf{\mathring{A}} = \frac{\log \sigma_{sp}(\lambda_1) - \log \sigma_{sp}(\lambda_2)}{\log \lambda_2 - \log \lambda_1}$$

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

2016년 안면도에서 측정한 월평균 에어로졸 옹스트롬지수를 그림 3.3.10에 보였다. 2016년에 에어로졸 옹스트롬지수의 월평균은 1.57~1.84 범위에 분포 하였다. 최댓값은 9월, 최솟값은 1월에 관측되었다. 지난 10년 평균과 비교할 때 4~6, 8~10월은 10% 이내로 비슷했고, 나머지 월은 12~19% 높게 관측 되었다.

2006~2015년 동안 에어로졸 옹스트롬지수는 2015년에 최댓값(1.71), 2006년이 최솟값(1.39)을 보였다. 2016년의 연평균 에어로졸 옹스트롬지수는 1.71로 2015년과 같았다(그림 3.3.11). 2013년 이후 옹스트롬지수는 계속 증 가하는 추세를 보였다.



롬지수

다. 에어로졸 광흡수계수

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

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

여기서 *I*와 *I*₀는 각각 처음 빛의 세기와 필터에 포집된 에어로졸로 인해 감 쇄된 빛의 세기를 뜻한다. 에어로졸이 필터에 일정 시간(△*t*) 동안 포집되면, 감 쇄계수(*σ*_{*ATN*})는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 A는 에어로졸이 필터에 포집된 면적, Q는 포집공기의 유량이다. 검 댕(Black Carbon)의 질량농도는 다음과 같이 산출된다.



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



데 가로선은 평균값, 점-선은 2006~2015년 평균값을 나타냄)

2016년 안면도 기후변화감시소에서 측정한 880 nm의 검댕 농도를 그림 3.3.12에 나타내었다. 2016년 검댕 농도의 월평균은 6.9(7월)~1.2(1월) μg/m³ 이었고, 에어로졸 광흡수계수 월평균은 5.1(7월)~10.3(1월) Mm⁻¹으로 관측되었다. 8월에는 과거(2006~2015년) 평균보다 12% 높았고 2월과 7월에는 최 근 10년보다 20~24% 낮았다(그림 3.3.13). 1, 3~6, 9~12월에는 과거 평균 과의 차이가 10% 이내로 비슷했다.

2006~2015년 동안 검댕 농도는 2013년에 10.2 μg/m³로 최대였고, 2009 년에 8.2 μg/m³로 최소였다(그림 3.3.14). 에어로졸 광흡수계수는 2013년에 최대(10.2 Mm⁻¹), 2009년에 최소(8.3 Mm⁻¹)였다(그림 3.3.15). 2016년의 연평균 검댕 농도와 에어로졸 광흡수계수는 각각 1.0 μg/m³, 8.8 Mm⁻¹로 2015년과 비슷했다.





그림 3.3.14 2006~2016년 동안 안면도 기후변화감시소에서 관측한 검댕(880 nm)

라. 에어로졸 광학깊이(AOD)

에어로졸 광학깊이(AOD)는 태양복사가 대기의 상한에서 지표까지 도달하는 동안 대기 중에 존재하는 여러 성분들에 의해 감쇄되는 효과를 나타내는 척도이 다. 이는 에어로졸과 복사강제력의 평가를 위한 가장 중요한 단일요소이다. AOD 는 태양광도계(Sun-Photometer)나 필터복사계(Filter Radiometer) 등의 관 측기기를 이용하여 태양으로부터 직달 태양복사의 스펙트럼 투과를 관측한다.

안면도 기후변화감시소에서는 AOD 산출을 위하여 2010년 11월에 GAW-PFR(Precision Filter Radiometer, 스위스 PMOD)로 장비를 설치하였고, 또한 2011년 12월에 제주 고산과 울릉도에 추가 설치하였다.

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

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

이 공식에서 S는 측정된 신호이고 S_0 는 교정상수이다. R은 천문단위로 표시 되는 태양과 지구간의 거리이며, m_A 는 에어로졸 air mass이다. δ_R 과 δ_0 는 공 기분자와 오존의 광학깊이이며, m_R 과 m_0 는 각각의 air mass이다.

본 보고서에서는 2015년과 2016년에 안면도, 제주 고산, 울릉도에서 관측된 에어로졸 광학깊이, 옹스트롬지수를 중심으로 분석하였다. 최종적인 품질관리는 WORCC에서 이루어지며 본 보고서에서는 WORCC에서 제공하는 기본적인 알 고리즘을 통해 산출한 결과를 수록하였다. 한편 WORCC에서 품질관리가 완성 된 자료(°모양; 2013년 1월~2014년 4월)와 함께 표출함으로써 자체 분석자 료(•모양)와의 연속성을 보이고자 하였다.

그림 3.3.16은 안면도의 2013년부터 2016년까지의 500 nm에서의 에어로 졸 광학깊이를 보여준다. 대체로 봄철에 큰 값을 보이고 가을철에서 겨울철에 적은 값을 보였다. 그러나 2015년 10월 20일에 광학깊이가 2.0에 이르는데 이 는 우리나라에 심한 연무현상이 있었던 사례였다.


그림 3.3.16 안면도의 에어로졸 광학깊이(2013~2016년)

그림 3.3.17은 안면도의 옹스트롬지수를 보여준다. 옹스트롬지수를 통해 에 어로졸 크기를 상대적으로 판단할 수 있다. 즉, 주로 큰 입자로 구성된 황사의 영향을 받는 봄철에 옹스트롬지수는 작은 값을 보이고, 그 외 에어로졸의 영향 이 적거나 작은 입자의 영향을 주로 받는 가을철과 겨울철에는 대체로 옹스트롬 지수가 큰 값을 보인다. 그러나 2016년 가을과 겨울에는 옹스트롬지수가 상대 적으로 적게 나타났다.



그림 3.3.17 안면도의 에어로졸 옹스트롬지수(2013~2016년)

그림 3.3.18은 고산의 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이를 보여준다. 고산 에서 관측한 자료 중 2014년 5월부터 2015년 3월 24일까지는 관측결과에 오 류가 나타나 최종 결과물에 포함하지 않았다. 2015년과 2016년의 결과를 보면, 대체로 봄철에 큰 값을 보이고 가을철에서 겨울철에 작은 경향을 보인다.



그림 3.3.18 고산의 에어로졸 광학깊이(2013~2016년)

그림 3.3.19는 고산의 옹스트롬지수를 보여준다. 한편 옹스트롬지수는 안면 도에서와 같이 대체로 봄철에 낮고 가을 및 겨울철에 높게 나타났다.



그림 3.3.19 고산의 에어로졸 옹스트롬지수(2013~2016년)

그림 3.3.20과 3.3.21에 울릉도의 500 nm에서의 에어로졸 광학깊이와 옹스 트롬지수를 각각 나타내었다. 울릉도의 관측자료에서도 2014년 7월 10일부터 2015년 8월 14일까지의 관측결과에 오류가 나타나 최종 결과물에는 포함하지 않았다. 에어로졸 광학깊이와 옹스트롬지수는 안면도, 고산과 유사한 경향을 보 인다.



그림 3.3.20 울릉도의 에어로졸 광학깊이(2013~2016년)



그림 3.3.21 울릉도의 에어로졸 옹스트롬지수(2013~2016년)

광주 지역에 설치된 태양광도계는 광주 북쪽 외곽지역에 설치되어 광주 중심 가에 비해 인위적 오염 에어로졸이 적게 발생한다. 하지만, 주변에 일부 공장지 대와 농경지가 근접해 있어 공장에서 발생하는 인위적 오염물질과 농경지에서 발생하는 생체소각(Biomass) 등 다양한 지역 오염원이 존재한다. 또한 중국에 서 발생하는 황사와 연무 같은 장거리 수송 에어로졸의 영향도 종종 받는다.

표 3.3.1은 2016년 월별 관측일수 및 관측 횟수를 표시한다. 2015년에는 1월부터 8월까지 장비의 수리 및 관측의 검보정 작업으로 인해 관측 값이 산출 되지 못하였으나, 2016년에는 관측이 가능한 날(맑은 날)에 지속적으로 관측이 수행되어 총 148일 관측에 672회의 관측이 수행되었다.

표 3.3.1 2016년 태양광도계

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	총
관측 일수	3	16	23	10	13	8	12	23	12	6	14	8	148
관측 횟수	9	99	145	51	51	19	31	101	43	30	56	37	672

그림 3.3.22는 2016년 태양광도계로 측정된 월별 수증기량 (a), 440~870 nm 두 개의 파장에서 옹스트롬지수 (b), 440 nm 파장에서 에어로졸 광학깊이 (c) 자료를 보여준다. 2016년 관측결과(검은색 사각형)와 지난 12년간(2004~ 2015년) 관측결과의 평균자료를 구분하여 관측 특성을 비교하였다. 옹스트롬지 수는 대기 중 부유하는 에어로졸의 크기분포를 나타내는 척도로 황사처럼 입자 의 크기가 큰 에어로졸이 관측되었을 때 0에 가까운 낮은 값을 보이고 입자가 미세한 에어로졸 일수록 2에 가까운 값을 갖는다. 에어로졸 광학깊이는 대기 중 에 존재하는 에어로졸에 의해 빛이 산란과 흡수를 통해 소산되는 양을 측정한 것으로 대기 중에 많은 에어로졸이 분포하면 값이 높아진다. 2016년 관측 데이 터는 구름에 의한 영향을 제거되어 바로 산출된 Level 1.5⁴) 자료를 사용하였으 며, 2004년부터 2015년까지의 데이터는 검증된 Level 2.0⁵) 자료를 적용하였 다. Level 2.0 자료는 연속적으로 관측된 값들 중에 큰 변동을 갖는 자료를 제 거하고 일 변동에서 표준편차를 적용하여 만족하지 않는 자료를 제거하는 방법 을 사용한다.

그림 3.3.22에서 2004~2015년 평균 에어로졸 광학깊이는 0.44이고 2016 년 평균 에어로졸 광학깊이는 0.41로 거의 비슷하게 나타났다. 2004~2015년 에어로졸 광학깊이 월별 평균값의 범위는 0.25~0.84이고, 1월에 최솟값을 보 이고 6월에 가장 높았다. 2016년 에어로졸 광학깊이의 월별 평균값의 범위는 0.21에서 0.57이다. 2016년 12월에 가장 낮고 4월에 가장 높았다.

⁴⁾ AERONET 분석 결과의 수준을 나타내는 표현으로 원시자료를 분석 시 구름에 의한 영향을 제거한 자 료를 의미한다.

⁵⁾ AERONET 분석 결과의 수준을 나타내는 표현으로 구름에 의한 영향을 제거하고 데이터 교정을 통하여 검보정 된 데이터임을 의미한다.



그림 3.3.22 (a) 광주지역 광흡수 옹스트롬지수, (b) 광소산 옹스트롬지수, (c) 440 nm 에서의 에어로졸 광학깊이. 사각형은 2016년 관측 결과를 보여주고 원형 은 2004년부터 2015년까지 관측된 결과의 평균치임

2016년도의 옹스트롬지수 값은 4월을 제외하고 1.0이 넘는 높은 값을 보이 고 있어 광주지역에 발생하는 에어로졸의 입자의 크기는 작은 것으로 나타났다 (그림 3.3.22(b)). 그러나 2016년 4월에 경우 옹스트롬지수 값이 과거에 비해 현저하게 낮은 값을 보이는데 이는 황사와 같은 입자가 큰 에어로졸이 장거리 수송되어 대기 중에 영향을 미친 것으로 판단된다.

그림 3.3.23은 2016년에 1월에서 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 3.3.23 2016년 월별 평균 입자 크기 분포와 2004~2015년 월별 평균 입자크기 분포

그림 3.3.23을 통하여 2016년 월별 평균 입자크기 분포와 2004~2015년 월별 평균 입자크기 분포를 비교하였다. 2004~2016년 동안 평균 입자크기 분 포의 경우에는 3~5월을 제외하고 미세먼지 중 조대입자에 비해 미세입자의 비 율이 높은 분포를 보이거나 같았다. 2016년의 경우는 2~5월을 제외하고 미세 입자의 분율이 높거나 비슷했다. 이는 2월부터 발생된 황사의 영향으로 판단되 어 진다. 그림 3.3.22(b)에 2016년 4월의 옹스트롬지수 값이 현저하게 낮은 것 도 같은 맥락으로 해석 된다.

마. 에어로졸 연직분포

1) 안면도

빛은 대기 중의 분자, 입자(먼지 등)와 구름입자(수적 또는 빙정)에 의해 산 란 또는 흡수(감쇄)되는 특징을 가지고 있다. 이러한 빛의 특성을 이용하여 대 기 중의 에어로졸을 관측 및 연구하기 위해 사용되는 원격탐지장비가 LIDAR (Light Detection and Ranging)이다. 안면도 기후변화감시소는 대기 중 에어로 졸의 연직분포를 관측하기 위하여 2000년 11월부터 에어로졸 라이다(MPL: Micro Pulse LIDAR)를 운영하였고, 장비의 노후화에 따라 2010년 11월부터 에어로졸 라이다(MPoLAR 2020)를 새로이 도입하여 운영하고 있다.

안면도 기후변화감시소에 도입된 에어로졸 라이다(MPoLAR 2020; Multiwavelength Polarization Lidar for Atmospheric Research 2020)는 지상에 서 레이저를 발사하여 대류권의 에어로졸, 특히 황사 및 불규칙한 형상을 갖고 있는 미세입자의 연직특성을 관측하는 장비이다. 조사된 레이저가 대기 중에 산 란되어 돌아오는 빛을 망원경으로 받아 고도정보를 구하고 편광신호와 파장별 후방산란신호를 측정하여 비편광도와 후방산란비를 계산하여 대기 중 에어로졸 의 연직분포와 에어로졸 입자크기 정보를 계산한다. 에어로졸 라이다는 532 nm 파장의 고유한 편광을 유지하고 있는 신호와 편광이 깨어진 신호를 편광분석기 를 통하여 비편광도를 계산함으로써 구형인 수적과 비구형인 에어로졸 입자구분 이 가능하다. 또한 두 파장으로부터 후방산란비를 구하여 에어로졸 입자의 크기 정보를 유추할 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 라이다는 구름과 황사를 구분 할 수 있을 뿐만 아니라 황사층과 미세먼지층의 고도정보를 얻을 수 있다. MPoLAR 2020의 세부 규격은 아래 표 3.3.2와 같다.

표 3.3.2 다파장편광 라이다 세부 규격

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

그림 3.3.24는 2016년 11월 24일부터 30일까지 관측한 에어로졸 라이다 결과이다. 우리나라에 11월 27일과 28일에 황사가 관측되었으며 안면도의 라이 다 결과에서도 황사의 시그널이 검출되었다. 후방산란강도(그림 3.3.24(a))에 의하면 11월 27일 오후부터 28일 오전까지 0.5 정도의 강한 시그널이 나타났 다. 한편, 같은 기간 편광소멸도(그림 3.3.24(b))의 결과에서는 27일 낮 동안 상층에만 비구형성 에어로졸이 관측되다가 27일 밤에는 약 2.5 km 고도부터 지 상까지 비구형성 에어로졸의 영향을 받고 있음이 잘 나타난다. 황사는 대표적인 비구형성 에어로졸로서 에어로졸 종류의 구분 결과에 의하면 황사 에어로졸(그 림 3.3.24(c)의 황토색 영역)의 영향이 잘 표시되고 있다. 안면도의 에어로졸 라이다 분석 결과는 KALION(Korea Aerosol LIDAR Observation Network) 홈페이지(http://www.kalion.kr)에 상시 표출되고 있다.

a) 후방산란강도



b) 편광소멸도





그림 3.3.24 안면도 기후변화감시소에서 에어로졸 라이다로 관측한 2016년 7호 황 사의 a) 후방산란강도, b) 편광소멸도, c) 에어로졸 종류 구분

2) 광주

광주과학기술원의 다파장 라만 라이다는 광원으로 Nd:YAG 레이저를 사용하 여, 레이저 빛은 355 nm, 532 nm, 1064 nm의 파장으로 각각 140 mJ, 154 mJ, 640 mJ의 출력으로 대기로 방출된다(그림 3.3.25). 대기 에어로졸의 후방 산란으로 인해 돌아온 신호는 Schmidt-Cassegrain 망원경으로 수집되며, 수집 된 빛은 빔분리기(Beam splitter)와 파장 간섭 필터(Interference filter)에 의 해 각각의 수신 채널로 나눠진다. 355 nm, 532 nm와 1064 nm 채널의 신호는 탄성산란(elastic scattering) 신호이며, 387 nm와 607 nm에서 N2 라만 산란 (Raman scattering 또는 inelastic scattering) 신호 획득할 수 있다. 일반적으 로 라이다 시스템은 대부분 탄성산란 신호만을 측정하는 장비로서, 라이다 비 (Lidar ratio)를 가정하여, 에어로졸의 광학적 특성들을 산출하기 때문에 산출 값에 있어 많은 오차를 유발한다. 하지만 광주과학기술원 다파장 라만 라이다는 라만 산란 검출 채널을 이용하여 에어로졸의 연직분포 및 특성들을 가정 없이 해석 할 수 있어, 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 407 nm 채널로부터 수증기(Water vapor)에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 361 nm 와 546 nm 채널으로부터 대기 중 석영 물질(Quartz material)에 대한 정보를 얻을 수 있다. 532 nm와 355 nm의 편광채널은 각각 파장에서의 편광 수직 성 분과 수평 성분을 획득하여, 그 비(편광소멸도)를 산출하고, 이는 대기 에어로졸 의 형태(particle shape)에 대한 정보를 얻을 수 있다(그림 3.3.25). 이는 황사 와 같은 비구형성 에어로졸의 관측에 이용된다. 다파장 라만 라이다로부터 에어 로졸의 광학적 특성뿐만 아니라, 미세물리적 특성의 연직분포의 산출이 가능하다. 다파장 라만 라이다로부터 얻어지는 신호로부터 에어로졸에 의한 후방산란계수 (Backscatter coefficient)와 소멸계수(Extinction coefficient)의 연직분포를 산출 할 수 있으며, 이는 에어로졸의 분포 고도와 양에 대한 정보를 제공한다.



그림 3.3.25 광주과학기술원 다파장 라이다의 모식도



그림 3.3.26 2016년 5월 11일에 광주과학기술원 라만라이다 532 nm와 1064 nm로 관측된 후방산란강도(Ranged Corrected signal)와 532 nm에서 측정된 편광소멸도(Depolarization)

그림 3.3.26은 2016년 5월에 11일에 광주 과학기술원에서 라만라이다로 측 정된 532 nm, 1064 nm 파장에서 측정된 후방산란강도와 532 nm 파장에서 측정된 편광소멸도 측정자료이다. 후방산란강도는 라이다 원시자료(raw data) 로부터 거리와 기기 특정값을 보정한 자료로 고도별 에어로졸의 상대적인 분포 를 파악할 수 있으며 에어로졸과 구름층을 구별이 가능하다. 그림 3.3.26에서 관측시작 후 상층부 7~11 km에 권운(cirrus cloud)을 볼 수 있다. 5월 11일 8시 30분 이후부터 0~2 km 내외의 후방산란 강도가 급격하게 증가한 층이 나 타난다. 이는 대기 경계층 내에서의 에어로졸 농도가 높으면서 고도에 따라 균 일하게 분포하고 있음이 관측되었다.

편광소멸도는 후방산란되어 돌아온 레이저의 수평성분과 수직성분의 비로 나 타낸다. 편광된 레이저 빛이 에어로졸에 의해 후방 산란되어 돌아온 빛을 측정 하여 레이저의 진동방향에 따라 수직과 수평성분을 측정한다. 비구형성인 황사 입자나 구형인 오염물질을 구분하는데 주로 사용된다. 주로 황사 입자가 많이 포함 된 에어로졸 층일수록 편광소멸도는 증가한다. 5월 11일에 관측된 자료에 서 2 km 이내에서 후방산란 신호는 높고 편광소멸도가 낮아 광주지역에 지속적 으로 인위적 오염물질이 발생했음을 알 수 있다.

3.3.3 에어로졸 화학특성

기상청 기후변화감시소는 안면도에서 매주 1회씩 24시간 동안 총부유분진 (TSP)과 직경이 10 µm 이하인 입자(PM10), 직경 2.5 µm 이하인 입자 (PM2.5)를 포집하여 각 크기별 에어로졸의 질량농도를 산출하고 화학 특성(이 온성분, 원소성분)을 분석한다. TSP와 PM10은 각각 2001년과 1997년부터 고 용량 미세먼지채취기(High Volume Sampler)를, PM2.5는 1999년부터 저용량 미세먼지채취기(Low Volume Sampler, 충돌판형)를 사용하고 있다. 또한 2008년부터는 싸이클론 방식의 저용량 미세먼지채취기를 이용하여 PM10과 PM2.5를 포집하고 있다. 표 3.3.3은 안면도에서 사용한 에어로졸 채취기 정보 이다.

방식	TSP	PM10	PM2.5	PM10 (cyclone)	PM2.5 (cyclone)
장비 도입연도	2001	1997	1999	2007	2007
제조사/모델명	Anderson/ GMB-2360	Anderson/ TE-6020	TECORA/ Bravo-PM2.5	APM/ 2000A	APM/ 2000A
장비 교체연도	2012	2012	2011	-	-
제조사/모델명	TISCH/ TE-HIVOL+	TISCH/ TE-PM10+	APM/ PMS-204	APM/ 2000A	APM/ 2000A
채취 방식	다단형	다단형	충돌판형	싸이클론형	싸이클론형
샘플링 방법	High-Vol	High-Vol	Low-Vol	Low-Vol	Low-Vol
기본 유량	1.13m³/hr	1.13m ³ /hr	16.7L/min	16.7L/min	16.7L/min

표 3.3.3 에어로졸 채취기기 정보

본 보고서에서는 세계기상기구 지구대기감시프로그램(WMO/GAW Report No.227, 2016)의 권고에 따라 2016년 1월부터 12월까지 안면도 기후변화감 시소에서 PM10, PM2.5 저용량 미세먼지채취기(싸이클론 방식)으로 채취하여 산출한 중량법과 이온성분을 분석하였다. PM10 질량농도가 PM2.5 질량농도보 다 큰 사례만 유효 자료로 처리하였고, 이온수지 불균형 자료는 제외하였다.

가. 에어로졸 질량농도(저용량 미세먼지채취기)

포집된 에어로졸 질량농도는 포집 전후 필터의 무게 차이와 평균 유량을 이 용하여 다음과 같이 산출한다.

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

여기서 W₁은 포집 전의 필터 무게(g), W₂는 포집 후의 필터 무게(g), V는 통과시킨 공기량(m³)으로 평균 유량(m³/min)에 포집시간(1440 min)을 곱한 값이다.

2016년 저용량 미세먼지채취기로 산출한 PM10과 PM2.5의 평균 농도는 각 각 41.0±30.4 μg/m³(n=46), 34.8± 22.1 μg/m³(n=49)이다. 2016년 4월 23일인 황사일(서산(129) 기준)의 PM10, PM2.5 질량농도는 각각 202.5, 126.2 μg/m³로 2016년 측정 사례 중 가장 높았다. 국내 PM10과 PM2.5 대기 환경기준 연간 평균치 기준(각 50 μg/m³, 25 μg/m³)과 비교할 때, 2016년 안 면도의 PM10 농도는 기준을 만족하였으나 PM2.5는 초과하였다.

저용량 미세먼지채취기로 산출한 PM10 농도와 같은 기간의 부유분진측정기 자료를 평균하여 상호 비교하였다(그림 3.3.27~3.3.28). 2016년 총 46개 시료 의 PM10 질량농도는 평균 41.0±30.4 μg/m³이며, 같은 기간의 부유분진측정 기 PM10 질량농도는 39.3±35.6 μg/m³으로 1.7 μg/m³의 차이를 보였다. 그림 3.3.28과 같이 두 측정값 간의 상관계수(r)는 0.915이며, 등가성평가실험의 자 동측정기 인증 기준⁶)을 만족하고 있다.

2008년부터 2016년까지의 PM10, PM2.5의 연도별, 계절별 질량농도는 그 림 3.3.29.~3.3.31과 같다. PM10, PM2.5의 지난 8년간(2008~2015년) 평 균 질량농도는 각각 50.2±35.3 μg/m³(n=285), 36.2±22.5 μg/m³(n=304) 로, 2016년도 평균보다 높았다. PM10과 PM2.5 모두 봄철 평균이 다른 계절 평균보다 높았다.

 ^{6) 『}환경측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시』(국립환경과학원 고시 제 2017-6호, 2017. 4. 5.)
<표3>의 PM10 자동측정기 인증 기준 중 정확도(85%), 선형회귀식 기울기(1±0.1). 선형회귀식 절편 허 용치(-5.0~5.0)



그림 3.3.27 2016년 안면도에서 측정한 PM10(저용량 미세먼지채취기), PM2.5(저용량 미세먼지채취기), PM10(부유분진측정기)의 일평균 질량농도



그림 3.3.28 2016년 안면도에서 측정한 PM10(저용량 미세먼지채취기)과 PM10(부유 분진측정기)의 일평균 질량농도



그림 3.3.29 2008~2016년 PM10(저용량 미세먼지채취기)의 연도별 질량농도 박스플롯 * 파란색 실선: 국내 대기환경기준의 PM10 연간 평균치 기준

- * Total: 2008~2015년(8년간)
- *상자 선의 양끝은 5,95% 값,상자 양끝은 25,75% 값,상자 가운데 실 선은 중간값,빨간색 점선은 평균값을 나타냄.



- 그림 3.3.30 2008~2016년 PM2.5(저용량 미세먼지채취기)의 연도별 질량농도 박스플롯 * 파란색 실선: 국내 대기환경기준의 PM10 연간 평균치 기준
 - * Total: 2008~2015년(8년간)
 - *상자 선의 양끝은 5,95% 값,상자 양끝은 25,75% 값,상자 가운데 실 선은 중간값,빨간색 점선은 평균값을 나타냄.



그림 3.3.31 2008~2016년 PM10(저용량 미세먼지채취기, 위), PM2.5(저용량 미세먼 지채취기, 아래)의 계절별 평균농도 박스플롯 * 파란색 점: 2008~2015년 계절별 평균 농도

* 상자 선의 양끝은 5,95% 값,상자 양끝은 25,75% 값,상자 가운데 실 선은 중간값,빨간색 점선은 평균값을 나타냄.

나. 에어로졸 이온성분

2016년 1월부터 2016년 12월까지 안면도 기후변화감시소에서 채취한 PM10, PM2.5 시료의 수용성 이온 9종(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, F⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)을 분석하였다. 수용성 이온성분 중 nss-SO₄²⁻는 비해염 (non-sea salt) 기원 SO₄²⁻의 농도로, '[nss-SO₄²⁻] = [SO₄²⁻] - [Na⁺] × 0.251'의 식에 의해 SO₄²⁻ 총 농도에서 해염으로부터 유입된 SO₄²⁻의 농도 ([Na⁺] × 0.251)를 뺀 결과이다. nss-Ca²⁺ 역시 비해염 Ca²⁺의 농도로 nss-SO₄²⁻과 유사하게 '[nss-Ca²⁺] = [Ca²⁺] - [Na⁺] × 0.04'의 관계식으 로부터 구한다(Ho et al, 2003).

1) PM10 이온성분

안면도에서 측정한 수용성 이온성분의 연도별 평균농도와 이온조성비를 그 림 3.3.32에 보였다. PM10 수용성 이온성분 중 nss-SO4²⁻의 2016년 평균농 도는 5.9 µg/m³로 지난 8년(2008~2015년) 평균농도인 6.4 µg/m³에 비해 약 간 낮았다. NO₃⁻의 과거 8년 평균과 2016년 평균농도는 각각 8.6(7.4~9.7), 7.4 µg/m³이며 NH4⁺는 각각 3.5(1.4~4.8), 2.4 µg/m³로, 두 성분 모두 지난 8년 평균 농도보다 낮았다. 연도별로는 nss-SO4²⁻와 NH4⁺성분은 2014년도에 가장 높고, 반면에 NO₃⁻성분은 2008년도에 가장 높았다. 반면, nss-SO4²⁻은 2012년, NO₃⁻은 2016년, NH4⁺성분은 2008년에 가장 낮았다. nss-Ca²⁺은 지 난 8년간 평균 0.7 µg/m³, 2016년은 0.5 µg/m³로 약 29% 낮았다. 연도별로는 2011년도에 가장 높고, 2016년에 낮았다. Cl⁻, Na⁺, F⁻ 성분은 지난 8년간의 전체평균농도보다 2016년에 낮은 값을 보였다. K⁺, Mg²⁺성분은 지난 8년간 농도보다 2016년도에 증가하였다.

연도별 수용성 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과, 2008년부터 2016년까 지의 이차무기에어로졸(nss-SO4²⁻, NO3⁻, NH4⁺)의 조성비는 65.6~86.8%로 이온성분의 대부분을 차지하고 있으며, 2012년에 가장 높고 2008년에 가장 낮 았다. 반면, 해염기원의 성분(Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺)은 2008년부터 2016년까지의 조성비가 9.1~27.2%이며, 2008년에 가장 높고, 2012년에 가장 낮았다. 토양 기원의 nss-Ca²⁺ 성분은 2.0~4.5% 조성비를 보였다.





그림 3.3.32 2008년부터 2016년까지 PM10 수용성 이온성분의 연평균 농도(위)와 조 성비(아래)(Total: 2008~2015년(8년간) 평균농도)

2) PM2.5 이온성분

PM2.5 수용성 이온 성분 중 nss-SO₄²⁻의 2016년 평균은 5.4 μg/m³로 지 난 8년(2008~2015년) 평균(5.4 μg/m³)과 비슷하였다. 연도별로는 2010년에 가장 높고, 2012년에 가장 낮았다. NO₃⁻의 2016년 평균은 7.0 μg/m³로 지난 8 년 평균인 7.9 μg/m³보다 낮았다. 연도별로는 2008년에 가장 높고, 2015년에 가장 낮았다. NH₄⁺의 2016년 평균은 2.6 μg/m³로 지난 8년 평균인 3.1 μg/m³ 보다 낮았다. 연도별로는 2014년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮았다. nss-Ca²⁺의 2016년 평균과 지난 8년 평균 모두 0.4 μg/m³였다. 연도별로는 2011 년도에 가장 높고, 2008년에 가장 낮았다. 그 외의 성분 중 Na⁺, Cl⁻, F⁻, Mg²⁺ 2016년 농도는 지난 8년 평균보다 낮았으며, K⁺는 지난 8년 평균보다 높았다.

연도별 수용성 이온성분들의 조성을 비교해 본 결과, 2008년부터 2016년 까지의 이차무기에어로졸 성분들(nss-SO4²⁻, NO3⁻, NH4⁺)의 조성비는 전체 이온성분의 74.1~88.4%를 차지하며, 2012년에 가장 높고, 2008년에 가장 낮 았다. 지난 8년 평균과 2016년의 이차무기에어로졸 성분들의 조성비는 각각 83.6%, 82.4%였다. 반면에 해염기원의 성분들(Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺)은 2008년부 터 2016년까지의 조성비는 7.5~19.1% 사이에 분포하며, 이차무기에어로졸 성분들과는 반대로 2008년에 가장 높고, 2012년에 가장 낮았다. 토양기원인 nss-Ca²⁺ 성분의 조성비는 1.2~3.1%였다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 이 온성분 중 이차무기에어로졸 성분들의 조성비가 다른 성분들에 비해 증가하는 것으로 확인되었다.





그림 3.3.33 2008~2016년 PM2.5 수용성 이온성분의 연평균 농도(위)와 조성비(아래) (Total: 2008~2015년(8년간) 평균농도)

안면도에서 측정한 PM10, PM2.5의 이온성분에 대한 계절별 평균 농도는 그림 3.3.34~그림 3.3.35와 같다. 여기서 계절별 평균농도는 2008년부터 2015년까지 같은 계절의 자료를 평균한 값이다. 겨울철인 경우 지난해 12월과 당해연도 1, 2월의 데이터를 평균하였다.

PM10 수용성 이온성분의 지난 8년(2008~2015년)간과 2016년 계절별 농 도를 비교해 보면, nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺성분의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농 도범위는 각각 3.6~8.5, 4.8~10.2, 1.3~3.8 μg/m³로 조사되었다. nss-SO₄²⁻성분의 2016년 겨울, 봄, 여름, 가을철 평균농도는 각각 4.0(n=9), 8.5(n=15), 3.6(n=8), 5.3(n=11) μg/m³, NO₃⁻의 2016년 겨울, 봄, 여름, 가 을철 평균농도는 각각 4.8(n=9), 8.3(n=15), 10.2(n=8), 6.8(n=11) μg/m³ 이며, NH₄⁺의 2016년 겨울, 봄, 여름, 가을철 평균농도는 각각 1.3(n=9), 3.0(n=15), 2.9(n=8), 2.2(n=11) μg/m³였다. nss-SO₄²⁻, NH₄⁺ 성분은 봄 철에 높은 농도를 보이며, NO₃⁻성분은 여름철에 높은 것으로 조사되었다. nss-Ca²⁺은 지난 8년 계절평균과 2016년의 계절별 농도를 비교해 보면, 지난 8년 의 겨울, 봄, 여름, 가을철의 농도 범위는 0.5~1.0 μg/m³, 2016년 겨울, 봄, 여 름, 가을철의 농도 범위는 0.4~0.6 μg/m³였고, 공통적으로 봄철에 가장 높았다.

수용성 이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차무기에어로졸 성분 들(nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺)의 조성비는 지난 8년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철 에 각각 77.8, 81.9, 88.6, 80.6%로, 여름에 높고, 겨울에 가장 낮았다. 또한 2016년의 겨울, 봄, 여름, 가을에 각각 72.3, 83.1, 87.0, 78.6%로, 지난 8년 평균과 같이 여름에 가장 높고, 겨울에 가장 낮았다. 그리고 해염기원 성분들 성 분(Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺)들의 조성비는 지난 8년간의 겨울, 봄, 여름, 가을에 각각 17.1, 12.6, 8.1, 14.1%였고, 2016년의 계절별 조성비는 각각 22.2, 11.1, 7.3, 14.5%로 나타나, 겨울철이 가장 높아 이차무기에어로졸과는 상반된 경향 을 보였다. 그리고 토양기원인 nss-Ca²⁺의 조성비는 지난 8년간의 겨울, 봄, 여름, 가을에 각각 2.8, 3.8, 2.3, 3.1%, 2016년 조성비는 4.0, 2.5, 1.9, 2.6% 로 봄철에 가장 높았으며, 이는 봄철에 발생빈도가 가장 높은 황사의 영향으로 추정된다.





그림 3.3.34 2008~2016년 PM10 수용성 이온성분의 계절별 농도(위)와 조성비(아래) *8 Years: 2008~2015년(8년간) 평균농도

*Winter: 전년도 12월과 당해년도 1, 2월의 평균값임

2008년 이후 PM2.5 수용성 이온성분의 계절별(겨울, 봄, 여름, 가을) 농도 범위는 각각 4.6~6.0, 6.2~9.1, 2.3~3.4 μg/m³였다. nss-SO₄²⁻성분의 2016년 겨울, 봄, 여름, 가을 평균농도는 각각 6.5(n=8), 7.9(n=15), 3.6(n=11), 4.1(n=12) μg/m³, NO₃⁻ 농도는 각각 5.3(n=8), 7.6(n=15), 9.0(n=11), 6.6(n=12) μg/m³, NH₄⁺ 농도는 각각 3.4(n=8), 3.3(n=15), 2.9(n=11), 2.1(n=12) μg/m³였다. PM10과 마찬가지로, PM2.5의 nss-SO₄²⁻성분은 봄철에 높은 농도를 보이며, NO₃⁻ 성분은 여름철에 높은 것으로 조사되었다. nss-Ca²⁺ 성분의 지난 8년 계절별(겨울, 봄, 여름, 가을) 평균농도 범위는 0.37~0.50 μg/m³, 2016년에는 0.28~0.52 μg/m³이며, 봄철에 가장 높았다.

PM2.5 수용성 이온성분의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 이차무기에어로 졸 성분들(nss-SO4²⁻, NO3⁻, NH4⁺)의 조성비는 지난 8년간의 겨울, 봄, 여름, 가을철에 각각 81.0%, 83.2%, 88.3%, 83.7%로, 여름철에 가장 높았다. 2016 년의 계절 평균은 각각 81.6%, 82.9%, 87.4%, 82.4%였다. 한편, 해염기원 성 분(Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺)의 지난 8년 계절별 조성비는 각각 14.0%, 12.2%, 8.3%, 11.4%이며, 2016년의 계절별 조성비는 각각 14.8%, 10.2%, 6.7%, 10.3%였 다. 그리고 토양기원의 nss-Ca²⁺의 지난 8년 계절별 조성비는 각각 2.3%, 2.3%, 1.8%, 2.4%, 2016년 조성비는 2.1%, 2.3%, 1.6%, 2.3%로써 PM10과 는 다르게 여름철을 제외하고는 계절별로 큰 차이를 보이지 않았다.





그림 3.3.35 2008~2016년 PM2.5 수용성 이온성분의 계절별 농도(위)와 조성비(아래) *8 Years: 2008~2015년(8년간) 평균농도 *Winter: 전년도 12월과 당일년도 1, 2월의 평균값임

3.4 대기복사

기상청은 태양복사에너지 및 그 변화를 감시하기 위해 안면도, 고산에서 대 기복사 관측을 수행하고 있다. 복사자료는 태양복사와 지구복사로 구분되며, 각 각의 상향·하향복사(4성분), 태양 하향복사의 두 성분인 직달일사와 산란일사, 지표면의 에너지 수지를 측정하는 순복사 등 7가지이다. 안면도 기후변화감시소 는 7가지 요소 모두를 관측하고, 고산 기후변화감시소는 태양복사 3가지 요소 (태양하향, 직달, 산란)를 관측하고 있다.

