

국내외 관측점간의 비교분석을 통한 이산화탄소의 장주기적 농도변화 특성에 관한 연구

김 기 현 · 윤 용 훈¹⁾ · 송 기 범

세종대학교 자연과학대학 지구과학과 대기환경연구실/세종연구원

¹⁾기상연구소 지구대기감시관측소

(2000년 8월 23일 접수, 2000년 11월 22일 채택)

A Study of Long-term Change in Carbon Dioxide Concentrations within and Across the Korean Peninsula between 1995 and 1997

Ki-Hyun Kim, Yong-Hoon Youn¹⁾ and Ki-Bum Song

*Atmospheric Environment Laboratory, Department of Earth Sciences, Sejong University /
Sejong Institution*

¹⁾*Korea Global Atmosphere Watch Observatory, Meteorological Research Institute*

(Received 23 August 2000; accepted 22 November 2000)

Abstract

This study was conducted to analyze the pattern of CO₂ concentration changes in various time scale within and across the Korean Peninsula. We compared the data sets obtained from Moo-Ahn (MAN) station in Korea with those determined from major background observatory stations around the world from the periods of Aug. 1995 to Dec. 1997. The mean CO₂ concentrations of the MAN area, if computed using the total of 884 daily mean values, were computed to be 374.5 ± 6.6 ppm. When the background data for MAN were compared with those of other background sites, the concentration of MAN was systematically higher than any other comparable sites. Results of correlation analysis between MAN and other background sites generally showed up the existence of strong correlations, indicating that the relative effects of CO₂ concentration change can proceed similarly over the globe. However, notable differences in annual growth rate of CO₂ between MAN and all the comparative sites suggested that its concentration in the MAN area be regulated in more complicated manners than those in the other areas. It is thus suspected that the data collected from MAN area be not effective enough to represent areal distribution characteristics of CO₂ in the Korean Peninsula.

Key words : CO₂, global warming, greenhouse gas, background, long-term scale

1. 서 론

대기 중의 온실기체로는 수증기(H₂O), 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄소(CFCs), 지상 오존(O₃) 등이 존재한다. 이외에도, 지난 1997년 12월 일본 교토에서 열린 IPCC 제3차 총회에서는 수소불화탄소(HFC), 과불화탄소(PFC), 육불화황(SF₆) 등이 추가로 규정되었다. 각 국가의 산업 경제 문제와의 직접적인 관련성 등으로 인해, 세계기상기구(WMO(World Meteorological Organization))에서는 지구대기감시(GAW(Global Atmosphere Watch)) 관측망을 강화하기 위해 각 회원국에 대한 온실기체의 관측을 권유하여 왔다. 이러한 시대적 조류에 맞추어, 국내에서도 온실기체에 대한 대처 방안 수립 및 기후변화 예측을 위해, 기후변화 모델링, 기후변화 영향평가, 기후변화를 유발하는 대기 성분의 감시에 주력하고 있는 실정이다(환경부, 1998; 기상청, 1997, 1998, 1999).

온실기체의 증가는 지구온난화를 가속화하여 기상이변, 사막화, 해수면 상승, 생태계 파괴와 같은 여러 가지 환경재난 및 기상재해를 초래하는 것으로 밝혀졌다(IPCC, 1995, 1996, 1997). 이들 온실기체의 대기 중 농도는 배출량의 변화추이와 밀접한 관련이 있는데, 특히 에너지 사용에 따른 온실기체의 배출비중은 전체배출량의 80% 이상을 차지하는 것으로 밝혀지고 있다(IPCC, 1995). 이 중 CO₂의 기여도는 약 55%를 차지하는 것으로 나타났으며(EPA, 1997, 1998, 1999; IPCC, 1995), IPCC 방법론에 따라 산정된 우리 나라의 연료연소에 따른 CO₂ 배출량은 높은 증가율을 보여주었다(한국대기환경학회, 1999; 과학기술처, 1994). 1984년 이후, CO₂의 연평균 배경농도 증가율은 0.4%로서 매년 약 1.5ppm씩 증가하는 것으로 나타났다(IPCC, 1995).

지구온난화에 대비하기 위해서는 기후변화에 대해 지속적인 분석과 영향평가 등을 실시하는 것이 중요하다. 특히 온실기체의 농도변화양상을 정확히 관측하고 그 경향을 추정하는 것과 동시에 방출된 오염물질의 농도분포를 파악하는 것은, 현재의 오염상태를 이해하고 장래의 대기질을 관리하는데 있어서 무엇보다 중요하다고 할 수 있다(IPCC, 1996, 1997). 본 연구에서는 전남 무안 기상대에서 관측한

CO₂와 기상자료를 토대로 하여, 한반도의 국지적 규모에서 진행되는 지구온난화의 경향성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 측정기간동안의 월주기 및 계절주기의 농도변화 양상 등을 분석하고, 국내외 관측망의 장기적 변화추세와 변화양상 등을 비교 분석하였다. 또한 기상요소들과의 상관분석 등을 통해 농도변화의 의미를 도출하고자 하였다. 이미 본 연구진은 선행 연구의 일환으로 24시간 주기로 진행되는 이산화탄소의 단주기적 농도변화양상에 대한 해석을 제시한 바 있다(송기범 등, 2000).

