

한반도 배경대기 중 온실기체의 농도 변동 특성 분석

Analysis of Variation Characteristics of Greenhouse Gases in the Background Atmosphere Measured at Gosan, Jeju

주옥정 · 차준석* · 이동원 · 김영미¹⁾ · 이정영¹⁾ · 박일수
국립환경과학원 지구환경연구소, ¹⁾국립환경과학원 대기환경과
(2007년 5월 31일 접수, 2007년 8월 2일 채택)

Ok-Jung Ju, Jun-Seok Cha*, Dong-Won Lee, Young-Mi Kim¹⁾,
Jung-Young Lee¹⁾ and Il-Soo Park
Global Environment Research Center, National Institute of Environmental Research
¹⁾*Air Quality Division, National Institute of Environmental Research*
(Received 31 May 2007, accepted 2 August 2007)

Abstract

Increase of the greenhouse gases emissions during last century has led remarkable changes in our environment and climate system. Continuous monitoring of atmospheric constituents over the world is positively necessary to understand these changes around us. The concentrations of greenhouse gases (CO₂, CH₄, N₂O, CFCs) have been continuously measured at Global Climate Change Monitoring station in Gosan, Jeju since January, 2002. In this study, the variation characteristics of greenhouse gases as well as their annual, seasonal and diurnal trend using the data from January, 2002 to December, 2005 were analyzed. The raw data which was used in the analysis were validated with the methods recommended by WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases). The concentration of CO₂ was increasing continuously by 2.1 ppm/year, while CH₄ did not show any increasing or decreasing trend clearly for 4 years. The concentration of N₂O was slightly increasing and CFCs were decreasing except CFC-12 which has longer lifetime compared with other CFCs. The variations of the greenhouse gases at Gosan were shown to be consistent with the global trend. But the concentration level of CO₂ in Korea was more or less higher than abroad.

Key words : Greenhouse gases, Background atmosphere monitoring, Gosan station

1. 서 론

인간 활동으로 인한 온실기체의 배출은 기후 변화

를 가져다 줄 것으로 예상되는 방향으로 대기를 지속적으로 변화시켜왔다. 2005년 이산화탄소의 대기 중 농도는 지난 65만 년 동안의 자연적 범위(180~300 ppm)를 넘어섰으며 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 증가로 인한 복사 강제력은 지난 만 년 동안 넘어본 적이 없는 수치이다(IPCC AR4, 2007). 이산화

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7515, E-mail : js11cha@me.go.kr

탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄소(CFCs) 등의 온실기체는 양의 복사 강제력으로 작용하여 지표면을 따뜻하게 하고 있으며, 이러한 온실기체 중 CO₂는 온실효과를 유발하는 기여도가 약 60%로서 CH₄(20%), CFCs(10%), N₂O(6%)보다 매우 높은 것으로 나타나고 있다(WMO Greenhouse Gas Bulletin, 2006).

세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization)는 자연적 혹은 인위적인 원인에 의한 대기 변화에 따른 복잡한 메커니즘을 이해하기 위하여 1989년부터 지구대기감시(GAW: Global Atmosphere Watch) 프로그램 하에 CO₂, CH₄, N₂O 등의 온실기체를 포함한 전 지구 대기 환경을 계속적으로 측정하고 있다. 국내의 경우 대기 중 이산화탄소의 변동을 감시하기 위해 기상연구소에서 서울대와 공동으로 1990년 8월 제주 고산 관측소에서 주 1회 Flask air sampling법을 이용한 관측이 처음 시도되었다(박미경, 1997; 조하만 등, 1995). 또 한국 교원대학교에서는 NOAA/CMDL의 CO₂ 관측망의 하나인 충남 태안군 파도리의 관측 지점에서 1990년 10월부터 동일한 방법으로 이산화탄소에 대한 감시 활동이 시작되었다(Bakwin *et al.*, 1998; Dlugokencky *et al.*, 1993). 이러한 국내 온실기체 연구 과정에는 전 지구적 이산화탄소의 농도 분포와 특성에 대한 소개 및 전지구 대기 중 농도에 대한 한반도 이산화탄소 배출량의 기여도 정량화 등이 있다(조하만 등, 2000; 박일수 등, 1994; 이근준과 정용승, 1993). 또한 온실기체의 장·단주기적 농도 변화 특성 분석 연구 및 국외 관측소의 농도 값과 비교분석, 근간에 대한 예측 연구가 발표되었다(조창범 등, 2005; 김기현 등, 2001; 송기범 등, 2000; 정용승과 피터 탠스, 2000).

제주도 고산의 경우 온실기체 농도가 세계적으로 높은 지역 중 하나인 동아시아 지역에서 지리적으로 매우 중요한 지점에 위치하고 있어 국제적으로 주요 관심 지역의 하나가 되고 있으며, 제주도 고산에서 관측되는 온실기체 값은 동아시아 지역의 매우 중요한 자료로 활용되고 있다(조하만, 2001). 그러므로 본 연구에서는 우리나라 대표적 배경대기 지역인 제주도 고산의 지구대기측정소에서 2002년 1월부터 측정된 대기 중 온실기체 농도를 바탕으로 변동 추세분석(일별, 월별, 계절별, 연별 변화)을 하였으며, WMO-GAW 산하의 온실기체 세계자료 센터(WDCGG: World

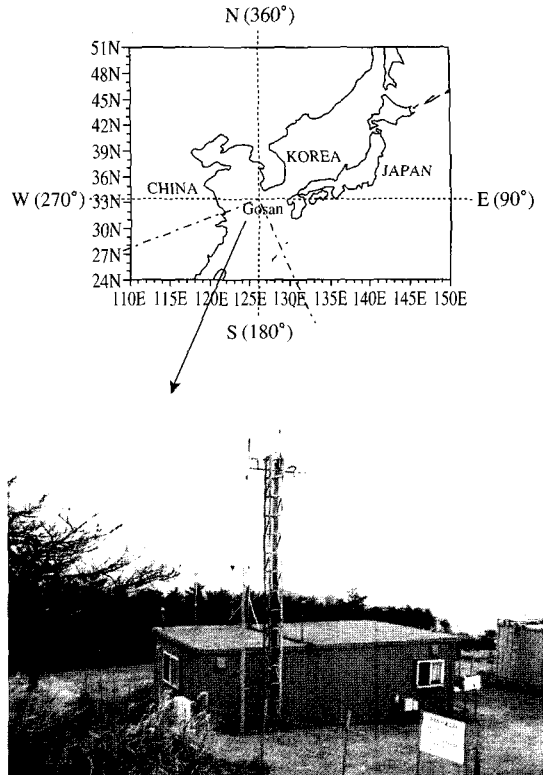


Fig. 1. View of the global climate change monitoring station at Gosan, Jeju.