관측 자료는 1분 간격으로 생산되며 단위는 W/m²이다. 자료 QC를 위해 BSRN(Baseline Surface Radiation Network)에서 권고하는 방법을 따랐다. QC방법은 3단계로 진행되며 QC1, QC2 단계는 Long and Dutton(2002)을 참 고하였다.

안면도 기후변화감시소는 9월 26일 부터 12월 7일 까지 관측 기계의 검정 으로 인해 관측이 되지 않아 연평균을 분석하지 않았다. 고산에서의 연평균은 태양하향복사 149.4 W/m², 직달일사 104.3 W/m², 산란일사 79.3 W/m²으로 서 지난 7년간(2009~2015년)의 평균(태양하향복사 156.7 W/m², 직달일사 115.5 W/m², 산란일사 82.0 W/m²)과 비슷하였다.

그림 3.4.1은 강수량과 일조시간을 월별로 나타낸 것이다. 복사자료는 강수 량과 일조시간에 영향을 받기 때문에 안면도 자료 분석을 위해 기후변화감시소 에서 직선거리로 약 33 km 떨어져 있는 서산(129) 자료를 이용하였고, 고산 기후변화감시소는 약 4 km 떨어져 있는 고산(185) 자료를 이용하였다. 강수량 이 많은 시기는 서산은 7월, 고산은 6월이었고, 일조시간은 서산은 5월, 고산은 8월에 매우 높았다.



3.4.1 직달일사, 산란일사

직달일사는 대기 중에서 산란 또는 흡수되지 않고 태양으로부터 직접 입사되 는 복사량을 말하며, 산란일사는 차폐 판을 이용하여 직달일사성분을 차단하고 관측한 복사량을 말한다. 2016년 안면도 기후변화감시소의 직달일사는 태양추 적장치 고장으로 3월 23일 이전 자료는 전천일사에서 산란일사를 뺀 값[(전천 일사-산란일사)/cos(solar zenith angle)]을 계산하여 이용하였다.

그림 3.4.2, 3.4.3은 안면도, 고산의 2016년 직달일사, 산란일사 월평균을 지난 관측 평균(안면도 10년: 2006~2015년, 고산 7년: 2009~2015년)과 비 교한 것이다. 고산 기후변화감시소의 2008년 관측 자료는 품질관리 과정에서 손실되는 자료가 많아 분석에서 제외하였다. 안면도 기후변화감시소의 2016년 직달일사 월평균 최대는 5월에 207.9 W/m², 최소는 1월에 74.4 W/m²로 나타 났다. 산란일사의 월평균 최대는 6월에 130.5 W/m², 최소는 1월에 57.2 W/m² 이다. 고산 기후변화감시소의 2016년 월평균 최대는 직달일사가 8월에 173.9 W/m², 산란일사는 6월에 112.4 W/m²이며 최소는 직달일사가 1월에 30.7 W/m², 산란일사는 12월에 44.1 W/m²이다. 고산의 10월 직달일사가 평년대비 약 60% 낮았는데 2015년 대비 10월 고산의 월 강수량은 약 6배 높았고, 일조 시간은 약 60% 감소한 경향과 일치한다.



(상자 선의 양끝은 10%, 90%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간 값, 빨간색 점 2016년 평균, 점-선은 지난 관측(안면도: 10년, 고산: 7년) 평균을 나타냄)



200 Dif_Solar_Rad. for 2016 Dif_Solar_Rad. from 2006 to 2015 150 W/m² 100 50 0 FEB APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC JAN MAR Diffuse Solar Radiation (Gosan) 200 Dif_Solar_Rad. for 2016 Dif_Solar_Rad. from 2009 to 2015 150 W/m^2 100 50

Diffuse Solar Radiation (Anmyeon)

그림 3.4.3 안면도, 고산 기후변화감시소의 월평균 산란일사

APR

MAY

JUN

JUL

AUG

SEP

OCT

NOV

DEC

MAR

0

JAN

FEB

3.4.2 태양상향복사, 태양하향복사(전천일사)

그림 3.4.4는 안면도의 태양상향복사와 태양하향복사의 월평균과 고산의 태 양하향복사의 월평균이다. 태양복사의 월평균은 계절변동으로 봄철에 증가하고 겨울로 갈수록 감소하나 여름철에는 구름과 강수로 인해 오히려 값이 낮아진다. 안면도의 2016년 월평균 최대는 5월에 46.8 W/m²(태양상향복사), 255.0 W/m² (태양하향복사), 최소는 12월에 20.0 W/m²(태양상향복사), 1월에 87.7 W/m² (태양하향복사)로 관측되었다. 고산에서의 2016년 전천일사 최대는 5월에 221.3 W/m², 최소는 1월에 62.7 W/m²이다.



그림 3.4.4 안면도, 고산의 태양상향복사, 태양하향복사 월평균

3.4.3 지구상향복사, 지구하향복사

지구복사는 3~50 µm 파장대의 장파복사를 측정한다. 지구상향복사는 지표 에 의해 방출되는 성분으로서 지면온도의 영향을 받는다. 지구하향복사는 대기 에 의해 지표로 방출되는 성분으로서 주로 기온과 습도의 연직분포, 운량, 구름 물리성분 등에 따라 달라진다. 지구복사는 태양복사에 비해 일변화 폭이 적고, 지구상향복사량이 하향복사량보다 크다. 안면도에서는 2016년에 약 73 W/m² 정도 지구상향복사 연평균이 지구하향복사 연평균보다 높았다. 2016년 월평균 지구상향복사의 최대는 8월에 462.0 W/m², 최소는 1월에 313.2 W/m²이며, 지구하향복사의 최대는 7월에 386.5 W/m², 최소는 2월에 248.3 W/m²이다(그 림 3.4.5). 겨울에 낮고 여름에 높은 계절변동 특성이 잘 반영되고 있다.



3.4.4 순복사

순복사는 지표 에너지수지를 결정하는 중요한 요소이며, 태양과 지구사이의 복사에너지 수지로서 태양으로부터 들어오는 태양복사와 지구에서 방출하는 지 구 복사의 관계식(산출 순복사 = 태양하향복사 - 태양상향 복사 + 지구하향 복 사 - 지구상향복사)에 의해서 알 수 있다.

일반적으로 순복사는 봄과 여름에 높고, 겨울에 낮다. 열대 및 아열대 지역과 적도 근처에서 일별 순복사는 일 년 내내 양의 값을 가지는 반면, 그 외의 지역 에서는 양과 음의 값을 가진다. 맑은 날의 시간별 순복사량은 태양 고도 각이 증가함에 따라 서서히 증가하여, 정오에 최대가 된다. 그림 3.4.6은 안면도 순복 사의 월평균 분포이다. 2016년 월평균 최대는 5월에 142.0 W/m², 최소는 1월 에 11.8 W/m²으로 겨울철에 낮고 여름철에 높은 분포를 보였다.



3.5 성충권오존

성층권에 존재하는 오존은 대기 중 21%를 차지하는 산소 분자가 태양 자외 복사(태양빛)와 화학반응을 일으켜 자연적으로 형성된다. 대부분의 오존은 성층 권에 존재하며, 태양에서 방출되는 유해한 자외선으로부터 인류를 지켜준다. 오 존층의 변화는 지구 대기의 복사 에너지 균형에 막대한 영향을 미치고 있고 대 기 대순환에 직접 관계되고 있다. 1984년 남극 오존 구멍을 처음 발견한 이후 (Chubachi, 1984; Farman et al., 1985) 성층권의 오존층 파괴는 국제사회에 큰 관심을 가지게 하였다. 성층권의 오존 생성은 화학반응으로 파괴되는 오존에 의해 균형을 이루는데, 오존은 태양빛뿐 아니라 다양한 자연·인위적 화학물질 과 지속적으로 반응을 일으킨다. 오존을 파괴하는 주요 반응성 가스에는 산화수 소와 산화질소, 그리고 염소와 브롬이 함유된 반응성 가스가 있다. 1970년대 중 반, 인간 활동으로 발생하는 염소와 브롬 원자가 함유된 기체가 성층권 오존을 파괴할 수 있다는 사실이 밝혀졌다. 할로겐 생성가스 또는 오존층 파괴물질이라 불리는 이 가스들은 성층권에 도달한 후 화학반응을 일으켜 오존을 파괴한다. 오존층이 파괴되면 지표면의 자외선 복사가 증가하여 피부암과 백내장의 발병률 이 증가하고 식물, 농작물, 해양 플랑크톤에도 악영향을 미칠 것이다. 이렇듯 오 존층 변화 연구와 감시는 전 세계적인 관심사이다.

오존전량은 지상 어느 곳이든 그 위치 상공에 존재하는 오존의 총량으로 정 의되는데, 돕슨 단위(Dobson Unit, DU)로 기록된다. 일반적으로 오존전량은 적 도에서 최솟값을 갖고 극지방에서 최댓값을 갖는다. 태양 자외선 복사에 의한 오존 생성 비율은 열대지방에서 평균적으로 최고치를 보이지만, 성층권 내 공기 대순환으로 열대 오존이 극지방으로 서서히 수송되기 때문에 오존은 중위도와 고위도에 축적되어 오존층 두께가 두꺼워지고, 반면 열대지방의 경우에는 오존 층 두께가 얇아진다. 오존전량은 계절별로 달라지는데, 늦가을과 겨울 동안 열대 지방에서 극지방으로의 오존 수송이 증가하여 오존전량은 봄철 고위도에서 최댓 값을 갖게 된다.

3.5.1 오존전량

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

가. 안면도, 고산, 서울의 오존농도 변화

그림 3.5.1은 안면도, 고산, 서울의 연평균을 2006년부터 나타낸 그림이다. 안면도는 같은 위도대인 포항자료를 2013년 전후로 같이 분석하였고, 고산은 2011년 자료부터, 서울은 2006년부터 비교하였다. 2016년 오존전량은 안면도 321 DU, 고산 291 DU, 서울 324 DU로 나타났다. 세 지점 모두 2015년 보다 약 8%(고산), 3%(안면도), 4%(서울) 각각 감소하였다.



그림 3.5.1 안면도, 고산, 서울, 포항에서 측정된 연평균 오존전량 분포

그림 3.5.2는 안면도, 고산, 서울에서 측정한 2016년 오존전량 월평균을 지 난 관측 평균(포항+안면도 10년: 2006~2015년, 서울 10년: 2006~2015년, 고산 5년: 2011~2015년)과 같이 비교한 것이다. 고산의 2016년 1월에는 관 측기계 오류로 관측값이 없어 분석에서 제하였다. 2016년 오존전량 최댓값은 안면도 3월 27일에 433 DU, 고산 3월 27일 419 DU, 서울 2월 5일 438 DU 이다. 오존전량의 계절변동을 보면 2~5월까지 크고 10월에 가장 낮은 분포를 보였다. 과거 참조값 대비 봄철은 감소하였는데, 서울의 경우 감소폭이 가장 컸 다. 그러나 서울 지역의 일 대푯값 관측 자료를 기준으로 보게 될 경우, 봄철에 300 DU 이하로 감소하는 경우는 나타나지 않았으며, 모든 관측 값이 과거 관 측 값의 영역 내에 존재하고 있었다. 봄철의 오존전량 감소는 북극에서 나타난 오존전량의 급감과 이에 의한 오존홀은 현상이 북반구 중위도 지역까지 영향을 미친 것으로 볼 수 있다(Manney et al., 2011).



(상자 선의 양끝은 10%, 90%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간 값, 빨간색 점 2016년 평균, 점-선은 지난 평균값(포항+안면도 10년 (2006~2015), 서울 10년(2006~2015), 고산 5년(2011~2015))을 나타냄)

나. 타 지역과의 오존농도 변화 비교

한반도와 인접한 일본의 오존전량과의 비교를 위하여 삿포로(Sapporo, 43°04'N, 140°20'E), 나하(Naha, 26°12'N, 127°41'E), 쓰꾸바(Tsukuba, 36°03'N, 140°08'E)의 Dobson 관측 값을 함께 분석하였다(그림 3.5.3). 2016 년 오존전량 연평균 값은 6개 지역 모두 2015년 보다 감소하였으며, 삿포로, 서울, 안면도, 쓰꾸바, 고산, 나하의 위도 순으로 351, 324, 321, 303, 291, 262 DU로 각각 나타났다. 지난 2006년부터 2016년까지의 각 월평균 오존전 량의 연변화는 그림 3.5.4에 나타냈다. 나하를 제외한 5개 지점의 연 변화 경향 은 봄철에 높고, 가을철에 낮게 나타나는 유사한 경향을 보여주고 있으나, 고위 도로 갈수록 연 변화의 진폭이 증가함을 알 수 있다. 그리고 연변화의 진폭은 봄철에서 그 변화가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.





그림 3.5.4 한반도 및 일본상공의 월평균 오존전량 분포
3.5.2 오존 연직분포

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

가. 포항

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

2016년에는 총 52회 관측이 실시되었으며, 이중 45회가 성공하여 오존 연 직분포를 관측하였다. 그림 3.5.5는 2016년 포항 상공의 월평균 연직 오존분포 를 오존분압으로 나타낸 그림이다. 고농도는 주로 18~28 km에 존재하며, 1~ 5월에 높게 나타났다. 1월에서 4월에 걸쳐 고도 약 20~24 km 부근에서 성층권 오존의 최대 농도 층이 존재하며, 가을로 갈수록 최대 농도 층은 높아지다 겨울 에 다시 낮아진다(표 3.5.1). 대류권계면 주변에서 나타나는 Second Ozone Peak(SOP)에 의해 나타나는 오존전량 급증현상은 봄철 9~16 km 부근에서 두드러지는 것을 알 수 있다.

	1월	2월	3월	4월	5월	6월
최대농도[mPa]	15.6	17.85	16.7	15.7	15.4	14.2
고도[km]	23	20.3	20.1	21.9	22.3	24.7
	7월	8월	9월	10월	11월	12월
최대농도[mPa]	14.4	13.2	14.0	13.7	14.5	15.6
고도[km]	24.2	26.7	23.7	26	25.2	23

표 3.5.1 포항 2016년 월평균 최대 오존농도와 최대 농도가 나타나는 고도



그림 3.5.5 2016년 포항지역의 오존농도 연직분포

그림 3.5.6은 포항에서 오존연직 관측이 시작된 1995년부터 2016년까지 오 존연직분포를 나타낸 그림이다. 성층권 오존과 대류권 오존은 상반된 영향력을 보이며 생성 메커니즘 또한 차이가 난다. 오존의 연직분포를 분석할 때는 주로 성층권과 대류권을 구분하여 분석하는데 최근 대류권계면 주변에서 나타나는 Second Ozone Peak(SOP)에 의해 오존전량 급증현상이 나타난다고 알려져 있 어, 연직분포를 성층권(16 km이상), SOP(9~16 km), 대류권(9 km 이하)로 나누어 장기 변화를 분석하였다(김준 등, 2005; Hwang et al., 2007). 성층권 에서는 -3.0 DU/decade, SOP 0.6 DU/decade, 대류권 1.9 DU/decade로 SOP 구간과 대류권에서 증가경향을 보였다.



그림 3.5.6 포항지역의 오존농도 연직분포(1995~2016년)

나. 서울(숙명여자대학교, 위탁관측소)

기후변화감시 위탁관측소인 숙명여자대학교 지구환경연구소내 오존관측소에서 110 GHz 마이크로파 수신기인 SORAS(Stratospheric Ozone Radiometer in Seoul)를 이용하여 성층권 오존의 연직분포를 관측하고 있다. 관측된 연직분포 는 부피혼합비(ppmv)로 표현하고 있으며, 각 고도에서의 대기압을 고려할 경우 분압(mPa)의 단위로도 표현할 수 있다.

110 GHz 마이크로파 수신기 SORAS는 오존 분자의 회전 운동시, 에너지 전이(606-615)를 통해 발산하는 전파를 지상 50 m 고도에서 수신한다. 오존에 서 발산된 전파는 분자의 운동 방향에 따라 수신 주파수가 달라지는 도플러 효 과와 대기 분자와의 충돌로 인해 나타나는 에너지 변동이 나타나는 압력 넓힘 효과로 인해 스펙트럼의 모양이 결정된다. 성층권 영역에서는 압력 넓힘 효과로 인해 나타나는 스펙트럼 모양이 도플러 효과보다 크게 기여하며, 이 정보를 역 산하여 고도별 분포도를 분석할 수 있다. 대류권 영역에서는 압력 넓힘 영향이 매우 크기 때문에 스펙트럼의 피크가 거의 나타나지 않아 이 영역에 대한 고도 별 분포도는 분석할 수 없다. 그러나 지구 대기 중 존재하는 오존의 대부분은 성층권에 분포하기 때문에, 기후변화 관측 자료로써 충분한 자료를 제공한다.

SORAS는 61 kHz 간격으로 나타나는 800 MHz 대역폭의 스펙트럼의 모양을 분석함으로써, 성층권 오존의 고도별 분포도를 분석할 수 있다. 여기서는 2016 년도 오존의 고도별 분포 자료를 제시하고, 월별 최고 농도를 표현하였다.

다음 스펙트럼(그림 3.5.7)은 2016년 3월 14일에 관측된 오존 전파 스펙트 럼 및 고도별 부피혼합비, 평균 커널을 나타내었으며, 비교를 위해 동일 날짜에 서의 AURA 위성의 MLS(ver 4.2)관측 결과를 같이 표현하였다. SORAS 오존 연직분포도는 위성 결과와 비교했을 때 전체 고도 구간에 걸쳐 0.5 ppmv 이내 의 차이를 보이고 있다.



그림 3.5.7 2016년 3월 14일 18시(KST)에 관측한 110.836 GHz 오존 전파 스펙트럼 과 평균 커널, 오존의 연직분포도(SORAS, AURA MLS), 연직분포도 차이 값(스펙트럼은 18시를 기준으로 총 6시간 적분된 결과임)

오존 농도의 월별 변화를 살펴보기 위해 월평균 고도별 분포도를 부피혼합비 와 분압으로 나타내었다(그림 3.5.8). 부피혼합비는 각 고도별 전체 대기압을 기준으로 오존의 비율을 의미하며 분압은 오존의 존재량을 압력의 단위로 표현 한 것이다. 지표면과 가까워질수록 존재하는 대기 분자의 수가 급격하게 증가하 기 때문에, 부피혼합비와 분압의 분포는 서로 다른 모양으로 표현된다. 먼저 월 평균 부피혼합비를 살펴보면, 3월부터 9월까지의 최대 부피혼합비가 8 ppmv 이상의 값을 나타내며, 12월에 7 ppmv 수준의 최저 부피혼합비를 나타내었다. 위성자료와 비교했을 때, 최대 농도의 차이가 4월부터 10월까지 0.5 ppmv 이 내의 수준을 나타내나, 1~2월과 11~12월은 거의 동일한 최댓값을 나타내었다 (그림 3.5.9). 이것은 마이크로파 전파 전달시 흡수율이 높은 수증기의 농도가 낮은 환경이 조성됨에 따라 데이터의 품질이 향상된 결과라 볼 수 있다.



그림 3.5.8 2016년 서울 상공의 성층권 오존 연직분포 변화



그림 3.5.9 2016년 서울 상공의 성층권 오존 연직분포의 최댓값 비교 (SORAS 관측값과 AURA 위성의 MLS 관측값)

월평균 오존 관측 자료를 위성 자료와 비교했을 때(그림 3.5.10), 분석된 농 도 값은 차이가 있으나, 분포 모양은 상당히 유사하게 관측된 것을 볼 수 있다. 8월의 오존 연직분포의 차이가 다른 월에 비해 비교적 큰 값의 차이를 보이고 있으며, 이 현상은 대류권의 높은 습도로 인해 마이크로파의 낮은 투과율이 과 다 추정된 결과로 볼 수 있다.



그림 3.5.10 서울 상공의 월평균 오존 연직분포 관측자료와 AURA위성의 MLS 자료 와의 비교



그림 3.5.11 서울 상공의 월평균 오존 연직분포 관측자료와 AURA위성의 MLS 자료 와의 차이 비교(SORAS 관측자료 - AURA MLS 관측자료)

그림 3.5.12는 분압으로 표현된 오존의 고도별 분포도를 나타내었다. 분압 계산은 이상기체상태방정식에 따라 부피혼합비×기압으로 계산하여 표현하였다. 분압으로 표현할 때, 오존의 절대량이 가장 큰 고도를 표현할 수 있는 장점이 있다.



그림 3.5.12 2016년 서울 상공 성층권 오존의 고도별 분포도(분압)

	1월	2월	3월	4월	5월	6월
최대농도 [mPa]	15.8	14.8	14.4	15.7	14.9	14.3
고도 [km]	22	22	23.5	23.5	25	25
	7월	8월	9월	10월	11월	12월
최대농도 [mPa]	14.8	15.6	13.2	12.8	14.4	14.6
고도 [km]	25	25	25	25	25	25

표 3.5.2 2016년 서울 상공의 월평균 최대 오존 농도(분압)

3.5.3 남극 오존홀

국지방은 겨울에 성층권에서 극 소용돌이(Polar Voltex)에 의하여 극지방상 공과 그 주의에 공기의 교환이 현저하게 제한되어 극지방상공의 성층권 대기는 주위로부터 오존과 열 공급을 받지 못하고 고립된다. 겨울에 태양빛을 받지 못 하므로 극 소용돌이 내부는 복사냉각에 의하여 기온이 현저하게 하강한다. 성층 권의 기온이 내려가면 극 성층권구름(Polar Stratospheric Cloud, PSCs)으로 불리는 미세한 입자로 구름이 성층권에 형성된다. PSCs는 초산 또는 수증기 등 이 낮은 온도에서 응결되어 액체와 고체의 입자가 형성된다. 이 PSCs를 크게 나누어 하부성층권의 기온이 -78℃ 이하에서 발생하는 형태 I과 -85℃에서 발생하는 형태 II가 있다. 전자는 질산(HONO₂)이 많이 함유하여 있는 반면 후 자는 빙정(H₂O)이 주성분으로 되어 있다(WMO, 1999). PSCs가 형성되면 그 입자의 표면에 불 균일 반응(기체분자가 고체 또는 액체의 표면에서 일어나는 화학반응)으로부터 성층권의 초산염소(ClONO₂)와 염화수소(HCl)의 염소분자 (Cl₂)가 발생되어 겨울동안 축적된다(WMO, 1995). 봄이 되면 극지방 상공의 성층권에 태양빛이 비추어져 겨울동안 축적된 Cl₂가 광해리되어 활성염소원자가 된다. 이 염소가 촉매작용을 하게 되어 오존을 파괴하는데, 오존홀은 남극지방에 서 이 메커니즘에 의하여 급격한 오존감소, 파괴가 진행되어 형성된다. 이와 같 이 오존홀 형성에는 극 소용돌이의 활동과 밀접한 관계가 있다. 따라서 극 소용 돌이의 연 변동에 따라 오존홀의 크기가 매년 달라진다.

이와 관련된 변동을 살펴보기 위해서, 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)와 National Aeronautics and Space Administration(NASA)에서는 SBUV-2 등의 위성 자료를 활용하여 남극의 오 존홀의 면적 변화에 대한 감시를 수행하고 있다. 오존홀은 오존전량이 220DU 보다 낮은 영역을 기준으로 정하였으며 남극 극 소용돌이에서 제트기류가 강화 되는 8~12월 사이에 오존홀은 생성되며, 주로 남극 봄의 9~10월에 최대 면적 을 보이게 된다. 남극 지역에서의 오존전량은 1980년 이전에는 300 DU 수준 의 오존전량을 보였으나, 오존홀의 발견 이후 계속해서 감소하다가 1993년에는 82 DU로 관측 기록 중 최저를 나타내었다.



그림 3.5.13 남극에서의 Total Column Ozone의 변화량 (참조: http://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/spo_oz/spototal.html)

그림 3.5.13은 남극 오존홀이 자주 발행하는 7~12월의 오존전량의 변화를 시계열로 나타낸 것이다. 2016년(빨간선)의 경우, 장기 월평균(1986~2015년) 과 비슷한 경향을 보였으며, 11월의 경우 낮게 나타났던 2015년에 비해서 오존 전량이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 오존전량에 대한 분석에 대해서, 여러 참고문헌(Solomon et al., 2016, Salby et al., 2011)에서는 오존층의 회 복세의 가능성을 나타내었고, 추후 장기적인 분석이 필요할 것이라 생각된다.

그림 3.5.14는 오존홀의 연 최대면적에 대한 경년 변화를 시계열로 나타낸 그림이다. 2016년도는 과거 월평균(2006~2015년)과 2015년에 비해 오존홀 의 월 최대면적이 비교적 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 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 값 으로 나타났다. 2013년의 오존홀의 연 최대면적은 2,100만 km²으로 2011년의 2,500만 km²에 비해 약 16%가 작은 값으로 나타났으며, 2012년에 관측된 극 대 값인 1,850만 km²에 비해서 약 13.5%가 증가한 면적으로 나타났다.



그림 3.5.14 최근 남극 오존홀의 면적 변화 (참조: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar)

3.6 자외선

자외선 복사는 자외선A(320~400 nm), 자외선B(280~320 nm), 자외선C (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, 백내 장, DNA 손상 등의 해를 일으키며 가축, 물고기, 농작물 등의 생육에도 크게 피 해를 준다. 그러나 자외선B는 햇빛에 적당히 노출시켰을 경우 인체의 비타민 D 합성에 도움을 주는 긍정적인 효과도 있다.

자외선 복사는 복사파장, 태양 천정각, 오존 및 기타 미량가스, 구름, 에어로 졸, 알베도, 고도, 지구와 태양 간 거리 등에 의해 영향을 받는다. 따라서 자외선 복사의 변화폭은 매우 크며 대기 변화에 크게 영향을 받는다. 오존 변화가 자외 선에 영향을 끼치며 파장이 짧은 영역에서 변화가 크기 때문에 오존층 감소에 따라 그 복사량 증가가 우려되면서 기후환경의 중요한 문제가 되고 있다

기상청은 자외선 복사량을 감시하기 위하여 국내 7개 지점(안면도, 고산, 울 릉도, 강릉, 포항, 목포, 서울)에 자외선 측정기를 설치·운영하고 있으며, 위탁관 측소인 연세대학교(서울)에서도 자외선 복사량을 관측하고 있다. 기상청에서는 UV-Detector(Solar Light Co. Model #501)를 이용 자외선A(320~400 nm)와 UV-Biometer(Solar Light Co. Model #501)를 이용 자외선B(280~ 320 nm)를 각각 관측하고 있으며, 연세대학교는 Brewer 분광광도계(SCI-TEC #148)를 이용 자외선 복사(287~363 nm)를 관측하고 있다.

3.6.1 자외선A

자외선A 복사량은 현재 서울, 안면도, 고산, 목포, 포항, 울릉도, 강릉 등 7개 지점에서 관측하고 있다. 2016년 자외선 자료는 품질관리 단계를 추가하였으며 자세한 내용은 자료통계 방법에 나타내었다. 그림 3.6.1은 2016년 지역별 자외 선A의 일누적 복사량의 시계열이다. 그림순서는 위도가 높은 순으로 나타내었 다. 자외선A 일누적 복사량의 최댓값은 강릉은 6월 1일에 1.55 MJ/m², 서울은 7월 9일에 1.52 MJ/m², 울릉도는 6월 1일에 1.45 MJ/m², 안면도는 6월 25일 에 1.38 MJ/m², 포항은 6월 2일에 1.45 MJ/m², 목포는 7월 23일에 1.52 MJ/m², 고산은 5월 23일에 1.55 MJ/m²로 나타났다. 주로 5월, 6월, 7월에 최 댓값이 나타났다.



그림 3.6.1 2016년 자외선A 일누적 복사량(그림순서는 위도가 높은 순임)

그림 3.6.2는 2016년 자외선A의 일 누적 복사량의 월변화를 지난 과거 평 균값과 같이 비교하였으며, 관측시작년도가 지점마다 달라 과거 평균년도는 그 림 3.6.2 설명에 나타내었다. 자외선은 태양천정각과 일조시간 등에 영향을 받 기 때문에 자외선 일 누적 값은 하지를 기준으로 남중고도가 높고, 낮 길이가 긴 5월~6월 사이 높게 나타날 수 있고, 7월~8월의 경우는 장마의 영향으로 누 적 복사량이 낮아지는 경향이 있다. 각 지역별 지난 과거 평균값 대비 2016년 월평균 값이 큰 차이를 보이지 않았다. 일 누적값의 월평균 최댓값은 강릉(1.13 MJ/m²), 서울(1.09 MJ/m²), 안면도(1.05 MJ/m²) 지역은 5월, 목포(1.12 MJ/m²), 고산(1.09 MJ/m²)은 8월, 울릉도(1.04 MJ/m²)는 6월에 나타났고, 포항은 5월과 8월이 1.05 MJ/m²로 가장 높았다. 그림 3.6.3은 2016년 자외선 A의 일 최대 복사량의 월변화를 지난 과거 평균값과 같이 비교하였다. 과거 평 균년도는 그림 3.6.2와 같다. 월평균 최댓값은 주로 5, 6, 8월에 나타났다. 강릉 의 월평균 최댓값은 6월 47.45 W/m²이며, 목포는 50.27 W/m²로 5월에 가장 높았다. 그 외 지역은 일 누적 값의 월평균이 가장 높게 나타난 달에 일 최댓값 의 월평균도 가장 높게 나타났다.



그림 3.6.2 2016년 자외선A 일 누적 복사량의 월평균 변화

(상자 선의 양끝은 10%, 90%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간값, 빨간색 점 2016년 평균, 점-선은 지난 과거 평균값(강릉, 서울, 목포(1년): 2015, 울릉도(4년): 2012~2015, 안면도(9년):2007~2015, 포항(7년):2009~2015, 고산(4년): 2012~2015을 나타냄)



그림 3.6.3 2016년 자외선A 일 최대 복사량의 월평균 변화

3.6.2 자외선B

자외선B는 홍반에 대한 가중함수가 적용된 홍반자외선(EUV-B) 복사량이 다. 자외선B의 관측단위는 MED이며, MED는 유해자외선 파장영역(280~8320 nm)의 최소 홍반점 조사(Minimum Erythemal Dose)를 나타내는 값으로 1 MED는 210 Jm⁻²의 복사량 값으로 환산할 수 있다. 그림 3.6.4는 2016년 지 역별 자외선B의 일 누적값을 시계열로 나타낸 것이다. 그림순서는 위도가 높은 순으로 나타내었다. 각 지역별 일 누적 최댓값은 강릉 7월 22일 5.0 KJ/m², 서 울 5월 7일 4.15 KJ/m², 울릉도 7월 15일 5.88 KJ/m², 안면도 7월 14일 5.44 KJ/m², 포항 7월 15일 4.79 KJ/m², 목포 5월 30일 5.41 KJ/m², 고산 5 월 23일 5.87 KJ/m² 이다. 주로 5월, 7월에 최댓값을 보였다.



그림 3.6.4 2016년 자외선B 일누적 복사량(그림순서는 위도가 높은 순임)

그림 3.6.5는 자외선B의 일 누적값의 월변동성을 지난과거 월 평균값과 비교 한 그림이고, 그림 3.6.6은 자외선B의 일 최댓값의 월변동성을 지난과거 월 평 균값과 비교한 그림이다. 울릉도, 안면도, 목포의 경우 5월부터 8월사이의 일 누 적 월 평균값이 지난 과거 평균값보다 증가하였고, 그 외 지역은 큰 차이를 보 이지 않았다. 안면도와 목포의 경우 5월~8월 사이 일 누적 월 평균값은 지난 과거 평균값과 큰 차이를 보였지만, 일 최대 월평균 값은 지난 과거 평균값과 차이가 크지 않았다. 일 최댓값의 월변동성은 강릉, 서울, 포항, 목포의 경우 6 월~7월의 여름장마로 인해 영향을 받아 5월과 8월에 높은 쌍봉분포를 보였고, 안면, 울릉도와 고산은 다른 지역에 비해 6월, 7월의 강수량이 적어 6월부터 8 월 까지 높은 값을 나타냈다. 일 최댓값의 월평균값은(그림 3.6.6) 강릉, 서울, 목포는 5월달에 0.163 W/m², 0.155 W/m², 0.203 W/m²로 가장 높았고, 울릉 도, 안면도, 포항은 7월에 0.202W/m², 0.2 W/m², 0.176 W/m²로 가장 높았다. 또한 고산의 최댓값은 8월 0.216 W/m² 이었다.



그림 3.6.5 2016년 각 지역별 자외선B 일 누적값의 월평균 변화 (상자 선의 양끝은 10%, 90%, 상자 양끝은 25%, 75%값, 가운데 선 중간 값, 빨간색 점 2016년 평균, 점-선은 지난 과거 평균값(강릉, 안면도, 포 항, 목포(10년):2006~2015, 서울(1년):2015, 울릉도(4년):2012~2015, 고산 (4년):2012~2015)



그림 3.6.6 2016년 각 지역별 자외선B 일 최댓값의 월평균 변화

3.6.3 자외선 복사량(연세대학교, 위탁관측소)

연세대학교(서울)는 2004년부터 기후변화감시 위탁관측소에 등록되어 현재 까지 Brewer 분광광도계(SCI-TEC #148)로 자외선 복사(287~363 nm)를 0.5nm 간격으로 측정하고 있다. 287~363nm 파장역의 적분값을 총자외선 (Total ultraviolet radiation, TUV)이라고 하며, 287~320 nm의 영역에 피부 홍반에 대한 가중함수를 적용하여 홍반 자외선(Erythemal ultraviolet, EUV) 복사량을 계산하였다. EUV의 가중함수는 McKinlay and Diffey(1987)의 참고 문헌의 데이터를 사용하였다. 강수와 브루어 장비 수리로 인한 결측일(71일)을 제외하면, 관측가능일은 251일이며, 그중에 243일이 관측되었다. 2016년에는 Brewer 분광광도계가 자동적으로 수은램프수행을 하지 못하고 태양을 제대로 따라가지 못하는 문제와 매년 문제가 되었던 겨울철 통신 케이블의 끊어짐으로 인해서 12월에 관측이 연속적으로 수행되지 못하였다.

자외선 복사량의 변화는 태양천정각과 일조시간의 천문학적 원인과 날씨에 의해 영향을 주로 받게 되므로 뚜렷한 계절변화를 보이기 때문에 여름에 높고 겨울에 낮은 특징을 보인다. 그림 3.6.7은 일 적산된 TUV (a)와 EUV (b)의 시계열이다. 2005년을 제외한 2004년부터 2011년도까지는 연 최댓값이 TUV 에서 6월에 나타나고 있었지만, 2012년과 2013년도에는 연 최댓값이 8월과 7 월에 각각 나타났다. 그러나 2013년도에도 5월과 6월에 꾸준히 높은 값이 나타 나는 경향성은 일치하고 있다. EUV는 최근 몇 년 동안 EUV에서의 연 최댓값 은 7~8월에 나타나고 있으나, 2016년도에는 여름철 관측 값의 부재로 6월에 나타났다. 2016년 TUV 최댓값은 5월 28일에 나타났으며 그 값은 1.20 MJ/m²이고, EUV의 최댓값은 6월 5일에 나타났으며 그 값은 4.36 KJ/m²로 나 타났다.

TUV와 EUV의 지난 13년간(2004~2016)의 월평균값을 각각 그림 3.6.8 에 나타내었다. TUV의 장기 월평균 값은 6월에 최댓값(0.94 MJ/m²), 12월에 최솟값(0.28 MJ/m²)을 나타내었다(그림 3.6.8(a)). 2016년도는 높은 값을 나 타내는 여름철에 관측이 중단되었기 때문에 5월에 최댓값(0.75 MJ/m²), 1월에 최솟값(0.13 MJ/m²)을 나타내었다. 장기 월평균 값들과 비슷한 값을 보임을 확 인하였고, 9월~11월까지는 지난 13년간 평균값보다 낮은 값들을 보였다(그림 3.6.8(a)).

그림 3.6.8 (b)는 EUV의 월 평균값의 연 변화와 지난 13년간의 평균값을 각각 나타낸 것이다. 장기평균값은 6월에 최댓값(2.72 KJ/m²)을 가지며, 12월 에 최솟값 (0.45 KJ/m²)을 가진다. 또한 2016년은 5월에 최댓값(3.05 KJ/m²) 을 가지며, 1월에 최솟값(0.26 KJ/m²)을 가진다. 그림 3.6.8 (a)와 그림 3.6.8 (b)의 TUV와 EUV의 경년 변화에서 알 수 있듯이 월평균이 어느 정도 일치함 을 알 수 있다. 하지만 여름철에 TUV와 EUV는 차이점을 보이는데, TUV는 6 월이 8월에 비해 높은 반면, EUV는 8월이 6월에 비해 높게 나타났다. 이는 TUV의 경우 EUV에 비해 파장이 길기 때문에, 습도와 수증기량이 많은 여름철 의 감쇄로 인한 것임을 유추할 수 있다.