2. 연구 방법

본 연구의 CO₂를 포함한 온실기체와 기상인자의 관측은 무안군 해제반도에 위치한 무안 기상대(전남 무안군 해제면 광산리 242-2)에서 이루어졌다. 무안 기상대는 동쪽을 제외한 삼면이 바다이며, 해발고도가 비교적 낮은 곳(해발고도: 23.3 m, 35°06'N, 126°17'E)에 위치하고 있다(그림 1). 기상청은 1993년에 온실기체 관측소를 설립하였으며, 이 관측소는 온실기체 연속 관측 시스템을 갖추고 현지의 대기 성분을 관측하는 in-situ 상태로 관측하였다. 1994년 1월부터 CO₂ 관측을 시작으로, 같은 해 2월에는 CFCs(CFC-11, CFC-12)를 1995년 3월부터는 N₂O, CH₄에 대한 관측을 추가적으로 수행하였다. 그러나 1997년 말 업무의 효율화와 세계기상기구(WMO)의 지구대기감시(GAW) 계획에 따른 관련 업무 통합 차원에서 배경대기관측소를 태안반도에 위치한 안면도(해발고도: 47 m, 36°31'N, 126°19'E, 이하 영어 약칭 TAP(Tae-An Peninsula)로 지칭함)로 이전하였다. 따라서 1998년 4월을 기점으로 온실기체의 관측은 TAP를 중심으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 1995년 8월부터 1997년 12월까지 약 29개월의 기간 동안 무안 기상대에서 관측한 CO₂와 기상요소(기온, 기압, 습도, 강우량, 풍향, 풍속)에 대한 관측자료를 이용하여 온실기체의 장주기적 환경거동을 해석하기 위해 여러 가지 비교분석을 실시하였다. CO₂의 측정에는 연속관측장비인 비분산 적외선 분석기(Non-Dispersive InfraRed(NDIR); ULTRAMAT-5E, Siemens Co., Germany)가 사용되었다. CO₂의 분석과 관련한 자세한 내용은

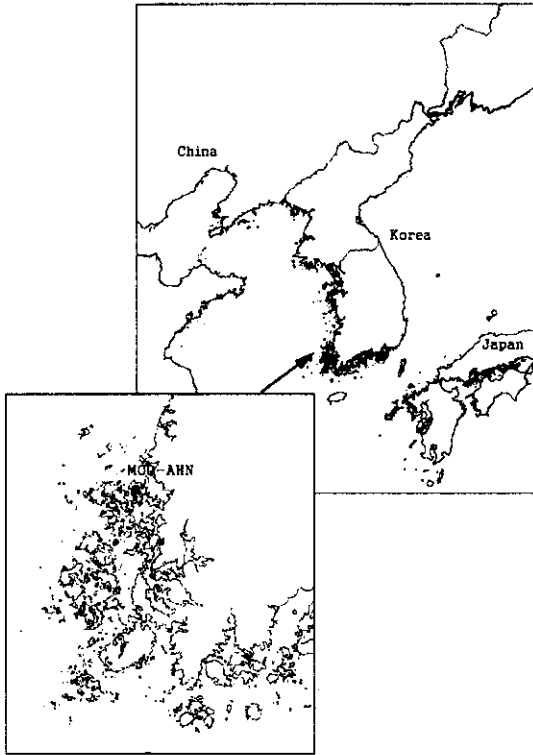


Fig. 1. The location of Moo-Ahn (MAN) station (35° 06'N, 126° 17'E) for CO₂ measurement in Korea.

이미 선행과제에서 상세하게 언급하였다(송기범 등, 2000).

본 연구에서는 이상자료의 구분을 위해 1분 간격으로 연속 관측된 자료에서 1시간 간격으로 평균과 표준편차(σ)를 구하여 평균으로부터 $\pm 2\sigma$ 범위를 초과하는 자료를 제외하였다. 기본적인 처리과정을 거친 자료는 해석의 편의상 일, 월, 계절 평균농도로 재산출하여 사용하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 기상조건 및 비교관측지점의 환경

본 연구에서는 국내에서 무안관측소(이하 영어 약칭 MAN (Moo-Ahn)으로 지칭함)를 중심으로 1995년 8월부터 1997년 12월까지의 2년 5개월의 기간동안 측정이 이루어진 이산화탄소의 농도분포를 이용하여 다양한 통계적 비교를 시도해 보았다.

CO₂의 농도분포와 함께 무안 기상대에서 동시관측이 이루어진 기온, 강수량, 풍향, 풍속, 상대습도, 해면기압 등의 변화추이는 표 1에 제시한 바와 같다. 총 884일의 기간동안 관측한 일별 자료로부터 구한 농도의 평균치는 374.5 ± 6.6 ppm으로 나타났다. 모든 일별 자료를 계절별로 분리해서 통계량을 비교하면, 봄, 여름, 가을, 겨울의 순서로 각각 378 ± 5.2 (N = 181), 372 ± 10.2 (N = 210), 372 ± 7.2 (N = 243), 376 ± 5.4 ppm (N = 206)의 평균치가 산출되었다.