Data Center for Greenhouse Gases)에 등록되어 있는 우리나라 주변국과의 온실기체 자료를 비교·분석하였다.

2. 자료 및 연구 방법

환경부에서 운영중인 제주도 고산에 위치한 지구 대기측정소(제주도 북제주군 한경면 고산리 3768, 해발고도: 72 m, 위·경도: 33° 15'N, 126° 12'E)는 지구 온난화, 성층권 오존층 파괴 등 지구 규모의 대기 오염현상 분석을 위한 기초자료 습득을 위한 배경대기 측정망으로, 국내의 국부적인 오염원에 의해 영향을 가장 적게 받고 있는 지역으로 판단되는 곳에 설치되어 있다(그림 1). 본 연구에서 분석된 온실기체는 CO₂, N₂O, CH₄, CFCs-11, 12, 113이 있으며, 2002년 1월부터 2005년 12월까지 4년 동안 측정된 자료

Table 1. Yearly average concentrations of CO₂ at Gosan in Jeju and other monitoring sites in domestic and abroad.
(The data of the other sites are from WDCGG web site (<http://gaw/kishou.go.jp/wdcgg/html>)). (Unit: ppm)

		2000	2001	2002	2003	2004	2005
Domestic	Taeam	373.4	375.6	377.8	379.7	381.6	383.5*
	Anmyeondo (KGAWO ¹)	377.0	381.0	383.3	388.5	387.3	392.0
	Gosan (Metri ²)	373.8	373.2	375.6	381.9	—	—
	Gosan (ME ³)	—	—	379.2	380.0	380.3	386.2
Abroad	Japan_Minamitorishima	370.3	371.7	373.8	376.6	378.2	380.7
	Japan_Yonagunijuma	371.8	373.4	375.5	378.3	380.0	382.5
	Japan_Ryori	372.6	373.4	375.9	378.6	380.3	382.4
	China_Waligun	370.3	371.3	372.7	376.2	378.2	380.4
	USA_Mauna Loa	369.6	371.2	373.0	375.8	377.6	380.0
	USA_American Samoa	368.2	369.8	371.9	374.0	376.0	378.0
	USA_South Pole	367.0	368.6	370.7	373.0	375.0	376.6
	USA_Barrow	370.8	372.4	374.3	377.5	378.1	381.0
	Germany_Schauinsland	371.0	372.4	374.2	378.3	379.6	382.2

*Annual average value excluding Nov., Dec. data

¹Korea Global Atmosphere Watch Observatory, ²National Institute of Meteorological Research, ³Ministry of Environment

를 분석하였다.

CO₂ 측정에 사용된 분석 장비는 비분산적외분석기(Non-Dispersive InfraRed analyzer: NDIR, Ultramat-6)로 30초 주기로 자동 측정된 이산화탄소 농도를 1시간 평균, 일평균, 월평균하여 분석하였으며, CH₄의 경우는 가스크로마토그래프/불꽃이온화 검출기(Gas Chromatograph/Flame Ionization Detector: GC/FID, GC3800)로 측정된 1시간 주기의 자료를 분석하였다. N₂O는 가스크로마토그래프/전자포획형 검출기(Gas Chromatograph/Electron Capture Detector: GC/ECD, GC3800)로 측정된 1시간 주기, CFCs는 가스크로마토그래프/전자포획형 검출기(GC/ECD, HP6890)로 측정된 2시간 주기의 자료로 일평균, 월평균 값을 분석하였다. 대기 중 시료채취는 관측소 건물 옆에 설치된 지상으로부터 약 10 m 기상탑 상단에 대기 시료의 채취통을 설치하여 하고 있으며, 시료채취 입구는 원통형으로 열린 부분이 아래로 향하게 되어있고 내부중간위치에 필터(50 mesh)를 달아 입자나 빗물이 들어침을 막도록 되어있다.

각 온실기체 자료는 측정 장비의 운영상 오차 자료를 배제한 원시자료로부터 계산하였으며, 제주도는 우리나라, 중국, 일본에 둘러싸여 있는 섬으로 남풍이 불 때 배출원의 영향이 적은 배경농도를 측정할 수 있으므로 원시자료를 풍향(160° ≤ 풍향 ≤ 250°)과 풍속(≥ 3 m/s)에 따라 일차적으로 처리하여 배경대기 자료의 선정 과정 후 WDCGG에서 권고한 방식(김

정식과 최재천, 2001)으로 보정을 거친 자료를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이산화탄소의 농도 변동 특성

표 1은 제주도 고산에 위치한 환경부 지구대기측정소에서 측정된 자료와 WDCGG에 등록되어 있는 국내·외 다른 관측소에서 2000년 이래로 측정된 연평균 이산화탄소 농도 값을 나타낸 것이다. WDCGG에서는 시간별, 일별, 월별 평균값의 자료를 제공하고 있으며, 표 1에 나타낸 농도는 월평균 값을 이용하여 구한 연평균 값이다. 이산화탄소 농도는 산업혁명 이후 계속해서 증가하고 있으며, 본 연구에서 살펴본 국외 관측소들의 이산화탄소 농도보다 국내 이산화탄소 농도가 더 높은 것을 알 수 있으며, 제주 고산 지구대기측정소에서 측정된 최근 4년간의 배경대기 이산화탄소 연평균 농도 증가율은 2.1 ppm으로 나타났다.

국내에서는 2004년을 기준으로 불 때 안면도(KGAWO: Korea Global Atmosphere Watch Observatory)의 이산화탄소 농도 값이 가장 높게 나타났고, 제주도 고산에서 측정된 값이 가장 낮게 나타났는데 이는 안면도의 경우 한반도 주변의 인위적 활동 증가에 따른 영향이 이산화탄소 자료 분석 결과

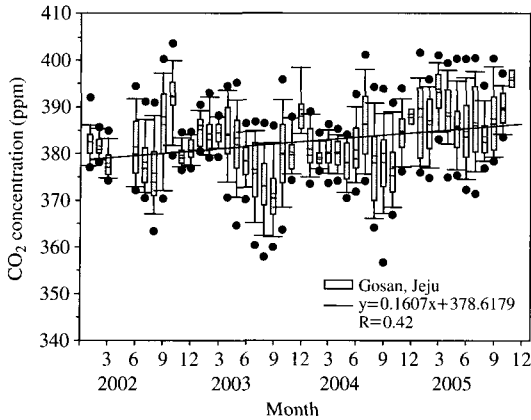


Fig. 2. A box diagram for monthly variations of CO₂ at Gosan, Jeju (The box is 25th to 75th percentile and the higher dot and hat between higher dot and box are 95th and 90th percentile respectively. Red and black solid lines in the box are average and median, respectively).