그림 3.6.7 일 누적된 총자외선(a)과 홍반자외선(b)의 시계열(2004.3~2016.12)



그림 3.6.8 서울 상공 TUV (a)와 EUV (b)의 2016년 연 변화(녹색 상자 그림: 2016년 의 TUV, 선의 양끝: 10, 90%, 상자 양끝: 25, 75%, 상자가운데 선: 월 평균 값, 상자 양끝의 검은 점: 최댓값 및 최솟값)와 2004년부터 2015년도의 월평균(2004~2015)

3.7 총대기침적

습성 침적은 강수가 인위적 또는 자연적으로 배출되는 가스와 입자를 대기 중에서 제거하는 중요한 과정이다. 따라서 지구 및 지역 규모에서 습성 및 건성 침적의 조성을 파악하는 일은 산성화, 부영양화, 스모그, 기후변화 등의 원인과 영향을 이해하는 데 중요하다. 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 강수화학 분야는 지구 및 지역 규모의 강수성분의 패턴과 추세를 정량화하고, 주요 화학 성분의 생화학 주기에 대한 이해를 높이며, 대기 침적의 생태계에 미치는 영향 을 평가하는 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

기상청은 1997년부터 안면도와 울릉도에서, 1998년부터 울진과 고산에서 강수의 산성도, 전기전도도, 이온성분 농도 등 화학적 특성을 분석하고 있다. 강 수는 당일 09시부터 익일 09시까지 시료를 채취하고, 채취한 시료는 산성도 (pH)와 전기전도도(EC, Electric Conductivity)를 측정한 후 여과지로 시료에 포함된 불순물을 제거하고 이온성분 분석을 실시하였다.

다양한 환경 영향과 문제들에 미치는 대기오염물질을 적절히 파악하기 위하 여 습성 침적뿐만 아니라 강하분진(건성 침적)을 포함한 총 대기 침적에 대한 평가가 필요하다. 기상청은 2003년부터 안면도에서 총 대기 침적의 이온성분 농도 등 화학적 특성을 분석하고 있다. 강수가 없을 때에만 한 달 동안의 강하 분진을 채취하며, 강하분진의 이온성분 분석을 실시하였다.

3.7.1 2016년 강수특성

연도별 강수량은 지역에 따라 증가와 감소를 반복하는 등 서로 다른 양상을 보인다. 이중 안면도는 최근 강수량이 계속 감소하고 있으나, 고산, 울릉도는 대 체로 증가하는 경향을 보인다. 2016년 강수량은 2015년과 비교할 때 안면도에 서 거의 변화가 없었고, 고산을 제외한 울릉도, 울진에서 2016년에 강수량이 증 가하였다(그림 3.7.1).



그림 3.7.1 연도별 강수량(mm)

2016년 지역별 연강수량을 살펴보면 안면도 658.0 mm, 고산 1543.5 mm, 울릉도 2079.2 mm, 울진 1196.3 mm로 울릉도가 가장 많았다(그림 3.7.2a).



그림 3.7.2 2016년 관측지점별 연강수량(mm)과 강수채취율(%)

2016년 강수량은 지난 10년(2006~2015년)간의 평균과 비교할 때 안면도 에서 지난 10년간의 평균보다 적었고, 고산, 울릉도, 울진에서는 지난 10년간의 평균보다 강수량이 많았다. 강수채취율은 총강수량 중에서 채취한 강수량의 비 율로, 2016년 강수채취율은 안면도 98.8%, 고산 98.6%, 울릉도 94.4%, 울진 95.6%로, 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 강수화학 분야에서 강수채취 율의 품질목표인 70%보다 높았다(그림 3.7.2b).

2016년 강수량과 지난 10년간의 평균 강수량을 월별로 비교하였다(표 3.7.1). 모든 지역이 여름철(6~8월)에 최대 강수량을 보였다. 안면도는 대체로 지난 10년간의 평균과 유사한 강수량을 보였으나, 여름철 강수량이 지난 10년 간의 평균보다 적었다. 고산은 7~9월과 11월을 제외하고 모두 지난 10년간의 평균보다 강수량이 많았다. 울릉도는 1~7월까지 지난 10년간의 평균보다 강수 량이 적었고, 8~12월까지 지난 10년간의 평균보다 많았다. 울진은 대체로 지 난 10년간의 평균과 유사한 강수량을 보였으나, 7, 9, 12월 강수량이 지난 10 년간의 평균보다 많았다.

표 3.7.1 2016년과 지난 10년(2006~2015년)간의 평균 강수량(mm)

지점	구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
	2016년	3.5	33.0	17.5	79.5	122.0	30.5	148.5	27.5	75.0	71.0	13.5	36.5	658.0
안면도	10년 평균	14.6	21.0	36.8	69.4	74.8	116.1	228.4	230.7	128.9	40.5	53.0	27.8	1042.1
	2016년	82.0	97.5	120.5	168.5	174.0	205.0	110.0	97.5	135.5	210.0	58.5	84.5	1543.5
고산	10년 평균	34.9	62.7	86.8	125.8	116.4	174.6	199.6	195.5	131.6	54.8	86.3	51.5	1320.6
	2016년	194.6	99.4	16.1	118.5	64.3	46.3	133.6	491.3	241.3	214.5	222.4	236.9	2079.2
울릉도	10년 평균	110.2	87.4	82.1	105.1	121.5	115.8	180.6	156.0	163.1	113.6	145.0	126.4	1506.7
	2016년	12.8	40.6	26.8	103.8	18.0	45.4	323.9	114.3	243.0	96.7	58.4	112.6	1196.3
울진	10년 평균	40.1	43.1	55.8	82.2	72.8	106.3	210.6	167.4	149.2	72.5	70.2	24.5	1094.6

강수화학 분석요소 중 수용성 이온 9종(F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)에 대한 품질관리를 통해 이온성분 분석의 신뢰도뿐만 아니라 함께 측정한 산성도(pH)와 전기전도도 자료를 검증할 수 있다. 시료의 양이 적 으면 분석 오류가 발생할 수 있기 때문에 강수량이 0.5 mm 이상인 시료만을 유효시료로 삼아 이온성분 분석을 실시하였다.

이온분석기는 매번 분석을 할 때마다 측정할 수 있는 최소농도와 측정할 수 있는 범위가 수용성 이온 종류에 따라 달라지기 때문에, 매번 검출한계(MDL, Method Detection Limit)를 구하고, 이를 적용하여 자료를 제거하여야 한다. 검출한계는 각 수용성 이온의 최소농도 표준용액을 사용하여 7회 반복한 분석 결과로부터 얻은 표준편차에 신뢰수준 98%일 때 Student's t값인 3.143을 곱 한 값이다(Glaser, 1981). 그러나 2016년에 이온성분을 분석할 때마다 검출한 계를 산출하지 않았기 때문에 2016년 5월 20~21일중 실시한 표준용액 실험에 서 얻은 검출한계를 일괄적으로 적용하여 이온분석기의 검출한계 이하로 측정된 자료는 분석에서 제외하였다. 이때 검출한계는 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺ 이온에 대하여 각각 0.03316, 0.02589, 0.12090, 0.01791, 0.06344 ppb이 었다.

세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 강수화학 품질관리 지침에 따라 수용 성 이온 9종(F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)의 이온 균 형(Ion Balance)과 전기전도도 균형(Conductivity Balance)에 대한 품질관리 를 실시하였다.

일반적으로 모든 수용액 성분의 총합은 전기적으로 중성을 띄기 때문에, 이 론적인 양이온의 당량농도 합과 음이온의 당량농도 합은 정확히 일치해야 한다. 그러나 실제로 시료를 분석해보면 차이가 나는 경우가 많은데, 이는 분석오차나 측정되지 않은 주요 이온이 존재하기 때문이다. 따라서 수용성 성분의 이온수지 (ion balance)를 비교하여 자료의 신뢰도를 평가할 수 있다.

$$T_{cation} = \sum_{i=1}^{m} C_i Z_i / W_i \tag{1}$$

$$T_{anion} = \sum_{i=1}^{n} C_i Z_i / W_i \tag{2}$$

$$0.75 < \frac{T_{cation}}{T_{anion}} < 1.25 \tag{3}$$

여기서 T_{cation}은 양이온의 당량 합, C_i는 이온 i의 농도(µeq/L), Z_i는 이온 i 의 당량수, W_i는 이온 i의 분자량이며, m은 양이온의 수, n은 음이온의 수, T_{anion}은 음이온의 당량 합이다(심상규, 1994). 양이온의 당량농도 합과 음이온 의 당량농도 합의 비가 25% 이상 차이가 날 경우 분석에서 제외하였다(Park et al., 2003).

2016년 강수시료에 대한 품질관리 결과 안면도는 59개 중 57개, 고산은 103개 중 94개, 울릉도는 103개 중 95개, 울진은 75개 중 65개가 품질관리를 통과하였다. 각 지점별 분석 성공률은 안면도가 96.6%, 고산이 91.3%, 울릉도 가 92.2%로, 울진이 86.7%로, 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 강수화

학 분야에서 규정하는 분석 성공률의 품질목표인 90%를 울진을 제외하고 모두 만족하였다(표 3.7.2).

표 3.7.2 2016년 관측지점별 강수시료에 대한 품질관리 결과

구분	안면도	고산	울릉도	울진
강수 시료 개수(개)	59	103	103	75
검출한계 통과(개)	59	98	96	69
이온 균형 통과(개)	58	103	103	74
전기전도도 균형 통과(개)	59	103	103	75
이온수지 통과(개)	57	99	102	72
QA/QC 통과(개)	57	94	95	65
분석성공률(%)	96.6	91.3	92.2	86.7

3.7.2 산성도(pH)

2016년 우리나라 강수의 평균 산성도(pH)는 4.94으로, 지난 10년(2006~2015년)간의 평균 산성도인 4.69보다 높았다. 2016년 지점별 평균 산성도를 보면, 안면도 4.90, 고산 5.08, 울릉도 4.81, 울진 5.12로 울릉도가 가장 낮았고, 울진이 가장 높았다(표 3.7.3).

표 3.7.3 관측지점별 평균 산성도(pH)

지점 기간	안면도	고산	울릉도	울진	한반도 평균
2016	4.90	5.08	4.81	5.12	4.94
2006~2015	4.59	4.75	4.71	4.74	4.69

1997년부터 2016년까지 관측지점별 연평균 산성도를 보면 대체로 4~6 범 위에서 나타났으며, 거의 모든 해에서 안면도가 가장 낮게 관측되었다(그림 3.7.3).



그림 3.7.3 관측지점별 산성도 연변화. 연도별 분포(상자그림), 연도별 평균(빨간 별 표), 상자그림은 중앙값과 함께 5%, 10%, 25%, 75%, 90%, 95% 표시

2016년 관측지점별 월평균 산성도는 안면도, 고산, 울릉도, 울진 모두 1월에 산성도가 가장 낮았다. 그리고 안면도, 고산, 울릉도, 울진 모두 지난 10년간의 평균과 대체로 유사하게 변화하나, 지난 10년간의 평균보다 높게 나타났다(그림 3.7.4).



그림 3.7.4 2016년 관측지점별 산성도의 월변화. 2016년 분포(상자그림), 2016년 월 평균(빨간 별표), 2006~2015년 월평균(파란 동그라미), 상자그림은 중앙값 과 함께 5%, 10%, 25%, 75%, 90%, 95%를 표시

석탄, 오일 및 천연가스와 같은 화석연료의 사용으로 대기 중 이산화탄소의 농도가 400 ppm 정도 증가하였고, 이에 따라 산성비의 기준이 과거 pH 5.65 에서(Likens, 1976), pH 5.61로 바뀌었다(Seinfeld and Pandis, 2006). 그런 데 Charlson and Rodhe(1982)에 따르면 자연적인 황, 질소, 물 순환을 고려할 때 자연적인 pH는 4.5~5.6의 범위를 갖는다. 2016년 pH 5.6 이하의 산성비는 안면도 47회, 고산 74회, 울릉도 86회, 울진 43회로 울릉도가 가장 많았고, pH 4.5 이하의 산성비는 안면도 11회, 고산 10회, 울릉도 16회, 울진 0회로 울릉 도가 가장 많았다(표 3.7.4).

표 3.7.4 2016년 산성비 발생 횟수

	안면도		고산		울릉	릉도	울진		
	pH5.6 이하	pH4.5 이하							
발생 횟수	47	11	74	10	86	16	43	0	

2016년 pH 5.6 이하는 안면도 82.5%, 고산 78.7%, 울릉도 90.5%, 울진 66.2%로 울릉도가 가장 많았고, pH 4.5 이하는 안면도 19.3%, 고산 10.6%, 울릉도 16.8%, 울진 0.0%로 안면도가 가장 많았다. 2016년은 지난 10년간의 평균과 비교할 때 울릉도를 제외하고 모든 지점에서 지난 10년간의 평균보다 낮게 나타났다(표 3.7.5).

표 3.7.5 산성비 발생 비율(%)

	안면도		고신	고산		울릉도		울진	
	'06~'15년	'16년	'06~'15년	'16년	'06~'15년	'16년	'06~'15년	'16년	
pH5.6 이하	88.8	82.5	91.3	78.7	78.7	90.5	85.8	66.2	
pH4.5 이하	39.5	19.3	26.4	10.6	24.1	16.8	21.9	0.0	

3.7.3 전기전도도

우리나라 강수의 2016년 평균 전기전도도는 31.3 μS/cm로 지난 10년간의 평균(39.2 μS/cm)보다 낮았다. 2016년 관측지점별 전기전도도를 보면, 안면도 20.2 μS/cm, 고산 18.3 μS/cm, 울릉도 49.9 μS/cm, 울진 26.1 μS/cm로 고 산이 가장 낮았다(표 3.7.6).

1997년부터 2016까지 20년 동안 안면도, 고산, 울릉도, 울진의 연평균 전기 전도도 분포를 보면, 네 지점 모두 증가와 감소를 반복하였다. 그리고 해염 성분 의 비중이 가장 높은 울릉도가 전기전도도가 가장 높았다(그림 3.7.5).

표 3.7.6 관측지점별 전기전도도(µS/cm)

기간 지점	안면도	고산	울릉도	울진	평균
2016	20.2	18.3	49.9	26.1	31.3
2006~2015	33.3	28.8	55.0	32.6	39.2



그림 3.7.5 관측지점별 전기전도도의 연변화. 연도별 분포(상자그림), 연도별 평균(빨 간 별표), 상자그림은 중앙값과 함께 5%, 10%, 25%, 75%, 90%, 95% 표시

2016년 관측지점별 월평균 전기전도도는 모든 지점에서 산성도와 반대로 1 월이 가장 높았다. 지난 10년(2006~2015년)간의 평균과 비교하면 대체로 지 난 10년간의 평균과 유사하거나 낮았으며, 지점별로 큰 차이를 보이는 경우도 있었다(그림 3.7.6).



그림 3.7.6 2016년 관측지점별 전기전도도의 월변화. 2016년 분포(상자그림), 2016년 평균(빨간 별표), 지난 10년(2006~2015년)간의 평균(파란 동그라미), 상자 그림은 중앙값과 함께 5%, 10%, 25%, 75%, 90%, 95% 표시

3.7.4 강수이온성분

지난 10년간의 평균과 2016년 평균 모두 해염입자인 Na⁺와 Cl⁻가 모든 관 측지점이 해안에 있어서 가장 큰 비율을 차지하고 있다. 그런데 안면도와 울진 에서는 지난 10년간의 평균보다 비율이 감소한 반면, 고산과 울릉도에서는 증가 하였다. 다음으로 비중이 높은 성분은 주요 산성화 물질인 SO4²⁻이었다. 지난 10년간의 평균과 비교할 때, 모든 지점에서 SO4²⁻가 감소하였고, 울릉도를 제외 하고 NO₃⁻가 증가하였다. 안면도에서는 Ca²⁺가 감소하고, NH4⁺가 증가하였다. 고산과 울릉도에서는 NO₃⁻, Ca²⁺, K⁺가 감소하고, Mg²⁺가 증가하였다. 울진에 서는 Ca²⁺, Mg²⁺, NH4⁺가 증가하였다(그림 3.7.7).



그림 3.7.7 2006~2015년, 2016년 관측지점별 강수의 이온성분 비율

표 3.7.7은 2016년 관측지점별 연평균 이온농도로, F⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Ca²⁺ 를 제외한 나머지 이온성분들은 울릉도에서 월등히 높게 나타났다. 주요 산성화 물질인 NO₃⁻와 SO₄²⁻는 울릉도, 울진, 안면도, 고산 순으로 높게 나타났고, NH₄⁺는 안면도, 울릉도, 울진, 고산 순으로 높게 나타났다.

요소	F	Cl	NO ₃ ⁻	SO4 ²⁻	Na⁺	${\sf NH_4}^+$	K^{+}	Mg ²⁺	Ca ²⁺
지점					(µeq/L)				
안면도	0.9	48.4	28.8	38.6	40.1	40.9	2.5	11.6	15.7
고산	0.3	69.9	16.4	29.0	60.6	18.6	2.0	15.0	11.7
울릉도	0.7	244.7	27.2	67.7	220.0	27.9	7.4	50.4	25.0
울진	0.7	93.9	27.2	41.2	87.1	26.6	4.7	23.7	32.6
평균	0.6	132.7	24.4	46.6	118.7	27.0	4.5	28.6	21.2

표 3.7.7 2016년 관측지점별 연평균 이온농도

3.7.5 강하분진

안면도에서 채취한 2003~2016년 건성 및 습성 침적량을 보면(그림 3.7.8), 2010년 이후 대체로 감소하는 경향을 보여, 2016년 전체 침적량은 7,898 mg/m²이었다. 2003년 이후 건성 침적량이 습성 침적량에 비해 적었다.



그림 3.7.8 연도별 건성 및 습성 침적량

2016년 월별 건성 및 습성 침적량을 보면 8월 총 침적량이 995 mg/m²로 가장 많았다(그림 3.7.9). 한편 건성 침적량은 5월(473 mg/m²)에, 습성 침적 량은 7월(899 mg/m²)에 가장 많았다. 지난 10년(2006~2015년)간의 평균 총 침적량과 건성 침적량은 모두 12월에 가장 많았으나, 습성 침적량은 8월에 가장 많았다.



그림 3.7.9 2016년과 2006~2015년 월별 건성 및 습성 침적량

2016년 1월, 3월, 5월, 10월, 11월은 건성 침적량이, 나머지 달에는 습성 침적량이 더 많았다. 지난 10년(2006~2015년)간의 평균 월별 건성 및 습성 침적량의 비 율을 보면, 봄과 겨울에 건성 침적량이, 여름과 가을에 습성 침적량이 더 많았 다(그림 3.7.10).



그림 3.7.10 2016년과 2006~2015년 월별 건성 및 습성 침적량의 비율

그림 3.7.11는 2014~2016년 월평균 이온 성분별 침적량이다. NO₃ 와 SO₄²⁻, NH₄⁺ 농도는 건성 침적보다 습성 침적량이 더 많은 반면 Ca²⁺는 건성 침적량이 더 많았다. 강수량이 많은 여름과 가을철에 습성 침적량이 높게 나타 났고, 12월도 높게 나타났다. 2016년은 대체로 NO₃ 와 SO₄²⁻, NH₄⁺ 모두 습 성 침적량이 건성 침적량보다 많았고, 월별로 볼 때 NO₃ 와 SO₄²⁻, NH₄⁺ 는 7 월에, Ca²⁺는 2월에 가장 많았다.



(a) NO3⁻



(b) SO42-



(c) NH4⁺



(d) Ca²⁺

그림 3.7.11 2014~2016년 월평균 이온성분별 침적량
3.8 기타

3.8.1 수증기 농도 연직분포(숙명여자대학교, 위탁관측소)

수증기의 농도 변화는 인위적 요인보다 자연적 요인으로 인해 농도 증감이 결정된다. 온도 변화로 인해 대기 중 존재할 수 있는 최대 수증기량이 결정되며, 지구의 평균 기온이 변동하는 상황에서 수증기 농도 변화 모니터링과 동시에 수 증기량 변동과 연관지어 기후변화 현상에 대한 연구가 향후 필요하다.

숙명여대에서는 22 GHz 마이크로파 수신기 SWARA(Seoul Water vapor radiometer)를 이용하여 2006년부터 현재까지 수증기의 농도 분포를 관측하고 있다. 우천 시를 제외하고 계속적으로 관측을 수행하고 있으며, 이 관측 자료는 국제 중층대기 감시 네트워크(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)에 보고하고 있다.

성층권 오존과 마찬가지로 성층권 수증기 스펙트럼은 수증기의 회전 운동으 로 인한 에너지 전이(616~523)로 발생한다. 스펙트럼의 압력 넓힘 현상으로 인해 지상에서 수신한 스펙트럼의 세기가 매우 약한 특징이 있다. 그림 3.8.1에 서는 2016년 11월 5일에 관측한 수증기 스펙트럼 및 평균 커널을 표현하였다.



그림 3.8.1 2016년 11월 5일에 관측한 수증기 스펙트럼(좌)과 평균 커널(우)



그림 3.8.2 2016년 서울 상공의 중층대기 수증기 농도의 고도별 분포 변화

월	1	2	3	4	5	6
최대부피비[ppmv]	6.86	6.53	6.66	6.91	7.08	7.59
고도 [km]	53.2	55.1	51.3	51.3	49.3	43.4
월	7	8	9	10	11	12
최대부피비[ppmv]	7.11	7.08	7.07	7.04	6.96	6.89
고도 [km]	59.1	59.1	57.1	53.2	53.2	53.2

표 3.8.1 2016년도 월평균 최대 수증기 부피혼합비

수증기의 월 평균 최대 농도는 6.5~7.6 ppmv 범위에서 변화하며, 2월에 6.53 ppmv의 최솟값을 보이고 있다. 최대 부피비가 나타나는 고도는 평균 53 km로 나타난다. 7월~8월에 약 40 km 고도에서 농도 감소가 나타나고 있으나, 위성 자료와 비교 검증 결과, 지상으로 도달하는 22 GHz의 낮은 투과율로 인해 발생한 결과로 보인다.



그림 3.8.3 2016년 서울 상공의 중층대기 수증기 월별 평균농도와 AURA위성의 MLS 관측자료와의 비교

성층권 분자에서 발산된 전파가 지상으로 전달되는 과정에서 전파의 투과율 은 대류권의 광학깊이(Opacity)로 표현할 수 있다.

전파 투과율:
$$e^{-\tau}$$

광학깊이: $\tau(\nu, z) = \int_0^z \alpha(\nu, s) ds$

ν는 주파수, z는 전파전달경로, τ는 광학깊이, α는 거리당 대기의 흡수계수 를 의미한다. 마이크로파 영역에서의 광학깊이는 대류권 수증기에 의한 영향이 대부분을 차지한다. 즉 광학깊이의 변화를 살펴봄으로써, 서울 상공의 대류권 수 증기 총량에 대한 정보를 간접적으로 알아볼 수 있다.

2016년 광학깊이의 월평균 변화를 살펴보면 7~8월에 0.3 이상의 높은 값을 기록하였으며, 1~2월에 0.048의 최저 광학깊이를 기록하였다. 이것은 서울의 1~2월 기상 조건에서 22 GHz 전파에 대해 95 %의 높은 투과율을 보인다는 것을 의미한다. 7~8월의 높은 에러바는 잦은 강수로 인해 자료의 변동성이 심 한 것을 의미한다.



(2016년 시간별(상), 월별 평균(하))

Ŧ	3.8.2	2016년도	21.935	GHz	월평균	광혁	학깊이	

월	1	2	3	4	5	6
평균광학깊이[-]	0.048	0.048	0.064	0.099	0.128	0.209
월	7	8	9	10	11	12
평균광학깊이[-]	0.308	0.319	0.203	0.127	0.085	0.061

다음은 2006년 10월부터 2016년까지 서울에서의 21.935 GHz 전파의 광 학깊이 변화이다. 지난 10년간의 자료를 살펴보면, 계절적 특성을 뚜렷하게 보 이는 가운데, 2012년에 최고치를 기록하고 있으며, 최대 광학깊이의 변동은 2014년부터 일정 수준을 유지하고 있다.



그림 3.8.5 21.985 GHz에서의 서울 대류권 광학깊이 변화(2006~2016년)

3.8.2 라돈 농도(제주대학교, 위탁관측소)

222Rn, 85Kr, 210Pb, 7Be은 WMO/GAW에서 주요 관측요소에 포함시켜 지속적으로 관리하도록 권장하고 있는 대표적인 방사능 물질이다(WMO/GAW, 2001). 이 중에서 222Rn은 자연계에 널리 분포하는 주요 자연방사능 물질로 자연방사능 중 인체 노출 방사선량의 50% 이상을 차지한다(Almeida et al, 2004). 238U의 붕괴사슬 과정에서 226Ra의 α-붕괴로 생성된 222Rn은 4번 의 α-붕괴와 4번의 β-붕괴를 거쳐 최종적으로 206Pb으로 안정화된다. 라돈 의 주요 동위원소로는 222Rn (radon), 220Rn (thoron), 219Rn (actinon)이 대표적이다(WMO/GAW, 2004; Moon et al., 2009). 특히 라돈은 흡연 다음으 로 위험한 폐암 유발 물질로 평가되고 있고, WHO에서는 폐암환자 중 3~14% 가 라돈에 기인한 것으로 추정하고 있다. 따라서 대기 중의 자연방사능 물질 관 리를 위해서는 우선적으로 라돈농도 수준을 파악해야 하고, 이를 위해서는 청정 지역에서 라돈의 배경농도를 관측할 필요가 있다.

특히 아시아대륙의 편서풍 풍하 측에 위치한 한반도의 경우 대륙에서 발생하 여 기류를 타고 장거리 이동하는 여러 대기오염물질과 함께 대기 라돈농도 변화 역시 지속적으로 감시할 필요가 있다. 또한 222Rn은 반감기가 3.82일 정도로 주요 대기오염물질(NO_X, SO₂, CO, O₃ 등)과 비슷한 수명을 나타내고 대기 에 어로졸과도 유사한 수명을 보인다(Zahorowski et al., 2004). 그리고 물에 용 해되지 않고 습도, 온도, 일사량에도 안정하여 화학적으로 불활성인 성질을 나타 내기 때문에 에어로졸이나 가스상 오염물질의 장거리 수송 특성을 파악하기 위 한 지시물질로 활용이 가능하다.

ANSTO(Australian Nuclear Science and Technology Organisation)에서 는 오래전부터 주요 WMO/GAW 관측소를 중심으로 세계 30여 지점에 라돈검 출기를 설치하여 라돈농도를 지속적으로 모니터링하고 있다(Zahorowski et al, 2004). 그리고 한반도의 경우 아시아대륙에서 편서풍 기류를 타고 이동하는 각 종 장거리 이동 오염물질의 영향을 평가하기 위하여 대기 라돈을 지속적으로 모 니터링할 필요가 있다. 이를 목적으로 제주도 고산에서는 ANSTO에서 제작한 라돈검출기를 현장에 설치하여 2001년초부터 대기 라돈 배경농도를 지속적으로 모니터링 해 오고 있고, 2016년말 현재 16년간의 관측 자료를 확보하고 있다.

가. 라돈농도 모니터링

대기 라돈농도는 제주도 고산(33.17°N, 126.10°E) 현장에 고감도 라돈검출 기를 설치하여 2016년 1월부터 10월초까지 30분 간격으로 실시간 측정하였다. 그러나 10월 5일부터는 태풍(Chaba)의 영향으로 전원공급을 차단하였다. 그리 고 태풍 직후에 고산 통합운영실 이설을 위한 비양실 내부 리모델링 작업이 실 시되면서 전기 공급이 불안정하여 10월부터 12월까지 라돈농도 관측을 중단하 였다.

라돈 측정을 위한 공기 유입관은 50 mm HDPE 파이프를 사용하여 지상 10 m 높이로 설치하였고, 공기의 유속은 대략 ~60 L/min이 되도록 조절하였다. 라돈 검출기는 배경농도 측정을 위한 목적으로 호주 ANSTO에서 자체적으로 설계, 제작한 High Sensitivity Radon Detector(모델 D1500) 시스템이다. 이 검출기는 필터를 거친 후 자연확산 또는 동력펌프를 통해 셀 내로 유입된 라돈 과 셀 내부에서 생성된 라돈자손으로부터 방출된 알파입자를 측정하는 방식이 다. 알파입자는 ZnS(Ag)와 반응하여 섬광을 발생하며 이를 광전증배관으로 검 출, 계수하였다. 라돈 모니터링을 위해 사용한 라돈검출기의 감도(sensitivity) 는 0.28~0.29 counts·sec⁻¹/Bqm⁻³이며, 검출한계(low limit of detection)는 25 mBq/m³이다. 라돈 농도 데이터는 Radon Detector System에 내장된 Campbell Scientific사의 모델 CR800 data logger를 사용하여 30분 간격으로 저장하였다. 그리고 data logger에 저장한 데이터를 컴퓨터로 전송하여 연속적 으로 저장하였다.

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



그림 3.8.6 제주도 고산의 라돈검출기(ANSTO, Model D1500)

나. 라돈 배경농도 모니터링 결과

국내 배경지역인 제주도 고산에 고감도 라돈검출기를 설치하여 라돈 농도를 실시간으로 모니터링하였다. 실시간으로 관측한 2016년의 시간별 시계열 라돈 농도를 그림 3.2에 도시하였다. 2016년 1~10월의 고산 라돈농도는 시간평균 2364±1128 mBq/m³를 나타내었고, 이를 일평균으로 환산한 농도는 2376±857 mBq/m³이었다. 이는 이전 2001~2015년의 평균농도 2680±1404 mBq/m³에 비해 다소 낮은 결과이다. 그러나 2016년의 경우 10월 6일부터 12월말까지 고 산 통합운영실 이설을 위한 비양실 리모델링 작업으로 10~12월에 결측이 발생 하였다. 보편적으로 라돈 농도는 가을과 겨울철에 연 중 비교적 높은 농도를 나 타내며, 이 시기의 데이터가 누락되면서 연평균농도가 예년에 비해 다소 낮은 경향을 보이는 것으로 판단된다.

라돈의 계절별 농도는 겨울 > 가을 > 봄 > 여름 순으로, 겨울, 가을, 봄에 높 고 상대적으로 여름에 낮은 농도를 나타내었다. 월별 농도는 11월과 12월을 제 외하고 1월 > 9월 > 8월 > 2월 > 10월 > 3월 > 5월 > 4월 > 6월 > 7월의 순 으로 농도가 가장 높은 1월과 낮은 7월에 약 2배 정도의 편차를 보이는 것으로 조사되었다. 또한 일간 농도변화를 조사해 본 결과, 대체적으로 하루 중에는 야 간이 낮 시간에 비해 높은 농도를 나타내었다. 그리고 오전 6시 전후에 2738 mBq/m³로 가장 높고, 오후 3시 경에 1897 mBq/m³로 낮은 농도를 보였다. 이 를 계절별로 비교해 본 결과, 봄, 여름, 가을철에는 오전 5~9시 경에 높은 농도 를 보이나 겨울철은 자정 전후에 높은 농도를 보여 겨울철에 다소 다른 시계열 변동 특성을 나타내었다.

이러한 국내 배경지역의 농도를 외국의 도시 및 배경지역과 비교해 보면, 홍 콩의 Hok Tsui와 이탈리아의 L'Aquila지역 보다는 훨씬 낮으나 하와이 Mauna Loa보다는 대략 25배 정도 더 높고, 일본의 Sado Island와는 서로 비슷한 수준 을 보이고 있다(Chambers et al., 2013, 2009; Zahorowski et al., 2005, Pitari et. al., 2014).



그림 3.8.7 2016년 고산의 라돈농도 시계열 변화

고산의 2016년 라돈농도를 그림 3.3에 계절별로 비교하였다. 그림에서 막 대그래프는 시간별 라돈농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 중앙 값(median)과 90 분위수(90th percentile), 10 분위수(10th percentile) 농도 를 나타낸 것이다. 그림 3.3의 결과와 같이 계절별 평균농도는 봄에 2248 mBq/m³, 여름 2091 mBq/m³, 가을 2682 mBq/m³, 겨울 2758 mBq/m³로 4 계절 중에서는 겨울철에 가장 높고, 다음으로 가을, 봄, 여름 순으로 높은 경향 을 보였다. 또한 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수를 각 계절별로 분류하여 비 교해 본 결과, 90 분위수와 10 분위수에서 모두 겨울철 높은 농도 값으로 평균 농도와 동일한 경향을 보였다. 이처럼 계절별 비교에서 겨울, 가을, 봄에 라돈농 도가 높은 것은 이 시기에 북서계열 풍향이 주류를 이루고 있고 이 때 대륙으로 부터 대기가 유입되었기 때문으로 추정된다. 반면에 여름에 훨씬 낮은 농도를 나타내는 것은 이 시기에 주로 남동 계절풍의 영향을 받아 해양으로부터 공기가 유입되었기 때문인 것으로 추정된다.

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



그림 3.8.8 고산의 계절별 라돈농도 비교

2016년의 라돈농도를 월별로 비교하였고 그 결과를 그림 3.4에 나타내었다. 그림에서 막대그래프로 나타낸 농도는 시간별 농도를 월별로 평균한 결과이고, 꺾은선그래프는 각각 중앙값, 90 분위수, 10 분위수 농도를 나타낸 것이다. 관 측이 결측된 11, 12월을 제외한 나머지 기간의 월별 비교에서 라돈농도는 1월 > 9월 > 8월 > 2월 > 10월 > 3월 > 5월 > 4월 > 6월 > 7월 순으로 높은 농 도를 보였다. 그리고 농도가 가장 높은 1월에 2976 mBq/m³, 가장 낮은 7월에 1522 mBq/m³로 월별로는 거의 2배 정도의 편차를 보이는 것으로 확인되었다. 또 농도가 높은 90 분위수와 낮은 10 분위수 농도를 월별로 비교해 본 결과, 중앙값과 90 분위수, 10 분위수 농도는 2월, 8월, 10월에 다소 다른 결과를 보 였고, 그 외에는 월평균농도와 비슷한 변화추세를 보였다.



그림 3.8.9 고산의 월별 라돈농도 비교

라돈농도를 시간별로 평균하여 일간 변화를 비교하였고 그 결과를 그림 3.5 에 나타내었다. 일간 변화를 비교한 결과에서 라돈농도는 오전 6시에 2738± 1222 mBq/m³로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 오후 3시경에 1897±897 mBq/m³로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 대체적으로 야간에 더 높고 주 간에 낮은 경향을 보였으며, 일간 변화는 아침부터 서서히 농도가 낮아지기 시 작하여 오후 3시경까지 감소하고 다시 저녁시간에 상승하여 밤에는 점차로 상승 하는 추세를 보였다(Omori et. al., 2009). 이러한 일간 변화 패턴은 이탈리아 L'Aquila 지역의 시간별 라돈농도의 변화와 유사한 것으로 나타났다(Pitari G. et. al., 2014).

일간 변화는 대기의 혼합고의 변화에 따라 영향을 받았기 때문인 것으로 추 측되며, 이 때 혼합고 높이는 날씨가 맑을 때에는 늦은 오전이나 오후의 낮 동 안에 최고가 되어 대기 경계의 높이까지 이르게 되고, 이 높이 이내의 대기오염 물은 난류에 의해 균일하게 연직분포를 이루게 된다. 그러나 밤이나 이른 아침 에는 지표 가까이에 안정된 복사역전층이 형성되는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 1985). 따라서 주간에 혼합고가 최대로 확장되어 라돈이 확산되므로 낮은 농도를 보이지만, 야간에는 혼합고가 낮아지고 농집된 라돈이 더 높은 농도를 나타내는 것으로 추정된다. 이처럼 라돈의 일간 농도는 월별, 계절별 농도와 마 찬가지로 혼합고의 확장, 축소에 따라 라돈의 확산과 농집에 영향을 미치고 이 로 인해 농도가 변화하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.



다. 라돈의 장거리 수송 경로

2016년에 측정한 라돈의 일평균농도를 기준으로 이 시기의 기류 이동궤적을 역궤적 분석을 통하여 조사하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA)의 HYSPLIT4 모델과 NCEP의 GDAS 기상데이터를 이용하였고, 고산지역을 기점 으로 120시간으로 모사한 역궤적 군집분석 결과를 그림 3.6에 나타내었다. 이 때 출발점 고도는 850 mb 면인 500 m, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC 를 기준으로 설정하였다.

역궤적 군접분석을 기초로 제주도 고산지역으로 이동한 기류의 유입경로를 크게 4개의 군접으로 분류하였다. 그리고 각 군접별로 제주도 주변지역을 Cluster 1(중국중부 및 황해), Cluster 2(중국북부), Cluster 3(한반도 남부), Cluster 4(북태평양)으로 분류하여 제주로 유입되는 기류의 이동경로를 조사하 였다. 이렇게 구분한 Cluster 1, Cluster 2, Cluster 3, Cluster 4의 빈도는 각 각 44%, 15%, 34%, 6%를 보였고, 기류는 대부분 북서풍 계열로 중국대륙으 로부터 제주로 이동한 것으로 확인되었다. 그리고 이 때 각 군접별 일평균 라돈 농도를 비교한 결과, Cluster 1~Cluster 4에서 각각 2447, 2827, 2233, 1638 mBq/m³이었다. 이처럼 라돈 농도는 기류가 중국대륙에서 제주도로 이동 했을 때(continental fetch) 대체적으로 더 높은 경향을 보이고 있다. 반면에 기 류가 북태평양에서 제주지역으로 유입되었을 때(oceanic fetch)에는 중국에서 유입되었을 때에 비해 1.5~1.7배 정도 더 낮은 농도를 나타내었다. 이와 같이 대기 라돈 농도는 기류가 아시아대륙에서 제주지역으로 이동했을 때 훨씬 더 높 은 농도를 나타내었고, 반대로 해양에서 기류가 유입되었을 때는 낮은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다.