본 연구에서는 MAN지역을 중심으로 확보된 이산화탄소의 농도관측자료에 대한 해석에 덧붙여, 미국의 해양기상청에 의해 관리되는 세계 4대 주요 배경관측점의 동시간대 자료를 동시에 비교 분석 대상으로 활용하였다. 이들 지점은 다음과 같다: (1) Mauna Loa, Hawaii (약칭: MLO, 국가: U.S., 해발고도: 3,397 m, 19° 32'N, 155° 35'W), (2) American Samoa (약칭: SMO, 국가: U. S., 해발고도: 30 m, 14° 15'S, 170° 34'W), (3) Point Barrow, Alaska (약칭: BRW, 국가: U.S., 해발고도: 11 m, 71° 19'N, 156° 36'W), (4) Amundsen Scott, South Pole (약칭: SPO, 국가: Antarctica, 해발고도: 2,810 m, 89° 59'S, 24° 48'W). 각 측정점은 여러 가지 기후권역을 대표한다. 예를 들어, 제 (1), (2)에 해당하는 MLO와 SMO 지점은 열대기후를 대표한다. 반면 제 (3)의 BRW는 한대기후, 제 (4)의 SPO는 극지 기후를 대표한다고 할 수 있다.

이들 지역의 이산화탄소는 현장에서 실시간 연속 관측방식으로 분석된 결과 (in-situ analysis)를 이용하였다. 따라서 측정점간의 농도분포를 객관적으로 비교하기 위해, MAN 지역과 동일하게 시간대별로 자료를 정리한 후, 다시 일별 단위의 처리를 가하였다. 분석결과에 따르면 BRW, MLO, SMO, SPO에서는 95/8~97/12 기간 중 각각 363.6 ± 5.9 , 362.2 ± 2.5 , 361.1 ± 1.0 , 360.3 ± 1.0 ppm의 평균농도를 보였다. 이들 국외 비교지점에 덧붙여 flask를 이용하여 수일 단위의 장기측정이 이루어진 두 개의 국내 관측점인 태안반도(이하 영어약칭 TAP, 36° 31'N, 126° 19'E)와 제주도 고산(이하 영어 약칭 KSN, 33° 17'N, 126° 10'E)의 농도자료도 동시에 활용하였다. 동 기간 중 이들 지역에서 관측한 평균농도는 각각 367.0 ± 4.2 와 361.5 ± 7.4 ppm으로 나타났다.

Table 1. A summary of data groups for the whole measurement periods (Aug. 1995 ~ Dec. 1997).

	Spring	Summer	Fall	Winter	Total
	Mean \pm SD(N) Range	Mean \pm SD(N) Range	Mean \pm SD(N) Range	Mean \pm SD(N) Range	Mean \pm SD(N) Range
CO ₂ (ppm)	377.8 \pm 5.2(181) 366.2 ~ 393.9	373.2 \pm 8.6(198) 353.3 ~ 395.0	372.1 \pm 7.2(242) 357.1 ~ 429.7	376.1 \pm 4.2(201) 366.2 ~ 389.7	374.5 \pm 6.6(822) 356.3 ~ 395.0
Temp. (°C)	11.1 \pm 5.1(184) (0.9 ~ 21.3)	24.5 \pm 2.9(215) (17.6 ~ 29.1)	15.8 \pm 5.4(273) (1.9 ~ 27.8)	2.3 \pm 3.0(212) (-5 ~ 1.9)	13.7 \pm 9.0(884) -5.0 ~ 29.1
Rainfall (mm)	1.3 \pm 2.1(61) (0 ~ 9.8)	1.9 \pm 2.7(83) (0 ~ 12.7)	1.2 \pm 2.0(76) (0 ~ 12.9)	0.4 \pm 0.8(84) (0 ~ 4.6)	1.2 \pm 2.1(304) 0.0 ~ 12.9
Wind dir. (°)	314.5(184) (0.3 ~ 360)	211.1(215) (0.7 ~ 358.6)	353.6(273) (0.2 ~ 359.5)	353.3(212) (0.2 ~ 360)	339.1(884) 0.2 ~ 360
Wind sp. (msec ⁻¹)	2.5 \pm 1.0(184) (1.0 ~ 5.7)	2.4 \pm 1.1(215) (0.9 ~ 6.3)	2.4 \pm 1.0(273) (0.6 ~ 5.8)	2.6 \pm 1.3(212) (0.2 ~ 6.7)	2.5 \pm 1.1(884) 0.2 ~ 6.7
RH (%)	64.8 \pm 14.0(184) (33.9 ~ 96.1)	80.6 \pm 9.6(215) (57.0 ~ 98.6)	66.3 \pm 12.5(273) (34.4 ~ 97.6)	64.5 \pm 17.3(212) (33.0 ~ 97.9)	69.0 \pm 15.0(884) 33.0 ~ 98.6
Pressure (HPa)	1017 \pm 6.3(184) (1002.8 ~ 1029.9)	1008 \pm 3.8(215) (995.3 ~ 1015.2)	1018 \pm 5.4(273) (1003.8 ~ 1031.2)	1025 \pm 4.7(212) (1005.7 ~ 1036.9)	1017 \pm 7.7(884) 995 ~ 1037