반영되는 것으로 생각되며(조창범 등, 2005), 제주 고산 지구대기측정소의 경우는 배경대기 관측 자료로써 대표성을 갖기 위해 풍향과 풍속으로 자료를 보정하였기 때문에 다른 국내 관측소의 값에 비해 좀더 낮은 농도 값을 나타낸 것으로 생각된다. 김정식과 최재천(2001)은 연속 관측 자료가 배경대기 관측 자료로써 대표성을 갖기 위해서는 청정 지역에 위치한다 할지라도 풍향의 변화에 따라 주변 지역의 영향을 받기 때문에 최대한 배제하여야 하고, 또한 적용되는 처리방식에 따라 CO₂ 농도가 큰 차이를 나타낼 수 있으며 CO₂ 농도는 풍계에 따라 주변 지역의 CO₂ 발생원이 큰 영향을 미친다고 지적한 바 있다.

그림 2는 2002년 1월부터 2005년 12월까지 4년간 관측된 CO₂ 농도의 시간 평균 농도를 이용하여 월별 시계열 변화를 상자 도표로 나타낸 것이다. 상자 도표에서 아래로부터 CO₂ 농도는 5-, 10-, 25-, median, 75-, 90-, 95-percentile을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최근 4년간 이산화탄소 농도는 계속해서 증가하는 경향을 보이고 있으며, 월별 시계열 변화를 통해 월별 이산화탄소의 증감을 알 수 있는데 대체로 여름에 낮아졌다 겨울에 높아지는 경향을 보인다. 그러나 2004년, 2005년 여름(6, 7, 8월)에는 농도가 크게 낮아지지 않아 다른 해에 비하여 계절 변

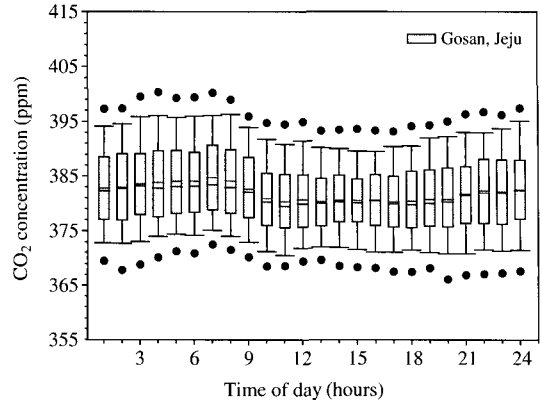


Fig. 3. A box diagram for hourly mean concentrations of CO₂ at Gosan, Jeju.

동성이 작게 나타났다.

그림 3에는 CO₂ 농도의 일변화를 살펴보기 위하여 시간별 평균 농도를 그림 2와 같은 상자 도표 형식으로 나타내었다. 일변화가 뚜렷하지는 않으나, 일출직전인 7시에 384.7 ppm으로 최대농도를 보이고, 오후에 낮아졌다가 17시에 380.3 ppm으로 최소농도를 나타내었으며, 해가 진후에 다시 높아지는 변화를 보여 탄소 동화 및 이화작용으로 대표되는 식생활동이 북반구 중위도 지역의 대기 중 이산화탄소 변동에 영향을 주는 가장 큰 인자로 인식할 수 있으며(Bacastow *et al.*, 1985; Keeling *et al.*, 1976), 오후에 저농도 특성을 보이는 것은 식물에 의한 광합성이 활발하기 때문이다(김정식과 최재천, 2001).

같은 기간동안에 관측된 CO₂ 농도의 일평균 농도를 계절별로 살펴보면, CO₂의 계절별 평균 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울별로 각각 383.1 ppm, 380.5 ppm, 379.8 ppm, 383.4 ppm으로 나타나 겨울에 가장 높고 여름과 가을에 낮은 농도를 보였다. 계절적 사이클은 주로 생물의 흡수와 배출량의 계절적 변동을 반영하는 것으로 겨울과 봄에 고농도를 보인 것은 난방 및 산업 시설 등에서 화석 연료 사용으로 인한 것으로 생각되며, 여름과 가을에 저농도를 보이는 것은 식물의 광합성 작용에 의한 활동이 많기 때문이다(지구 대기감시보고서, 2006; 정용승과 피터 텐스, 2000). 이는 또한 계절별 일변화를 나타낸 그림 4를 통해서도 확인할 수 있다. 각 계절별의 일변화를 살펴보면, 여름철에 일변화가 뚜렷하게 나타나 이산화탄소 농도

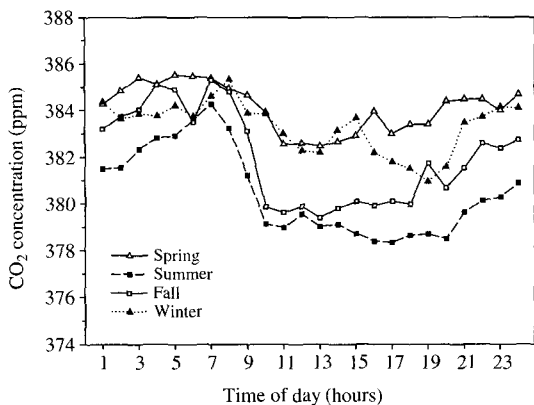


Fig. 4. Diurnal variations of CO₂ by seasons at Gosan in Jeju.

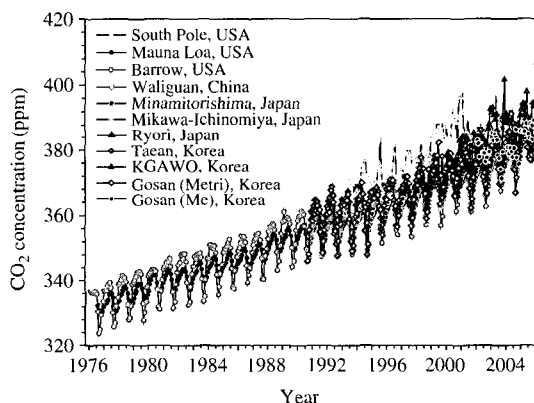


Fig. 5. Variations of CO₂ concentration at Gosan and other sites in domestic and abroad.

변동은 식생활동에 의한 영향을 가장 크게 받는 것을 알 수 있으며, 겨울과 봄에는 일변화가 상대적으로 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 각 계절별 변화량은 3 ppm (봄), 6 ppm (여름), 5.9 ppm (가을), 4.4 ppm (겨울)으로 여름과 가을의 변화량이 크게 나타났으며 이와 같은 일변화 경향은 다른 지역급 관측소와 유사한 경향을 보인다. 그러나 좀더 과학적인 결과를 도출하기 위해서는 장기간의 자료가 요구된다.