그림 3.8.11 라돈 유입경로 추적을 위한 역궤적 군집분석

제4장 지구대기감시 자료 통계 방법

4.1 온실가스

4.1.1 관측장비

○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	측정주기	관측연도
CO ₂	비분산적외선분석기 (NDIR)	Simense	30초	1999년 ~ 2011년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재
CH₄	가스크로마토그래프- 불꽃이온화검출기 (GC-FID)	Agilent	30분	1999년 ~ 2015년
	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2016년 ~ 현재
N ₂ O				1999년 ~ 현재
SF_6	가스크로바토그래프-	Agilant	11176	2007년 ~ 연새 1000년 - 형재
	신작포퐉영검물기 (GC-ECD)	Aglient	그시간	1999년 ~ 연재 1000년 - 허피
CFC-113				1999년 ~ 연재 2007년 ~ 현재

○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	측정주기	관측시작연도
	비분산적외선분석기 (NDIR)	Simense	30초	2009년 ~ 2013년
CO ₂ ,	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2014년 ~ 현재
CH4	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2015년 ~ 현재
N ₂ O SF ₆	가스크로마토그래프- 전자포획형검출기 (GC-ECD)	Agilent	1시간	2010년 ~ 현재 2016년 ~ 현재

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

○ 울릉도

관측요소	장 비 명	제 작 사	측정주기	관측시작연도
CO ₂	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재
CH ₄	공동감쇠분광기 (CRDS)	공동감쇠분광기 PICARRO (CRDS)		2012년 ~ 현재
N ₂ O SF ₆	가스크로마토그래프- 전자포획형검출기 (GC-ECD)	Agilent	1시간	2012년 ~ 현재 2015년 ~ 현재

○ 독도

관측요소	장 비 명	제 작 사	측정주기	관측시작연도
CO ₂	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재
CH4	공동감쇠분광기 (CRDS)	PICARRO	5초	2012년 ~ 현재

4.1.2 자료선별법 및 배경대기 산출법

관측요소	측정주기	자료통계 방법
한국보조 이산화탄소 (CO ₂)	<u> </u>	 <입력자료 선정> ③ 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플 래깅을 원시자료에서 제거 ② 이산화탄소 표준가스 교정기간 제거 ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균을 구한 뒤 ④ 시간평균의 표준편차가 A보다 크고 연속된 앞 뒤 시간평균값의 차이가 B이상 차이 가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 1.8 ppm, (B) 1.8 ppm 고 산: (A) 1 ppm, (B) 1 ppm 울릉도: (A) 0.8 ppm, (B) 0.8 ppm 독 도: (A) 0.4 ppm, (B) 0.6 ppm * 자료의 약 30 ~ 32 % 기각됨
		<일평균, 월평균> ⑤ ④의 시간평균 자료가 15개 이상일 때 1차 일평균 산정 ⑥ ⑤의 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 smooth curve fitting을 한 뒤 ⑦ ⑥의 잔차가 3♂ 안에 분포하면 일평균 확정

관측요소	측정주기	자료통계 방법
		 ⑧ ⑥의 잔차에 대해 low pass filter를 통하여 50일 이하(7.3 cycle/yr[*]) 단주기성 분 제거 후 fitting값에 추가하여 월평균과 연평균 확정 * 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/yr 반영 (Thoning et al., 1989)
메탄(CH4)	5초	 <입력자료 선정> ① 메탄 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플 래깅을 원시자료에서 제거 <시간평균> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로, 시간 평균을 구한뒤 ④ 시간평균의 표준편차가 A보다 크고 연속된 앞 뒤 시간평균값의 차이가 B이상 차이 가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 9 ppb, (B) 16 ppb * 자료의 약 30 ~ 32 % 기각됨
		 <일평균, 월평균> ⑤ ④의 시간평균 자료를 산술평균하여 일평균 산정 ⑥ ⑤의 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 smooth curve fitting을 한 뒤 ⑦ ⑥의 잔차가 30 안에 분포하면 일평균 확정 ⑧ ⑥의 잔차에 대해 low pass filter를 통하여 50일 이하(7.3 cycle/yr[*]) 단주기성 분 제거 후 fitting값에 추가하여 월평균과 연평균 확정 * 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/yr 반영 (Thoning et al., 1989)
아산화질소 (N ₂ O)	1시간	 <입력자료 선정> ① 아산화질소 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플 래깅을 원시자료에서 제거 <시간자료 선택> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 시간자료의 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 1.6 ppb, 고산: (A) 1.4 ppb * 자료의 약 30 ~ 32 % 기각됨 <일평균, 월평균> ⑤ ④의 시간평균을 중심으로 일평균 산정 ⑥ ⑤의 일평균 자료에 대해 장기추세와 자연변동을 고려한 다항식으로 smooth curve fitting을 한 뒤 ⑦ ⑥의 잔차가 30 안에 분포하면 일평균 확정 ⑧ ⑥의 잔차에 대해 low pass filter를 통하여 50일 이하(7.3 cycle/yr[*]) 단주기성 분 제거 후 fitting값에 추가하여 월평균과 연평균 확정 * 대류권 화학성분의 분반구 균질화 주기 7.3 cycle/yr 반영 (Thoning et al., 1989)
염화불화 탄소류 (CFCs)	1시간	<입력자료 선정> ① 염화불화탄소류의 표준가스를 이용하여 농도 재산정(표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플 래깅을 원시자료에서 제거

관측요소	측정주기	자료통계 방법
		<시간자료 선택> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * CFC-11: (A) ±4 ppt, CFC-12: (A) ±5 ppt CFC-113 (A) ±1.5 ppt * 전체자료의 연속값의 차이값 분포를 통해 상위 90%, 하위 10% 값을 기 준함
		<일평균, 월평균> ※ O'Doherty et al., 2001 ⑤ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting함 ⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출 ⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출 ⑧ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별 ⑨ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 일평균 산정 ⑩ ⑨를 이용하여 월평균 산정
		<입력자료 선정> ① 육불화황 표준가스를 이용하여 농도 재산정 (표준가스 6시간마다 주입) ② 장비유지보수 일지를 참조하여 관측자가 농도에 영향을 줄 것으로 판단된 플 래깅을 원시자료에서 제거
육불화황 (SF ₆)	1시간	<시간자료 선택> ③ ①과 ②의 선정된 자료를 중심으로 ④ 연속된 앞 뒤값의 차이가 A이상 차이가 나면, 시간자료 기각 * 안면도: (A) 1 ppt * 전체자료의 연속값의 차이값 분포를 통해 상위 90%, 하위 10% 값을 기 준함
		<일평균, 월평균> ※ O'Doherty et al., 2001 ⑤ 선별된 날을 기준으로 ±60일의 최저 시간값을 이용하여 이차함수로 fitting함 ⑥ fitting 값 잔차의 중간값을 산출 ⑦ 산출된 중간값보다 낮은 농도의 표준편차(σ) 산출 ⑧ 중간값 + 3σ의 합보다 낮으면 배경농도로 선별 ⑨ 선별된 배경농도 시간자료를 중심으로 일평균 산정 ⑩ ⑨를 이용하여 월평균 산정

4.2 반응가스

4.2.1 관측장비

○ 안면도

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정주기	관측기간
		ECOTECH	ML9812	10분	1998년 ~ 2005년
O ₃	오존분석기		40;	10분	2005년 ~ 2007년
		ITERIVIO	491	5분	2007년 ~ 현 재
		ECOTECH	ML9830	10분	1998년 ~ 2005년
CO	CO 일산화탄소분석기	THERMO	48i	10분	2005년 ~ 2007년
				5분	2007년 ~ 현 재
		ECOTECH	ML9841A	10분	1998년 ~ 2005년
NO _x	질소산화물분석기	THERMO	42i -	10분	2005년 ~ 2007년
				5분	2007년 ~ 현 재
		ECOTECH	ML9850	10분	1998년 ~ 2005년
SO ₂	이산화황분석기		42;	10분	2005년 ~ 2007년
		INERIVIO	431	5분	2007년 ~ 현 재

○ 고산

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정주기	관측기간
O ₃	오존분석기	THERMO	49i	5분	2012년 ~ 현재
СО	일산화탄소분석기	THERMO	48i	5분	2012년 ~ 현재
NO _X	질소산화물분석기	THERMO	42i	5분	2012년 ~ 현재
SO ₂	이산화황분석기	THERMO	43i	5분	2012년 ~ 현재

4.2.2 반응가스 자료통계방법

관측요소	측정주기	자료통계 방법
오존(O ₃)		 ○ 통계 최소자릿수: 0.1 ○ 생산자료 → 시간통계 → 일통계 → 월통계 → 연통계 < 시간 통계 > ○ 자료기간 : 생산자료를 이용하여 해당 시간의 00분 이후부터 55분까지의 1시간에 대하여 통계 ○ 자료종류 : 시간평균자료
일산화탄소(CO)	-	 ○ 산출방법 – 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
	-	$\overline{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1} + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} X_i$
질소산화물(NOx)	5분	 ○ CO는 매 일 새벽 4시 분석하는 zero값으로 24시간의 표류오차값을 보정함. 예) 전날 04시 zero = 5 ppb, 당일 04시 zero = 10 ppb라면 24시간동안 5ppb가 선형적으로 증가하였다고 가정하고 관측값에서 빼 줌. ○ L 트 레 .
		< 월 중계 > ○ 자료기간 : 시간평균자료가 하루 75% 이상일 때 산출(시간자료 18개)
이산화황(SO ₂)	-	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

4.3 에어로졸

4.3.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정 주기	관측기간
DM10 진란노드	부유분진측정기	Thormo		сы	안면도 2003년 ~ 현재
PINITO 클릭우고	$(\beta$ -ray PM ₁₀)	menno	FH02C14	고도	고산 2009년 ~ 현재
크기별 수농도	공기역학입자계수기	тсі	2271	2 ㅂ	안면도 2006년 ~ 현재
(0.5~20 µm)	(APS)	131	5521	고도	고산 2009년 ~ 현재
미세입자 크기별 수농도(0.01~0.5 μm)	전자기유도입자 계수기 (SMPS)	TSI	3034	3분	안면도 2005년 ~ 현재
응결핵 수농도 (0.01~3 μm)	응결핵계수기 (CPC)	TSI	3772	5분	고산 2010년 ~ 현재
연직분포	에어로졸 라이다	EN3엔지니어링	MPoLAR 2020	15분	안면도 2010년~ 현재
광산란계수	광산란계수측정기 (Nephelometer)	TSI	3563	5분	안면도 2003년 ~ 현재
과ㅎ스게스	광흡수계수측정기	Magee	AE16	5분	안면도 2001년 ~ 2010년
	(Aethalometer)	Scientific	AE31	5분	안면도 2011년 ~ 현재
					안면도 2010년 ~ 현재
광학깊이	정밀필터복사계 (PFR)	PMOD, Switzerland	GAW-PFR	1분	고산 2011년 ~ 현재
	x ,				울릉도 2011년 ~ 현재
	태양광도계 (Sun-Photometer)	Cimel	CE-318N	15분	안면도 2013년 ~ 현재

4.3.2 에어로졸 물리·광학 자료통계방법

관측요소	측정주기	자료통계 방법
PM10 질량농도	5분	 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거 기기오류 검사, 계측한계, 연속성 검사, 튀는 값 제거 정합성 검사(인근 동일 요소 산출물 비교) 원시자료(5분)가 1시간에 75% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간 평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 75% 이상일 때 월평균과 연평균 산출
크기별 수농도 (0.5~20 μm)	3분	- 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거 - 기기오류 검사, 계측한계, 튀는 값 제거
미세입자 크기별 수농도 (0.01~0.5 μm)	3분	- 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간 평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출
응결핵 수농도 (0.01~3 μm)	5분	 기기오류 검사 계측한계, 튀는 값 제거 장비의 검·교정시 안정화 단계까지의 자료는 제거 DB 시스템과 실시간 그래픽으로 자료를 확인 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간 평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출
광산란계수	5분	 기기오류 검사 배경농도(제로체크) 검사 계측한계 파장별 관측 오류 검사 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간 평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출
광흡수계수	5분	 계측한계, 튀는 값 제거 감쇄계수 오류 검사 필터 스팟 이동 검사 원시자료(5분)가 1시간에 30% 이상일 때 시간평균값 산출, 시간 평균 자료가 월 전체 또는 연 전체의 30% 이상일 때 월평균과 연평균 산출

4.3.3 에어로졸 화학 자료통계방법

관측요소	측정 주기	자료통계 방법
TSP 질량농도 (총부유분진채취기)	주 1회	- TSP 무게 측정 질량농도(μg/m³) < PM10 무게 측정 질량농도(μg/m³) 일 때, TSP 무게 측정 질량농도(μg/m³) 를 제거
질량농도/이온성분 (PM10, PM2.5) (고용량 미세먼지채취기)	주 1회	 PM10 무게 측정 질량농도(µg/m³) < PM2.5 무게 측정 질량농도(µg/m³) 일 때, PM10 무게 측정 질량농도(µg/m³)를 제거 Filter 무게 측정 질량농도(µg/m³) < 화학성분 총 질량농도(µg/m³) 일 때, 자료 제거
		- 영어는 영영동도 칩(Z[CallOI]eq), 음어는 영영동도 칩(Z[AllOI]eq)을 의 미하며, 아래의 식으로 계산.
질량농도/이온성분 (PM10, PM2.5) (저용량 미세먼지채취기, Cyclone)	주 1회	$0.7 < rac{\varSigma[Cation]_{ m eq}}{\varSigma[Anions]_{ m eq}} < 1.3$ - 양이온과 음이온 당량 농도합의 비가 30% 이상 차이 나는 자료는 최종 결과에서 제외

4.4 대기복사

4.4.1 관측장비

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

4.4.2 대기복사 자료통계방법

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

○ Quality Check 방법(BSRN 기준)

1단계 QC (Physically Possible Limits)						
- Global Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 1.5 X $\mu_0^{1.2}$ + 100 W/m ²					
- Reflected Solar Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 1.2 X $\mu_0^{1.2}$ + 50 W/m ²					
- Direct Solar Irradiance	Min : -4 W/m ² Max : Sa					
- Diffuse Solar Radiation	Min : -4 W/m ² Max : Sa X 0.95 X $\mu_0^{1.2}$ + 50 W/m ²					
- Downwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m ² Max : 700 W/m ²					
- Upwelling Infrared Radiation	Min : 40 W/m ² Max : 900 W/m ²					
2단계 QC (Comparisons)						
- Ratio of Global Radiation over SUM	Global / SUM -> within +/- 8% of 1.0 (for SZA < 75°, SUM > 50 W/m ²) Global / SUM -> within +/- 15% of 1.0 (for 75° < SZA < 93°, SUM > 50 W/m ²)					
- Ratio of Diffuse over Global Radiation	SWDIFF / Global < 1.05 (for SZA < 75°, Global > 50 W/m ²) SWDIFF / Global <1.10 (for 75° < SZA < 93°, Global > 50 W/m ²)					
- Reflected Solar Radiation comparison	SWUP < SUM (SUM > 50 W/m ²)					
- Air Temperature comparison (Infrared Radiation)	$\sigma(Ta-15K)^4 < LWUP < \sigma(Ta+25K)^4$ 0.4X σ Ta ⁴ < LWDOWN < σ Ta ⁴ +25					
- Infrared Radiation comparison	LWDOWN < LWUP + 25 W/m ² LWDOWN > LWUP - 300 W/m ²					
3단계 QC (NET Comparison)						
- NET & Cal. NET	NET < 50 W/m ² -> NET - Cal. NET < 25 W/m ² NET ≥ 50 W/m ² -> (NET - Cal. NET) / NET < 0.5					
 * 태양상향복사(SWUP), 태양하향복사(전천일사/Global), 직달일사(SWDIR), 산란일사(SWDIFF), 지구상향복사(LWUP), 지구하향복사(LWDOWN) * SUM : SWDIFF + SWDIR × μ₀ * SZA : Solar Zenith Angle * μ₀ : Cos(SZA) * Salar Solar Solar constant at mean Fath Sun distance 						
AU : Earth – Sun d * σ : 5.67 × 10 ⁻⁸	[^] Sa : S ₀ / AU ⁻ (S ₀ : Solar constant at mean Earth-Sun distance AU : Earth – Sun distance in Astronomical Units) [*] σ : 5.67 × 10 ⁻⁸					
* Ta : air temperatuer in Kelvin (17	OK < Ta < 350K)					

4.5 성충권오존

4.5.1 관측장비

○ 안면도

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

○고 산

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

○포 항

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

포항 오존분광도계 2017년 관측 중단예정, 자료는 2013년까지 사용 가능

○ 서 울(위탁관측소)

관측요소	장	비	명	제	작	사	모델	측정주기	관측기간
오존전량	오존 Brew) Spectro	분광 /er C phot	도계 Dzone cometer)	S	CI-TE	C	MK-IV	상시	1997년 ~ 현재 (연세대학교)
오존전량	Dobson 분광광도계		E	Ealing	9	Beck #124	<mark>일 6호</mark>) Direct-오전,정오,오후 Zenith-오전,정오,오후	1984년 ~ 현재 (연세대학교)	
오존연직 분포	11 마이크.	.0 GI 로파	Hz 수신기	자	체개	발	SORAS	15분	2008년 ~ 현재 (숙명여자대학교)

4.5.2 성층권 오존 자료통계방법

관측요소	측정주기	자료통계 방법
오존전량 (total ozone)	상시	< 오존분광도계 > - 태양광 중 6개 파장에 대한 광도를 참조 값과 비교하여 오존전량 산출 - 태양의 위치에 따라 하루 10회 이상 관측하여 오차가 적은 유효한 관측 값들을 평균하여 그날의 오존전량으로 산출 (직달일사 만 유효) - 일평균 오존전량 중 편차가 50 [DU] 이하일 경우 => 일 대푯값 - 매월 10일 이상의 일 자료가 있을 경우 월평균값 산출
성층권 오존연직분포	1회/1주	< ECC 오존존데 > - 관측일 중 베스트 프로파일 선택하여 월별, 계절별 분석 수행

4.6 자외선

4.6.1 관측장비

관측요소	장 비 명	제 작 사	모델	측정주기	관측기간
자외선A	UVA-Detector	Solarlight	#501	10분	2007년 ~ 현재 (안면도) 2012년 ~ 현재 (고 산) 2011년 ~ 현재 (울릉도) 2009년 ~ 현재 (포 항) 2014년 ~ 현재 (목 포) 2015년 ~ 현재 (강 릉) 2014년 ~ 현재 (서 울)
자외선B	UV-Biometer	Solarlight	#501	10분	1997년 ~ 현재 (안면도) 2011년 ~ 현재 (고 산) 2011년 ~ 현재 (울릉도) 1994년 ~ 현재 (포 항) 2000년 ~ 현재 (목 포) 2001년 ~ 현재 (강 릉) 2014년 ~ 현재 (서 울) 1999년 ~ 2012년 (고산기상대)
총자외선	Brewer 분광광도계	SCI-TEC	MK-IV	상시	2004년 ~ 현재 (서울, 위탁관측소)

4.6.2 자외선 자료통계방법

관측요소	측정주기	자료통계 방법
지외선A 자외선B	- 10분	 매일 10분 간격으로144개 원시 파일 생산 자외선A : 10분 누적값 (단위: J/cm²) 자외선B : 10분 누적값 (단위: MED) 원시자료 품질관리 수행 과측으로 경측 처리
		 · 긴기상태 오류 · 관측센서온도가 24℃ ~ 26℃를 벗어날 경우 오류 처리 · The spike detection method (Papale et al., 2006, Hong et al., 2009) · 연속된 3개의 관측 값의 차이를 이용한 튀는 값 처리 · 관측값 차이의 절댓값의 중앙값(median)으로부터 벗어난 정도를 이용하여 튀는 값 처리
		- 품질관리를 통과한 원시자료가 80% 이상일 때 자외선A, 자외선B
		시간 누적값, 시간 최댓값 산출 1시간 누적값 : 자외선A (단위: MJ/m ²), 자외선B (단위: KJ/m ²) 1시간 최댓값 : 자외선A, 자외선B (W/m ²)
		- 태양천정각(Solar Zenith Angle) < 90°인 시간자료 중 80% 이상 존재할 때 자외선A, 자외선B 일 누적값, 일 최댓값 산출 일 누적값 : 자외선A (단위: MJ/m ²), 자외선B (단위: KJ/m ²) 일 최댓값 : 자외선A, 자외선B (W/m ²)
		- 매월 80% 이상의 일 자료가 있을 경우 일 누적값의 월 평균값, 일 최댓값의 월평균 산출
		- 매년 80% 이상의 월 자료가 있을 경우 연 평균값 산출 ※ 2016년부터 자료통계 단위가 변경됨

4.7 총대기침적

4.7.1 관측장비

장비명	관측지점	제작사	모델명	관측시작년도	관측요소	
강수자동측정 시스템	안면도	Eigenbrodt	nbrodt NMO 191/ 2012년 KSDSC 2012년			
	고산	KNR	APK9900	2014년	건성침적, - 습성침적	
	울릉도	KNR	APK9900	2014년		
	울진	KNR	Aqua, JP/RM8300	2007년		
산성도측정기	안면도	Thermo	Orion 3-Star	2009년		
	고산	Thermo	Orion 3-Star	2009년		
	울릉도	Thermo	Orion 3-Star	2009년	신경도	
	울진	Thermo	Orion 3-Star	2009년	-	
전기전도도 측정기	안면도	Thermo	Orion 3-Star	2009년		
	고산	Thermo	Orion 3-Star	2009년	ᅯᅴᅯᄃᄃ	
	울릉도	Thermo	Orion 3-Star	2009년	신기신도도	
	울진	Thermo	Orion 3-Star	2009년	-	
이온크로마토 그래프(IC)	안면도	Dionex	ICS-2000	2005년	강수 이온성분 (9종: F ⁻ , Cl ⁻ , NO₃ ⁻ ,	
		Dionex	ICS-2000	2005년	SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	

4.7.2 총대기침적 자료통계방법

관측요소	측정주기	자료통계 방법		
산성도	강수시	 당일 09시부터 익일 09시까지 강수량이 0.5 mm 이상인 시료만을 유효 각 이온성분 농도가 방법검출한계보다 작을 경우 제거 아래 이온밸런스법과 전기전도도 균형을 동시에 만족하는 경우에 이용 이온 균형 > 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 		
	강수시	$IonDifference(\%) = \frac{(CE - AE)}{(CE + AE)} \times 100$		
		표 1. 종 이온 동도(CE+AE)에 따른 이온 자의 허용범위(AID) (WMO GAW Report No. 160)		
저기저ㄷㄷ		CE+AE (µeq/L)	Acceptable Ion Difference(AID, %)	
신기신포도		[CE+AE] ≤ 50	$AID \leq \pm 60$	
		50 < [CE+AE] ≤ 100	$AID \leq \pm 30$	
		100 < [CE+AE] ≤ 500	$AID \leq \pm 15$	
		500 < [CE+AE]	$AID \leq \pm 10$	
		- 이온 비의 허용범위(25%)를 기준으로 타당성 판단		
		$0.75 < IonRatio(\%) = \frac{CE}{AE} \times 100 < 1.25$		
		< 전기전도도 균형 > - 직접 측정한 전기전도도(EC _{mea})와 이론적으로 계산한 전기전도도(EC _{cal}) 비교 - 전기전도도 차의 허용범위(Acceptable Conductivity Difference, ACD)를 기준으로 타당성 판단		
강수이온성분	병분 강수시	$ConductivityDifferene(\%) = \frac{EC_{cal} - EC_{mea}}{EC_{mea}} \times 100$		
		표 2. 측정된 전기전도도에 따른 전기전도도 차의 허용범위(ACD) (WMO GAW Report No. 160)		
		EC _{mea} (µS/cm)	Acceptable Conductivity Difference (ACD, %)	
		EC _{mea} ≤ 5	$ACD \leq \pm 50$	
		$5 < EC_{mea} \le 30$	ACD $\leq \pm 30$	
		30 < EC _{mea}	$ACD \leq \pm 20$	

참고문헌

□ 제2장 2016년 기상기후 특성

IPCC, 2013: climate change 2013. The Physical Basis Working Group I Contribution to the 5th Accessment Report. 기상청, 2016 기상연감, 9-17, 176-180. 기상청, 2016 기상연보.

□ 제3장 분야별 관측·분석결과

3.1 온실가스

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The physical science basis, Report of the IPCC, 1-572.

WMO, 2016.

- Dlugokencky, E.J., E.G. Dutton, P.C.Novelli, P.P.Tans, K.A. Masarie, 1996: Changes in CH4 and CO growth rates after the eruptiopn of Mt. Pinatubo and their link with changes in tropical tropospheric UV flux, *Geophys. Res. Lett.*, 23(20), 2761–2764.
- Etheridge, D.M., L. P. Steele, R. J. Francey, and R.L. Langenfelds, 1998: Atmospheric methane between 1000 A.D. and present: evidence of anthropogenic emissions and clmatic variability, *Journal of Grophysical Research*, 103, 15979-15996.
- 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.

- O' Dorthy, S., P.G.Simmonds., D.M. Cunnold, H.J.Wang, G.A.Sturrock, P.J.Fraser, D.Ryall, R.G.Derwent, R.F.Weiss, P. Salameh, B.R. Miller, and R.G.Prinn, 2001: In situ chloroform measurments at Advanced Global Atmsopheric Gases Experiment atmospheric research stations from 1994 to 1998. J. Geophys. Res., 106, 20429-20444.
- Thoning K.W. and P.P. Tans, 1989: Atmospheric Carbon Dioxide at Mauna Loa Observatory 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974-1985, J. Geophys. Res., 94.
- 기상청, 2010. 2010 지구대기감시 보고서, pp228.

3.2 반응가스

- IPCC, 2013: Climate Change 2013. The Physical Basis Working Group I Contribution to the 5th Accessment Report.
- Parish, D. D., K. S. Law, J. Staehelin, R. Derwent, O. R. Cooper, H. Tanimoto, A. Volz-Thomas, S. Gilge, H.-E. Scheel, M. Steinbacher, and E. Chan, 2012: Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations at northern mid-latitudes, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 11458-11504.
- WMO GAW Report No.209, 2013: Guidelines for continuous measurements of ozone in the troposphere.

3.3 에어로졸

- 심상규, 강창희, 김용표, 1994: 제주도에서의 빗물 이온 농도 분석, 한국대기보전 학회지, 10(2), 98-104.
- Anderson, T. L., D. S. Covert, S. F. Marshall, M. L. Laucks, R. J. Charlson, A. P. Waggoner, J. A. Ogren, R. Caldow, R. L. Holm, F. R. Quant, G. J. Sem, A. Wiedensohler, N. A. Ahlquist, and T. S. Bates, 1996: Performance Characteristics of a High-Sensitivity, Three-Wavelength, Total Scatter/Backscatter Nephelometer, *American Meteorological Society*, 13, 967–986.

- Collaud Coen, M., E. Andrews, A. Asmi, U. Baltensperger, N. Bukowiecki, D. Day, M. Fiebig, A. M. Fjaeraa, H. Flentje, A. Hyvarinen, A. Jefferson, S. G. Jennings, G. Kouvarakis, H. Lihavainen, C. Lund Myhre, W. C. Malm, N. Mihapopoulos, J. V. Molenar, C. O' Dowd, J. A. Ogren, B. A. Schichtel, P. Sheridan, A. Virkkula, E.Weingartner, R. Weller, and P. Laj, 2013: Aerosol decadal trends Part 1: In-situ optical measurements at GAW and IMPROVE stations. *Journal of Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 869-894.
- Hansen, A. D. A., H. Rosen, and T. Novakov, 1984: The aethalometer an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Sci. Total Environ.*, 36, 191–196.
- Ho, K.F., S.C. Lee, C.K. Chan, J.C. Yu, J.C. Chow, and X.H. Yao (2003) Characterization of chemical species in PM2.5 and PM10 aerosols in Hong-Kong, *Atmospheric Environment*, 37(1), 31–39.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I.
- Ko, H.J., E. Lim, J.M. Song, W. H. Kim, C. H. Kang, H. Lee, and C. Lee (2015) Composition Variation of Atmospheric Fine Particulate Matters in Accordance with Air Mass Transport Pathways at Background Site of Korea in 2013, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 15-27.
- Park, M. H., Y. P. Kim, C. H. Kang, 2003: Aerosol composition change due to dust storm: Measurements between 1992 and 1999 at Gosan, Korea, Water, Air, & Soil Pollution : Focus, 3(2), 117-128.
- World Meteorological Organization (WMO), (2016) WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, 2nd Edition (WMO No.1177), GAW Report, No. 227, 15-33.

3.4 대기복사

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

3.5 성층권 오존

- 김준, 조희구, 이윤곤, 오성남, 백선균 2005: 서울 상공의 최신 성층권 오존변화 경향, *대기지*, 15(2), 101-118.
- 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:10.1029/2006JD007978.
- 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.
- Salby, M., Titova, E., & Deschamps, L., 2011: Rebound of Antarctic ozone. Geophysical Research Letters, 38(9).
- Solomon, S., Ivy, D. J., Kinnison, D., Mills, M. J., Neely, R. R., & Schmidt, A., 2016: Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. Science, 353(6296), 269-274.
- World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. Rep. 44, Global Ozone Reseach and Monitoring Project, Geneva, 1999.

3.6 자외선

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

3.7 총대기침적

- 심상규, 강창희, 김용표 1994: 제주도에서의 빗물 이온분석, *한국대기보전학회지*, 10(2), 98-104.
- Charlson, R. J., and Rodhe, H. 1982: Factors controlling the acidity of natural rainwater, *Nature*, v. 295, p. 683-685.
- Glaser, J.A., Foerst, D.L., McKee, G.D., Quave, S.A., Budde, W.L. 1981: Trace Analyses for Wastewaters, *Environmental Science and Technology*, v. 15, no. 12, p. 1426–1435.
- Likens, G. E. 1976: Acid precipitation: Chemical and Engineering News, v. 54, no. 48, p. 29-44.
- Park, M.H. 2003: A study on long-term characteristics of ion composition and transport pattern of aerosol at Gosan, Korea. MSc Thesis. Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea.
- Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N. 2006: Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, Second Ed., J. Wiley & Sons, New York.

3.8 기타

- Chambers, S. W. Zahorowski, K. Matsumoto, and M. Uematsu (2009) Seasonal variability of radon-derived fetch regions for Sado Island, Japan, based on 3 years of observations: 2002-2004, *Atmospheric Environment*, 43(2), 271-279.
- Chambers, S. D., Zahorowski, W., Williams, A. G., Crawford, J., and Griffiths, A. D. (2013) Identifying tropospheric baseline air masses at Mauna Loa Observatory between 2004 and 2010 using Radon-222 and back trajectories, *J. Geophys. Res.*, 118, 1-13, doi:10.1029/2012JD018212.
- Kim, E. H., P. S. Kim, C. Y. Kim, K. S. Lee, and K. D. Kwon (1985) Determination of the Mixing Height in Seoul by the Radioactivity Measurement of Radon in Air, *Bulletin of Environmental Sciences*
(Research Institute for Environmental Sciences Hanyang University), 6(2), 129-136.

- Kim, Y. S., C. M. Lee, K. Y. Kim, H. J. Jeon, J. C. Kim, and Takao Iida (2007) Time Series Observations of Atmospheric Radon Concentration in Seoul, Korea for an Analysis of Long-Range Transportation of Air Pollutants in the North-East Asia, *Kor. J. Env. Hlth.*, 33(4), 283-292.
- Moon, K. H., J. S. Kim, J. K. Ahn, H. C. Kim, and H. M. Lee (2009) Long-term Variation of Radon in Granitic Residual Soil at Mt. Guemjeong in Busan, Korea, Jour. Petrol. Soc. Korea, 18(4), 279-291.
- Omori, Y., I. Tohbo, H. Nagahama, Y. Ishikawa, M. Takahashi, H. Sato, T. Sekine (2009) Variation of atmospheric radon concentration with bimodal seasonality, *Radiation Measurements*, 44, 1045–1050.
- Pitari G., E. Coppari, N. De Luca, P. Di Carlo (2014) Observations and 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, 1st International Expert Meeting on Sources and Measurements of Natural Radionuclides Applied to Climate and Air Quality Studies (No. 155), WMO TD No. 1201, April 2004.
- Zahorowski, W., S. Chambers, T. Wang, C. H. Kang, I. Uno, S. Poon, S. N. Oh, S. Wercqynski, J. Kim, and A. Henderson-Sellers (2005)
 Radon-222 in boundary layer and free tropospheric continental outflow events at three ACE-Asia sites, *Tellus*, 57(2), 124-140.