3. 2 이산화탄소의 주기적 변화양상-월주기의 농도변화

측정기간 동안 관측된 일평균 농도를 이용하여 산출한 월평균 농도로, 국내 및 국외 여타 측정점의 자료에 대비한 월주기 변화양상을 살펴보았다(그림 2a). 무안의 경우 1월부터 서서히 CO₂의 농도가 증가하여 4월에 정점(380 ppm)을 이룬 후 점점 감소한다. 계절적인 차이에 따라 7월을 제외한 여름기간 중에는 대체적으로 감소를 보이는 것으로 나타났다. 겨울에 비해 상대적으로 연료의 사용이 적으며(저배출), 활발한 광합성이 이뤄지고(고소모), 청정한 공기가 유입되는 8월에 최저치(366 ppm)를 보여 주었다. 그 후로는 12월까지 지속적으로 농도가 완만하게 상승하는 것을 확인할 수 있다.

비록 국내 측정점인 TAP와 KSN 지역의 측정 및 분석방법 등에서 MAN 지역과 다소 차이는 존재하지만, 시간의 흐름에 따른 월별 변화양상은 매우 유사하게 나타났다. 즉, 모두 봄과 겨울에 고농도, 여름에 저농도를 보여주었는데, 이러한 변화양상은, 월별 변화가 거의 일어나지 않는 SMO와 SPO를 제외한 국외의 타 관측소(BRW, MLO)의 변화양상과 매우 유사한 것으로 확인되었다(기상연구소, 1999; 환경부, 1998; 이명인 등, 1997; 이근준 등, 1993). 월주기 패턴에 있어서 위도에 따른 지점별 농도차이가 다

양하게 나타나는데, 특히 북반구가 남반구에 비해 상대적으로 고위도로 갈수록 큰 진동폭을 보인다. 즉, 남반구에 위치한 SPO, SMO는 각각 1.9, 2.0 ppm으로 나타나 변동폭이 작으며, 위도에 따른 차이 또한 작은 반면, 북반구에 위치한 MLO, MAN, BRW는 각각 5.9, 14.2, 14.6 ppm으로 나타나 위도별 차이가 크며, 진동폭 역시 고위도로 갈수록 커짐을 알 수 있다. 이러한 원인으로는 북반구가 남반구에 비해 상대적으로 식생 활동 및 인류의 산업활동이 왕성하므로 CO₂의 발생원과 소멸원이 다양하게 분포되어 있기 때문인 것으로 분석된다(송병현과 조하만, 1999; 환경부, 1998).

각 지점에 대한 월별 변화양상을 비교분석하기 위한 한 방편으로 모든 자료를 기준시점인 1월의 평균 농도치를 이용하여 표준화한 결과를 그림 2b에 제시하였다. 각 지점별 1월의 농도를 기준으로 이용하여, 모든 지점의 월별 변화양상을 살펴본 결과, 전 단락에서 서술한 월별 변화양상 및 증감을 확연히 알 수 있었다. 월별 진동폭을 살펴보면, MAN 지점을 비롯한 국내지점 모두와 열대지역인 BRW 지점에서 여타 지점에 비해 높은 진동폭을 보였다. 이와 같은 월별 차이는 계절의 변화에 따른 공기순환의 차이, 발생원과 소멸원의 변화 등이 복합적으로 작용한데 따른 결과로 보여진다.