그림 5는 CO₂의 월평균 농도 변화를 WDCGG에 등록되어 있는 국내·외 다른 관측소의 측정결과와 비교한 것이다. 인간과 식생활동의 영향을 거의 받지

Table 2. Concentrations of non-CO₂ greenhouse gases at Gosan, Jeju during 2002~2005.

	CH ₄ (ppb)	N ₂ O (ppb)	CFC-11 (ppt)	CFC-12 (ppt)	CFC-113 (ppt)
2002	1784.5	313.9	269	545	89.1
2003	1802.6	315.3	258	536	83.4
2004	1796.9	317.7	250	538	76.9
2005	1784.8	317.9	254	547	78.0

않는 지구급 관측소(Global station)인 마우나 로아(Mauna Loa)는 국내 관측소 안면도(KGAWO) 및 제주도 고산의 경우보다 낮은 값을 보였다. 또한 해양에 위치한 하와이 지역은 고위도인 한반도 지역보다 낮은 계절변화를 나타내었고 국내 온실기체 관측소의 경우 식생의 영향이 높은 것으로 나타났다. 또 고산에서의 CO₂ 농도는 태안에서의 CO₂ 농도와 유사하게 나타났다. WMO WDCGG에서 발간한 온실기체 회보(WMO Greenhouse Gas Bulletin, No. 2: 1, 2006)에 의하면 2005년 CO₂의 전 지구 평균 농도는 379.1 ppm이며 지난 10년(1996~2005년)동안에 나타난 연평균 농도 증가율은 1.9 ppm으로 나타났다. 2005년 제주도 고산에서의 연평균 농도는 386.2 ppm으로써 전 지구 평균 농도보다 약 7 ppm 높은 것으로 나타났으며, 연평균 농도 값으로 구한 연평균 증가율은 약 2.1 ppm 정도로 전 지구의 연평균 농도 증가율보다 약간 높게 나타났다.

3. 2 비이산화탄소 온실기체 (메탄, 아산화질소, 염화불화탄소)의 농도 변동 특성

표 2는 2002년부터 2005년까지 제주 고산 지구대 기측정소에서 측정한 이산화탄소 외의 온실기체 연평균 농도이다. 메탄의 경우 최근 4년 동안에 뚜렷한 증감 추세가 나타나지 않았으며, 2005년도 기준 전 지구 메탄 농도는 1,783 ppb이고, 2005년 제주도 고산에서 측정한 메탄의 연평균 농도는 1,785 ppb으로 나타나 고산이 약 2 ppb 높게 나타났다. 아산화질소의 경우는 최근 4년간 계속해서 증가하였으며, 전지구 아산화질소 농도는 319.2 ppb(2005년)로 제주도 고산에서 측정한 2005년 연평균 농도값(317.9 ppb)과 1.3 ppb 차이를 나타내었다. 오존층 파괴 물질로서 알려진 염화불화탄소의 경우는 몬트리올 의정서와 그 수정안에 따라 두 화합물의 제조를 금지함으로써

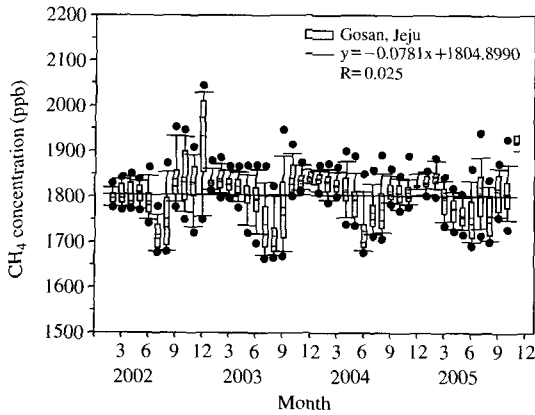


Fig. 6. A box diagram for monthly variations of CH₄ at Gosan, Jeju.

CFC-11은 감소하기 시작하였고, CFC-12의 증가비율도 쇠퇴하기 시작하였으나 여전히 대기 중에 연속적으로 측정되고 있다. 고산 지구대기측정소에서 측정된 대기 중 CFC-11과 CFC-113의 경우 최근 4년간 농도가 감소하고 있는 경향을 보이고 있으며, CFC-12 농도는 뚜렷한 증감 추세를 보이고 있지 않다.

그림 6은 4년간 관측된 메탄의 시간별 평균 농도를 이용하여 월별 시계열 변화를 상자 도표로 나타낸 것이다. 상자 도표에서 아래로부터 메탄의 농도는 5-, 10-, 25-, median, 75-, 90-, 95-percentile을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 메탄의 농도는 최근 4년간 뚜렷한 증감 추세를 나타내지 않았으나, 여름에는 저농도를 겨울에는 고농도를 나타내는 계절 변동을 보여주었다. 이는 또한 일평균 농도 값으로 나타낸 계절별 변화를 나타낸 그림 7에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 여름에 1767.3±39.3 ppb로 가장 낮은 값을 나타냈으며, 겨울에 1824.1±28.5 ppb로 가장 높은 값을 나타내었다. 정용승과 이근준(1992)에 의하면 6~7월에 메탄의 저농도 현상은 북태평양의 해양성 기류의 유입과 잦은 비로 인한 washout-rain-out, OH radical의 급속한 증가, 벼의 최고 성숙기 이후 메탄 방출의 감소 등에 기인하는 것으로 설명하였으나 본 연구에 사용된 메탄 농도는 이미 남풍계열만의 자료로서 풍향보다는 그 외의 요인(OH radical의 증가)으로 인해 메탄의 소멸이 더 강하게 나타난 것으로 생각된다. 또한 계절 변동은 대기 중 메탄의 주요 소멸원인 OH와의 반응에 의해 생긴다고 하였으

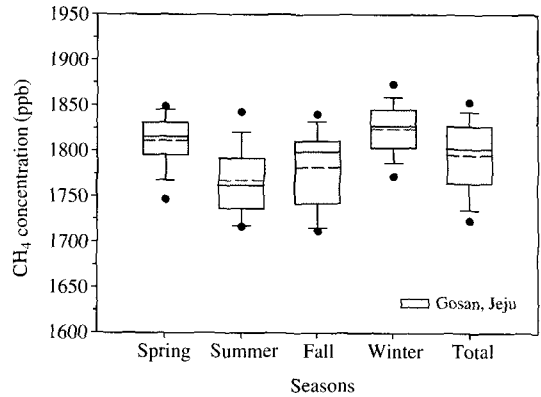


Fig. 7. A box diagram for seasonal cycle of CH₄ at Gosan, Jeju.