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
	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
이산화탄소	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
(CO ₂) [다의 : nnm]	2008	392.5	393.5	394.6	395.2	393.9	390.5	385.7	382.8	384.8	389.2	392.3	393.7	390.7
	2009	394.4	395.2	396.4	397.0	395.4	391.6	387.3	384.9	386.8	391.6	394.9	396.0	392.6
	2010	397.1	397.9	398.0	398.3	397.8	394.8	390.3	387.8	389.5	393.6	396.6	397.6	394.9
	2011	398.6	399.4	399.8	400.5	400.0	396.9	392.1	388.8	390.9	395.9	398.6	399.9	396.8
	2012	401.3	402.2	403.4	404.3	403.2	399.6	394.9	392.2	393.9	398.9	402.3	403.1	399.9
	2013	404.2	405.3	406.0	406.8	405.5	401.9	397.9	394.8	396.3	400.8	403.9	405.6	402.4
	2014	406.6	407.7	409.2	409.1	407.5	404.3	399.3	396.9	398.9	402.6	405.8	407.8	404.6
	2015	409.2	410.2	410.6	411.1	410.0	406.3	402.0	399.2	400.8	405.5	409.0	410.4	407.0
	2016	411.4	412.4	413.7	414.2	412.8	409.1	404.5	402.1	404.3	408.8	411.8	413.2	409.9
	1999	-	-	-	1869	1863	1851	1844	1837	1865	1888	1864	1868	1861
	2000	1864	1878	1888	1875	1859	1840	1827	1819	1859	1868	-	-	1858
	2001	-	-	-	-	1841	1850	1809	1838	1874	1874	1861	1864	1851
	2002	1877	1875	1868	1864	1863	1858	1825	1826	1869	1871	1870	1876	1862
	2003	1895	-	-	-	-	1865	1869	1831	-	-	1888	1898	1874
	2004	-	-	-	-	-	-	-	-	1870	-	1873	1873	1872
	2005	1871	1866	1874	1865	1860	1859	1812	1823	1862	-	-	-	1855
메탄	2006	185/	1862	185/	1848	18/0	1881	1832	1813	1881	1901	1890	1901	1866
(CH ₄)	2007	1000	1000	1012	1001	-	-	-	1011	1900	-	1010	1010	1000
[단위 : ppb]	2008	1900	1909	1915	1901	1895	1881	1869	1879	1908	1901	1910	1910	1900
	2005	1918	1913	1920	1907	1884	1902	1851	1863	1918	1913	1912	1917	1901
	2011	1911	1922	1907	1906	1903	1895	1877	1870	1925	1919	1920	1925	1907
	2012	1929	1931	1932	1918	1927	1906	1878	1881	1927	1929	1933	1943	1919
	2013	1948	1953	1948	1932	1932	1931	1892	1885	1931	1940	1937	1942	1931
	2014	1944	1953	1943	1938	1941	1939	1885	1910	1962	1952	1964	1962	1941
	2015	1970	1961	1954	1952	1937	1942	1925	1906	1972	1956	1979	1970	1952
	2016	1967	1964	1968	1965	1966	1960	1929	1920	1984	1991	1991	1980	1965

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	315.2	314.6	314.2	314.6	315.6	316.3	316.4	314.0	312.1	313.7	313.8	314.6
	2000	312.6	313.4	313.6	314.1	315.4	315.4	315.0	314.5	314.9	316.3	316.5	316.5	314.9
	2001	315.8	314.3	314.3	315.3	316.0	317.0	317.3	316.6	315.7	315.7	316.7	317.6	316.0
	2002	317.8	317.7	317.7	318.3	318.8	319.0	318.9	318.2	318.0	318.0	318.3	319.0	318.3
	2003	318.5	318.7	320.2	320.2	-	-	-	-	-	-	-	-	319.4
	2004	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2006	-	-	-	-	-	-	-	321.1	321.8	321.7	321.7	322.0	321.7
아산와실소 (N₂O)	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
[단위 : ppb]	2008	322.3	321.9	321.3	320.9	321.6	324.1	323.7	321.6	323.8	325.3	323.3	322.7	322.7
	2009	323.3	323.3	323.6	323.8	323.4	323.6	324.5	324.4	323.9	324.2	324.1	323.8	323.8
	2010	323.2	323.3	324.4	324.4	324.3	325.3	325.4	325.7	326.4	326.6	325.8	324.3	324.9
	2011	324.5	325.3	324.5	324.5	324.9	324.8	325.5	324.5	322.6	322.8	322.9	324.1	324.2
	2012	326.6	326.7	326.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	326.5
	2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	325.5	326.6	326.1
	2014	-	-	-	-	-	-	-	326.0	325.7	325.8	326.3	325.5	325.8
	2015	328.1	329.5	328.8	328.4	328.2	329.1	328.2	329.0	328.8	329.6	329.9	330.0	329.0
	2016	329.2	329.5	330.0	330.2	330.3	330.3	330.3	330.4	330.6	330.1	329.7	329.5	330.0
	1999	-	266.9	267.5	266.7	268.6	269.1	268.6	267.9	267.4	269.8	267.6	265.8	267.8
	2000	266.5	265.8	264.3	265.5	266.9	267.4	270.3	270.7	267.6	265.7	265.6	265.4	266.8
	2001	266.0	266.5	265.3	266.2	265.8	263.9	264.2	267.4	264.9	263.7	262.5	262.8	264.9
	2002	262.6	262.7	263.6	264.5	265.7	266.1	267.0	265.7	266.4	261.5	260.2	261.3	264.0
	2003	256.7	257.6	254.2	261.0	262.2	260.6	260.5	260.0	260.2	259.4	259.1	258.2	259.1
	2004	258.0	-	-	258.2	258.9	258.6	255.5	256.3	257.6	262.0	265.0	263.1	259.3
	2005	264.4	264.3	261.0	265.1	266.2	265.4	265.1	263.5	265.5	264.9	266.3	-	264.7
	2006	-	-	-	-	-	-	265.9	265.4	256.6	243.9	240.9	238.4	251.8
염화불화탄소 11	2007	235.1	239.1	237.0	232.5	233.7	244.7	236.8	229.9	231.1	232.6	214.9	202.9	230.9
(CFC-11) [다일 : nnt]	2008	208.2	230.3	228.5	231.3	228.0	223.0	253.3	254.1	249.5	246.3	246.1	249.5	237.3
	2009	246.0	249.3	249.9	246.8	244.0	241.7	249.7	247.9	246.7	247.5	246.2	247.8	246.9
	2010	249.5	251.5	251.8	213.0	214.7	223.2	221.3	207.8	214.2	238.6	242.2	241.4	230.8
	2011	257.9	269.0	237.1	240.4	233.7	233.0	234.1	232.8	_	239.3	247.4	246.2	242.8
	2012	231 9	2331	233.0	222 5	223.4	2207	207.2	204.4	204 8	201 9	1981	1977	214.9
	2013	196.8	1947	214 7	221.1	221.6	221.8	224.0	_	_	224.4	228.0	241 1	218.8
	2012	220.0	2101	230 3	2371	230 0	230 8	240.2	237.2	_	234.7	235.6	232.2	235 5
	2014	277.0	210.1	230.5	237.1	233.3	233.0	270.2	236.2	227.2	237.7	233.0	232.2	233.5
	2013	201./	200.1	2 <i>3</i> 2.1	227.5	221.2	244.1	200.9	230.5	221.2	233.5	232.7	202.7	233.0
	2010	239.6	238.4	-	232.3	235.8	237.I	237.7	239.9	236.8	243.0	249.1	243.3	239.4

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	534.1	535.1	534.7	535.1	533.7	533.7	538.6	537.1	538.2	537.9	537.4	536.0
	2000	537.4	539.4	539.2	539.4	540.2	538.5	538.2	-	538.6	540.3	539.5	537.8	539.0
	2001	538.9	537.7	539.4	539.1	541.9	537.7	540.4	541.9	538.8	541.8	541.4	540.0	539.9
	2002	541.3	540.1	541.6	544.0	542.7	543.1	543.5	543.5	544.5	543.6	543.7	544.4	543.0
	2003	541.3	540.1	540.8	540.2	-	538.4	541.8	540.9	541.1	541.6	540.0	529.0	539.6
	2004	530.5	532.3	538.9	-	537.4	539.8	539.2	539.6	539.5	540.3	541.5	538.9	538.0
	2005	540.5	540.1	540.8	539.8	539.8	542.1	-	542.4	539.7	541.1	538.9	541.0	540.6
연히분하타소	2006	537.3	539.0	540.4	540.6	540.6	-	540.9	-	523.0	511.0	504.0	523.1	530.0
12	2007	526.1	536.9	550.6	539.0	539.5	541.7	541.6	551.6	552.6	546.1	507.6	489.2	535.2
(CFC-12)	2008	489.1	511.0	528.5	548.4	528.1	515.9	534.0	532.3	518.5	509.4	519.0	531.6	522.2
[단위 : ppt]	2009	527.4	530.8	530.6	529.2	518.6	522.7	531.6	526.6	527.5	527.5	527.5	532.5	527.7
	2010	534.6	539.0	539.4	508.5	513.5	532.2	533.4	503.1	510.5	523.8	534.2	538.1	525.9
	2011	-	-	501.8	510.4	486.1	480.1	480.4	484.2	485.3	550.5	545.6	543.5	506.8
	2012	525.7	528.6	530.0	505.9	500.0	499.1	503.2	506.2	505.3	504.4	505.4	505.6	509.9
	2013	503.7	500.8	524.9	525.4	526.6	520.4	509.6	-	-	-	-	518.5	516.2
	2014	519.2	508.6	530.6	531.0	530.4	519.3	521.5	520.5	-	518.8	517.9	513.7	521.1
	2015	-	530.4	538.6	518.3	504.9	522.9	514.7	516.1	518.5	516.4	523.7	523.1	520.7
	2016	524.6	523.5	-	513.0	522.4	531.1	533.4	533.1	519.7	534.1	550.0	542.4	529.8
	2007	-	75.7	82.3	73.9	73.9	79.7	76.7	91.4	90.2	88.5	82.8	80.4	81.4
	2008	75.6	76.9	76.7	79.0	76.8	74.2	70.3	76.5	77.8	76.4	79.3	82.3	76.8
	2009	70.8	80.0	78.3	76.2	76.7	75.9	79.9	76.7	80.0	80.0	80.7	83.6	78.2
소녀야분여만	2010	81.4	77.5	72.2	63.8	62.7	75.3	79.3	74.0	72.4	73.7	75.2	75.2	73.6
113	2011	81.0	80.5	74.1	72.0	75.3	75.6	76.3	76.1	75.6	76.3	75.8	75.1	76.1
(CFC-113)	2012	74.2	75.3	76.2	78.3	80.3	77.6	72.9	72.1	71.9	72.5	73.8	73.4	74.9
[단위 : ppt]	2013	73.8	74.0	72.9	73.0	73.2	73.8	74.6	71.8	70.4	70.3	70.5	73.1	72.6
	2014	73.6	72.6	67.8	74.4	74.8	72.0	72.7	72.2	-	71.3	72.6	72.5	72.4
	2015	69.1	72.7	75.2	71.6	69.4	72.7	71.9	70.8	71.1	71.8	73.3	71.9	71.8
	2016	71.9	-	69.6	-	71.9	72.7	73.2	73.5	72.3	72.9	74.2	73.6	72.6
	2007	-	-	6.2	6.4	6.3	6.5	6.6	6.1	6.0	6.0	6.4	6.8	6.3
	2008	6.6	6.4	6.5	6.0	6.6	6.9	6.8	6.7	6.2	6.4	7.0	7.1	6.6
	2009	7.0	7.2	7.1	7.3	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.2	7.4	7.2	7.3
	2010	7.5	7.1	7.5	7.8	7.8	7.9	7.0	6.8	7.2	8.4	8.6	8.4	7.7
육불화황	2011	8.3	8.0	7.7	7.6	7.7	7.8	8.2	7.9	8.3	8.2	8.7	8.7	8.1
(১৮ ₆) [단위 · nnt]	2012	8.1	7.9	8.0	8.0	8.3	7.9	7.8	8.4	8.4	8.2	8.2	8.1	8.1
r n i i v bbil	2013	8.1	8.1	8.2	8.2	8.2	8.4	8.2	8.2	8.2	8.4	8.4	8.3	8.2
	2014	8.4	8.7	8.5	9.1	9.4	9.6	9.5	9.7	9.7	9.5	9.3	8.9	9.2
	2015	8.9	9.2	9.3	9.2	9.1	9.2	9.1	9.8	9.5	8.9	9.8	9.4	9.3
	2016	9.4	9.3	9.3	9.6	9.6	9.8	9.5	9.2	9.3	-	9.4	9.5	9.5

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

○ 고산

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	2012	400.3	401.4	401.9	403.4	402.9	399.4	395.7	392.7	393.3	398.0	401.0	401.4	399.3
이산화탄소	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
(CO ₂)	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
[단위 : ppm]	2015	406.9	408.5	409.6	410.3	409.6	406.9	403.2	399.8	400.4	405.0	408.3	409.5	406.5
	2016	410.9	411.2	412.8	413.8	412.1	409.4	406.0	403.6	404.1	407.4	411.0	412.2	409.5
	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	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
(N ₂ O)	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
[단위 : ppb]	2015	329.0	329.3	329.4	330.1	329.3	329.1	328.7	328.9	329.1	329.3	329.6	329.9	329.3
	2016	330.0	329.6	329.8	329.9	329.9	-	-	330.1	330.8	330.6	330.6	330.1	330.1

○ 울릉도

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
이산화탄소	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
(CO ₂)	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
[단위 : ppm]	2016	410.6	411.6	413.0	414.1	411.0	-	(397.0)	(394.7)	(400.1)	(406.8)	411.4	412.5	407.5

○ 독도

화학종	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
이산화탄소	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
(CO ₂)	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
[단위 : ppm]	2016	409.2	411.0	411.6	412.0	410.8	406.8	401.1	397.8	400.0	404.6	408.6	410.2	407.0

□ 반응가스 평균 자료

○ 오존(O₃) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	2004	42.4	52.8	65.2	48.1	41.9	34.2	21.9	22.5	27.5	33.0	32.0	27.2	37.4
	2005	28.4	-	-	-	27.5	34.7	34.6	27.5	-	50.5	46.5	34.3	35.5
	2006	39.0	45.1	57.2	48.3	56.0	49.4	27.4	36.9	55.2	55.5	38.1	29.4	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	45.0	30.9	27.9	44.6
	2009	29.5	32.1	39.5	55.5	56.0	50.9	38.6	36.8	46.0	45.0	29.4	15.7	39.6
안면도	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2012*	-	-	-	-	-	40.8	33.7	25.2	33.8	45.6	29.4	32.2	34.4
고산	2013	47.2	43.9	56.2	64.0	52.0	33.2	15.1	14.9	44.8	39.8	39.3	35.3	40.3
*2012년	2014	36.7	42.0	46.8	64.2	63.2	55.2	32.6	33.2	42.9	39.8	39.3	35.3	44.3
6월부터 관측시작	2015	39.5	50.0	57.2	62.5	51.0	49.4	38.9	-	43.9	48.1	34.6	27.5	45.7
	2016	30.3	47.0	50.3	52.6	55.7	40.3	21.7	28.0	34.2	39.9	37.2	34.5	39.3

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 2014. 3. ~ 2016. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 결측 처리됨

○ 일산화탄소(CO) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	2006	137.4	133.6	95.0	95.6	137.5	108.0	74.1	45.4	471.4	537.8	710.8	342.8	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
안면도	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
고사	2012	-	-	-	-	-	145.0	118.8	93.6	163.0	180.1	212.0	168.4	154.4
16.6	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	2014	266.6	278.0	226.6	221.6	280.6	215.1	160.8	154.0	191.4	174.6	222.9	2120.	217.0
관측	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
시작	2016	295.2	241.2	233.4	249.6	231.1	203.6	136.3	165.6	215.8	199.7	222.2	202.6	216.4

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄※ 2014. 3. ~ 2016. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 결측 처리됨

○ 질소산화물(NO_x) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	2004	12.8	8.8	8.8	7.6	7.7	13.7	5.4	7.7	10.7	16.3	14.1	13.3	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
안면도	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2012	-	-	-	-	-	3.5	2.5	2.4	3.1	3.4	3.6	3.3	3.1
고산	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	2014	3.7	3.9	3.4	3.7	3.3	2.8	2.8	2.9	4.0	3.8	3.6	3.0	3.4
0철누너 과츠시잔	2015	3.9	3.3	5.2	4.5	4.4	3.3	3.4	-	4.1	4.7	4.0	4.2	4.1
29/19	2016	3.9	3.4	3.7	4.5	4.4	2.9	2.5	2.3	3.9	4.4	3.5	3.6	3.6

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 2014. 3. ~ 2016. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 결측 처리됨

○ 이산화황(SO₂) [단위: ppb]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	2004	5.2	4.3	3.7	1.4	1.4	1.0	-	0.6	0.7	1.5	2.5	2.1	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
안면도	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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
고사	2012*	-	-	-	-	-	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	0.8	0.6	0.5
10	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	2014	1.4	0.7	0.7	0.5	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.5	0.8	0.5
6월부터	2015	0.2	-	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7	-	0.3	0.6	0.3	0.7	0.5
관습시작	2016	0.7	1.0	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측을 나타냄

※ 2014. 3. ~ 2016. 자료는 관측환경에 따른 품질처리로 결측 처리됨

188 2016 지구대기감시 보고서

□ 에어로졸 평균자료

안면도 PM10 질량농도 [단위: μg/m³]

경우임

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 또는 유효한 시간평균값이 해당 월의 75% 미만인

2003	평균	-	-	-	46	53	47	33	24	34	39	34	54	
2003	자료비율	0.00	0.00	0.00	0.86	0.94	0.84	0.92	0.96	0.93	0.96	0.97	0.97	-
2004	평균	51	54	80	55	64	52	-	28	-	49	45	42	10
2004	자료비율	0.99	1.00	1.00	0.97	0.97	0.80	0.00	0.95	0.00	1.00	0.99	1.00	-15
2005	평균	45	39	57	75	50	39	44	-	44	59	69	40	F1
2005	자료비율	0.97	0.97	0.99	0.98	0.99	0.99	0.86	0.00	0.90	0.80	1.00	0.99	51
2006	평균	48	59	71	101	51	41	24	34	35	53	44	47	E0
2000	자료비율	0.83	0.93	0.96	0.91	0.99	0.99	0.94	0.96	0.99	0.98	0.99	1.00	50
2007	평균	49	63	53	70	72	26	34	19	25	36	49	49	16
2007	자료비율	1.00	0.96	0.99	0.95	0.92	0.91	0.96	0.91	0.93	1.00	1.00	1.00	40
2009	평균	44	46	55	54	42	30	25	29	36	46	-	42	41
2008	자료비율	0.99	1.00	1.00	0.91	0.97	0.99	0.97	0.94	0.96	1.00	0.00	1.00	41
2000	평균	33	55	44	52	41	35	28	26	35	41	28	43	20
2009	자료비율	1.00	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.98	0.99	0.87	1.00	0.98	0.99	30
2010	평균	34	28	44	36	39	31	24	26	29	37	63	53	27
2010	자료비율	0.91	0.98	0.97	0.99	0.96	0.98	0.84	0.96	0.93	0.99	0.94	1.00	37
2011	평균	33	59	56	50	78	32	24	26	29	39	37	31	41
2011	자료비율	1.00	0.99	1.00	0.99	0.96	0.96	0.95	0.97	0.96	1.00	0.98	0.99	41
2012	평균	49	37	38	39	46	28	21	24	34	30	41	34	25
2012	자료비율	0.82	0.96	0.99	0.98	1.00	0.98	0.98	0.98	0.99	0.94	0.99	1.00	30
2012	평균	51	38	44	47	46	33	31	34	37	32	35	40	20
2013	자료비율	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.96	0.99	0.96	1.00	0.84	39
2014	평균	45	49	43	44	61	39	34	25	26	29	32	30	20
2014	자료비율	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.90	0.97	0.96	0.99	0.96	0.99	0.99	38
201 5	평균	37	52	51	34	33	31	27	28	26	39	26	32	25
2015	자료비율	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	0.95	0.99	35
2010	평균	33	34	41	50	40	34	22	31	31	31	38	31	25
2016	자료비율	0.99	1.00	0.98	0.98	1.00	1.00	1.00	0.94	0.95	1.00	1.00	1.00	35
	0 71.01		T 1 J 1						1 - 1 1 -				750/ 5	

연 통계요소 1월 2월 3월 4월 5월 6월 7월 8월 9월 10월 11월 12월 **연평균**

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2011	평균	22	41	34	37	65	25	22	23	26	24	21	20	20
2011	자료비율	1.00	0.99	0.99	1.00	0.97	0.96	0.97	0.98	0.93	1.00	0.98	0.97	50
2012	평균	28	23	31	30	-	-	18	17	21	25	30	19	24
2012	자료비율	1.00	0.99	0.98	0.98	0.72	0.28	0.97	0.91	0.98	0.94	0.99	0.98	24
2012	평균	32	25	40	32	41	22	22	20	19	25	37	31	20
2013	자료비율	1.00	0.98	0.99	1.00	0.99	0.97	0.98	0.98	0.97	0.98	0.96	0.99	29
2014	평균	41	-	37	33	52	35	24	23	24	23	24	29	22
2014	자료비율	0.97	0.00	0.98	0.98	0.98	0.97	0.91	0.88	0.99	0.96	0.98	0.96	52
201 E	평균	33	45	40	33	28	29	27	27	22	34	24	30	21
2015	자료비율	0.97	1.00	0.99	0.97	0.99	0.98	0.96	0.99	0.99	0.99	0.93	0.99	21
2016	평균	31	35	39	44	41	33	18	20	-	-	-	-	21
2016	자료비율	0.97	0.99	0.99	0.95	0.97	0.78	0.83	0.88	0.22	0.47	0.62	0.21	21

Ο 고산 PM10 질량농도 [단위: μg/m³]

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 또는 유효한 시간평균값이 해당 월의 75% 미만인 경우임

○ 안면도 크기별 수농도(0.5~20µm) [단위: µm³/cm³]

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2007	평균	30.6	35.8	30.7	45.4	-	28.1	58.7	29.5	17.7	19.8	27.9	34.5	32.2
	표준편차	20.7	27.4	27.5	65.2	-	26.2	62.2	25.9	23.5	17.7	23.1	31.7	35.8
	자료비율	0.99	0.71	0.99	0.55	0.00	0.66	1.00	0.97	0.95	1.00	1.00	1.00	0.82
2008	평균	23.1	23.1	33.5	29.1	23.5	24.7	27.0	26.0	29.1	38.7	25.8	27.1	27.6
	표준편차	15.3	15.7	18.2	12.8	21.6	20.4	21.9	18.0	16.9	38.0	26.8	27.4	22.6
	자료비율	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2009	평균	24.1	52.5	27.7	32.2	-	-	21.3	20.0	18.3	17.2	16.1	24.7	24.4
	표준편차	18.5	53.9	22.3	24.0	-	-	14.6	16.4	14.1	12.7	16.3	32.4	25.6
	자료비율	0.97	0.72	0.91	0.86	0.00	0.00	0.82	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	0.78
2010	평균	19.3	18.3	24.1	20.3	17.8	23.8	15.8	16.2	12.9	14.8	23.7	23.3	19.2
	표준편차	13.8	12.0	19.3	10.9	13.6	29.1	12.2	12.2	12.3	10.7	34.4	25.7	19.2
	자료비율	0.97	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00	0.97	0.99
2011	평균	14.7	39.5	30.2	23.7	32.2	16.6	14.2	16.8	12.7	17.6	20.3	14.5	21.0
	표준편차	10.2	29.7	40.0	14.2	42.6	15.6	12.2	13.6	10.4	12.3	16.9	12.5	23.5
	자료비율	1.00	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00	0.99	0.99	0.99
2012	평균	27.4	17.3	17.8	20.6	36.4	13.8	18.9	16.9	-	12.5	17.7	22.1	20.3
	표준편차	22.5	12.9	11.1	13.8	31.1	8.8	16.1	13.8	-	7.5	17.2	17.2	18.1
	자료비율	0.98	1.00	0.95	0.98	0.93	0.90	0.51	1.00	0.00	1.00	0.59	1.00	0.82
2013	평균	43.9	30.4	31.5	34.7	34.6	-	-	32.3	22.0	15.3	25.4	24.3	30.7
	표준편차	45.8	23.5	31.5	26.2	24.2	-	-	26.8	21.3	12.6	22.3	20.9	30.1
	자료비율	1.00	0.88	0.98	0.99	0.99	0.02	0.25	0.98	0.98	1.00	1.00	1.00	0.84
2014	평균	28.0	40.6	34.9	38.5	45.6	46.4	38.2	19.8	16.6	18.8	30.7	29.3	32.3
	표준편차	27.2	38.8	28.3	28.6	33.1	36.8	37.1	22.7	13.3	19.4	47.2	40.3	33.8
	자료비율	1.00	0.90	1.00	1.00	0.99	1.00	0.96	0.96	0.98	0.94	1.00	0.98	0.98
2015	평균	36.4	40.0	42.9	32.4	32.2	42.3	38.0	42.1	13.8	36.0	37.9	51.1	37.8
	표준편차	27.1	47.4	37.9	23.1	24.1	30.7	49.5	42.7	11.3	31.5	32.5	42.7	36.6
	자료비율	0.94	1.00	0.99	0.98	1.00	1.00	0.98	0.97	0.72	0.30	0.89	1.00	0.90
2016	평균	46.9	45.6	65.2	85.2	62.1	59.0	-	-	-	-	-	25.9	53.9
	표준편차	31.7	30.8	52.3	100.2	34.5	36.3	-	-	-	-	-	15.4	56.0
	자료비율	0.93	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	0.63

※ "-"은 장비 수리, 점검 등에 의한 결측 또는 유효한 시간평균값이 해당 월의 30% 미만인 경우임

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2009	 평균	-	-	-	-	27.6	29.4	29.6	29.7	22.8	33.0	17.9	29.1	27.4
	표준편차	-	-	-	-	19.3	20.0	18.2	19.5	12.0	25.9	16.2	37.8	22.9
	자료비율	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.99	0.99	0.97	0.96	1.00	1.00	0.97	0.64
2010	평균	28.8	18.9	39.4	24.2	33.2	27.4	34.0	33.3	-	18.7	40.6	25.4	29.9
	표준편차	26.1	15.0	121.3	17.1	24.8	23.0	30.6	27.9	-	13.1	69.4	27.8	48.9
	자료비율	1.00	0.98	0.99	0.96	0.98	0.99	0.99	0.97	0.21	0.37	1.00	1.00	0.87
2011	평균	12.5	31.6	25.4	27.5	48.5	25.8	19.9	16.2	14.0	15.7	14.3	11.0	21.8
	표준편차	13.0	25.5	15.6	16.5	93.0	21.9	11.6	10.1	9.1	14.3	15.3	9.1	32.5
	자료비율	1.00	0.99	1.00	0.97	0.99	0.99	1.00	0.98	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99
2012	평균	17.6	13.8	21.7	20.7	22.4	12.8	15.7	14.1	11.1	13.0	17.7	10.8	15.9
	표준편차	14.5	11.4	17.2	14.0	16.3	7.3	11.9	9.1	5.5	10.7	16.7	11.1	13.1
	자료비율	1.00	1.00	0.97	0.98	1.00	0.98	1.00	0.99	1.00	1.00	0.71	1.00	0.97
2013	평균	21.4	18.3	40.6	26.5	35.4	18.0	27.9	20.1	-	19.3	26.6	15.3	25.1
	표준편차	22.4	19.3	37.5	16.3	22.6	10.4	16.2	13.6	-	8.8	31.1	15.5	23.0
	자료비율	1.00	0.96	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	0.11	0.30	0.99	0.73	0.84
2014	평균	-	26.3	28.1	25.3	29.7	33.1	22.4	22.1	18.9	16.1	16.2	20.9	23.7
	표준편차	-	24.3	22.0	10.7	24.6	22.5	16.7	18.4	12.1	8.2	9.5	17.2	18.9
	자료비율	0.20	0.94	0.97	0.94	0.99	0.97	0.97	0.99	0.94	0.95	1.00	0.96	0.90
2015	평균	24.6	29.3	25.7	21.2	17.3	22.6	-	-	-	-	-	19.2	22.9
	표준편차	22.5	33.0	26.9	15.0	12.1	19.3	-	-	-	-	-	16.6	22.3
	자료비율	0.97	1.00	1.00	0.95	1.00	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.54
2016	평균	20.0	22.6	20.2	23.3	23.2	18.2	10.9	12.0	13.9	12.0	16.6	12.7	17.1
	표준편차	17.7	15.6	12.4	17.7	19.1	18.7	7.8	6.6	10.1	7.8	13.2	15.2	14.8
	자료비율	1.00	0.81	1.00	0.99	0.97	1.00	0.99	1.00	1.00	0.91	0.99	0.95	0.97

고산 크기별 수농도(0.5~20μm) [단위: μm³/cm³]

○ 안면도 미세입자 크기별 수농도(0.01~0.5 µm) [단위: 개/cm³]

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2005	평균	6116	6406	6028	5408	5570	3807	4373	4886	-	4610	5131	3848	5078
	표준편차	2868	2940	3045	2934	2335	1738	2328	8484	-	2642	2411	1684	3289
	자료비율	0.51	1.00	1.00	1.00	0.77	0.96	0.94	0.53	0.13	0.69	0.95	1.00	0.79
2006	평균	6902	4073	4384	3914	4240	3441	3383	3181	3131	2410	4503	3528	3970
	표준편차	45495	1897	2156	1993	3524	1542	2199	3458	1853	1509	2842	1564	14358
	자료비율	0.94	0.78	0.91	1.00	0.59	0.48	0.75	0.76	0.70	0.99	1.00	1.00	0.82
2007	평균	4308	3939	3764	3653	4841	4635	3724	3478	3985	4834	6069	4459	4233
	표준편차	2235	1715	2653	3565	2093	2718	2567	2799	2209	3607	20497	26273	8818
	자료비율	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	0.92	0.70	0.65	0.97	0.33	0.86	0.87
2008	평균	6063	3459	3435	3591	3563	3882	2342	2315	5472	4763	4437	4283	3973
	표준편차	39043	1693	1530	1607	1908	2569	1437	2520	2827	2690	5006	1817	11068
	자료비율	0.84	0.98	0.81	1.00	1.00	1.00	1.00	0.79	1.00	0.97	0.94	0.97	0.94
2009	평균	4240	3065	3606	3564	-	2013	2041	3890	4270	3595	2718	3313	3400
	표준편차	2182	1399	4476	1334	-	1016	864	2538	2350	1823	7418	1463	3162
	자료비율	1.00	1.00	0.98	1.00	0.28	0.51	0.77	0.97	1.00	1.00	0.96	1.00	0.87
2010	평균	3857	4098	3704	4194	3859	3466	2722	2567	3494	3838	3234	3039	3501
	표준편차	1607	1685	1518	1584	1693	1858	1473	1703	2499	2356	1625	1693	1868
	자료비율	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99
2011	평균	4048	4020	4646	3581	4154	2528	2975	3264	3414	3402	-	3467	3577
	표준편차	1773	1778	1928	1288	2352	1444	2093	1498	2207	1997	-	1667	1935
	자료비율	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.79	0.23	0.97	0.92
2012	평균	-	4405	3790	4105	3511	2899	2662	4209	4306	-	5281	5255	4124
	표준편차	-	1461	1639	3205	2042	1943	1161	3410	2290	-	14373	2461	5187
	자료비율	0.21	0.91	1.00	1.00	1.00	0.93	0.30	0.88	0.59	0.00	0.91	0.96	0.72
2013	평균	4677	4905	4685	4788	3804	4367	2484	3260	5148	4872	4178	3646	4242
	표준편차	2037	2021	10689	1977	1829	1844	2029	2436	3661	2886	2317	1861	3856
	자료비율	1.00	1.00	0.94	0.99	1.00	1.00	0.97	0.81	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98
2014	평균	4384	4485	3924	4940	3822	3375	3695	1649	4434	-	-	4482	3857
	표준편차	1807	2036	1562	30324	2062	1744	2625	1571	2954	-	-	2026	9858
	자료비율	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.21	0.00	0.52	0.81
2015	평균	4541	3926	2135	3826	4494	4984	4820	3864	4741	4786	3283	3878	4107
	표준편차	2303	1989	2188	1616	2246	2834	2839	2802	2911	2561	1713	1708	2483
	자료비율	0.98	0.96	0.98	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	1.00	1.00	0.99
2016	평균	5660	7238	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	표준편차	5273	10899	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	자료비율	0.92	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12

○ 고산 응결핵 수농도(0.01~3 µm) [단위: 개/cm³]

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2010	평균	-	-	-	-	-	-	-	6683	10881	11386	11023	7464	9718
	표준편차	-	-	-	-	-	-	-	5351	8446	5730	6643	5186	6721
	자료비율	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59	1.00	1.00	1.00	1.00	0.38
2011	평균	5281	7689	9539	7071	7907	6562	6305	9533	11812	11203	8257	5476	8051
	표준편차	3014	4085	5895	3769	6271	3209	5295	5318	7011	6471	7992	4259	5798
	자료비율	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2012	평균	4337	5164	6298	5261	3559	3002	3283	3578	4781	4710	3466	2452	4153
	표준편차	3099	3354	4077	3687	1698	2104	4544	4208	3138	3178	2527	1647	3411
_	자료비율	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
2013	평균	2404	3149	3117	3136	2700	2906	2747	2856	-	-	5768	4838	3448
	표준편차	1367	1775	1565	2065	1721	1292	2462	2355	-	-	3264	3124	2482
	자료비율	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	1.00	0.00	0.00	1.00	0.96	0.86
2014	평균	4947	3744	4434	5039	6321	4665	5208	4945	5497	4876	4125	3167	4750
	표준편차	3976	2120	2842	3059	3883	1837	8604	3703	3871	2862	2252	2427	3951
	자료비율	0.84	1.00	0.99	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00	0.98
2015	평균	3027	2866	3601	3765	4732	3855	4760	3735	4065	-	-	2874	3736
	표준편차	2129	1684	2295	2200	2308	1965	3008	1839	3067	-	-	1870	2338
	자료비율	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.96	0.92	0.52	0.00	0.00	0.76	0.76
2016	평균	2368	3672	3344	4012	4644	3786	2574	3413	3497	4760	3645	2182	3488
	표준편차	1138	2824	1597	2055	2519	2795	1234	2623	1677	3775	3133	1513	2505
	자료비율	1.00	0.76	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	0.99	0.66	0.89	1.00	1.00	0.93

※ 2013년 12월부터 수월봉(현 고산지역기상서비스센터)으로 관측위치 변경

○ 안면도 에어로졸 광산란계수 [단위: Mm⁻¹]