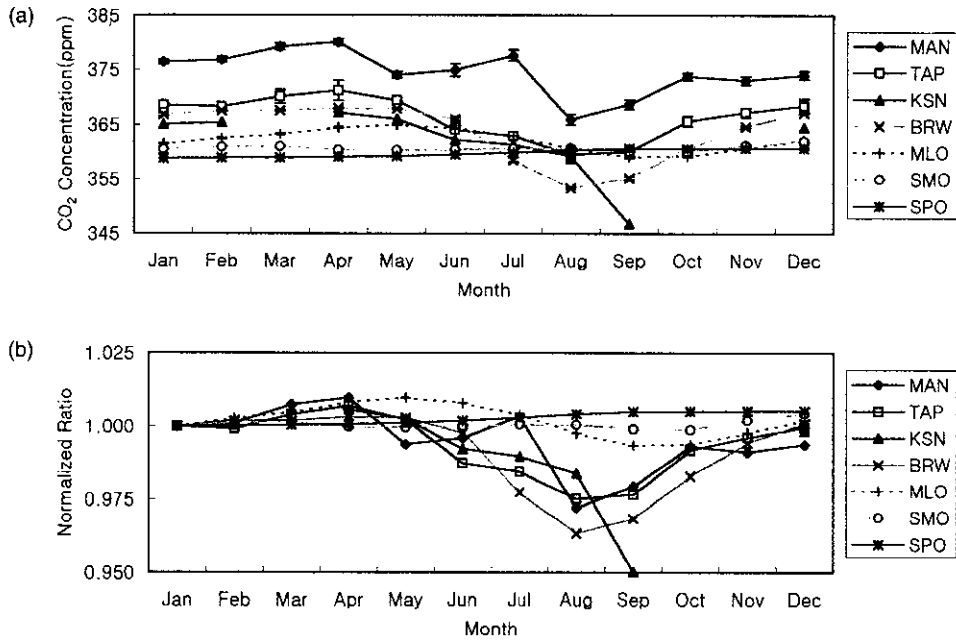


Fig. 2. (a) Temporal variation of CO₂ over monthly scale. The monthly mean concentrations for each site were computed using the data obtained during identical periods (Aug. 95–Dec. 97). The names for each station were abbreviated as follows: Moo–Ahn, Korea (MAN), Tae–Ahn Peninsula, Korea (TAP), Kosan, Korea (KSN), Point Barrow, Alaska (BRW), Mauna Loa, Hawaii (MLO), American Samoa (SMO), and Amundsen Scott, South Pole (SPO). (b) Comparison of monthly variation patterns among different study sites. The monthly mean data for each site were derived by normalizing the monthly data to that for Jan. The reference concentrations for each site are as follows: MAN (376.4 ppm), TAP (368.6 ppm), BRW (366.8 ppm), MLO (361.5 ppm), SMO (360.4 ppm), and SPO (358.8 ppm).

3.3 이산화탄소의 주기적 변화양상-계절주기의 농도변화

계절별 농도의 변화양상을 파악하기 위해 일별 평균농도를 계절별 (3, 4, 5월은 봄, 6, 7, 8월은 여름, 9, 10, 11월은 가을, 12, 1, 2월은 겨울)로 분류하여 제시해 보았다(그림 3). 연구지역인 MAN의 계절별 농도변화를 살펴보면 봄과 겨울에는 고농도의 경향성을, 여름과 가을에는 저농도의 경향성을 보였다. 이는 CO₂의 주 배출원이 화석연료(98% 이상)의 연소인 것을 감안할 때(EPA, 1997), 봄과 겨울의 경우 인간활동 및 난방과 관련된 북풍계열의 풍향이 한반도와 중국대륙으로부터 주로 유입된 데 따른 결과로 사료된다. 또한 북반구 지역의 경우 봄과 겨울철에 고위도로 갈수록 고농도 분포가 잘 나타나고 있으며(BRW와 MLO), 계절별 변화 역시 뚜렷한 형태로 나타나고 있다. 반면 타 계절에는 저위도 해

양의 청정한 공기가 유입되는 남풍계열이 주를 이루어 해풍의 빈도가 높아지는 현상도 저농도를 야기하는 요인으로 작용할 수 있는 것으로 보인다. 그리고 앞의 월별 경향비교에서 발견한 것과 같이 측정점별 계절간 농도변화의 폭이 다양하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 물론 이와 같은 차이는 위도에 따른 발생원과 소멸원간의 관계를 반영한 결과로 볼 수 있겠다. MAN 지역의 계절별 농도분포를 자세히 보면, 일반적으로 여름철에 가장 낮은 농도를 보이는 경향과 약간은 차이가 있다. 가을철에 비해 높은 여름철 농도는 앞서 월별 분포에서 보았듯이, 7월 기간 중의 고농도가 영향을 미친 것으로 보인다. 이와 같은 계절별 변화양상을 보다 자세히 파악하기 위해, 모든 월별 경향을 연도별로 분리 비교해 본 결과, 이와 같은 현상은 97년 7월에 특히 두드러지게 나타났던 것으로 보인다.

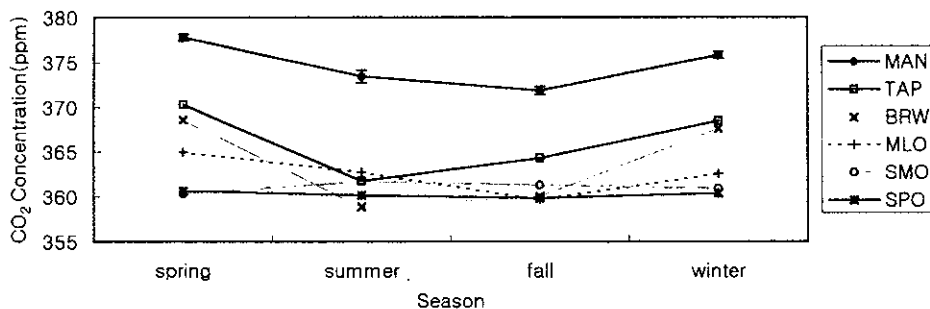


Fig. 3. Comparison of seasonal distribution patterns of CO₂ from six monitoring stations. The seasonal mean values were derived using the CO₂ data measured during the whole study periods of Aug. 95~ Dec. 97.

이러한 여름철의 저농도 양상은 선행연구에서 밝힌 동아시아 상층바람장의 분석결과 (박경윤 등, 1994; 전중갑, 1991), 기상연구소에서 미국해양대기청/기후감시 및 진단실험실 (NOAA/CMDL: National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory) 산하의 전지구적 관측망으로부터 입수한 8년간 (1991~1998년) 자료를 분석한 결과 (기상연구소, 1999), 화학이동 모델을 이용한 전지구적 CO₂ 분포모사 실험의 결과 (송병현과 조하만, 1999) 등과 잘 일치한다. 이들의 연구에 의하면, 전지구적 CO₂의 농도가 지속적으로 증가하는 가운데 북반구의 경우 겨울과 봄철에 고위도로 갈수록 농도가 높아지는 현상을 확인해 주었다. 그림 3에서 보듯이 CO₂는 계절적 및 지역적 농도분포의 차이를 잘 나타내는 것으로 보인다. 인구 및 산업 밀집지역인 유럽과 동아시아 지역, 북미 동부지역 등과 같은 북반구 지역에서는 겨울에 높은 농도를 나타내는 것으로 보인다. 반면, 해양이 많고 인구가 희박한 남반구 지역은 계절변화가 거의 없고 농도도 낮게 나타난다 (송병현과 조하만, 1999; 이근준과 정용승, 1993).