며(WDCGG No. 30), 일본 국립환경연구소(NIES: National Institute for Environmental Studies)의 Cape Ochi-ishi와 Hateruma 온실기체 관측소에서 측정된 메탄의 계절변동에서도 여름에 가장 낮고 겨울에 가장 높은 농도를 나타내었는데 이는 여름에 메탄 배출원이 적은 것과 OH 라디칼이 풍부하기 때문인 것으로 설명하였다(Tohjima *et al.*, 2002).

4년간 관측된 대기 중 메탄의 시간별 평균 농도 변화에서는 하루 중 메탄 농도는 새벽 5시와 22시에 각각 1786.1±65.4 ppb, 1786.8±65.2 ppb로 높은 농도를 나타냈으며, 대체로 오후에 저농도를 나타내고 19시에 1777.0±58.4로 가장 낮은 농도가 나타났으나 메탄은 이산화탄소처럼 식생에 의한 영향을 직접적으로 받는 온실기체가 아니므로(지구대기감시보고서, 2006) 일변화 패턴이 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 그러나 낮 시간대에 상대적으로 낮은 농도를 나타냈는데 이는 기온상승과 일사량 증대에 따른 광화학 반응의 촉진과 그로 인한 대기 중 OH radical의 증가로 메탄의 소멸이 용이한 것으로 생각되며(최규훈 등, 2001), 또한 오전에 높고 오후에 낮은 농도를 보이는 메탄의 일변화는 일본의 온실기체 관측소에서 측정된 메탄의 일변화에서도 나타난 바 있다(Tohjima *et al.*, 2002).

그림 8은 메탄의 월평균 농도 변화를 WDCGG에 등록되어 있는 국내·외 다른 관측소의 측정 결과와 비교한 그림이다. 남극(South Pole)에서 가장 낮은 값이 나타났으며, 본 측정소에서 관측한 값은 일본의

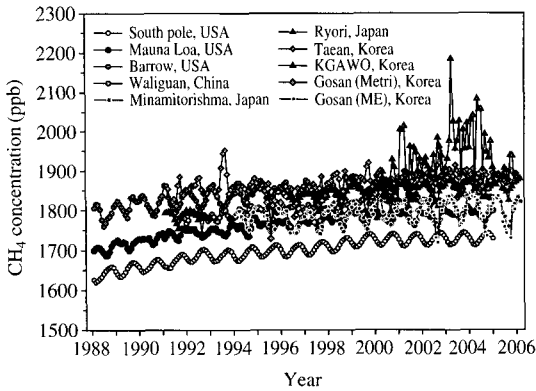


Fig. 8. Variations of CH₄ concentration at Gosan and other sites in domestic and abroad.

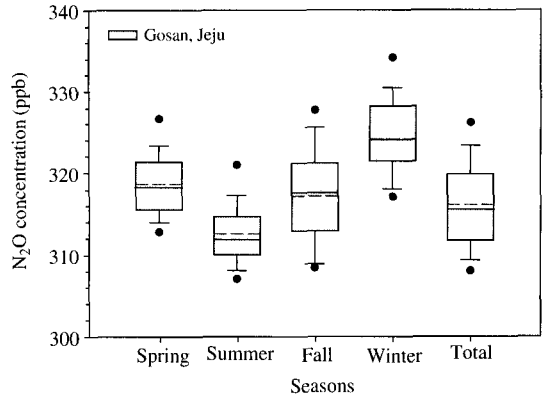


Fig. 10. A box diagram for seasonal cycle of N₂O at Gosan, Jeju.

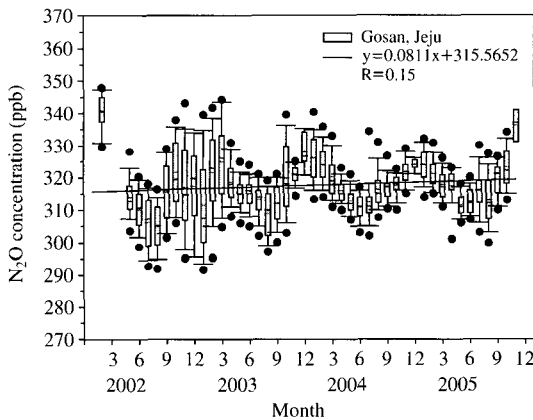


Fig. 9. A box diagram for monthly variations of N₂O at Gosan, Jeju.

지구급 관측소인 미나미토리시마 (Minamitorishima) 관측소와 비슷한 값을 보였으며 다른 국내 관측소에서 측정된 결과는 본 관측소보다 높게 나타났다. 또 해양에 위치한 하와이 지역은 고위도인 한반도 지역보다 작은 계절 변동을 나타냈다.

아산화질소는 대기 중 체류시간이 매우 긴 (150년) 무색의 기체로 대류권에서는 극히 안정하며, 8 μm 부근의 적외선 영역에 흡수대가 있어 강한 온실효과를 나타낸다 (지구대기감시보고서, 2006). 아산화질소의 발생원은 비생물적 과정과 생물적 과정으로 구분되며, 비생물적 과정으로서는 주로 연소과정에서 발생되며, 생물적인 발생과정으로서는 미생물의 질소대사

과정으로부터 생성되고 있다 (오종민 등, 1991). 그림 9는 아산화질소의 월별 시계열 변동을 나타낸 것으로 농도는 조금씩 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 대류권에서 극히 안정한 기체임에도 불구하고 월별 변동성이 크게 나타났는데 이는 지역급 관측소에서는 지역기원 오염물의 영향을 받기 때문으로 생각된다 (지구대기감시보고서, 2006). 2002년 1월부터 2005년 12월까지 최근 4년간 관측된 대기 중 아산화질소의 시간별 평균 농도 변화에서는 하루 중 아산화질소 농도는 새벽 1시에 313.8 ± 9.2 ppb로 가장 낮은 값을 나타냈으며, 15시에 316.4 ± 6.7 ppb로 가장 높은 값을 나타냈으나 일 변화량이 3 ppb 이내의 작은 차이로 뚜렷한 일변화는 나타나지 않았다.