2003 翌元 132.4 190.9 200.6 128.0 217.2 123.1 191.6 108.8 100.2 123.6 158.4 표준世차 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 자료비율 10.00 0.96 0.99 0.98 0.75 0.49 0.96 0.99 0.99 0.93 2004 평균 102.3 96.2 96.7 91.9 138.0 133.3 66.1 67.9 42.4 59.1 35.9 18.6 80.5 2005 평균 10.0 0.99 0.91 1.00 1.00 10.07 12.3 95.4 70.1 12.4 82.3 자료비율 0.65 1.00 1.00 0.99 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00												
표준 번128.1141.4133.972.5134.7134.1116.9175.9181.7101.481.1131.1134.2자료 비응1.000.960.990.990.970.960.990.990.990.990.992004평균123.296.296.791.9138.0133.366.167.942.459.135.918.680.5표준 世10.0388.262.964.710.711.9357.349.534.556.724.712.482.3자료 비응10.00.990.610.880.991.001.000.970.961.001.000.960.952005평균90.289.512.1911.512.2196.826.710.871.60.293.762.3131.374.1160.51.001.090.991.001.000.640.240.990.941.000.87200670.71.021.021.021.011.0287.714.6494.614.6576.3131.113.1200770.711.2112.817.1218.01.011.021.011.021.021.011.031.011.04200770.714.215.812.215.217.01.011.021.021.011.031.011.041.011.031.011.041.011.031.011.041.01 <t< td=""></t<>												
자료비용1.001.000.961.000.991.000.980.750.490.960.990.990.932004평균123.296.296.791.9138.0133.366.167.942.459.135.918.680.5표준판h10.9088.262.964.7101.7119.357.349.534.556.724.712.482.3자료비용10.00.990.9910.01.0010.00.970.961.001.000.960.952005평균90.289.512.1911.512.5196.827.113.05-12.395.470.113.07표준판h12.4578.691.475.884.4139.620.4710.87-16.0293.762.313.13자료180.651.001.090.991.001.000.640.7414.676.313.193.72006평균1.31.193.260.610.5913.081.010.577.711.0282.296.610.182017평균142.115.812.0513.5412.885.954.211.110.7312.14117.0표준ሞh9.6515.709.539.781.257.554.210.110.310.4111.0표준ሞh9.660.579.757.557.8<												
2004평균123.296.296.791.9138.0133.366.167.942.459.135.918.680.5표준팬차10.0388.262.964.710.7119.357.349.534.556.724.712.482.3자료비율10.000.990.0610.991.001.000.970.961.001.000.960.952005평균90.289.5121.9115.5122.5196.8276.1130.5-123.395.470.1130.7표준백차124.578.691.475.884.4139.6204.7108.7-160.293.762.3131.3자료비율0.651.001.000.990.991.001.000.640.240.990.941.000.872006평균122.2129.8114.398.7151.2197.287.7146.494.6146.576.3131.0124.4표준백차84.913.193.260.610.69130.681.0105.772.7110.282.296.610.82007평균142.1158.6120.5135.4122.885.954.2101.1107.3121.4117.0표준백차95.6157.095.397.675.675.676.890.9-97.4표준백차95.6157.095.379.876												
표준팬차109.388.262.964.7101.7119.357.349.534.556.724.712.482.3자료비율1.000.990.610.980.991.000.970.961.001.000.960.952005평균90.289.5121.9115.5122.5196.8276.1130.5-123.395.470.1130.7표준비율0.651.001.000.990.991.001.001.060.240.990.9762.3131.3자료비율0.651.001.000.990.991.001.001.040.640.240.990.941.000.872006평균122.2129.8114.398.7151.2197.287.7146.494.6146.576.3131.0124.4표준한차84.9113.193.260.6106.9130.681.0105.772.7110.282.296.6101.8자료비율0.930.990.970.931.000.990.990.830.970.890.990.940.952007평균142.1158.6120.5135.4122.885.954.2101.1107.3121.4117.0표준한차95.6157.095.393.781.179.576.890.90.90.940.932008평균81.270.6122.9												
자료비용1.000.990.610.980.991.001.000.970.961.001.000.960.952005평균90.289.5121.9115.5122.5196.8276.1130.5-123.395.470.1130.7표준팬차124.578.691.475.884.4139.6204.7108.7-160.293.762.3131.374.110.651.000.990.991.000.640.240.990.9410.00.872006평균122.2122.811.398.7151.2197.287.7146.494.6146.576.3131.0124.4표준판차84.911.3193.260.6106.9130.681.0105.772.7110.282.296.6101.8자료비용0.930.990.970.931.000.990.990.830.970.890.990.940.952007평균142.1158.6120.5135.4122.885.954.2101.110.310.2.3106.1표준판차95.6157.095.393.781.179.565.411.060.990.990.990.990.990.990.990.990.990.990.990.990.910.830.790.910.830.790.910.830.790.910.8470.414.00.10												
2005 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 84.4 130.6 20.47 10.87 - 160.2 93.7 62.3 131.3 7.4.19 0.65 1.00 1.00 0.99 1.00 1.04 94.6 9.63 0.99 0.94 10.0 0.87 2006 평균 122.1 128.3 114.3 98.7 151.2 197.2 87.7 146.4 94.6 163.5 121.4 124.4 #2047 84.9 113.1 93.2 60.6 10.09 1.99 0.80 0.97 0.82 96.6 10.13 121.4 170.0 #2047 75.6 157.0 95.3 93.7 81.1 79.5 - - 54.2 101.1 10.3 100.7 121.4 170.5 #2048												
표준편차124.578.691.475.884.4139.6204.7108.7-160.293.762.3131.3자료비용0.651.001.000.990.991.001.000.640.240.990.941.000.872006평균122.2128.3114.398.7151.2197.287.7146.494.6164.576.3131.0124.4표준편차84.9113.193.260.610.0130.681.010.5772.7110.282.296.610.8자료비용0.930.970.931.000.990.990.830.9776.411.110.73121.4117.0표준편차95.6157.095.393.781.179.565.411.2610.310.23106.1자료비용0.950.860.790.960.960.350.140.110.630.790.910.830.692008평균81.270.6122.9155.379.876.890.9-97.4표준면차68.656.474.775.957.5100.8100.7-81.4자료비용0.000.000.860.970.770.530.660.550.550.5995.993.4조표준면차75.7117.756.910.155.7												
자료비율0.651.001.000.990.991.001.000.640.240.990.941.000.872006평균12.212.811.4398.7151.2197.287.7146.494.6146.576.3131.0124.4표준편차84.911.3193.260.6106.9130.681.0105.772.7110.282.296.6101.8자료비율0.930.990.970.931.000.990.990.830.970.890.990.940.952007평균142.1156.6120.5135.4122.885.954.2101.1107.3121.4170.0표준편차95.6157.095.393.781.179.565.4112.610.03106.1자료비율0.950.860.790.960.350.140.110.630.790.910.830.692008평균81.270.6122.9155.379.8100.8100.7-81.4자료비율0.070.920.830.890.700.240.110.060.080.350.920.050.442009평균75.7117.756.910.110.60.880.550.550.550.550.950.850.982010평균84.969.174.877.462.9 <t< td=""></t<>												
2006평균12.212.9.8114.398.7151.2197.287.7146.494.6146.576.3131.0124.4표준편차84.9113.193.260.6106.9130.681.0105.772.7110.282.296.6101.8자료비율0.930.990.970.931.000.990.990.830.970.890.990.940.952007평균142.1158.6120.5135.4122.885.954.2101.1170.3121.4117.0표준편차95.6157.095.393.781.179.565.4112.6100.3106.30.790.910.830.692008평균81.270.6122.9155.378.876.890.9-97.4표준면차68.656.474.775.957.5100.8100.7-81.4자료비율0.720.920.830.890.700.240.110.060.080.350.920.050.442009평균75.7117.756.9124.975.675.659.792.993.4표준면차0.000.000.860.970.770.530.060.050.550.950.850.980.662010평균84.969.174.874.												
표준편차 자료비율84.9113.193.260.6106.9130.681.0105.772.7110.282.296.6101.8자료비율0.930.990.970.931.000.990.990.830.970.890.990.940.952007평균142.1158.6120.5135.4122.885.954.2101.1107.3121.4117.0표준편차95.6157.095.393.781.179.565.4112.6110.3102.3106.1자료비율0.950.860.790.960.960.350.140.110.630.790.910.830.692008평균81.270.6122.9155.379.876.890.9-97.4표준면차68.656.474.775.957.5100.8100.7-81.4자료비율0.720.920.830.890.700.240.110.060.080.350.920.050.492009평균75.7117.756.9103.165.368.561.896.487.4전재료비율0.000.000.860.970.770.530.050.550.950.850.980.662010평균84.969.174.877.462.098.458.4 </td												
자료비용0.930.990.970.931.000.990.990.830.970.890.990.990.940.952007평균142.1158.6120.5135.4122.885.954.2101.1107.3121.4117.0표준편차95.6157.095.393.781.179.565.4112.6110.3102.3106.1자료비용0.950.860.790.960.960.350.140.110.630.790.910.830.692008평균81.270.6122.9155.379.876.890.9-97.4표준면차68.656.474.775.957.576.80.920.050.492009평균0.720.920.830.890.700.240.110.060.880.350.920.050.442019평균75.717.756.9124.975.675.659.792.993.4표준면차6.000.000.860.970.770.530.060.050.550.950.850.980.662010평균84.969.174.877.462.098.458.4-59.783.6132.991.183.62010평균84.969.174.877.462.098.458.4<												
2007 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 자료비율 0.95 0.86 0.79 0.96 0.96 0.35 0.14 0.11 0.63 0.79 0.91 0.83 0.69 2008 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 자료비율 0.72 0.92 0.83 0.89 0.70 0.24 0.11 0.06 0.08 0.35 0.92 0.05 0.49 2009 평균 - 75.7 <td< td=""></td<>												
표준편차95.6157.095.393.781.179.565.4112.6110.3102.3106.1자료비율0.950.860.790.960.960.350.140.110.630.790.910.830.692008평균81.270.6122.9155.379.876.890.9-97.4표준편차68.656.474.775.957.5100.8100.7-81.4자료비율0.720.920.830.890.700.240.110.060.080.350.920.050.492009평균85.0144.195.6124.975.675.659.792.993.4표준면차75.7117.756.9103.165.368.561.896.487.4자료비율0.000.000.860.970.770.530.060.050.550.950.850.980.662010평균84.969.174.877.462.098.458.4-59.783.6132.991.183.62010평균84.969.174.877.462.098.458.4-59.764.0164.4108.590.2자료비율0.910.720.430.610.710.490.490.260.52												
자료비율0.950.860.790.960.960.350.140.110.630.790.910.830.692008평균81.270.6122.9155.379.876.890.9-97.4표준편차68.656.474.775.957.5100.8100.7-81.4자료비율0.720.920.830.890.700.240.110.060.080.350.920.050.492009평균85.0144.195.6124.975.675.659.792.993.4표준면차75.7117.756.9103.165.368.561.896.487.4자료비율0.000.000.860.970.770.530.060.050.550.950.850.980.662010평균84.969.174.877.462.098.458.4-59.783.6132.991.183.62011평균84.969.174.877.462.098.458.4-59.764.0164.4108.590.2자료비율0.910.720.430.610.710.490.490.260.520.940.980.930.672011평균58.9172.7-99.888.991.057.166.7 <t< td=""></t<>												
2008 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 자료비율 0.72 0.92 0.83 0.89 0.70 0.24 0.11 0.06 0.08 0.35 0.92 0.05 0.49 2009 평균 - - 85.0 144.1 95.6 124.9 - - 75.6 59.7 92.9 93.4 표준면차 - - 75.7 117.7 56.9 103.1 - - 65.3 68.5 61.8 96.4 87.4 자료비율 0.00 0.00 0.86 0.97 0.77 0.53 0.06 0.05 0.55 0.95 0.85 0.98 0.66 2010 평균 84.9 69.1 74.8 77.4												
표준편차68.656.474.775.957.5100.8100.7-81.4자료비율0.720.920.830.890.700.240.110.060.080.350.920.050.492009평균85.0144.195.6124.975.659.792.993.4표준편차75.7117.756.9103.165.368.561.896.487.4자료비율0.000.000.860.970.770.530.060.050.550.950.850.980.662010평균84.969.174.877.462.098.458.4-59.783.6132.991.183.6표준면차64.353.654.156.945.6110.454.2-55.764.0164.4108.590.2자료비율0.910.720.430.610.710.490.490.260.520.940.980.930.672011평균58.9172.7-99.888.991.057.166.763.798.191.576.885.8표준면차42.4123.7-96.494.494.357.553.359.576.474.366.382.1자료비율0.520.480.090.580.580.890.630.670.590.80												
자료비율 0.72 0.92 0.83 0.89 0.70 0.24 0.11 0.06 0.08 0.35 0.92 0.05 0.49 2009 평균 - - 85.0 144.1 95.6 124.9 - - 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 자료비율 0.00 0.00 0.86 0.97 0.77 0.53 0.06 0.05 0.55 0.95 0.85 0.98 0.66 2010 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 표준世社 0.91 0.72 0.43 0.61 0.71 0.49 0.26 0.52 0.94 0.98 0.63 0.67 2011 평균 58.9 172.7 <td< td=""></td<>												
2009 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 자료비율 0.00 0.00 0.86 0.97 0.77 0.53 0.06 0.05 0.55 0.95 0.85 0.98 0.66 2010 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 자료비율 0.91 0.72 0.43 0.61 0.71 0.49 0.49 0.26 0.52 0.94 0.93 0.67 2011 평균 58.9 172.7												
표준편차 - 75.7 117.7 56.9 103.1 - - 65.3 68.5 61.8 96.4 87.4 자료비율 0.00 0.00 0.86 0.97 0.77 0.53 0.06 0.05 0.55 0.95 0.85 0.98 0.66 2010 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 자료비율 0.91 0.72 0.43 0.61 0.71 0.49 0.49 0.26 0.52 0.94 0.98 0.93 0.67 2011 평균 58.9 172.7 - 99.8 88.9 91.0 57.1 66.7 63.7 98.1 91.5 76.8 85.8 175.7 134.9 97.3												
자료비율 0.00 0.00 0.86 0.97 0.77 0.53 0.06 0.05 0.55 0.95 0.85 0.98 0.66 2010 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 자료비율 0.91 0.72 0.43 0.61 0.71 0.49 0.49 0.26 0.52 0.94 0.98 0.93 0.67 2011 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 94.3 57.5 53.3 59.5 76.4 74.3 66.3 82.1 자료비율 0.52 0.48												
2010 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 자료비율 0.91 0.72 0.43 0.61 0.71 0.49 0.49 0.26 0.52 0.94 0.98 0.93 0.67 2011 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 94.3 57.5 53.3 59.5 76.4 74.3 66.3 82.1 자료비율 0.52 0.48 0.09 0.58 0.58 0.89 0.63 0.67 0.59 0.80 0.73 0.96 0.63 2012 평균 134.9<												
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 자료비율 0.91 0.72 0.43 0.61 0.71 0.49 0.49 0.26 0.52 0.94 0.98 0.93 0.67 2011 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 자료비율 0.52 0.48 0.09 0.58 0.58 0.89 0.63 0.67 0.59 0.80 0.73 0.96 0.63 2012 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 31.6 87.7 91.6 표준편차 107.6 93.6 69.0 0.97 0.55 0.07 0.48 0.00 0.00 0.13 0.11 0.60 0.84 0.58 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5												
자료비율 0.91 0.72 0.43 0.61 0.71 0.49 0.49 0.26 0.52 0.94 0.98 0.93 0.67 2011 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 자료비율 0.52 0.48 0.09 0.58 0.58 0.89 0.63 0.67 0.59 0.80 0.73 0.96 0.63 2012 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 자료비율 1.00 1.00 0.97 0.												
2011 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 자료비율 0.52 0.48 0.09 0.58 0.58 0.89 0.63 0.67 0.59 0.80 0.73 0.96 0.63 2012 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 자료비율 1.00 1.00 0.97 0.55 0.07 0.48 0.00 0.00 0.11 0.60 0.84 0.58 2013 평균 115.9 84.3 82.2 84.												
표준편차 42.4 123.7 - 96.4 94.3 57.5 53.3 59.5 76.4 74.3 66.3 82.1 자료비율 0.52 0.48 0.09 0.58 0.58 0.89 0.63 0.67 0.59 0.80 0.73 0.96 0.63 2012 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 자료비율 1.00 1.00 0.97 0.55 0.07 0.48 0.00 0.00 0.13 0.11 0.60 0.84 0.58 2013 평균 115.9 84.3 82.2 84.0 101.2 101.5 100.5 95.0 73.9 60.7 90.6 89.8 표준편차 101.5 62.8 76.9 63.9 62.9												
자료비율 0.52 0.48 0.09 0.58 0.58 0.89 0.63 0.67 0.59 0.80 0.73 0.96 0.63 2012 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 91.6 자료비율 1.00 1.00 0.97 0.55 0.07 0.48 0.00 0.00 0.13 0.11 0.60 0.84 0.58 2013 평균 115.9 84.3 82.2 84.0 101.2 101.5 100.5 95.0 73.9 60.7 80.7 90.6 89.8 표준편차 101.5 62.8 76.9 63.9 62.9 105.8 68.9 68.4 53.7 92.9 76.8 77.9												
2012 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 자료비율 1.00 1.00 0.97 0.55 0.07 0.48 0.00 0.00 0.13 0.11 0.60 0.84 0.58 2013 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												
표준편차 107.6 93.6 69.0 47.9 - 64.0 41.9 68.7 85.5 자료비율 1.00 1.00 0.97 0.55 0.07 0.48 0.00 0.00 0.13 0.11 0.60 0.84 0.58 2013 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												
자료비율 1.00 1.00 0.97 0.55 0.07 0.48 0.00 0.00 0.13 0.11 0.60 0.84 0.58 2013 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												
2013 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												
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												
사료비율 1.00 1.00 0.94 1.00 1.00 0.95 0.98 1.00 1.00 0.99 1.00 0.99												
2014 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												
<u>자료비율 0.99 1.00 1.00 1.00 0.92 0.99 0.99 0.99 0.22 0.00 0.00 0.91</u>												
2015 평균 96.5 114.4 140.1 90.3 83.9 111./ 112.0 110.6 65.5 100.5 101.0 99.4 101.2												
표준편자 88.4 83.5 111.5 63.3 60.8 /2.8 122.2 9/.1 5/.6 120.0 106.2 82.1 93.0												
자료비율 0.68 0.78 0.74 0.98 1.00 0.99 0.97 0.99 1.00 1.00 1.00 0.81 0.91												
2016 평균 83.5 60.6 83.4 83.8 102.0 84.0 40.8 61.3 62.9 42.4 47.7 - 69.0												
표준편차 /1.5 52.5 52.5 51.2 /2.6 58.3 26.7 43.8 40.4 43.6 33.6 - 55.3												
자료비율 1.00 0.97 1.00 1.00 1.00 0.99 1.00 1.00 1.00 1.00												
안면도 본동 옥상 단독 흡입구(비도체 튜브 사용)로 연속 관측(2003년 ~ 2004년)												
안면도 연구동 이전 통합 흡입구(도체 튜브 사용)로 연속 관측(2005년 ~ 2006년)												
광학특성 측정 장비 샘플링시스템 개선 적용(2007년 ~ 2012년)												

광학특성 측정 장비 표준 에어로졸 샘플링시스템 구축 적용(2013년 ~ 2016년)

○ 안면도 에어로졸 광흡수계수 [단위: Mm⁻¹]

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2001	평균	-	-	-	10.0	9.0	9.5	5.5	9.9	9.7	17.9	13.6	9.8	10.6
	표준편차	-	-	-	5.3	4.1	5.6	5.0	6.1	6.5	14.3	11.8	7.1	8.6
	자료비율	0.00	0.00	0.00	0.94	1.00	0.99	0.76	1.00	1.00	0.98	0.81	0.98	0.71
2002	평균	16.1	11.6	-	15.1	13.8	14.3	9.3	9.6	1.5	-	-	-	11.6
	표준편차	16.5	5.6	-	9.6	9.5	9.8	6.0	10.5	0.6	-	-	-	10.9
	자료비율	0.97	0.55	0.08	0.97	0.97	0.97	0.97	0.84	0.75	0.13	0.06	0.00	0.60
2003	평균	15.7	18.7	18.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	표준편차	13.3	12.2	9.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	자료비율	0.75	0.98	0.99	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
2004	평균	17.0	9.0	9.4	9.6	13.3	13.5	6.3	12.6	15.3	15.2	12.6	11.8	12.2
	표준편차	15.3	6.0	6.0	5.8	8.1	8.0	4.5	6.4	15.8	12.5	9.5	8.2	10.2
	자료비율	0.81	0.84	0.61	0.97	0.93	0.89	0.88	0.50	0.94	0.90	0.80	0.78	0.82
2005	평균	10.7	7.4	8.7	9.9	-	-	-	4.4	-	-	-	7.5	8.6
	표준편차	9.3	6.3	5.6	6.8	-	-	-	4.4	-	-	-	5.6	7.0
	자료비율	0.85	0.75	0.65	0.84	0.24	0.01	0.0.	0.36	0.00	0.00	0.00	0.56	0.35
2006	평균	10.8	16.8	10.1	8.9	11.3	9.0	4.8	8.5	10.9	11.8	8.3	-	10.1
	표준편차	6.6	13.6	8.2	5.5	6.3	5.8	3.6	5.5	6.5	6.1	7.9	-	7.7
	자료비율	0.95	0.84	0.74	0.97	1.00	0.92	0.96	1.00	0.97	0.89	0.73	0.17	0.84
2007	평균	13.7	12.9	8.7	10.0	7.5	-	7.8	4.1	9.0	10.3	11.0	13.3	10.0
	표준편차	8.7	9.7	6.8	6.3	4.8	-	5.8	2.8	8.3	8.0	8.6	9.7	8.1
	자료비율	1.00	1.00	0.92	0.98	0.60	0.02	0.82	0.92	0.87	0.87	0.98	0.99	0.83
2008	평균	8.7	6.6	10.6	13.9	8.4	8.0	6.2	8.1	10.2	11.5	9.4	4.3	8.8
	표준편차	6.4	4.2	5.8	6.1	6.0	6.0	3.6	5.7	6.4	10.0	7.3	3.9	6.6
	자료비율	1.00	0.98	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.96	0.97	0.90	0.90	0.96	0.97
2009	평균	4.7	3.2	7.0	11.8	8.8	9.7	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
	자료비율	0.97	0.95	0.98	0.96	1.00	0.96	0.97	0.97	0.95	0.94	0.96	0.99	0.97
2010	평균	9.1	9.1	7.4	-	-	-	-	5.8	7.1	9.4	11.1	8.6	8.6
	표준편차	5.9	7.1	4.5	-	-	-	-	2.6	4.7	6.6	10.2	8.6	6.9
	자료비율	0.99	0.99	0.99	0.06	0.00	0.00	0.16	0.38	0.98	0.99	1.00	0.97	0.62
2011	평균	5.5	12.0	5.7	7.4	7.5	8.6	6.1	7.2	8.8	12.7	11.5	9.0	8.5
	표준편차	3.6	8.0	3.6	3.9	5.6	6.3	3.8	4.1	5.6	8.1	8.1	6.0	6.2
	자료비율	0.99	0.97	0.95	0.99	0.97	0.98	0.97	0.99	0.99	0.99	0.98	1.00	0.98
2012	평균	13.1	10.0	8.6	6.9	-	-	-	-	9.2	9.2	5.5	13.0	9.7
	표준편차	8.4	7.1	6.0	4.5	-	-	-	-	5.0	5.3	5.6	9.3	7.1
	자료비율	0.97	1.00	0.98	0.77	0.00	0.00	0.00	0.15	0.86	0.34	0.67	0.71	0.53
2013	평균	14.8	10.9	11.1	10.5	11.0	9.4	5.7	7.2	9.8	10.1	9.8	12.0	10.2
	표준편차	10.9	6.4	9.3	6.5	5.5	3.9	4.4	5.1	6.0	6.3	7.4	9.8	7.4
	자료비율	0.99	0.95	1.00	0.94	0.99	0.99	0.96	0.94	0.98	0.98	0.98	0.84	0.96
2014	평균	12.5	14.1	11.7	13.2	11.6	8.4	6.6	6.4	7.6	8.1	8.8	7.8	9.7
	표준편차	8.7	9.6	6.1	7.8	6.7	5.0	5.4	3.9	4.2	5.7	5.8	6.7	7.0
	자료비율	0.99	1.00	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99
2015	평균	10.3	10.2	10.8	7.7	7.0	6.9	6.3	5.9	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	6.1
	자료비율	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	0.97	0.98	0.55	0.00	0.87	0.98	0.85
2016	평균	10.3	7.9	9.7	9.3	9.6	8.1	5.1	7.7	9.7	9.2	9.7	9.5	8.8
	표준편차	7.2	5.9	4.8	4.3	4.5	4.1	2.8	3.8	4.6	7.1	6.1	7.3	5.6
	자료비율	0.93	0.96	0.85	1.00	0.99	0.99	0.97	0.99	0.97	0.99	1.00	1.00	0.97

○ 안면도 지상 에어로졸 옹스트롬지수

연	통계요소	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
2003	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
	자료비율	1.00	1.00	0.96	1.00	0.99	1.00	0.98	0.75	0.49	0.96	0.99	0.99	0.93
2004	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
	자료비율	1.00	0.99	0.61	0.98	0.99	1.00	1.00	0.97	0.96	1.00	1.00	0.96	0.95
2005	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
	자료비율	0.65	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	0.64	0.24	0.99	0.94	1.00	0.87
2006	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
	자료비율	0.93	0.99	0.97	0.93	1.00	0.99	0.99	0.83	0.97	0.89	0.99	0.94	0.95
2007	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
	자료비율	0.95	0.86	0.79	0.96	0.96	0.35	0.14	0.11	0.63	0.79	0.91	0.83	0.69
2008	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
	자료비율	0.72	0.92	0.83	0.89	0.70	0.24	0.11	0.06	0.08	0.35	0.92	0.05	0.49
2009	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
	자료비율	0.00	0.00	0.86	0.97	0.77	0.53	0.06	0.05	0.55	0.95	0.85	0.98	0.66
2010	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
	자료비율	0.91	0.72	0.43	0.61	0.71	0.49	0.49	0.26	0.52	0.94	0.98	0.93	0.67
2011	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
	자료비율	0.52	0.48	0.09	0.58	0.58	0.89	0.63	0.67	0.59	0.80	0.73	0.96	0.63
2012	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
	자료비율	1.00	1.00	0.97	0.55	0.07	0.48	0.00	0.00	0.13	0.11	0.60	0.84	0.58
2013	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
	표순편자	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
	자료비율	1.00	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00	0.95	0.98	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
2014	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
	자료비율	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	0.99	0.99	0.99	0.22	0.00	0.00	0.91
2015	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
	표순편자	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
2016	사료비율	0.68	0.78	0.74	0.98	1.00	0.99	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	0.81	0.91
2016	명권 	1.5/	1.62	1./6	1.66	1./6	1.64	1.//	1.80	1.84	1.68	1./1	-	1./1
	표순편차	0.24	0.26	0.33	0.37	0.31	0.32	0.32	0.26	0.23	0.21	0.19	-	0.29
	사료비율	1.00	0.97	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	0.75	0.01	0.89

○ PM10 화학자료

여도	개수	Mass	F.	Cl	NO ₃ ⁻	nss-SO4 ²⁻	Na⁺	${\sf NH_4}^+$	K^{+}	Mg ²⁺	nss-Ca ²⁺
<u> </u>	111					(µq,	/m³)				
2008	30	48.8	0.16	2.71	9.65	5.96	4.16	1.41	1.19	0.17	0.51
2009	24	51.8	0.06	1.64	8.79	5.88	1.93	2.66	0.53	0.21	0.81
2010	42	51.0	0.05	1.27	7.71	6.48	1.47	2.90	0.41	0.23	0.75
2011	38	65.3	0.05	0.93	8.76	6.45	1.24	3.24	0.26	0.27	1.01
2012	39	41.7	0.04	0.83	7.79	5.41	0.75	3.66	0.16	0.19	0.59
2013	40	46.6	0.05	1.27	8.96	6.81	1.24	4.34	0.18	0.26	0.71
2014	39	49.9	0.04	0.96	9.13	7.44	1.11	4.83	0.26	0.24	0.75
2015	33	46.3	0.05	0.97	8.09	6.77	1.15	3.92	0.19	0.21	0.53
2016	46	41.0	0.04	0.95	7.44	5.89	1.45	2.41	0.63	0.16	0.51
연평균	331	50.2	0.06	1.27	8.57	6.44	1.54	3.46	0.37	0.22	0.71

	-1-71		Mass	F	Cl	NO ₃ ⁻	nss-SO4 ²⁻	Na⁺	${\sf NH_4}^+$	K^{*}	Mg^{2+}	nss-Ca ²⁺
계실	기간	개수 -					(µq/m³	['])				
겨울	2008 ~2015	66	53.8	0.08	1.95	8.49	7.01	2.05	3.85	0.50	0.24	0.69
	2016	9	34.8	0.08	1.42	4.83	3.95	1.47	1.35	0.14	0.22	0.56
봄	2008 ~2015	95	63.4	0.06	1.43	9.66	7.63	1.56	3.97	0.39	0.28	0.98
	2016	15	55.3	0.06	1.01	8.31	8.49	1.47	3.01	0.71	0.17	0.60
여름	2008 ~2015	50	34.6	0.05	0.56	9.21	4.65	0.91	3.69	0.15	0.15	0.45
	2016	8	30.4	0.00	0.12	10.25	3.63	1.16	2.86	0.73	0.12	0.36
가을	2008 ~2015	73	41.1	0.05	0.94	6.96	5.81	1.52	2.41	0.39	0.19	0.58
	2016	11	35.2	0.01	0.87	6.78	5.30	1.60	2.16	0.76	0.16	0.47

※ 2016년 12월 자료는 2016년 겨울철 자료로 사용하지 않음

198 2016 지구대기감시 보고서

							(µq/m ³	3)				
겨울	2008 ~2015	72	39.9	0.1	1.1	7.7	6.0	1.7	3.3	0.5	0.1	0.48
	2016	8	38.2	0.1	1.2	5.3	6.5	1.4	3.4	0.2	0.2	0.39
봄	2008 ~2015	99	41.6	0.1	0.8	8.8	5.9	1.7	3.4	0.4	0.2	0.50
	2016	15	47.2	0.1	0.7	7.6	7.9	1.5	3.3	1.0	0.1	0.52
여름	2008 ~2015	47	29.3	0.0	0.3	9.1	4.8	1.2	3.4	0.3	0.1	0.35
	2016	11	28.4	0.0	0.1	9.0	3.6	1.0	2.9	0.8	0.1	0.28
2008 2008 가을 ~2015 83 29.9 0.0 0.5 6.2 4.6 1.2 2.3 0.3 0.1 0.3												
	2016	12	27.2	0.0	0.4	6.6	4.1	1.1	2.1	0.8	0.1	0.36
× 20	16년 12월	월 자료	는 2016	년 겨울	울철 자	료로 시	나용하지 <u>G</u>	않음				

							(µq/m	³)				
2008	35	37.9	0.12	0.86	9.97	5.	50	3.44	1.63	1.:	17 0.11	0.29
2009	42	38.9	0.07	0.95	8.76	5.4	48	2.26	2.19	0.	71 0.12	0.44
2010	32	35.2	0.04	0.56	7.05	6.	32	0.99	3.23	0.	37 0.12	0.44
2011	33	46.3	0.04	0.65	7.92	6.	16	0.97	3.43	0.	27 0.17	0.63
2012	48	33.8	0.05	0.63	7.44	4.	58	0.56	3.46	0.	18 0.12	0.48
2013	31	36.7	0.04	0.76	7.80	5.	93	1.41	4.06	0.	22 0.17	0.49
2014	41	30.7	0.03	0.60	7.14	4.	71	0.93	3.45	0.1	18 0.13	0.42
2015	42	32.9	0.04	0.77	6.95	5.4	45	1.41	3.52	0.	19 0.11	0.31
2016	49	34.8	0.03	0.58	6.96	5.	35	1.28	2.64	0.	76 0.13	0.40

5.44

1.47

 NO_3^- nss- SO_4^{2-} Na^+

3.12

0.40

 NH_4^+ K^+

0.13

Mg²⁺ nss-Ca²⁺

0.44

nss-SO42-

 Na^+

 NH_4^+

 K^{*}

Mg²⁺

nss-Ca²⁺

○ PM2.5 화학자료

연도 개수

연평균 353

기간

개수

계절

F-

36.2 0.05

Mass

0.72

F

7.85

Cl

Mass

Cl-

 NO_3^-

□ 대기복사 평균자료

○ 직달일사 [단위: ₩/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	-	-	-	145.6	124.2	57.5	124.0	129.2	116.2	115.5	-
	2000	71.2	136.7	184.9	188.1	119.7	134.8	101.5	172.2	141.4	143.7	130.5	131.6	138.0
	2001	105.9	125.3	-	-	-	-	75.7	-	-	-	148.7	118.1	-
	2002	109.7	162.7	163.4	175.9	152.4	207.0	100.5	65.5	141.9	180.2	109.2	117.7	140.5
	2003	109.8	141.3	119.0	145.2	163.1	97.5	59.7	85.4	120.7	200.7	108.7	84.3	119.6
	2004	108.3	175.6	174.6	194.2	158.4	111.7	84.1	155.6	159.0	211.8	67.6	123.1	143.7
	2005	101.7	123.3	185.5	173.3	223.5	61.4	73.2	132.7	129.7	163.4	120.4	69.6	129.8
	2006	104.9	107.4	170.6	130.6	140.5	99.6	41.6	179.4	157.9	145.6	95.1	81.5	121.2
	2007	92.5	161.4	85.8	149.3	139.7	108.5	69.6	76.5	-	-	-	-	-
안면도	2008	116.6	155.8	167.9	146.9	150.0	111.9	95.2	179.3	-	-	124.2	128.3	137.6
	2009	150.6	106.9	193.7	201.7	-	176.3	118.4	159.1	130.0	157.4	69.6	83.3	140.6
	2010	107.1	115.9	110.4	169.0	174.0	161.9	146.3	171.0	-	-	-	75.3	-
	2011	127.0	160.0	238.9	252.2	-	174.0	114.3	98.9	194.4	170.5	114.7	115.4	160.0
	2012	137.1	183.4	175.4	198.1	191.2	189.6	177.5	152.7	173.3	189.1	124.6	111.4	167.0
	2013	107.7	147.6	165.7	197.7	202.3	187.2	84.7	-	-	-	-	-	-
	2014	-	-	159.6	155.8	212.8	150.7	111.3	85.9	186.7	187.9	102.2	73.7	142.7
	2015	120.1	103.4	204.2	145.9	229.8	-	128.6	147.7	195.5	153.3	52.5	104.6	144.1
	2016	74.4	149.8	175.5	135.1	207.9	131	118.4	181.4	132.6	-	-	-	-
	2008	3.0	-	-	-	-	51.2	-	-	-	-	76.1	71.4	-
	2009	53.7	71.5	109.1	177.1	206.0	126.5	71.6	136.8	142.2	169.5	72.7	50.7	115.6
	2010	59.7	77.8	85.3	132.7	134.2	90.8	65.8	132.9	130.0	122.1	111.7	65.2	100.7
	2011	42.6	111.4	174.9	194.6	125.6	34.6	104.8	-	-	-	93.2	53.1	-
고산	2012	50.2	62.7	119.3	162.1	150.1	97.7	111.6	168.1	161.6	177.8	92.8	50.6	117.1
	2013	69.4	107.1	135.1	-	-	75.7	98.3	170.4	171.0	174.8	99.3	83.0	118.4
	2014	121.1	98.1	135.5	159.6	191.1	77.2	70.3	75.3	116.6	202.4	132.7	61.3	120.1
	2015	81.5	94.3	141.2	130.2	188.4	111.1	91.2	131.9	173.3	194.2	53.9	58.8	120.8
	2016	30.7	92.8	113.6	124.2	159.1	85.4	127.7	173.9	94.0	73.0	91.9	85.6	104.3

○ 산란일사 [단위: ₩/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	75.1	85.2	97.4	115.7	121.3	136.1	171.8	97.5	70.4	55.9	42.3	97.2
	2000	47.8	68.7	87.5	105.3	126.3	130.1	130.0	93.0	77.9	68.4	49.3	46.2	85.9
	2001	52.1	63.9	82.8	107.3	107.0	122.3	120.6	102.5	-	65.3	50.1	43.2	83.4
	2002	49.6	60.7	83.3	96.4	98.4	100.5	126.8	102.8	95.9	66.4	50.4	42.3	81.1
	2003	50.9	63.7	98.2	95.9	122.0	118.5	115.5	96.3	88.4	57.0	44.1	45.2	83.0
	2004	53.2	61.2	88.8	95.2	100.0	131.6	97.9	102.7	77.2	55.9	63.5	41.6	80.7
	2005	54.5	62.4	80.4	100.3	102.3	129.3	122.2	98.0	84.1	63.0	56.6	43.8	83.1
	2006	50.5	65.2	86.5	110.3	114.2	135.8	107.8	111.3	88.4	68.2	53.4	47.0	86.6
	2007	50.3	60.4	84.4	109.0	114.2	122.9	127.0	128.0	-	-	-	43.3	-
인먼도	2008	48.3	64.7	87.0	112.0	114.7	127.4	108.2	110.5	-	-	51.4	35.4	86.0
	2009	37.8	56.5	83.9	99.9	-	108.0	116.7	95.1	80.0	69.2	54.6	45.6	77.0
	2010	51.4	53.1	80.8	95.2	107.8	121.7	114.6	88.6	-	-	69.5	62.2	84.5
	2011	47.5	58.9	66.0	83.7	99.2	105.0	86.3	97.9	75.5	60.2	48.8	39.2	72.4
	2012	38.0	54.3	66.6	83.8	118.0	121.3	93.0	91.8	77.1	57.7	45.0	39.5	73.8
	2013	48.9	57.2	95.3	81.9	99.6	119.9	104.1	-	-	22.6	23.6	-	-
	2014	37.2	-	76.6	103.4	113.5	143.0	125.6	108.0	79.6	51.2	47.2	45.7	84.6
	2015	42.3	66.8	79.3	95.3	103.3	127.9	109.6	108.6	77.6	68.0	45.3	40.5	80.4
	2016	57.2	57.8	83.5	102.0	100.6	130.5	118.6	108.8	95.9	-	-	-	-
	2008	19.9	-	-	-	-	94.2	-	-	-	-	45.1	44.7	-
	2009	46.7	67.6	88.0	91.7	94.9	110.5	111.8	102.6	87.7	76.9	56.5	44.7	81.6
	2010	54.2	58.5	71.3	92.2	111.8	117.7	123.7	99.6	91.3	77.7	67.5	45.2	84.2
	2011	50.5	67.5	84.4	94.6	109.1	110.3	117.9	-	-	-	53.0	42.8	-
고산	2012	57.7	63.0	75.2	88.1	122.6	126.0	99.7	96.2	91.9	68.3	57.8	43.8	82.5
	2013	51.2	56.0	91.4	-	-	117.9	123.2	106.0	78.3	73.5	60.5	45.9	80.4
	2014	54.9	70.8	76.9	90.4	111.1	129.8	113.2	108.5	89.8	57.6	53.1	49.8	83.8
	2015	50.8	58.6	89.6	93.0	107.2	99.7	121.8	103.2	73.4	63.4	51.6	44.4	79.7
	2016	48.4	68.0	86.4	99.0	100.6	112.4	99.4	87.3	84.0	69.1	52.4	44.1	79.3
※ "-"은 :	장비 수	느리, 전	험검 등	에 의	한 결	측 등	한 달	일평·	균 값	50%	미만으	.로 제	거한 ·	값임

○ 태양상향복사 [단위: ₩/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2000	-	-	25.2	48.3	41.5	39.7	34.6	39.6	31.6	27.7	19.8	16.5	32.5
	2001	23.7	20.4	-	-	-	-	28.3	-	-	-	24.5	22.0	-
	2002	17.8	26.3	34.1	40.8	34.2	45.4	34.3	25.6	36.6	33.2	19.7	18.5	30.5
	2003	28.8	23.9	30.4	34.6	41.7	32.9	25.7	26.3	31.3	35.3	19.2	16.2	28.9
	2004	28.5	31.2	42.3	40.4	36.2	36.5	27.2	39.3	35.5	37.2	18.9	19.1	32.7
	2005	23.6	28.8	38.7	40.7	45.6	29.9	30.9	34.6	32.4	31.0	24.1	-	32.8
	2006	-	-	35.7	33.6	40.4	36.5	-	38.8	31.8	-	-	-	-
아며ㄷ	2007	-	-	-	-	-	34.5	-	35.0	28.0	28.2	-	-	-
신신포	2008	-	28.5	35.9	35.5	-	-	-	41.7	-	-	22.3	21.4	-
	2009	23.1	21.2	35.5	41.8	-	43.1	35.2	37.6	33.2	32.6	16.5	22.5	31.1
	2010	33.7	21.7	26.1	35.8	40.3	42.2	37.7	35.2	-	-	25.4	24.5	32.3
	2011	28.5	27.4	39.9	43.6	-	37.0	27.6	30.0	39.0	32.5	20.5	18.7	31.3
	2012	24.4	32.9	33.5	40.1	46.6	44.5	35.8	33.6	33.7	33.1	21.3	28.9	34.0
	2013	27.5	30.5	39.4	39.5	42.3	44.5	29.5	52.5	58.6	-	-	-	-
	2014	-	-	34.6	38.7	48.1	42.5	33.3	28.4	35.9	32.9	21.4	21.9	33.8
	2015	20.8	23.7	39.4	35.5	49.5	47.5	34.8	39.8	38.8	30.8	13.0	15.3	32.4
	2016	25.4	25.5	37.3	36.5	46.8	41.3	35.4	42.7	36.3	-	-	20.0	34.7

○ 태양하향복사(전천일사) [단위: ₩/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	-	-	-	231.7	228.6	210.6	178.9	140.7	109.3	89.6	-
	2000	76.6	144.9	194.7	232.4	215.1	232.2	207.1	217.0	164.7	146.1	107.8	99.5	169.8
	2001	96.9	126.5	-	-	-	-	173.6	-	-	-	117.1	90.7	-
	2002	96.5	139.3	178.7	214.7	200.9	247.3	201.1	147.6	185.7	166.8	100.1	90.6	164.1
	2003	95.7	134.2	168.6	195.2	242.0	191.4	158.0	154.2	164.2	166.9	94.1	78.9	153.6
	2004	98.1	149.0	196.9	226.4	216.0	214.4	157.0	213.4	181.2	173.3	94.7	93.1	167.8
	2005	99.2	128.5	193.0	218.6	261.4	181.8	178.1	189.0	169.6	152.7	110.8	73.0	163.0
	2006	94.6	113.5	192.6	199.8	215.7	211.3	139.3	240.4	190.2	149.5	97.6	78.3	160.2
아머드	2007	85.6	125.0	142.7	204.6	213.1	203.6	180.4	180.7	134.0	149.3	-	-	161.9
친민포	2008	92.1	151.2	188.1	211.9	220.0	207.9	176.6	234.1	-	-	99.3	82.6	166.4
	2009	99.0	115.3	197.0	232.0	-	236.1	200.3	203.3	163.6	155.1	84.1	77.9	160.3
	2010	96.4	110.1	148.0	201.7	227.2	236.9	218.7	206.3	-	-	119.3	91.7	165.6
	2011	102.0	136.7	206.5	238.8	-	229.7	162.8	158.2	193.1	153.3	98.8	85.7	160.5
	2012	98.7	146.6	165.9	212.6	249.4	254.8	214.5	189.9	174.3	161.3	101.1	84.0	171.1
	2013	92.2	131.1	193.6	212.0	238.1	251.2	163.1	-	-	-	-	-	-
	2014	-	-	174.5	207.3	265.1	253.8	205.0	164.8	190.3	155.2	96.2	74.0	178.6
	2015	96.2	116.6	194.8	189.6	260.8	250.9	199.3	215.6	203.8	153.9	67.3	77.7	168.9
	2016	87.7	128.7	188.0	199.4	255.0	230.5	206.6	234.8	180.9	-	-	-	-
	2008	22.8	-	-	-	-	133.7	-	-	-	-	82.0	78.0	-
	2009	73.0	107.3	159.7	218.7	251.7	209.4	169.8	201.7	181.1	175.8	91.4	67.8	159.0
	2010	84.3	102.0	129.2	187.4	215.8	187.7	178.0	198.0	178.1	148.1	121.5	74.0	150.3
	2011	71.8	129.2	193.1	228.5	208.6	138.5	200.9	-	-	-	96.9	67.2	-
고산	2012	81.5	99.5	152.5	205.4	238.6	201.5	185.7	214.4	198.0	168.3	103.7	66.1	159.6
	2013	84.0	116.4	183.2	-	-	178.1	201.4	226.9	188.3	170.9	108.6	83.2	154.1
	2014	110.7	119.8	162.4	200.9	255.1	191.2	166.9	167.5	165.5	170.7	117.5	76.9	158.8
	2015	89.1	110.5	177.1	183.5	244.8	187.9	195.5	198.9	186.9	176.6	76.7	72.1	158.3
	2016	62.7	120.8	160.3	189.3	221.3	181.3	197.3	213.7	149.6	114.2	99.6	82.9	149.4