3. 4 지역간 농도분포의 상관성 비교

위도별 농도자료의 연계성을 확인하기 위한 한가지 방편으로 일평균 데이터를 이용하여 MAN 지역과 세계의 타 관측점의 결과에 대한 상관분석을 실시한 결과 (그림 4), 남극지역에 위치한 관측결과에서 음의 상관관계가 예외적으로 확인된 것을 제외하면, 나머지 세 지역은 모두 무안지역과 양의 상관성을 가졌다. 특히, MAN과 알래스카에 위치한

BRW와의 상관관계가 가장 강한 것으로 나타났다 ($r=0.4113$, $P=6.4603E-33$, $N=773$). 반면, 위도가 낮은 MLO나 SMO 등에서는 상관성의 강도가 다소 감소되고, 극지인 SPO에서는 가장 낮은 상관성과 함께 추세 기울기도 음으로 반전되는 것이 확인되었다. 이미 선행연구에서 24시간을 주기로 이루어지는 CO₂의 농도변화양상을 분석한 결과, 지역간 이질성이 강하게 나타날 수 있다는 것을 확인한 바 있다 (송기범 등, 2000). 그러나 본 연구에서와 같이 계절별 규모의 추세에 대한 분석결과는 비교적 긴 시간적 규모로 진행되는 CO₂의 농도분포 변화는, 위도별로 상당히 유사하게 이루어지고 있다는 사실을 확인시켜준다 (송병현과 조하만, 1999; 과학기술처, 1994).

3. 5 장기적 변화추세

앞의 계절적 추세비교의 결과에 의하면 CO₂의 농도는 봄철 최고, 여름철 최저의 계절적 양상을 반복하는 것으로 확인되었다. 그런데 보다 장기적인 관점에서는 지속적으로 꾸준히 농도가 증가한다는 사실은 지난 수십 여년 간 CO₂를 분석한 모든 연구들에서 거의 일관성 있게 확인되고 있다 (환경부, 1998; 이명인과 강인식, 1997; IPCC, 1995). 계절적 규모의 변화추세에 대한 분석보다 더 긴 규모의 시간대에서 진행되는 CO₂의 농도변화양상을 파악하기 위해, MAN과 비교 관측점의 측정자료를 전체 측정기간인 95/8~97/12에 맞추어 비교해 보았다 (그림 5). 그 결과에 의하면 MAN과 SMO 지역에서는 수일 규모로 농도의 변화가 빠르게 진행되는 반면, BRW, MLO, SPO 지역에서는 농도가 일정한 수