그림 10은 일평균 자료를 가지고 나타낸 계절별 변화이다. 각 계절별 평균값은 318.7 ± 3.97 ppb (봄), 312.6 ± 3.89 ppb (여름), 317.2 ± 6.12 ppb (가을), 324.2 ± 5.29 ppb (겨울)로 나타나 여름에 가장 낮고 겨울에 가장 높은 농도 값이 나타났다. 또한 인간 활동의 영향을 현저하게 받고 있는 육수환경 중의 아산화질소의 분포를 조사한 오종민 등 (1991)의 연구결과에서도 여름에 가장 낮고 봄, 겨울, 가을에 높은 농도를 보이는 계절 변동성을 나타낸 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 아산화질소의 월평균 농도 변화를 국내·외 다른 관측소의 측정 결과와 비교한 그림이다. 지구급 관측소인 마우나 로아 (Mauna Loa)와 바로우 (Barrow)에서 변동성이 작고 낮은 값이 나타났으며 두 관측소의 값은 거의 같게 나타났다. 일본의

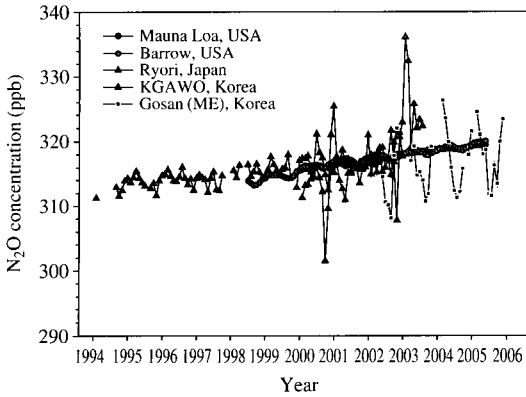


Fig. 11. Variations of N₂O concentration at Gosan and other sites in domestic and abroad.

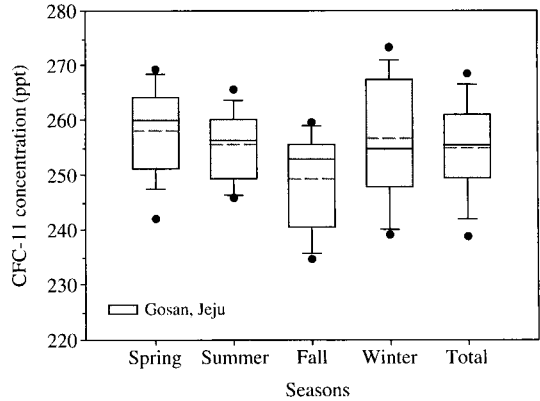


Fig. 13. A box diagram for seasonal cycle of CFC-11 at Gosan, Jeju.

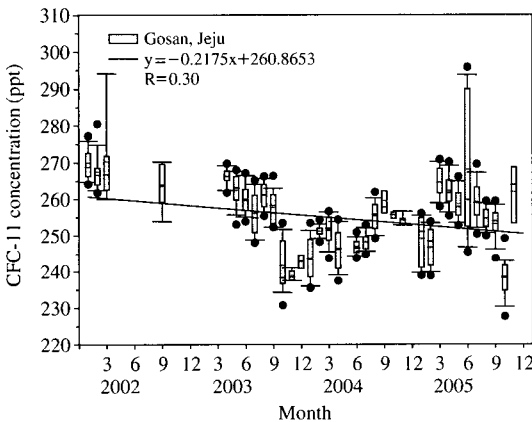


Fig. 12. A box diagram for monthly variations of CFC-11 at Gosan, Jeju.

지역급 관측소인 료리(Ryori)에서는 월별 변동성이 나타났으며 국내 관측소에서는 이보다 더 큰 변동성을 보였다.

오존층 파괴 물질로서 알려진 염화불화탄소는 대기 중에 미량으로 존재하며, 자연적으로 존재하지 않는 인공적인 화합물이다. 몬트리올 의정서와 그 개정안에 따라 오존층 파괴 물질에 대한 생산 및 배출을 규제한 이후 CFC-11 (CCl₃F), CFC-113 (C₂Cl₃F₃)은 감소하기 시작하였고 CFC-12 (CCl₂F₂)의 증가비율도 쇠퇴하기 시작하였으나 여전히 대기 중에 연속적으로 축적되고 있다.

그림 12는 매 2시간 마다 측정된 CFC-11 농도 자

료를 이용하여 월별 시계열 변동을 나타낸 것으로, 본 관측기간 동안에는 감소하고 있는 것으로 나타났다. CFC-11의 일변화를 보면, 하루 중 CFC-11 농도는 오전 7시에 255±10.9 ppt로 가장 낮은 값을, 24시에 261±5.6 ppt로 가장 높은 값을 나타냈으며, 최대 농도와 최소 농도의 차이가 약 6 ppt이나 뚜렷한 일변화는 나타나지 않았다. 또한 일평균 농도로 계절별 변화를 나타낸 그림 13에서는 각 계절별 평균값이 258±8.1 ppt (봄), 256±6.7 ppt (여름), 249±8.6 ppt (가을), 257±11.7 ppt (겨울)로 나타나 산업 활동 및 난방시설 등의 인위적 배출량이 많은 봄, 겨울에 높은 농도가 나타났다. 이는 또한 인공화합물인 염화불화탄소의 계절별 농도 변화를 통해 이산화탄소 농도가 봄, 겨울에 높게 나타난 것이 지역 기원 오염물질에 의한 것임을 말해주는 것이기도 하다(Derwent *et al.*, 2002).

그림 14는 매 2시간 마다 측정된 CFC-12 농도 자료를 이용하여 월별 시계열 변동을 나타낸 것으로, 본 관측기간 동안에는 약하게 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 4년간 측정된 CFC-12의 시간평균 값으로 본 일변화에서는 하루 중 CFC-12 농도는 23시에 543±14.9 ppt로 가장 높은 값을, 14시에 537±10.4 ppt로 가장 낮은 값을 나타냈으나 뚜렷한 일변화는 나타나지 않았다. 그림 15는 일평균 자료를 가지고 나타낸 계절별 변화이다. 각 계절별로 농도 값이 545±12.7 ppt (봄), 540±11.4 ppt (여름), 537±12.9 ppt (가을), 541±13.5 ppt (겨울)로 나타났으며 전체 평균

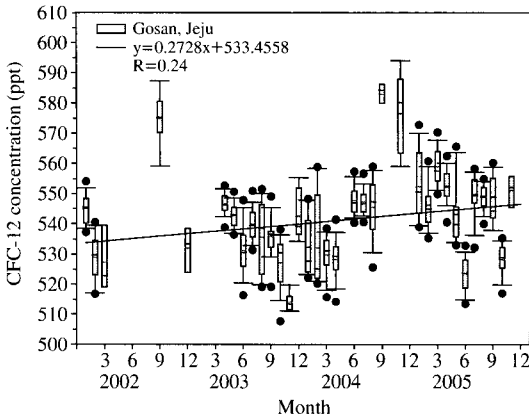


Fig. 14. A box diagram for monthly variations of CFC-12 at Gosan, Jeju.