○ 지구상향복사 [단위: ₩/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	-	-	-	464.1	489.3	501.0	491.1	451.6	421.2	391.9	-
	2000	368.6	378.0	407.8	432.8	440.6	470.6	482.5	488.9	466.7	457.9	417.8	395.5	434.0
	2001	361.1	359.3	-	-	-	-	434.1	-	-	-	354.4	316.5	-
	2002	321.8	330.5	354.1	382.5	400.4	431.4	448.0	445.1	420.8	384.9	341.3	328.8	382.5
	2003	305.0	322.5	346.6	376.0	405.9	424.0	439.5	442.7	427.6	393.2	359.4	324.0	380.5
	2004	310.7	326.3	348.4	375.1	400.6	430.2	421.4	451.1	421.6	386.7	351.1	334.8	379.8
	2005	248.4	294.7	330.8	380.8	390.3	430.4	444.2	441.8	430.2	-	354.5	284.8	366.4
	2006	293.0	270.7	330.8	361.6	393.5	421.1	438.3	462.7	425.9	403.1	355.3	327.1	373.6
아며도	2007	317.3	324.5	344.1	355.4	387.7	427.3	439.5	454.4	422.3	388.3	365.8	-	384.2
	2008	301.3	306.5	353.9	383.3	405.9	439.2	452.9	444.0	-	-	346.5	320.5	375.4
	2009	292.6	311.5	314.7	359.6	-	433.0	445.1	443.2	410.1	386.6	333.1	304.9	366.8
	2010	295.9	292.1	332.7	348.2	394.8	419.2	425.3	410.7	-	-	278.0	255.2	345.2
	2011	247.7	264.4	236.8	260.6	-	336.1	429.3	447.9	423.8	386.2	368.9	308.1	337.3
	2012	281.5	278.1	329.1	362.0	415.7	445.6	453.5	460.5	422.6	370.4	304.4	279.2	366.9
	2013	285.3	299.4	334.2	363.5	406.9	430.6	417.2	497.7	361.8	-	-	-	-
	2014	-	-	349.5	372.6	400.1	426.9	439.7	428.8	413.2	384.5	347.4	300.6	386.3
	2015	309.4	320.8	342.9	371.3	375.5	377.0	417.2	441.9	417.7	378.6	355.7	327.2	369.6
	2016	313.2	319.1	340.1	375.3	397.2	413.4	447.3	462.0	434.6	-	-	325.6	382.8

○ 지구하향복사 [단위: ₩/m²]

	° 2	/ 월	0궐	9월	10월	11월	12월	연평균
1999	409.3	440.2	446.8	434.2	380.0	346.8	312.8	-
2000 311.0 308.6 338.0 365.9 392.0	422.3	441.7	440.1	405.3	384.7	342.2	318.1	372.5
2001 298.8 302.3	-	431.9	-	-	-	281.2	257.9	-
2002 264.2 257.3 284.0 317.4 348.1	366.1	410.5	415.1	362.9	316.4	284.2	277.5	325.3
2003 248.7 259.8 283.5 313.4 337.2	372.8	402.6	404.1	375.5	317.8	305.0	267.0	324.0
2004 252.2 258.6 275.6 300.9 341.3	377.2	390.8	398.5	367.0	310.1	288.1	266.2	318.9
2005 213.1 247.6 263.4 309.7 317.8	391.5	411.5	406.8	392.5	-	285.9	250.4	317.3
2006 243.3 235.8 258.8 301.9 335.7	367.4	413.7	405.0	356.9	338.1	302.3	272.9	319.3
2007 259.5 260.2 292.2 287.2 325.7	372.2	405.1	415.4	388.5	330.6	291.3	-	329.8
2008 245.2 234.6 278.1 311.5 341.3	388.9	416.3	382.8	-	-	284.4	267.1	315.0
2009 230.0 252.8 243.9 278.6 -	357.2	385.4	375.1	335.7	306.7	281.4	257.3	300.4
2010 247.1 246.0 275.6 271.6 316.9	342.5	363.6	354.7	-	-	217.6	212.4	284.8
2011 203.1 207.6 174.1 194.6 -	282.0	386.2	396.4	345.6	304.0	309.9	254.6	278.0
2012 230.0 217.2 263.8 290.4 327.0	353.6	391.3	401.2	353.6	295.9	252.6	234.6	300.9
2013 236.2 242.1 257.5 288.8 326.2	352.0	368.6	389.4	254.5	-	-	-	-
2014 266.3 283.3 301.1	341.4	375.2	369.5	325.5	300.8	283.6	249.2	309.6
2015 247.0 259.1 255.8 300.6 290.6	294.9	360.1	375.3	330.1	298.3	310.2	266.4	299.0
2016 255.4 248.3 257.8 302.9 311.6	337.0	386.5	378.8	351.2	-	-	270.0	310.0

○ 순복사 [단위: ₩/m²]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1999	-	-	-	-	-	132.2	141.8	124.5	99.0	52.0	31.0	8.0	-
	2000	16.9	50.9	79.9	108.8	117.5	138.3	140.1	136.4	81.0	53.7	25.4	15.4	80.4
	2001	19.9	44.7	-	-	-	-	124.4	-	-	-	24.0	14.4	-
	2002	20.6	38.2	73.3	107.1	113.6	134.8	129.3	94.2	90.6	62.8	20.0	17.5	75.2
	2003	9.7	47.3	74.9	99.2	133.0	110.3	98.1	90.1	83.0	55.1	20.9	5.7	68.9
	2004	11.3	48.1	78.5	109.0	119.6	125.2	100.2	122.5	88.5	56.1	14.1	10.2	73.6
	2005	31.6	42.9	81.3	105.0	138.7	106.4	108.9	111.3	87.7	61.4	14.8	2.4	74.4
	2006	18.4	44.5	83.1	98.9	115.6	119.9	89.6	142.2	86.1	54.7	18.9	7.4	73.3
	2007	11.1	36.2	60.7	101.1	110.0	114.6	112.1	107.9	70.6	53.8	15.3	-2.5	65.9
안면도	2008	14.5	40.2	73.4	99.6	115.8	125.2	110.9	136.4	-	-	23.5	11.7	75.1
	2009	19.3	39.6	93.0	115.0	-	129.5	118.6	115.6	70.4	50.8	19.9	7.3	70.8
	2010	12.0	42.0	64.1	95.5	122.4	136.9	137.6	125.4	-	-	36.3	24.8	79.7
	2011	27.9	54.0	105.7	132.1	-	140.7	104.7	96.1	95.6	48.4	26.3	14.3	76.9
	2012	22.2	51.0	69.1	106.7	130.3	136.1	132.8	115.3	86.5	61.1	28.3	9.5	79.1
	2013	13.4	42.1	79.2	100.8	125.2	145.8	107.0	124.2	81.4	-	-	-	-
	2014	-	-	74.2	98.9	141.3	148.3	129.0	97.3	95.1	52.5	21.2	5.9	86.4
	2015	17.8	37.2	78.8	97.6	145.2	145.2	127.5	128.5	95.3	56.9	19.1	8.3	79.8
	2016	11.8	39.1	81.9	106.5	142.0	141.8	132.2	136.3	-	-	-	-	-

□ 성층권 오존 평균 자료

○ 포항 오존전량 [단위: Dobson Unit (DU)]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	1994	-	335	352	334	336	325	285	282	289	275	261	268	304
	1995	297	330	339	323	327	323	279	272	273	273	292	317	304
	1996	336	350	346	352	346	301	286	278	286	283	269	301	311
	1997	326	320	318	324	327	320	291	275	284	285	288	297	305
	1998	328	345	338	343	321	336	292	287	281	284	-	281	312
	1999	296	336	297	349	358	319	300	284	281	309	315	333	315
	2000	323	350	354	379	355	335	306	294	294	274	265	290	318
	2001	364	342	389	365	384	354	-	305	293	284	315	306	336
	2002	321	337	359	353	354	362	297	279	292	291	309	311	322
고하	2003	345	333	344	319	320	318	-	275	271	274	253	278	303
포앙	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

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

○ 안면도 오존전량 [단위: Dobson Unit (DU)]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	2013	-	322	340	329	347	325	299	301	300	279	307	331	316
	2014	327	348	361	344	346	338	305	297	293	283	294	333	322
안면도	2015	329	379	381	361	342	339	308	304	307	297	306	317	331
	2016	346	370	357	350	331	326	312	299	293	271	295	306	321

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

2016	356	372	355	358 3	332	339	308 3	304 29.	2 27	5 29:	3 305	324
※ "-"은	장비	수리.	점검 등(에 의하	곀츸읔	을 나타	냄					
※ 과方(10101	7FO	김급 () 겨츠 () 리	이유명		 .томс		Dobsor	과츠	가이리	하사하	자리이
~ 글오(/인의	ᆹᆫ	걸득으도	친아어			시뇨글	DODSOI	친득	ᆹᅳ노	푄尦인	시도금

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	337
2016	356	372	355	358	332	339	308	304	292	275	293	305	324

○ 서울 오존전량 [단위: Dobson Unit (DU)]

4월

5월

6월 7월

8월

9월

10월 11월 12월 평균

연도 1월 2월 3월

○ 고산 오존전량 [단위: Dobson Unit (DU)]

지역	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균
	2011	285	331	342	342	316	318	286	281	285	279	275	289	302
	2012	281	280	311	335	330	321	303	294	304	281	291	297	302
7.11	2013	288	287	318	350	345	336	307	294	290	274	285	308	307
고산	2014	302	319	336	328	332	319	294	289	289	275	274	305	305
	2015	296	340	347	341	326	327	306	305	307	287	-	284	315
	2016	-	323	327	318	310	296	283	287	277	252	264	266	291
	Thu	~ _1	ור גד		· · 士· · · ·		÷1 F						기숙니 그	

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

□ 자외선A 일 누적값의 월평균 자료

○ 강릉 자외선A [단위: MJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	0.37	0.50	0.77	0.78	1.14	0.99	0.98	1.01	0.84	0.65	0.27	0.33	0.72
2016	0.41	0.54	0.64	0.91	1.13	1.04	0.89	1.04	0.64	0.47	0.40	0.33	0.70

○ 서울 자외선A [단위: MJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	0.71	0.81	1.10	1.00	0.89	0.81	0.89	0.60	0.31	0.31	0.74
2016	0.37	0.46	0.69	0.84	1.09	0.95	0.84	0.92	0.72	0.56	0.37	0.30	0.68

○ 울릉도 자외선A [단위: MJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.19	0.42	0.54	-	0.91	-	-	0.72	0.68	0.48	0.29	0.18	-
2013	0.26	0.33	-	0.66	0.89	0.82	0.84	0.85	0.61	0.42	0.29	-	0.60
2014	-	-	0.52	0.72	0.95	0.83	0.84	0.58	0.67	0.47	0.29	0.20	0.61
2015	0.20	0.34	0.57	0.66	0.96	0.78	0.83	0.78	0.64	0.66	0.29	0.24	0.58
2016	0.27	0.37	0.69	0.78	0.98	1.04	0.86	0.88	0.54	0.38	0.26	0.23	0.61

○ 안면도 자외선A [단위: MJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0.66	0.67	0.46	0.30	-
2008	0.38	0.60	0.76	0.89	1.03	1.05	0.94	1.15	0.88	0.64	0.43	0.33	0.76
2009	0.41	0.46	0.76	0.96	1.09	1.13	1.05	1.06	0.92	0.73	0.41	0.30	0.77
2010	0.37	0.45	0.60	0.74	0.99	1.08	1.04	0.91	0.79	0.63	0.44	0.34	0.70
2011	0.42	0.51	0.77	0.85	0.91	0.93	0.77	0.79	0.84	0.63	0.39	0.33	0.68
2012	0.37	0.56	0.65	0.85	1.03	1.13	1.01	0.88	0.78	0.65	0.38	0.32	0.72
2013	0.36	0.51	0.74	0.83	0.97	1.09	0.78	1.01	0.78	0.64	0.38	0.30	0.70
2014	0.36	0.49	0.67	0.81	1.08	1.13	1.00	0.79	0.82	-	0.40	0.31	0.72
2015	0.36	0.47	0.76	0.81	1.10	1.09	0.95	0.97	0.87	0.60	0.30	0.30	0.72
2016	0.34	0.47	0.69	0.80	1.05	1.03	0.94	0.99	0.72	0.50	0.37	0.30	0.68

○ 포항 자외선A [단위: MJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	-	-	-	-	-	-	0.78	0.83	-	0.65	0.37	0.36	-
2010	0.40	0.44	0.48	0.77	0.96	1.01	0.99	0.84	0.73	0.58	0.44	0.35	0.67
2011	0.45	0.45	0.74	0.80	-	0.99	0.94	0.76	0.69	0.59	0.36	0.32	0.64
2012	0.34	0.44	0.53	0.81	0.83	0.79	0.85	0.71	0.65	0.57	0.38	0.29	0.60
2013	0.34	0.44	0.59	0.74	0.81	0.82	0.83	0.81	0.61	0.45	0.38	0.28	0.59
2014	0.32	0.31	-	0.73	1.07	0.80	0.96	0.70	0.77	0.57	0.41	0.37	0.64
2015	0.37	0.47	0.75	0.72	1.10	0.91	0.93	0.92	0.75	0.64	0.31	0.30	0.68
2016	0.36	0.52	0.64	0.81	1.05	0.93	0.94	1.05	0.56	0.48	0.39	0.35	0.67

○ 목포 자외선A [단위: MJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	0.38	0.49	0.75	0.82	1.14	-	-	0.99	0.92	0.69	0.32	0.34	0.68
2016	0.38	0.52	0.77	0.89	1.11	0.97	1.03	1.12	0.74	0.53	0.43	0.34	0.74

○ 고산 자외선A [단위: MJ/m²]

_														
	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
	2012	0.29	0.38	0.56	0.79	0.96	0.88	0.87	0.87	0.74	0.62	0.37	0.24	0.63
	2013	0.29	0.41	0.64	0.74	0.94	0.79	0.88	0.93	0.71	0.59	0.36	0.26	0.63
	2014	0.33	0.38	0.53	0.68	0.86	0.96	0.85	0.83	0.82	0.74	0.48	0.32	0.65
	2015	0.36	0.46	0.73	0.83	1.13	0.94	1.02	0.96	0.86	0.74	0.36	0.30	0.72
_	2016	0.28	0.46	0.73	0.86	1.00	0.90	1.02	1.09	0.72	0.56	0.43	0.34	0.70
>	※ "-"은	장비	수리,	점검	등에 으	한 결=	측, 품절	실관리	등 한달	달 일	자료가	80% (미만으로	제거

한 값임

□ 자외선A 일 최댓값의 월평균 자료

○ 강릉 자외선A [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	20.19	26.26	34.73	35.61	46.91	44.00	45.91	47.73	41.94	30.83	15.88	19.05	34.09
2016	21.35	28.00	32.33	41.38	46.82	47.45	43.34	47.39	35.75	27.13	21.82	18.23	34.25

○ 서울 자외선A [단위: W/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	32.79	38.93	44.57	45.14	44.47	41.56	42.29	29.57	18.59	17.40	35.53
2016	19.46	23.45	32.41	38.76	46.50	45.85	41.59	45.76	37.04	29.21	20.42	17.12	33.13

○ 울릉도 자외선A [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	13.29	24.00	29.61	-	42.04	-	-	38.14	37.62	26.33	19.71	12.92	-
2013	16.73	20.48	-	34.87	39.03	38.74	41.43	38.74	31.50	25.60	18.22	-	30.53
2014	-	-	26.56	32.56	41.31	39.00	39.34	29.65	31.99	24.14	17.74	13.97	29.63
2015	14.38	21.01	27.54	31.20	39.42	37.31	37.07	35.94	31.49	32.84	17.63	15.69	28.46
2016	17.80	22.31	33.36	38.68	42.85	45.44	42.25	42.12	31.66	23.00	17.05	15.45	31.00

○ 안면도 자외선A [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	36.04	34.65	25.78	19.18	-
2008	20.99	30.07	35.31	41.11	45.59	50.06	47.16	51.53	43.56	33.01	24.21	20.48	36.92
2009	23.81	26.07	36.86	42.92	46.75	49.52	49.54	49.50	42.94	35.24	23.62	18.37	37.10
2010	21.15	24.07	30.81	36.89	44.20	46.57	48.50	45.01	39.44	32.82	23.76	20.13	34.45
2011	23.49	25.92	36.19	39.45	41.79	41.88	40.68	40.87	40.12	30.99	22.79	19.52	33.64
2012	20.32	29.25	30.74	40.00	44.35	46.90	48.06	44.36	38.87	32.49	22.97	18.89	34.77
2013	20.42	26.09	34.71	36.46	40.79	46.48	38.73	44.63	36.94	32.75	22.35	17.35	33.14
2014	19.68	24.90	31.73	37.88	44.99	48.78	45.85	39.08	39.62	-	22.79	18.41	33.97
2015	20.39	25.55	34.31	37.72	47.05	46.98	43.36	43.57	39.70	30.26	18.30	17.79	33.75
2016	19.65	23.98	32.52	37.27	45.83	43.52	42.44	44.42	35.14	26.68	20.02	16.88	32.36

○ 포항 자외선A [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2009	-	-	-	-	-	-	41.81	44.25	-	32.29	21.79	19.57	-
2010	21.94	23.65	26.60	37.39	43.12	45.70	45.80	45.18	37.21	32.89	23.64	19.05	33.51
2011	23.35	23.75	34.53	39.23	-	43.96	44.50	39.72	35.26	30.32	21.01	18.75	32.22
2012	18.48	23.03	26.81	36.59	39.71	37.98	39.68	38.27	33.31	29.10	20.88	16.23	30.01
2013	17.72	22.75	28.74	35.07	37.96	38.00	39.59	38.22	30.26	25.23	19.86	15.40	29.07
2014	17.73	18.73	-	35.29	44.37	38.11	46.07	37.03	37.96	28.83	22.19	20.38	31.52
2015	19.77	25.51	34.96	36.29	45.76	41.91	42.52	42.30	38.17	31.80	18.40	17.29	32.89
2016	19.21	26.35	31.62	36.83	45.34	42.36	44.00	46.32	29.86	27.46	20.71	19.36	32.45

○ 목포 자외선A [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	21.62	27.15	36.17	39.99	49.02	-	-	46.15	42.58	33.87	20.06	19.90	33.65
2016	21.72	27.86	36.57	40.36	50.27	44.03	46.39	49.23	38.24	31.10	24.41	20.19	35.86

○ 고산 자외선A [단위: ₩/m²]

-													
연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	19.69	22.80	28.38	36.29	43.37	41.92	42.18	43.60	37.01	31.26	22.05	16.75	32.11
2013	18.31	21.82	31.03	36.64	41.33	38.64	38.88	43.57	36.11	30.86	21.67	17.25	31.34
2014	19.51	20.81	26.59	33.53	38.66	47.13	41.19	44.07	41.30	35.78	27.84	21.76	33.18
2015	21.03	26.62	36.90	41.33	48.98	44.94	46.54	46.85	41.92	36.24	21.25	19.90	36.04
2016	19.73	27.31	35.18	40.71	45.78	43.86	45.96	51.41	38.36	32.07	25.75	21.49	35.63

한 값임
□ 자외선B (홍반자외선) 일 누적값의 월평균 자료

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	0.56	1.02	1.46	2.26	2.49	2.68	3.52	-	2.48	1.57	0.87	0.56	1.77
2002	0.59	1.04	1.50	2.59	3.20	3.29	-	2.53	2.13	1.39	0.74	0.41	1.77
2003	0.52	0.81	-	2.09	2.27	-	2.50	-	1.72	1.43	0.67	-	-
2004	0.56	0.97	1.61	2.28	2.76	3.09	-	-	-	1.64	0.82	0.51	-
2005	0.58	0.88	1.49	2.21	2.74	2.84	3.07	3.07	2.00	1.47	0.86	0.53	1.81
2006	0.54	1.02	1.40	1.69	2.55	2.57	2.00	3.01	2.29	1.20	0.68	-	1.72
2007	0.56	0.85	1.27	1.55	2.66	2.88	2.59	2.74	1.46	1.38	0.84	0.52	1.61
2008	0.59	1.03	1.26	2.03	2.63	2.69	3.13	3.13	2.30	1.43	0.81	0.59	1.80
2009	0.68	0.97	1.43	2.49	2.82	-	2.80	2.71	2.24	1.45	0.56	0.41	1.69
2010	0.50	0.67	0.96	1.77	2.38	3.09	2.79	2.25	1.96	1.31	0.75	0.44	1.57
2011	0.58	0.81	1.39	1.81	2.01	2.80	2.23	2.67	1.83	1.31	0.58	0.45	1.54
2012	0.52	0.96	1.21	1.96	2.17	2.25	2.75	1.91	1.93	1.41	0.70	0.40	1.51
2013	0.50	0.91	1.47	1.79	2.49	2.72	2.48	2.88	1.75	1.29	0.69	0.42	1.62
2014	0.48	0.70	1.30	1.61	2.40	2.21	3.17	2.14	2.14	1.30	0.67	0.60	1.56
2015	0.69	0.97	1.78	2.16	3.38	3.02	3.33	3.14	2.40	1.61	0.54	0.52	1.96
2016	0.61	0.97	1.48	2.43	3.18	2.83	2.53	2.73	1.63	1.20	0.76	0.52	1.74

○ 강릉 자외선B [단위: KJ/m²]

○ 서울 자외선B [단위: KJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	1.68	2.30	3.23	2.88	2.85	2.43	2.40	1.45	0.64	0.51	2.04
2016	0.57	0.82	1.59	2.19	3.00	2.38	2.21	2.16	1.72	1.38	0.74	0.50	1.61

○ 울릉도 자외선B [단위: KJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.39	1.04	1.33	2.43	-	2.77	3.13	2.87	2.37	1.54	0.64	0.32	1.71
2013	0.51	0.77	1.46	1.87	2.91	2.67	2.85	2.66	2.09	1.37	0.70	0.32	1.68
2014	-	-	1.42	2.17	3.01	2.73	2.99	2.13	2.25	1.55	0.78	0.39	1.94
2015	0.44	0.78	1.56	2.18	3.48	2.91	3.48	3.05	2.10	1.68	0.62	0.44	1.89
2016	0.47	0.74	1.76	2.34	3.26	3.70	3.40	3.44	1.94	1.26	0.61	0.46	1.95

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2005	0.65	1.04	1.95	2.61	3.68	3.25	3.41	3.65	3.12	1.98	1.02	0.58	2.25
2006	0.71	1.29	1.90	2.23	3.20	2.97	2.93	4.13	2.52	1.60	0.80	0.58	2.07
2007	0.64	1.13	1.35	2.14	2.82	3.20	2.99	3.11	2.04	1.73	0.95	0.48	1.88
2008	0.67	1.13	1.57	2.20	2.78	2.91	3.04	3.41	2.36	1.44	0.78	0.51	1.90
2009	0.62	0.90	1.50	2.20	2.62	2.91	2.91	3.17	2.53	1.58	0.75	0.48	1.85
2010	0.61	0.77	1.21	1.94	2.57	2.77	3.19	-	-	1.58	-	-	-
2011	-	-	-	2.30	2.84	3.01	2.77	3.02	3.04	1.83	1.00	0.62	-
2012	0.71	1.38	1.74	2.70	3.21	3.87	4.11	3.22	2.53	1.99	0.88	0.60	2.25
2013	0.73	1.25	2.09	2.42	2.99	3.81	2.89	3.08	2.30	1.83	0.84	0.50	2.06
2014	0.65	1.03	1.57	2.09	2.77	2.88	2.76	2.57	2.72	1.83	0.90	0.52	1.86
2015	0.69	0.90	1.86	2.33	3.53	3.58	3.40	3.33	2.75	1.67	0.68	0.56	2.11
2016	0.61	1.01	1.94	2.52	3.69	3.77	3.62	3.51	2.55	1.74	0.94	0.64	2.21

○ 안면도 자외선B [단위: KJ/m²]

○ 포항 자외선B [단위: KJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	1.77	2.48	3.25	3.53	3.17	3.21	2.39	-	0.91	0.69	-
2000	-	-	1.88	-	2.82	3.05	3.65	3.22	2.34	1.73	1.03	0.75	-
2001	0.63	1.22	1.62	2.66	2.77	-	4.22	3.53	2.77	1.55	1.02	0.75	2.07
2002	0.72	1.30	1.85	-	-	3.38	3.31	2.84	2.43	1.66	1.03	0.60	1.91
2003	0.69	0.96	1.48	2.30	2.47	2.60	2.41	2.83	2.21	1.82	0.92	0.78	1.79
2004	0.79	1.32	1.93	2.67	2.75	3.31	3.52	2.97	2.15	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	3.41	2.97	3.07	2.10	1.51	1.03	0.76	-
2006	0.73	1.36	1.81	2.10	2.95	3.17	2.67	3.66	2.47	1.86	0.84	0.65	2.02
2007	0.68	1.07	1.58	2.23	3.05	3.31	2.97	3.31	2.03	1.68	1.11	0.62	1.97
2008	0.72	-	1.66	2.55	3.04	2.80	3.74	3.64	2.55	1.82	0.93	0.67	2.19
2009	0.73	1.10	1.70	2.43	3.00	-	2.82	2.82	2.55	1.81	0.93	-	1.99
2010	0.71	0.84	0.99	1.83	2.22	2.72	3.17	3.02	2.24	1.54	0.89	0.55	1.73
2011	0.76	0.81	1.55	2.00	-	3.09	3.35	3.21	2.84	2.09	0.99	0.82	1.96
2012	0.85	1.51	1.82	-	3.47	3.76	3.77	3.16	2.73	2.27	1.19	0.74	2.30
2013	0.96	1.53	2.23	2.80	3.21	3.33	3.18	2.87	2.14	1.54	1.09	0.68	2.13
2014	0.82	0.92	1.53	2.10	3.04	2.48	3.19	2.39	2.30	1.50	0.90	0.57	1.81
2015	0.65	0.89	1.60	2.00	3.26	2.68	3.10	2.96	2.25	1.71	0.65	0.53	1.86
2016	0.61	0.99	1.53	2.22	3.14	2.85	3.13	3.28	1.67	1.42	0.86	0.67	1.86

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	2.84	1.62	1.01	0.65	-
2002	0.72	1.24	1.62	2.25	-	2.82	3.08	2.80	2.93	1.55	2.93	0.60	2.05
2003	0.67	0.99	1.57	2.11	2.52	2.62	2.21	2.71	2.47	1.74	0.93	0.69	1.77
2004	0.78	-	1.84	2.36	2.50	2.76	3.43	3.36	2.17	1.87	0.98	0.64	2.06
2005	0.70	1.07	1.78	2.49	3.01	2.82	2.96	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.94	0.66	-
2007	0.71	1.23	1.71	2.53	3.04	3.06	3.48	3.35	2.22	2.09	1.21	0.63	2.11
2008	0.79	1.41	1.96	2.91	3.20	3.03	3.56	3.65	2.53	1.84	1.01	0.68	2.21
2009	0.81	1.26	1.99	2.66	3.38	2.99	2.83	2.92	2.70	1.67	0.94	0.61	2.06
2010	0.73	0.86	1.22	2.01	2.61	2.40	2.96	-	2.62	1.61	0.92	0.65	1.69
2011	0.85	1.06	1.80	2.39	2.60	2.26	2.86	1.94	2.09	1.51	0.76	0.56	1.72
2012	0.69	1.09	1.47	2.01	2.36	2.21	1.93	2.12	1.76	1.33	0.76	-	1.61
2013	-	-	-	1.71	2.10	2.12	2.36	-	1.68	1.35	0.74	0.50	-
2014	0.68	1.02	1.57	2.31	3.24	-	-	-	-	-	-	0.78	-
2015	0.96	1.25	2.15	2.63	4.20	-	-	3.46	2.96	2.16	0.86	0.79	2.14
2016	0.83	1.26	2.29	2.90	3.74	3.12	3.44	3.31	1.98	1.44	0.99	0.69	2.17

○ 목포 자외선B [단위: KJ/m²]

○ 고산 자외선B [단위: KJ/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2011	-	-	1.89	2.73	3.06	-	-	-	2.48	1.62	0.93	0.53	-
2012	0.80	1.13	1.80	2.52	3.24	3.28	3.64	3.81	2.82	2.31	1.10	0.64	2.26
2013	0.81	1.41	2.23	2.71	3.41	3.09	3.68	3.52	2.72	2.21	1.09	0.66	2.30
2014	0.87	1.16	1.64	2.59	3.31	3.09	3.34	2.97	2.74	2.09	1.15	0.60	2.13
2015	0.71	0.95	1.74	2.30	3.63	3.01	3.62	3.28	2.62	2.12	0.85	0.66	2.12
2016	0.57	1.01	1.93	2.58	3.28	3.03	3.72	3.75	2.42	1.65	1.05	0.78	2.15

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

□ 자외선B (홍반자외선) 일 최댓값의 월평균 자료

○ 강릉 자외선B [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	0.037	0.064	0.088	0.126	0.137	0.152	0.210	-	0.154	0.104	0.055	0.037	0.106
2002	0.039	0.065	0.090	0.142	0.170	0.180	-	0.158	0.131	0.086	0.047	0.029	0.103
2003	0.035	0.051	-	0.125	0.126	-	0.160	-	0.115	0.086	0.045	-	-
2004	0.035	0.059	0.092	0.121	0.154	0.170	-	-	-	0.102	0.052	0.034	-
2005	0.037	0.055	0.089	0.121	0.148	0.158	0.169	0.180	0.124	0.095	0.056	0.034	0.105
2006	0.036	0.064	0.082	0.101	0.146	0.143	0.131	0.182	0.137	0.081	0.045	-	0.104
2007	0.037	0.055	0.080	0.103	0.149	0.159	0.154	0.171	0.099	0.097	0.053	0.034	0.099
2008	0.039	0.065	0.084	0.119	0.144	0.154	0.180	0.185	0.141	0.091	0.054	0.040	0.108
2009	0.044	0.067	0.091	0.139	0.160	-	0.163	0.158	0.136	0.089	0.037	0.028	0.101
2010	0.032	0.042	0.064	0.102	0.130	0.155	0.160	0.144	0.124	0.087	0.046	0.029	0.093
2011	0.037	0.051	0.084	0.104	0.109	0.147	0.136	0.156	0.114	0.080	0.040	0.030	0.091
2012	0.035	0.059	0.074	0.109	0.118	0.131	0.153	0.119	0.121	0.087	0.046	0.028	0.090
2013	0.033	0.059	0.084	0.106	0.138	0.154	0.153	0.169	0.113	0.088	0.047	0.027	0.098
2014	0.033	0.048	0.082	0.096	0.143	0.131	0.183	0.132	0.131	0.080	0.043	0.039	0.095
2015	0.044	0.061	0.098	0.121	0.173	0.162	0.189	0.177	0.146	0.093	0.038	0.037	0.112
2016	0.039	0.061	0.091	0.137	0.163	0.160	0.151	0.150	0.108	0.079	0.050	0.035	0.102

○ 서울 자외선B [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2015	-	-	0.093	0.132	0.162	0.162	0.171	0.146	0.139	0.088	0.045	0.034	0.117
2016	0.037	0.051	0.093	0.124	0.155	0.140	0.132	0.138	0.104	0.087	0.048	0.034	0.095

○ 울릉도 자외선B [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2012	0.030	0.070	0.094	0.134	-	0.161	0.176	0.171	0.154	0.098	0.051	0.027	0.106
2013	0.039	0.056	0.093	0.117	0.151	0.154	0.167	0.153	0.128	0.095	0.052	0.028	0.103
2014	-	-	0.087	0.120	0.163	0.153	0.166	0.131	0.131	0.095	0.056	0.033	0.113
2015	0.036	0.057	0.093	0.123	0.172	0.167	0.186	0.168	0.122	0.099	0.044	0.033	0.108
2016	0.037	0.052	0.105	0.145	0.180	0.199	0.202	0.198	0.137	0.090	0.048	0.035	0.119

○ 안면도 자외선B [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2005	0.044	0.063	0.113	0.147	0.196	0.182	0.192	0.212	0.179	0.121	0.068	0.041	0.130
2006	0.049	0.081	0.109	0.129	0.171	0.177	0.190	0.216	0.144	0.096	0.056	0.040	0.122
2007	0.043	0.074	0.090	0.122	0.152	0.172	0.174	0.196	0.131	0.108	0.061	0.036	0.113
2008	0.044	0.069	0.092	0.126	0.147	0.168	0.181	0.190	0.143	0.091	0.052	0.037	0.112
2009	0.044	0.062	0.091	0.122	0.143	0.159	0.171	0.184	0.142	0.094	0.053	0.033	0.108
2010	0.041	0.051	0.076	0.119	0.143	0.149	0.182	-	-	0.099	-	-	-
2011	-	-	-	0.132	0.162	0.168	0.178	0.192	0.175	0.114	0.068	0.044	-
2012	0.048	0.088	0.104	0.152	0.182	0.204	0.234	0.191	0.156	0.120	0.064	0.043	0.132
2013	0.051	0.080	0.123	0.136	0.165	0.208	0.174	0.168	0.133	0.110	0.057	0.035	0.120
2014	0.042	0.064	0.091	0.117	0.140	0.148	0.156	0.157	0.154	0.111	0.062	0.037	0.107
2015	0.046	0.061	0.102	0.132	0.189	0.191	0.187	0.179	0.154	0.101	0.049	0.039	0.119
2016	0.041	0.062	0.111	0.141	0.198	0.194	0.200	0.196	0.150	0.108	0.061	0.043	0.125

○ 포항 자외선B [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
1999	-	-	0.109	0.140	0.166	0.192	0.192	0.196	0.143	-	0.060	0.044	-
2000	-	-	0.114	-	0.159	0.164	0.215	0.197	0.145	0.108	0.069	0.049	-
2001	0.041	0.074	0.096	0.143	0.147	-	0.233	0.205	0.167	0.100	0.064	0.049	0.120
2002	0.046	0.078	0.107	-	-	0.176	0.189	0.171	0.149	0.100	0.064	0.041	0.112
2003	0.045	0.061	0.095	0.132	0.134	0.141	0.150	0.176	0.142	0.108	0.059	0.049	0.108
2004	0.050	0.080	0.111	0.150	0.155	0.177	0.199	0.178	0.138	-	-	-	-
2005	-	-	-	-	-	0.184	0.163	0.178	0.129	0.097	0.062	0.046	-
2006	0.048	0.083	0.106	0.123	0.170	0.170	0.167	0.208	0.156	0.113	0.056	0.043	0.120
2007	0.046	0.069	0.098	0.131	0.164	0.185	0.172	0.194	0.133	0.112	0.069	0.042	0.118
2008	0.050	-	0.102	0.139	0.168	0.161	0.207	0.211	0.155	0.109	0.063	0.047	0.128
2009	0.049	0.075	0.105	0.140	0.157	-	0.179	0.183	0.151	0.116	0.065	-	0.122
2010	0.046	0.054	0.068	0.106	0.131	0.152	0.183	0.177	0.138	0.101	0.055	0.036	0.104
2011	0.048	0.053	0.091	0.121	-	0.169	0.193	0.198	0.174	0.131	0.071	0.056	0.119
2012	0.058	0.096	0.115	-	0.203	0.214	0.214	0.202	0.165	0.138	0.079	0.051	0.140
2013	0.061	0.096	0.133	0.158	0.170	0.185	0.180	0.164	0.126	0.105	0.070	0.045	0.124
2014	0.054	0.067	0.095	0.119	0.161	0.142	0.188	0.157	0.140	0.096	0.060	0.040	0.110
2015	0.043	0.059	0.095	0.123	0.168	0.152	0.171	0.164	0.136	0.102	0.046	0.037	0.108
2016	0.039	0.062	0.093	0.123	0.165	0.157	0.176	0.175	0.107	0.095	0.054	0.046	0.108

○ 목포 자외선B [단위: ₩/m²]

연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	0.164	0.102	0.065	0.046	-
2002	0.050	0.077	0.097	0.128	-	0.153	0.181	0.171	0.152	0.097	0.152	0.042	0.118
2003	0.045	0.064	0.096	0.122	0.141	0.148	0.142	0.164	0.145	0.104	0.064	0.048	0.107
2004	0.052	-	0.107	0.132	0.138	0.153	0.192	0.195	0.140	0.110	0.064	0.043	0.121
2005	0.047	0.070	0.106	0.132	0.156	0.153	0.169	-	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.064	0.046	-
2007	0.049	0.078	0.106	0.143	0.176	0.181	0.205	0.217	0.144	0.130	0.080	0.049	0.130
2008	0.054	0.090	0.114	0.163	0.173	0.178	0.213	0.212	0.156	0.115	0.071	0.051	0.133
2009	0.059	0.084	0.121	0.149	0.176	0.169	0.179	0.188	0.158	0.112	0.066	0.043	0.125
2010	0.050	0.059	0.078	0.121	0.140	0.144	0.176	-	0.157	0.108	0.063	0.046	0.104
2011	0.059	0.067	0.111	0.136	0.148	0.141	0.164	0.123	0.120	0.088	0.052	0.040	0.104
2012	0.047	0.071	0.085	0.111	0.120	0.116	0.126	0.128	0.109	0.082	0.054	-	0.095
2013	-	-	-	0.100	0.113	0.115	0.141	-	0.104	0.082	0.051	0.035	-
2014	0.045	0.067	0.098	0.132	0.169	-	-	-	-	-	-	0.057	-
2015	0.065	0.082	0.127	0.158	0.218	-	-	0.190	0.163	0.126	0.061	0.056	0.125
2016	0.056	0.081	0.132	0.157	0.203	0.169	0.184	0.176	0.119	0.097	0.064	0.046	0.124