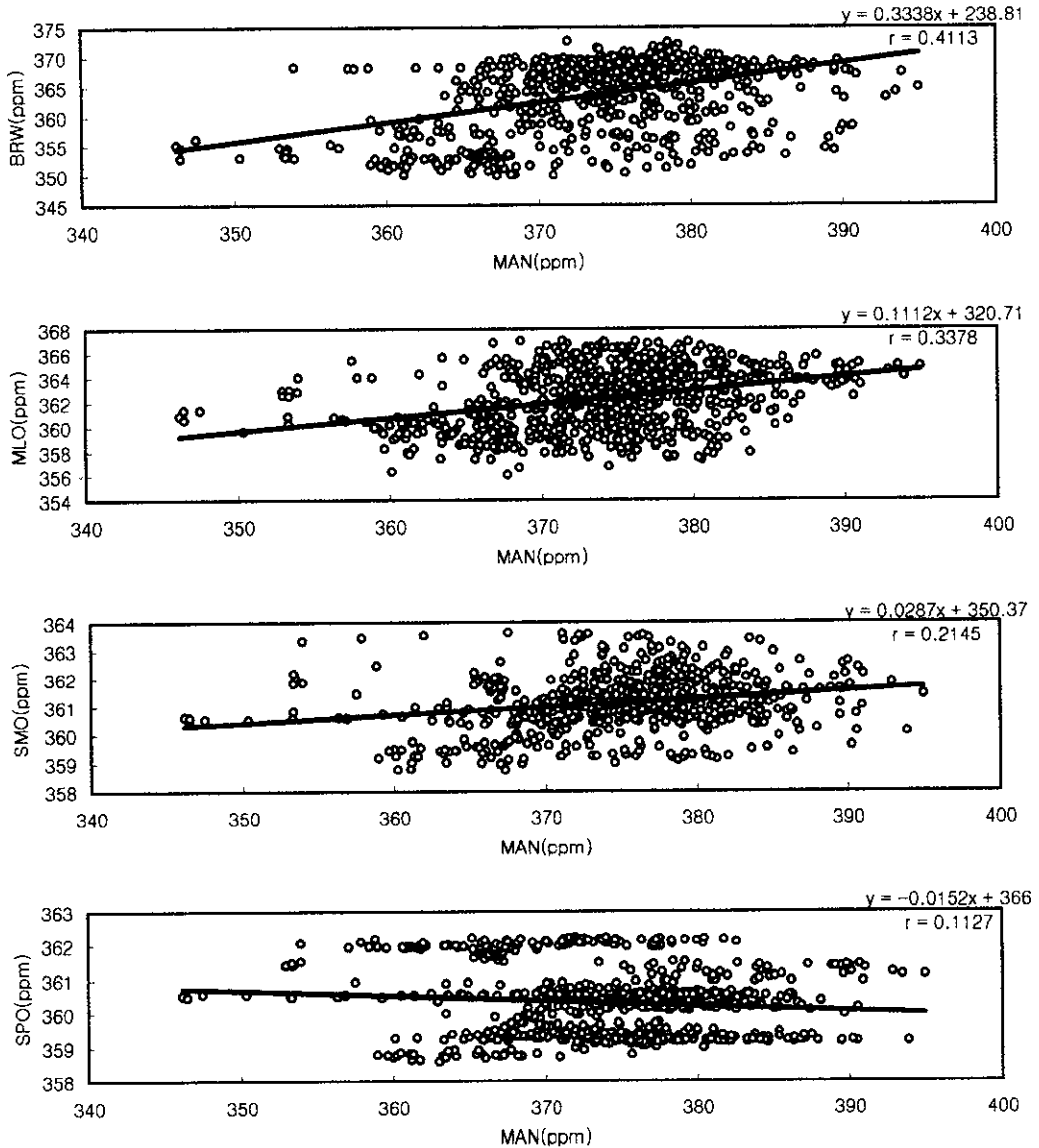


Fig. 4. Correlation between MAN and each sites. The sites selected for comparison include: Moo-Ahn, Korea (MAN), Point Barrow, Alaska (BRW), Mauna Loa, Hawaii (MLO), American Samoa (SMO), and Amundsen Scott, South Pole (SPO).

준을 유지하며 변화를 지속한다는 것을 알 수 있다. 그리고 후자 지역들의 경우, 정도의 차이는 있겠지만 계절적인 추이변화가 상당히 규칙적이고 반복적인 것을 확인할 수 있다. 이에 반해, 전자 지역들의 경우 극심한 일간 변화로 인해 그러한 경향성이 상대적으로 미미하게 나타난다. 이와 같은 차이는 CO₂

가 타 대기 오염물질과는 다르게 그 발생과 소멸이 생물의 활동과 인위적 활동과 관련된 영향을 동시에 받는다는 점을 감안하지 않을 수 없다. 따라서 전자 지역들의 경우 역시, MAN 지역과 동일하게 지역적 규모의 배출원이 보다 다양하게 기능하는데 따른 결과를 반영한 것으로 추정된다(송기범 등,