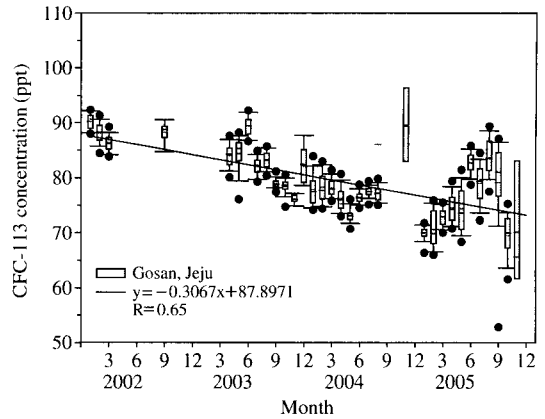


Fig. 16. A box diagram for monthly variations of CFC-113 at Gosan, Jeju.

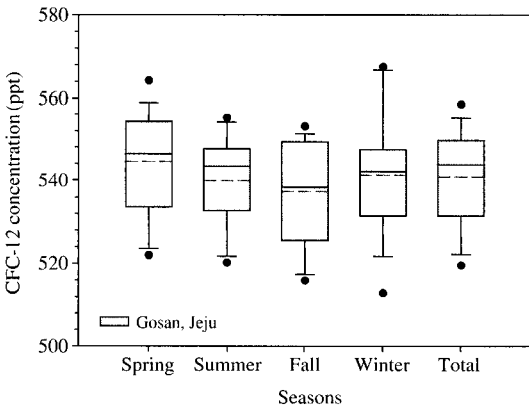


Fig. 15. A box diagram for seasonal cycle of CFC-12 at Gosan, Jeju.

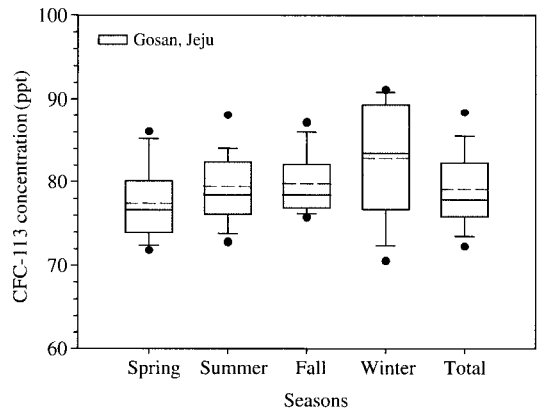


Fig. 17. A box diagram for seasonal cycle of CFC-113 at Gosan, Jeju.

농도는 541 ± 12.4 ppt로 각 계절별 농도가 전체평균 농도와 큰 차이를 나타내지 않으나 봄에 가장 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

그림 16은 매 2시간 마다 측정된 CFC-113 농도 자료를 이용하여 월별 시계열 변동을 나타낸 것으로, 본 관측기간 동안에는 감소하고 있는 경향이 뚜렷이 나타나고 있다. 최근 4년간 측정된 CFC-113의 두 시간마다 측정된 농도 값으로 살펴본 일변화에서는 하루 중 CFC-113 농도는 아침 6시에 84.1 ± 3.2 ppt로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 15시에 77.1 ± 5.7 ppt로 가장 낮은 농도를 나타냈으나 뚜렷한 일변화는

나타나지 않았다. 그림 17은 일평균 자료를 가지고 나타난 계절별 변화이다. 각 계절별로 농도 값이 77.4 ± 4.30 ppt(봄), 79.4 ± 4.40 ppt(여름), 79.7 ± 3.46 ppt(가을), 82.9 ± 6.92 ppt(겨울)로 나타났으며 전체 평균 농도는 79.1 ± 4.71 ppt로 각 계절별 농도가 전체 평균 농도와 큰 차이를 나타내지 않았으나 CFC-11, CFC-12와 같이 다른 계절에 비하여 겨울에 고농도를 나타내었다.

염화불화탄소의 일평균 농도 변화를 국내·외 다른 관측소의 측정 결과와 비교하여 보면, 남극에서 측정된 CFC-11과 CFC-12 농도가 가장 낮게 나타났

으며, 1992년을 기점으로 CFC-11은 감소하고 있으며, CFC-11보다 대기에서의 체류시간이 긴 CFC-12는 농도 증가율이 감소하여 약하게 증가하는 모습이다. 국내 관측소에서 관측한 값의 변동성이 다른 국외 관측소에 비하여 좀더 크게 나타났지만 평균값은 국내·외 관측소 모두에서 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 WMO WDCGG에서 발간한 DATA SUMMARY (WMO No. 1: 14, 2006)에 의하면 전 지구적으로 염화불화탄소 농도는 서서히 감소하고 있다고 보고하고 있으며 본 연구에서 비교하여 본 국내·외 관측소의 농도는 이러한 전 세계적인 농도 변화를 잘 보여주고 있고 국내 관측소의 농도 변동도 이와 같은 경향으로 변화하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

제주도 고산에 위치한 지구대기측정소에서 2002년 1월부터 2005년 12월까지 측정된 온실기체의 시간평균, 일평균, 월평균 농도 자료를 이용하여 한반도 배경대기의 온실기체 농도 변동 특성을 분석하였으며 WDCGG에 등록되어 있는 국내·외 다른 관측소에서의 온실기체 농도 특성과 비교·분석하였다.

이산화탄소의 경우 월별 시계열 분석에서 농도는 계속 증가하고 있는 것을 알 수 있었고, 대체로 여름과 가을에 낮은 농도를, 겨울과 봄에 높은 농도를 나타냈었는데 이는 식생활동에 의해 크게 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

WDCGG에 등록되어 있는 국내 관측소 중에서 안면도(KGAWO), 고산(기상연구소)과 태안(NOAA/GMD)의 이산화탄소 연평균 농도를 2004년을 기준으로 비교하여 보면 고산 지구대기측정소에서 가장 낮은 값을 보였는데 이는 국내 배경대기 관측 자료로서 좀더 배경대기에 가까운 농도를 나타내기 위해 풍향과 풍속에 따라 자료를 보정하여 주었기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 우리나라와 가까운 일본과 중국, 미국의 마우나로야의 이산화탄소 농도를 비교하면 한반도의 이산화탄소가 가장 높은 것으로 나타났다.