○ 고산 자외선B [단위: ₩/m²]

-														
	연	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	평균
	2011	-	-	0.118	0.149	0.174	-	-	-	0.142	0.104	0.068	0.042	-
	2012	0.061	0.083	0.109	0.140	0.177	0.190	0.212	0.228	0.172	0.143	0.078	0.051	0.137
	2013	0.062	0.091	0.137	0.164	0.193	0.183	0.200	0.199	0.165	0.138	0.078	0.051	0.138
	2014	0.062	0.074	0.100	0.150	0.178	0.185	0.195	0.191	0.166	0.128	0.079	0.049	0.130
	2015	0.053	0.069	0.112	0.145	0.192	0.176	0.204	0.194	0.157	0.126	0.060	0.051	0.128
	2016	0.046	0.072	0.114	0.150	0.184	0.179	0.205	0.216	0.153	0.112	0.073	0.057	0.130
ī														

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

□ 총대기침적 관측자료

○ 안면도

dr	_ 개	2	낭수량	рН	EC	F⁻	Cl-	NO_3^-	SO4 ²⁻	Na⁺	${\sf NH_4}^+$	K^{*}	Mg ²⁺	Ca ²⁺
연도	두 수	(1	mm)		(µS/cm)					(µeq/L)				
199	7 22	6	02.7	4.76	21.6	5.2	61.3	16.8	43.2	68.9	28.0	3.8	11.0	15.9
199	8 31	6	97.8	4.90	25.7	2.9	71.5	22.2	58.6	64.8	36.5	4.1	17.1	20.3
1999 45		10)45.1	4.99	20.0	1.0	63.9	18.0	33.4	62.7	19.9	2.9	14.0	17.0
200	0 20	2	07.8	4.56	28.5	0.5	54.8	33.8	66.3	54.5	34.0	3.8	16.0	31.1
200	1 23	2	68.5	4.70	18.4	1.1	23.9	22.0	48.6	27.1	38.5	2.0	6.4	16.5
200	2 21	3	08.0	4.62	20.6	0.6	21.4	31.0	45.1	29.5	38.8	2.0	5.3	13.7
200	3 33	2	68.0	4.41	27.8	4.6	30.3	34.0	61.7	29.8	41.3	2.2	9.3	19.8
200	4 53	9	44.0	4.71	20.0	1.0	39.9	26.3	48.6	37.6	27.2	2.3	10.1	16.7
200	5 53	8	88.5	4.57	34.0	2.0	72.4	46.6	55.8	63.5	35.4	4.2	17.5	25.9
200	6 48	5	23.5	4.78	49.3	2.2	144.9	54.8	106.9	126.1	57.7	8.1	35.6	65.0
200	7 65	9	22.0	4.42	42.0	3.4	61.0	46.3	92.0	54.2	52.6	3.9	15.7	27.5
200	8 58	5	46.5	4.36	45.9	1.4	85.1	47.7	78.8	74.6	44.7	4.5	20.1	27.2
200	9 47	6	52.5	4.63	34.7	2.1	98.6	39.1	61.8	84.2	39.8	4.3	21.5	22.9
201	0 76	12	257.5	4.70	24.9	1.1	45.4	29.2	47.7	39.5	34.8	2.3	11.2	16.4
201	1 64	9	28.0	4.53	36.0	1.5	59.8	46.7	73.3	51.9	63.7	3.2	16.5	30.2
201	2 66	11	L36.5	4.73	23.1	0.6	63.0	21.7	38.4	54.6	25.2	1.6	14.8	14.4
201	3 67	9	48.0	4.57	31.4	1.8	68.8	35.2	58.1	57.9	45.6	3.0	15.5	21.8
201	4 72	6	90.5	4.65	26.7	1.2	52.5	35.7	50.8	44.8	50.4	2.7	12.8	17.9
201	5 72	6	43.0	4.62	35.7	1.3	102.5	42.9	61.4	86.3	54.9	3.4	21.5	20.8
201	6 57	6	38.0	4.90	20.2	0.9	48.4	28.8	38.6	40.1	40.9	2.5	11.6	15.7
연평	!균	7	05.8	4.64	29.2	1.7	64.7	33.6	57.0	58.0	39.7	3.3	15.3	22.1
					FC	F ⁻	Cl ⁻	NO₃⁻	SQ4 ²⁻	Na^+	NH₄⁺	K ⁺	Ma ²⁺	Ca ²⁺
계절	기간	-	개수	рН	(µS/cm)					(µeq/L)				
	2006~2	015	111	4.36	75.0	2.8	241.9	84.7	118.7	211.1	69.9	9.4	54.5	55.4
겨울	2016		21	4.42	85.6	1.8	341.3	75.7	128.6	290.2	100.4	8.8	64.6	34.7
	2006~20	015	138	4.71	33.4	2.3	52.8	49.3	78.7	47.0	52.7	4.1	17.4	53.5
몸	2016		14	5.10	13.3	0.5	36.3	13.9	23.1	31.6	18.8	1.3	9.0	11.4
~ =	2006~20	015	223	4.61	26.7	1.3	44.0	28.2	53.3	37.2	43.5	2.3	10.2	12.0
여름	2016		14	4.82	23.1	1.4	47.8	40.6	50.5	37.1	62.3	2.2	11.7	18.1
9 15	2006~20	015	158	4.55	36.9	1.5	109.6	38.9	58.6	94.6	34.2	3.6	23.8	20.3
가들	2016		12	4.95	14.1	0.7	28.4	17.3	22.1	23.6	22.1	3.2	5.9	8.1

연도	기소 -	강수량	рН	EC	F	Cl	NO ₃ ⁻	SO4 ²⁻	Na⁺	NH_4^+	K^{*}	Mg^{2+}	Ca ²⁺
연도	- 11-	(mm)		(µS/cm)					(µeq/L)				
1998	35	256.6	5.48	19.6	0.3	75.9	17.4	39.9	64.4	19.7	3.4	18.0	17.6
1999	9 27	634.5	5.39	29.8	0.7	116.7	22.0	43.2	119.2	20.5	6.6	32.8	28.5
200) 12	133.4	4.60	26.1	0.5	69.9	25.2	48.2	69.9	19.7	3.9	23.1	18.5
2003	1 18	376.0	4.82	20.8	0.3	84.7	11.8	41.4	75.6	20.2	3.2	16.0	8.8
2002	2 24	424.6	4.79	21.5	0.0	64.0	23.7	41.0	78.8	18.5	2.7	17.4	14.7
2003	3 32	470.0	4.59	32.0	3.0	103.8	26.0	63.5	100.9	36.1	4.0	26.4	17.4
2004	4 31	643.9	4.66	25.3	0.9	83.3	23.1	46.1	78.3	16.7	3.9	19.5	15.5
200	5 36	588.5	4.66	31.5	1.1	91.6	33.4	47.8	80.1	17.0	4.9	24.3	21.1
200	5 36	560.9	4.82	34.8	1.7	114.8	28.3	66.9	97.5	18.8	4.8	28.3	40.8
200	7 37	550.2	4.66	28.5	1.8	65.6	23.6	54.6	57.0	24.2	2.9	14.6	17.5
2008	3 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	9 40	788.7	4.77	24.1	1.1	64.9	21.9	41.4	56.7	17.4	3.4	14.5	14.5
2010) 47	753.2	4.94	55.5	1.2	274.7	42.6	70.0	250.5	23.2	12.7	60.2	41.7
201	1 38	560.6	4.55	32.8	0.6	93.2	35.1	43.8	84.4	21.7	5.0	22.2	21.6
2012	2 62	779.0	4.68	24.0	0.8	55.9	24.2	40.2	47.8	23.0	2.0	13.7	14.7
201	3 71	791.0	4.66	35.4	1.1	128.4	29.6	53.7	110.8	28.7	3.7	27.0	20.0
2014	4 95	1210.5	4.84	22.9	1.1	78.3	21.9	38.2	67.5	21.5	2.6	17.3	18.1
201	5 86	1360.0	5.00	15.7	0.6	45.9	18.1	28.7	39.1	20.3	1.7	9.2	9.5
201	5 94	1154.5	5.08	18.3	0.3	69.9	16.4	29.0	60.6	18.6	2.0	15.0	11.7
연평	æ	639.1	4.78	27.3	0.9	92.0	24.3	44.5	83.0	21.1	3.9	21.2	18.7
				EC	F ⁻	Cl	NO ₃ ⁻	SO4 ²⁻	Na^+	NH_4^+	K^{*}	Ma ²⁺	Ca ²⁺
계절	기간	개수	рН	(µS/cm)					(µeq/L)				
	2006~201	.5 131	4.59	56.8	1.1	241.4	41.8	79.6	216.2	26.1	7.1	52.1	36.6
겨울	2016	25	4.90	47.0	0.6	244.3	23.1	57.8	209.3	20.7	5.2	43.3	19.4
	2006~201	.5 142	4.78	26.8	1.1	78.9	25.2	50.1	67.9	24.8	4.1	18.7	26.4
봄	2016	26	5.21	13.6	0.3	42.8	15.9	29.9	36.7	20.3	0.9	9.5	11.3
	2006~201	.5 162	4.81	17.8	1.1	36.3	19.5	29.9	31.5	20.0	2.4	8.7	9.3
여름	2016	17	5.19	8.7	0.3	18.1	12.0	14.8	15.2	12.0	2.6	5.1	6.2
71 0	2006~201	.5 119	4.77	31.0	0.6	118.2	26.4	42.4	104.4	16.9	4.2	24.9	15.9
가물	2016	31	5.05	13.6	0.3	37.0	14.9	21.0	32.9	18.9	1.2	9.4	9.6

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

а –	ᆀᇫ	깅) 수량	рН	EC	F-	Cl	NO_3^-	SO4 ²⁻	Na⁺	${\sf NH_4}^+$	K^{*}	Mg^{2+}	Ca ²⁺
연도	개주-	(r	nm)		(µS/cm)					(µeq/L)				
1997	/ 13	3	85.9	4.93	37.0	1.6	191.7	20.4	51.2	165.3	20.6	11.1	35.3	32.4
1998	8 17	5	67.0	5.05	32.3	0.8	140.9	20.7	56.9	112.3	21.3	8.6	27.0	25.3
1999	56	10	69.3	5.06	45.5	1.2	206.0	28.1	65.0	192.3	15.4	12.6	41.4	33.5
2000	23	3	79.3	4.44	52.8	0.1	161.1	50.4	99.8	162.0	37.9	10.1	40.1	52.2
2001	. 14	2	31.7	4.74	36.2	0.2	154.9	23.0	65.9	159.6	25.5	10.7	32.2	32.6
2002	9	3	33.0	4.73	24.0	0.0	71.1	26.4	53.5	78.4	30.2	5.9	17.0	15.3
2003	8 15	4	19.3	4.81	24.5	0.7	83.8	22.1	53.1	75.7	25.9	5.2	25.5	27.7
2004	29	6	56.2	5.00	35.5	0.7	156.4	25.3	71.7	139.9	32.4	11.6	33.2	32.6
2005	29	4	19.4	5.23	48.8	1.0	226.4	51.6	56.8	160.5	19.4	45.4	40.5	85.3
2006	67	12	239.7	4.99	44.2	1.2	193.1	28.3	74.5	148.1	23.9	31.1	36.6	41.8
2007	′ 54	8	77.7	4.59	50.4	2.4	159.6	46.6	87.0	114.6	44.4	38.8	29.4	38.0
2008	8 71	10)32.8	4.62	41.7	0.8	147.6	29.1	63.9	128.4	25.9	14.1	27.1	23.3
2009	9 49	11	.13.8	5.15	45.7	1.1	223.2	23.7	63.1	157.7	22.7	49.9	37.0	38.5
2010	64	11	.40.1	4.79	53.9	0.8	248.9	28.6	71.2	183.7	27.3	52.3	44.2	35.0
2011	. 66	12	211.0	4.83	59.1	1.0	272.5	31.3	76.7	203.4	39.0	58.6	46.3	38.4
2012	83	14	19.9	4.38	72.2	0.9	292.2	44.0	95.3	256.0	36.3	9.2	61.0	36.2
2013	56	9	28.6	4.85	65.1	1.5	262.4	52.9	96.5	232.9	43.1	11.8	60.4	103.8
2014	86	13	890.9	4.68	58.2	1.2	270.6	43.1	83.1	239.5	36.7	9.5	57.3	38.7
2015	5 72	8	62.5	4.81	54.2	0.7	272.7	27.5	74.5	240.9	24.2	9.2	51.5	20.4
2016	5 95	14	10.0	4.81	49.9	0.7	244.7	27.2	67.7	220.0	27.9	7.4	50.4	25.0
연평균	₽	5	97.9	4.76	50.3	1.0	218.7	33.2	74.0	183	29.8	22.7	43.0	38.4
					EC	F	Cl	NO ₃ ⁻	SO42-	Na⁺	NH_4^+	K^{+}	Mg ²⁺	Ca ²⁺
계절	기간		개수	рН	(µS/cm)					(µeq/L)				
	2006~20	15	247	4.48	91.6	1.4	430.3	56.9	117.6	362.4	42.4	30.3	83.6	53.9
거술	2016		38	4.60	66.7	0.9	296.4	43.1	94.8	282.1	36.3	8.1	60.6	31.0
	2006~20	15	146	4.94	44.5	1.5	165.9	36.6	81.3	128.3	39.6	32.6	33.3	54.2
몸	2016		13	4.96	50.9	1.5	227.0	34.1	83.8	211.7	43.0	17.5	46.7	36.7
서르	2006~20	15	124	4.89	25.3	0.7	84.4	16.5	39.6	57.2	23.1	25.3	14.0	18.1
어둠	2016		10	4.94	74.5	0.6	447.8	31.4	84.5	374.0	34.0	9.7	84.6	30.7
가음	2006~20	15	153	4.74	56.2	0.9	260.0	32.1	72.6	211.8	23.6	27.2	50.1	45.6
12	2016		29	5.03	26.2	0.3	126.6	10.8	32.4	112.2	11.7	3.4	26.9	12.0

Ο	울진	

ar	게스	강=	수량	рΗ	EC	F-	Cl-	NO3 ⁻	SO4 ²⁻	Na^+	${\sf NH_4}^+$	K^{*}	Mg^{2+}	Ca ²⁺
연도	. 개주-	(mr	m)		(µS/cm)					(µeq/L)				
1998	3 21	393	3.2	4.97	17.9	0.5	55.3	11.6	30.4	55.7	12.7	4.7	10.7	11.0
1999	35	680	0.1	5.07	18.6	0.3	64.9	12.6	30.7	67.1	14.7	4.2	14.8	16.5
2000) 20	263	3.9	4.76	25.8	0.5	85.0	20.2	50.4	76.4	10.1	3.0	19.7	26.3
2001	14	230).5	5.00	15.7	1.4	54.1	13.9	36.8	47.3	12.7	2.0	15.2	16.3
2002	2 23	562	2.7	4.86	32.4	0.1	171.2	22.2	50.2	168.1	21.5	5.3	38.2	25.1
2003	8 28	563	3.7	4.84	21.8	1.2	85.1	20.9	47.6	70.7	22.7	3.8	17.9	25.9
2004	4 33	828	3.9	4.59	27.3	0.7	81.9	25.3	56.0	69.2	21.5	3.2	17.7	20.2
2005	5 37	748	3.0	4.70	30.5	0.7	94.8	29.4	46.5	78.9	21.7	5.3	20.4	22.5
2006	5 40	855	5.6	4.89	50.7	1.3	255.5	22.0	73.5	207.7	21.0	7.5	48.3	34.4
2007	41	821	1.7	4.82	20.3	1.6	42.8	21.8	46.2	37.3	23.4	2.8	10.9	22.4
2008	3 32	638	3.4	4.47	38.9	1.0	96.9	28.0	63.5	81.4	24.5	5.3	20.9	24.6
2009) 34	517	7.9	4.82	31.6	1.0	93.4	30.1	63.3	79.7	34.6	3.9	22.2	27.3
2010) 35	588	3.8	4.86	23.8	1.2	68.7	24.3	47.0	60.3	21.8	3.6	18.6	27.8
2011	35	540).5	4.79	22.9	0.4	72.0	17.5	34.9	63.2	17.9	3.0	16.8	16.4
2012	2 33	549	9.8	4.77	21.8	0.4	51.5	21.6	42.6	44.0	21.9	2.3	14.0	19.8
2013	3 53	828	3.5	4.75	33.2	1.4	131.7	23.2	49.8	112.9	25.0	4.6	27.9	26.4
2014	1 72	966	5.6	4.65	37.3	1.0	154.3	25.2	56.5	132.1	27.6	5.0	32.1	25.3
2015	5 55	563	3.3	4.80	36.5	0.7	152	30.3	51.2	135.3	25.2	4.7	33.2	30.9
2016	65	816	5.2	5.12	26.1	0.7	93.9	27.2	41.2	87.1	26.6	4.7	23.7	32.6
연평균	2	597	7.9	4.78	29.4	0.9	106.7	23.2	49.6	93.1	22.4	4.3	23.4	24.5
					EC	F-	Cl-	NO ₃ -	SO42-	Na ⁺	${\sf NH_4}^+$	K^{+}	Mg ²⁺	Ca ²⁺
계절	기간		개수	рН	(µS/cm)					(µeq/L)				
70	2006~20)15	70	4.57	52.8	1.5	189.8	37.2	94.1	164.7	32.3	7.9	43.4	51.3
거굴	2016		8	4.89	52.9	1.1	175.9	48.4	83.4	158.1	64.8	6.9	41.0	82.0
ы	2006~20)15	89	4.76	30.3	1.1	87.7	28.7	59.7	75.6	30.3	4.3	22.2	35.8
古	2016		15	5.48	29.8	1.6	71.2	51.1	64.2	68.8	57.7	5.8	21.2	63.5
서르	2006~20)15	156	4.76	20.6	1.0	52.3	19.0	34.9	42.2	21.5	2.5	11.1	13.3
어금	2016		17	5.09	20.8	0.7	46.2	35.4	34.9	46.0	25.3	7.2	16.2	29.7
71.9	2006~20)15	114	4.80	41.9	0.9	202.9	22.2	57.1	173.2	20.1	5.7	40.4	24.5
15	2016		22	5.05	27.0	0.4	124.5	16.8	34.3	113.4	15.4	3.3	28.3	19.8

※ 2006~2015년 겨울: 2005. 12.~2015. 2.중 1, 2, 12월, 2016년 겨울: 2015. 12.~2016. 2.

2. 지구대기감시 현황

2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램

세계기상기구(WMO)는 세계의 기상관측체계 수립, 기상관측의 표준화, 기상 정보의 국제 교환, 다른 분야에 대한 기상학의 응용을 추진하기 위해 1950년에 설립된 국제연합(UN)의 특별기구이다. 우리나라는 1956년에 이 기구에 가입하 여 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 통합 하여 시작되었다. 이 프로그램은 첫째, 지구대기의 화학 조성에 대한 과학적이고 신뢰할 수 있는 관측자료를 제공하고, 둘째, 지구대기의 자연적·인위적인 조성 변화 정보를 제공하며, 셋째, 대기·해양·생물 간의 상호작용 과정에 대한 이해를 높이는 것을 목적으로 한다.

지구대기감시 프로그램에는 세계기상기구의 모든 회원국이 참여하고 있다. 현재, 지구급 관측소(global station) 31개소, 지역급 관측소(regional station) 400여 개소, 그리고 협력 관측소(contributing station) 100여 개소가 운영되 고 있다.



그림 2.1 세계기상기구 지구대기감시 프로그램의 관측소 현황

지구대기감시 프로그램은 중앙기구를 두어 관측자료의 품질보증기술을 지원 하고 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 중앙 기구와 지구대기감시관측소 간의 협력과 운영을 돕는다.



그림 2.2 세계기상기구 지구대기감시(GAW) 프로그램의 운영 구조

표 2.1 세계기상기구 지구대기감시 세계자료센터 현황

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

2.2 한반도 기후변화감시망

한반도에서 지구대기감시는 1987년 1월에 충북 단양군 단양읍에 위치한 소 백산기상관측소에서 출발하였다. 이곳에서 대기질, 산성비, 대기복사 등이 관측 되었다.

1990년부터 기상연구소는 제주 고산에서 플라스크 샘플링 방법으로 온실가 스를 관측하기도 하였다. 이후에 기후변화 유발물질의 감시 필요성이 대두되면 서 1992년부터 무안기상대에서 온실가스를 관측하기 시작하였고, 1994년부터 포항기상대에서 성층권 오존과 자외선 관측도 시작되었다.

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

1998년 5월에 배경대기관측소는 세계기상기구에 지역급 지구대기감시관측 소로 등록되었고, 2000년 8월에 지구대기감시관측소로 명칭이 변경되었다. 이 때까지 국립기상연구소 소속이었던 지구대기감시관측소는 2008년 3월에 기상 청 기후변화감시센터로 소속과 명칭이 변경되었다.

빠른 속도의 기후변화로 지구 온난화가 사회·경제적인 이슈가 되면서 기상청 도 한반도에서 기후변화 유발물질의 유·출입을 감시하기 위한 지구대기감시 관 측망의 확대가 추진되었다.

한반도에서 기후변화 유발물질의 유입 지역에 해당하는 중부 서해안에 안면 도 기후변화감시소가 위치하고 있다. 그리고 남부 서해안 제주도에 고산 기후변 화감시소가 2008년 11월에 신설되었다. 또한 2011년 10월에 기후변화 원인물 질의 유출 지역에 해당하는 최동단인 독도에 온실가스를 관측하기 시작하였고, 2013년 12월에 울릉도에 울릉도독도 기후변화감시소가 신설되었다. 이로서 한 반도를 삼각형으로 감시하는 지구대기감시 관측망이 구축되었다.

2016년 현재 안면도, 고산, 울릉도독도의 기후변화감시 기본관측소 3소와 포항, 목포, 울진, 강릉의 보조관측소 4소, 대학, 관련기관 등 위탁관측소 6소가 운영되고 있다.



고산 기후변화감시소

그림 2.3 한반도 기후변화감시망의 구성

Ŧ	2.2	안면도	기후변화감시소	관측시설의	공간정보
---	-----	-----	---------	-------	------

시설망	용도	위·경도	해발고도	비고
40 m 타워	온실가스 측정	36.538 86°N 126.329 95°E	85.119 m	관측탑
오존브로워	성층권오존 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	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
(고산)	33.29°N 126.16°E	71.0 m	온실가스(2012), 반응가스(2012) 에어로졸(2014)	(2013, JGS)
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 (강릉)	37.80°N 128.85°E	79.0 m	자외선(2001)	보조관측소

표 2.4 위탁관측소 운영 현황

위탁기관명(관측지점명)	위·경도	관측요소	위탁지정일
연세대학교(서울)	37.57°N 126.95°E	성층권오존, 자외선	2004. 11. 6.
광주과학기술원(광주)	35.22°N 126.83°E	에어로졸 연직분포	2007. 1. 1.
서울대학교(광릉)	37.75°N 127.15°E	산림 이산화탄소	2008. 11. 5.
극지연구소 남극세종기지(남극)	62.22°S 58.78°W	이산화탄소	2010. 10.26.
제주대학교(제주)	33.29°N 126.16°E	라돈	2012. 4. 1.
숙명여자대학교(서울)	37.54°N 126.97°E	중층대기 수증기, 성층권오존	2015. 4. 1.

3. 기후변화감시 기술노트 목록

○ 발간 목록

- 기술노트 2014-01 통합지구대기화학관측(IGACO)의 오존 및 자외선 이행 계획
- 기술노트 2014-02 GC-μECD를 활용한 대기 농도 수준의 SF₆ 분석 가이 드라인
- 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 GCµECD (WMO/GAW Report NO. 222)
- 기술노트 2015-04 강수화학(대기 침적) 측정 및 분석 매뉴얼
- 기술노트 2015-05 WMO Guideline 2014 Atmosheric Composition : MEASUREMENT OF ATMOSPHERIC COMPOSITION
- 기술노트 2016-01 온실가스 관측업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-02 인체 비타민D 생성을 위한 태양자외선복사 노출시간 산정
- 기술노트 2016-03 국가승인기후변화감시통계 업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-04 에어로졸 관측업무 매뉴얼
- 기술노트 2016-05 Calibration Methods of GC- $\mu\,\text{ECD}$ for Atmospheric SF_6 Measurements
- ※ 기상청 기후정보포털(www.climate.go.kr)의 홍보·열린마당에서 열람 가능

4. 기후변화감시 관측자료 활용논문 목록

- 출판연도순으로, 동일한 출판연도인 경우에 영문판(알파벳순)과 한글판 순서
 (가나다순)대로 수록
- 신도식, 김산, 김정식, 차주완 1999: 안면도에서 1998년 봄철에 관측된 황사의 광학적 특징. 한국대기환경학회지, 15, 739-746.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 1999: 황사 시 서울과 안면도의 대기 중 에어 로졸 수농도 특성. 한국대기환경학회지, 15, 575-586.
- 김만구, 강미희, 홍영민, 박기준, 이보경, 이동수, 김산 2001: 필터팩을 이용한 서울과 춘천, 안면도의 건성 강하량 측정. 한국대기환경학회지, 17, 19-29.
- 김정식, 최재천, 2001: 배경대기 중 CO₂ 자료 선정 방법에 따른 안면도 자료의 분석. 한국대기환경학회지, 17, 277-288.
- 문병관, 김준, 류상범, 윤용훈, 임종환 2001: 안면도 지구대기감시 관측소에서의 순복사 비교 관측과 복사계 보정. 대기, 11, 176-180.
- 박기준, 최재천, 박상순, 오성남 2002: 안면도에서 측정한 온실가스(CH₄, N₂ O, CFCs)의 변동 특성 연구. 대기, 12, 502-505.
- 조경숙, 방소영, 최채천, 최병철, 차주완, 박기준, 최성철, 노영민, 김영준 2003: 에어러솔라이더를 이용한 안면도에서의 에어러솔 수직분포 측정. 대기, 13, 484-487.
- 최병철, Y. Iwasaka, 임재철, 정상부, 김윤석, T. Dmitri, T. Nagatani, M. Yamada, 김상백, 홍기만, 이영곤, 유희정 2005: 광학입자계수기를 이 용한 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. 한국대기환경학회 지, 22, 1-14.
- 구태영, 홍기만, 김상백, 공종웅, 김명수 2008: 2006년 4월 안면도에서 발생한 황사, 안개, 청명, 구름 사례에 대한 에어러솔 특성 분석. 대기, 18, 99-111.

- 노영민, 이한림, Detlef Muller 2010: 다파장 라만 라이다를 이용한 발생지에 따른 안면도 지역 에어러솔의 광학적 및 미세물리적 특성. 한국대기환경 학회지, 26, 554-566.
- 강창희, 김원형, 허철구, 강동훈 2012: 제주도 고산지역의 라돈 배경농도 실시 간 모니터링, 분석과학, 한국분석과학회, 25(1), 7-13.
- 고희정, 신승희, 허철구, 김원형, 강창희, 강동훈, Scott Chambers 2013: 제주 도 고산측정소의 대기 라돈농도 시계열 변화, 한국대기환경학회지, 29(1), 86~96.
- 김관철, 최성철, 노영민 2016: 선포토미터 데이터를 이용한 편광소멸도 산출과 라이다 편광소멸도와의 비교, 대한원격탐사학회지, 32, 97-104.
- 이경화, 김관철, 노영민 2016: 대기 에어로졸 고도 분포와 선포토미터 편광소멸 도의 연관성 연구, 대한원격탐사학회지, 32, 133-139.
- 신동호, 노영민 2016: 황사 발원지에서 선포토미터를 활용한 에어로졸의 광학 적 특성 산출과 미세먼지속 황사 구분, 대한원격탐사학회지, 32, 245-251.
- 송정민, 부준오, 김원형, 강창희, 고희정, S. Chambers 2017: 제주도 고산지역 의 대기 라돈 배경농도 및 시계열 변동, 한국대기환경학회지, 33(2), 174-183.
- Park, S. S., Kim, J., Cho, H. K., Lee, H., Lee, Y. and co-authors 2012: Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea. Atmospheric Environment 47, 226-235.
- Kim, J., S. Park, M. K. Park, S. Li, J. Y. Kim, C. O. Jo, J. Y. Kim, and K. R. Kim, 2013: Parameter optimization and automation of the FLEPXART Lagrangian Particle dispersion model for atmospheric back-trajectory analysis. Atmosphere, 23, 93-102.
- Kim, W. H., H. J. Ko, C. G. Hu, S. H. Lee, C. Lee, S. Chambers, A. G. Williams, and C. H. Kang, 2014: Background level of atmospheric Radon-222 concentrations at Gosan station, Jeju Island, Korea in 2011. Bulletin of the Korean Chemical Society, 35.

- Kim, J., Cho, H. K., Mok, J., Yoo, H. D. and Cho, N. 2013: Effects of ozone and aerosol on surface UV radiation variability. J Photochem Photobiol B 119, 46-51.
- Kim, Y. M., S. C. Yoon, S. W. Kim, K. Y. Kim, H. C. Lim, and J. G. Ryu, 2013: Observation of new particle formation and growth events in Asian continental outflow. Atmospheric Environment, 64, 160-168.
- Matsuil, H., M. Koikel, N. Takegawa, Y. Kondol, A. Takami, T. Takamura, S. Yoon, S. W. Kim, H. C. Lim, and J. D. Fast, 2013: Spatial and temporal variations of new particle formation in East Asia using and NPF-explicit WRF-cham model: North-south contrast in new particle formation frequency. Journal of Geophysical Research, 118, 11,647-11,663.
- Panicker, A. S., S. H. Park, D. I. Lee, D. C. Kim, W. S. Jung, S. M. Jang, J. H. Jeong, D. S. Kim, J. g. Yu, and Harrison Jeong, 2013: Observations of black carbon characteristics and radiative forcing over a global atmosphere watch supersite in Korea. Atmospheric Environment, 77, 98-104.
- Park, S. Y., J. G. Park, C. S. Kim and I. C. Shin 2013: Clarification of methane emission sources using WDCGG data: Case study of Anmyeon-do observatory, Korea. Asian journal of Atmospheric Environment, 7-2. 85-94.
- Hong, H., Lee, H., Kim, J., and Lee Y.-G., 2014: First comparison
- of OMI-DOAS total ozone using ground-based observations at a megacity site in East Asia: Causes of discrepancy and improvement in OMI-DOAS total ozone during summer. Journal of Geophysical Research: Atmosphere 119, 10058-10067.
- Kim, W., Kim, J., Park, S. S. and Cho, H.-K. 2014. UV Sensitivity to Changes in Ozone, Aerosols, and Clouds in Seoul, South Korea. Journal of Applied Meteorology and Climatology 53, 310-322.

- Kim, W. H., H. J. Ko, C. G. Hu, H. Lee, C. Lee, S. Chambers, A. G. Williams, and C. H. Kang 2014: Background Level of Atmospheric Radon-222 Concentrations at Gosan Station, Jeju Island, Korea in 2011, Bulletin of the Korean Chemical Society, 35(4), 1149-1153.
- Crawford, J., S. Chambers, C. H. Kang, A. Griffiths, and W. H. Kim 2015: Analysis of a decade of Asian outflow of PM10 and TSP to Gosan, Korea; also incorporating Radon-222, Atmospheric Pollution Research, 6(3), 529-.539.
- Park, S. S., Lee, Y. G. and Kim, J. H. 2015: Impact of UV-A radiation on erythemal UV and UV-index estimation over Korea. Advances in Atmospheric Sciences 32, 1639-1646.
- Song, J. M., W. H. Kim, C. H. Kang, H. Lee, C. Lee, S. Chambers, and A. G. Williams 2015: Temporal Variability of Atmospheric Radon-222 Concentration at Gosan Station, Jeju Island, Korea, during 2009-2013, Bulletin of the Korean Chemical Society, 36(2), 603-608.
- Bu, J. O., J. M. Song, W. H. Kim, C. H. Kang, S. D. Chambers, A. G. Williams, and C. Lee 2016: Variability of Atmospheric Radon-222 and Secondary Aerosol Components in Accordance with Air Mass Transport Pathways at Jeju Island, Korea, during 2011-2014, Bulletin of the Korean Chemical Society, 37(6), 841-846.
- Chambers, S. D., C. H. Kang, A. G. Williams, J. Crawford, A. D. Griffiths, K. H. Kim, and W. H. Kim 2016: Improving the representation of cross-boundary transport of anthropogenic pollution in Southeast Asia using Radon-222, Aerosol and Air Quality Research, 16(4): 958-976.
- Kim, J., Kim, J., Cho, H.-K., Herman, J., Park, S. S. and co-authors 2016: Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI

measurements over Seoul, Korea. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 1-33.

- Noh, Y. M., K. H. Lee, K. C. Kim, S. K. Shin, D. Mueller, and D. H. Shin 2016: Influence of the vertical absorption profile of mixed Asian dust plumes on aerosol direct radiative forcing over East Asia. Atmospheric Environment, 138. 191-204
- Noh, Y. M., S. K. Shin, K. H. Lee, D. Mueller and K. C. Kim 2016: Utilization of the depolarization ratio derived by AERONET Sun/sky radiometer data for type confirmation of a mixed aerosol plume over East Asia. International Journal of Remote Sensing, 37. 2180-2197.
- Noh, Y. M., D. Mueller, S. K. Shin, D. H. Shin, and Y. J. Kim 2016: Vertically-resolved profiles of mass concentrations and particle backscatter coefficients of Asian dust plumes derived from lidar observations of silicon dioxide. Chemosphere, 143. 24-31.
- Baek, K., Kim, J. H., Herman, J. R., Haffner, D. P. and Kim, J. 2017: Validation of Brewer and Pandora measurements using OMI total ozone. Atmospheric Environment 160, 165-175.
- Kang, M., B. Ruddell, J-H. Chun and J. Kim 2017: Identifying CO2 advection on a hill slope using information. Agricultural and Forest Meteorology, 232. 265-278.
- Ichii, K., M. Ueyama, M. Kondo, N. Saigusa, J. Kim, M. C. Alberto, J. Ardo, E. S. Euskirchen, M. Kang, T. Hirano, J Joiner, H. Kobayashi, L. B. Marchesini, L. Merbold, A. Miyata, T. M. Saitoh, K. Takagi, A. Varlagin, M. S. Bret-Harte, K. Kitamura, Y. Kosugi, A. Kotani, K. Kumar, S-G. Li, T. Machimura, Y. Matsuura, Y. Mizoguchi, T. Ohta, S. Mukherjee, Y. Yanagi, Y. Yasuda, Y. Zhang and F. Zhao 2017: New data-driven estimation of terrestrial CO2 fluxes in Asia using a standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 122. 767-795.

5. 기후변화감시기술 특허 보유(출원) 현황

- 제 0495483호 표준가스 중량법 제조를 위한 자동 무게 측정 장치. (출원일: 2003.09.09. / 등록일: 2005.06.07.)
- 제 10-0922630호 수분제거장치. (출원일: 2008.06.12. / 등록일: 2009.10.13.)
- 제 10-0993808호 풍향에 따른 자동 시료 포집. (출원일: 2008.10.02. / 등록일: 2010.11.05.)
- 제 10-1074697호 에어로졸 전처리 시스템. (출원일: 2009.02.09. / 등록일: 2011.10.12.)

6. 지구대기감시 보고서 작성자

1장	머리말	기후변화감시과	기상사무관	김 정 식
2장	2016년 기상기후 특성	기후변화감시과	기 상 주 사	고 혜 영
3장 	3.1 온실가스	환경기상연구과 " " " 서울대학교 극지연구소	기상연구사 연 구 원 연 구 원 연 구 원 교 수 선임연구원	이 해 홍 우 최 미 영 이 동 현 건 김 태 진
	3.2 반응가스	환경기상연구과 ″ ″	기상연구사 연 구 원 연 구 원	김 수 민 이 세 표 고 미 영
	3.3 에어로졸	환경기상연구과 "" " " " " 연세대학교 광주과학기술원	기상연구사 연구원 연구원 연구원원 연연구원 연 연 구 원 원 우 수	은 정 정 단 실 영 준 민 김 고 이 이 김 최 김 노
	3.4 대기복사	환경기상연구과 ″	기상연구사 연 구 원	이 상 삼 송 승 주
	3.5 성층권오존	환경기상연구과 ″ 연세대학교 숙명여자대학교	연 구 원 연 구 원 교 수 교 수	송 승 주 고 미 영 김 준 오 정 진
	3.6 자외선	환경기상연구과 <i>"</i> 연세대학교	연 구 원 연 구 원 교 수	송 승 주 문 세 영 김 준
	3.7 총대기침적	환경기상연구과 " " "	기상연구사 연 구 원 연 구 원 연 구 원	신 범 철 김 은 실 정 지 영 이 동 현
	3.8 기타	숙명여자대학교 제주대학교	교 수 교 수	오 정 진 강 창 희
4장	지구대기감시 자료 통계 방법	환경기상연구과 ″	기상연구관 기상연구관	한 상 옥 차 주 완

2016 지구대기감시 보고서

발 행 일 : 2017년 6월

발 행 처 : 기상청 기후과학국 기후변화감시과 07062 서울시 동작구 여의대방로16길 61

홈페이지 : 기후정보포털(www.climate.go.kr)



Report of Global Atmosphere Watch 2016

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