메탄의 경우, 최근 4년간 뚜렷한 증감 경향을 보이지 않았으며, 여름에 가장 낮고 겨울에 가장 높은 농도를 보이는 계절별 변동(seasonal cycle)을 보였으며, 일본 국립환경연구소(NIES: National Institute for

Environmental Studies)의 Cape Ochi-ishi와 Hateruma 온실기체 관측소에서 측정된 메탄의 계절변동에서도 여름에 가장 낮고 겨울에 가장 높은 농도를 나타내었는데 이는 여름에 메탄 배출원이 적은 것과 OH 라디칼이 풍부하기 때문인 것으로 설명하였다. 메탄의 일변화에서는 이산화탄소처럼 식생활동에 의해 직접적으로 영향을 받지 않으므로 일변화는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

아산화질소의 농도는 최근 4년간의 월별 시계열 변화를 통해 계속해서 조금씩 증가하는 것을 알 수 있으며, 대류권에서 극히 안정한 기체임에도 불구하고 월별 변동성이 크게 나타났는데 이는 지역급 관측소에서는 지역기원 오염물의 영향을 받기 때문으로 생각되며, 시간평균 값으로 구한 일변화에서는 뚜렷한 특징이 나타나지 않았다.

염화불화탄소 중 CFC-11와 CFC-113의 경우 최근 4년간 계속해서 감소하는 경향을 보였으며, CFC-12는 약하게 증가하는 경향을 보였으나 해가 지날수록 증가율은 계속해서 감소하는 것을 알 수 있었다. 염화불화탄소의 계절변동에서는 작은 차이이지만 산업활동 및 난방시설 등의 인위적 배출량이 많은 봄, 겨울에 높은 농도가 나타났는데 인공화합물인 염화불화탄소의 계절별 농도 변화를 통해 이산화탄소 농도가 봄, 겨울에 높게 나타난 것이 지역 기원 오염물질에 의한 것임을 말해주는 것이기도 하다.

제주도 고산에서 측정된 최근 4년간의 한반도 배경대기 중 온실기체의 농도는 국내·외의 여러 관측소와 유사한 변동성을 보이는 것으로 나타났으나, 좀더 과학적인 분석을 위해서는 지속적인 관측과 장기간의 데이터로 분석해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 제주도 고산 지구대기측정소에서 측정된 자료를 이용한 것으로 측정소 자료를 제공하여 주신 환경관리공단 대기측정망 관리팀 및 영산강 유역 환경청에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김기현, 윤용훈, 송기범(2001) 국내외 관측지점간의 비교분

- 석을 통한 이산화탄소의 장주기적 농도변화 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 17(1), 105-115.
- 김정식, 최재천 (2001) 배경대기 중 CO₂ 자료 선정 방법에 따른 안면도 자료의 분석, 한국대기환경학회지, 17(3), 277-288.
- 박미경 (1997) 한반도 대기 중의 CO₂ 분포에 관한 연구, 서울대학교 대학원, 석사학위논문, 33-35.
- 박일수, 최덕일, 최기덕, 홍윝기, 김정수, 정은영, 마창민 (1994) 우리나라 이산화탄소의 배출량 및 전지구적 대기 중 농도에 대한 기여도 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 217-223.
- 송기범, 윤용훈, 김기현 (2000) 이산화탄소의 단주기적 농도 변화 특성에 관한 연구, 한국지구과학회지, 21, 623-634.
- 오종민, 上田 眞吾, 小倉 紀雄 (1991) 도시지역의 수계환경 중의 아산화질소(N₂O) (제3의 온실효과가스 아산화질소의 행방), 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, 49-51.
- 이근준, 정용승 (1993) 한국의 태안반도에서 관측된 이산화탄소의 배경농도에 관한 연구: 1990~1992년 자료를 중심으로, 한국대기보전학회지, 9(1), 61-68.
- 조창범, 오성남, 박기준, 최병철, 박미경, 김경렬 (2005) 한반도 배경대기 중 이산화탄소의 농도 변동과 근간에 대한 예측, 한국기상학회지, 41(3), 371-385.
- 조하만, 박미경, 남재철, 민동하, 김경렬, 송병현, 김병선, 김성균, 정영선 (1995) 한반도 대기 중 CO₂ 배경농도 변동 특성, 한국기상학회지, 31, 301-312.
- 조하만, 임영권, 김정우, 김주공, 김지영 (2000) 전 지구적 대기 중 CO₂ 농도의 분포 특성, 한국기상학회지, 36, 167-178.
- 조하만 (2001) 대기 중 CO₂ 농도의 비균질 조건이 기후변화에 미치는 영향에 관한 연구, 연세대학교 대학원 박사학위논문.
- 정용승, 이근준 (1992) 한국의 태안반도에서 관측된 CH₄의 지역적 배경농도에 관한 연구-1990~1992년 자료를 중심으로-, 한국환경과학회지, 1(2), 33-48.
- 정용승, 피터 텐스 (2000) 한국 태안반도의 온실기체 모니터링, 한국기상학회지, 36(1), 25-34.
- 지구대기감시보고서 (2006) 기상청.
- 최규훈, 윤용훈, 김기현, 강창희, 조영민 (2001) 무안지역 메탄가스의 단주기적 농도변화에 대한 평가, 한국지구과학회지, 22(4), 327-338.
- Bacastow, R.B., C.D. Keeling, and T.P. Whorf (1985) Seasonal amplitude increasing in atmospheric CO₂ concentration at Mauna Loa, Hawaii, *Journal of Geophysical Research*, 90D6, 1959-1982.
- Bakwin, P.S., P.P. Tans, D.F. Hurst, and C. Zhao (1998) Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program, *Tellus*, 50B, 401-415.
- Derwent, R.G., D.B. Ryall, A.J. Manning, P.G. Simmonds, S.O'Doherty, S. Biraud, P. Ciais, M. Ramonet, and S.G. Jennings (2002) Continuous observations of carbon dioxide at Mace Head, Ireland from 1995 to 1999 and its net European ecosystem exchange, *Atmospheric Environment*, 36, 2799-2807.
- Dlugokencky, E.J., J.M. Harris, Y.S. Chung, P.P. Tans, and J. Fung (1993) The relationship between the methane seasonal cycle and regional sources and sinks at Taeahn Peninsula Korea, *Atmospheric Environment*, 27(14), 2115-2120.
- IPCC Working Group 1: The Physical Basis of Climate Change AR4 Report (2007) Summary for Policymakers.
- Keeling, Charles D., R.B. Bacastow, A.E. Bainbridge, C.A. Ekdahl, P.R. Guenther, L.S. Waterman, and J.F.S. Chin (1976) Atmospheric carbon variation at Mauna Loa observatory, Hawaii, *Tellus*, 28, 538-551.
- Tohjima, Y., T. Machida, M. Utiyama, M. Katsumoto, Y. Fujinuma, and S. Maksyutov (2002) Analysis and presentation of in situ atmospheric methane measurements from Cape Ochi-ishi and Hateruma Island, *Journal of Geophysical Research*, 107, D12, 4148-4159.
- WMO Greenhouse Gas Bulletin (2006) No. 2: 1.s