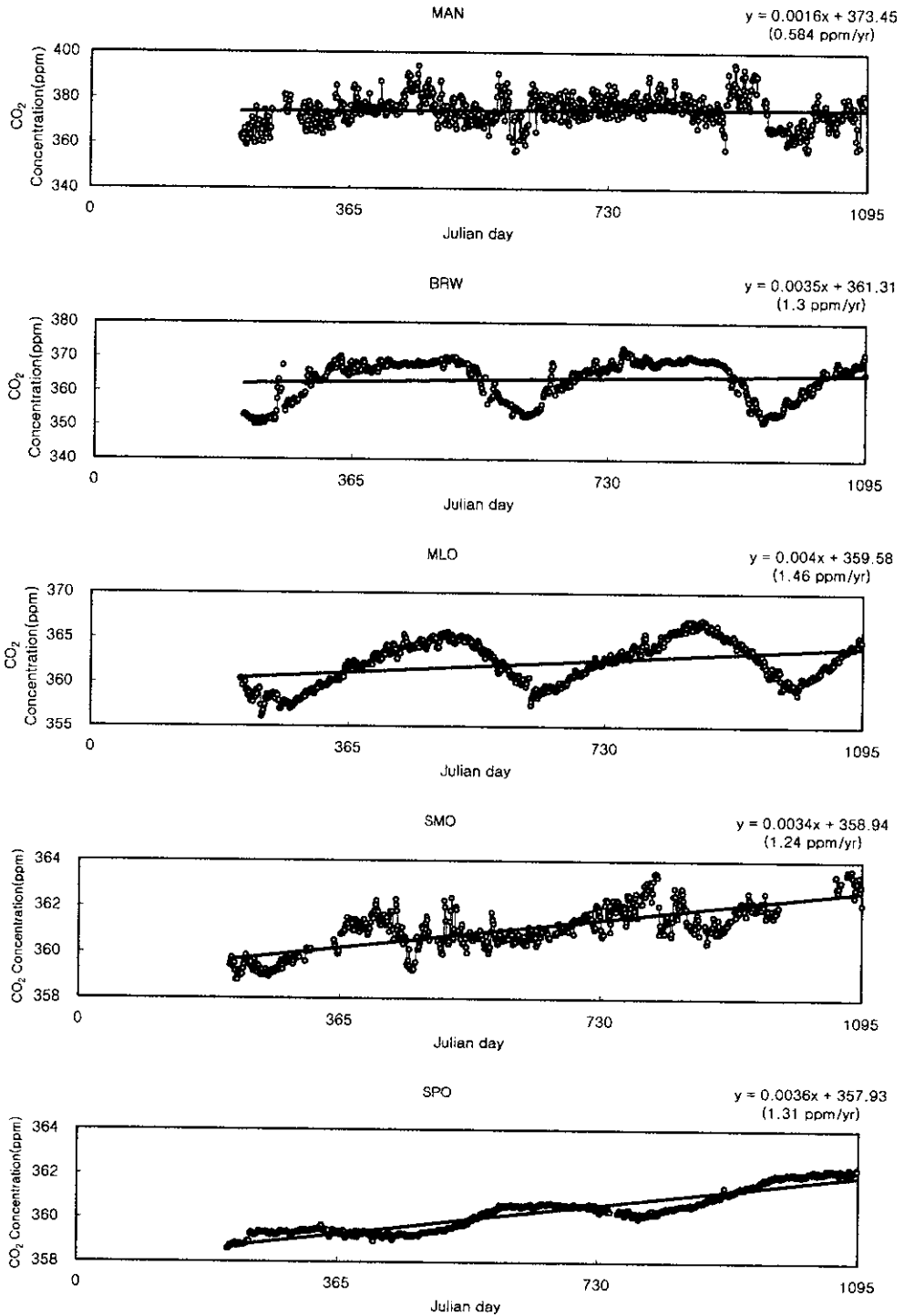


Fig. 5. Trends of CO₂ concentration change from Aug. 1995 to Dec. 1997: Moo-Ahn, Korea (MAN), Point Barrow, Alaska (BRW), Mauna Loa, Hawaii (MLO), American Samoa (SMO), Amundsen Scott, South Pole (SPO).

2000; 과학기술처, 1994).

본 연구는 총 측정기간이 2년여를 약간 상회하는 제한적 기간동안 이루어졌기 때문에, 이로부터 장기적 경향성을 유추하는 것은 쉽지 않다. 그러나 이미 과거의 수많은 선행연구들의 결과에서 확인된 바와 같이, 이산화탄소의 시간적 농도변화가 대단히 규칙적이라는 점을 감안하면, 이러한 변화의 추세를 정량화하는 것도 나름대로 중요한 의미를 지닐 것으로 사료된다. 장기간에 걸친 농도변화의 증감양상을 가장 간단하게 파악하기 위한 한 가지 방편으로, 이들 자료를 이용하여 단순회귀분석을 실시해 보았다. 그림 5에 제시된 바와 같이 다섯 지점 모두 1995년 대비 1997의 농도가 뚜렷한 증가 추세를 보이고 있으며, 이 중 하와이에 위치한 MLO의 증가율이 타 지역에 비해 높은 것으로 나타났다. 연구대상지역인 MAN의 경우, 전체적으로는 최고농도를 보였지만, 증가율 규모의 비교에서는 가장 낮은 수치를 보였다. 일간 농도변화를 이용한 추세선의 기울기에 365를 곱하면 연간 CO₂의 농도변화량을 산출할 수 있다. 이를 계산한 결과, 총 관측기간 중 4개 국외 관측점에서는 연간 1.24~1.46 ppm의 농도증가가 확인되었다. 반면, MAN 지역의 증가율은 그 절반에 못 미치는 연간 0.58 ppm 수준으로 나타났다. 여타 지역과 달리 MAN 지역의 연간 증가율은 낮게 나타나는데, 이런 결과는 MAN 지역의 농도변화가 여타 지역에 비해 상대적으로 복잡한 경향을 띠고 있다는 점을 확인해 준다.

MAN 지역의 증감율이 전 지구적인 규모의 추세 변화로부터 동떨어진 원인을 규명하기 위한 한가지 방편으로 여타 국내 지점의 농도변화경향과 비교분석을 해보았다. MAN 지역의 농도를 연도별로 분류하여 살펴본 결과, 1995, 1996, 1997년도에 각각 369.9, 375.1, 374.4 ppm으로 나타났다. 단순히 연도별 평균을 이용하여 증감율을 비교하면 95~96년에 약 5 ppm의 증가, 96~97년에 오히려 0.7 ppm이 감소된 것으로 보인다. 따라서 시간적 변화에 비교적 강한 규칙성을 보이는 여타 지역에서는 거의 일관성 있는 증가율이 확인된 반면, MAN 지역에서는 보다 복잡한 요인의 작용으로 그러한 시그널을 확인하기가 어려운 것으로 보인다. 국내 여타 지점을 살펴보면, 제주도의 KSN은 1995년과 1996년도에 각각 361.7, 367.9 ppm으로 나타났으며, 태안반도의

TAP는 1995, 1996, 1997년도에 각각 364.2, 366.1, 367.2 ppm으로 나타났다. 이러한 비교를 국외 여타 지점에까지 확대해 보면, BRW는 1995, 1996, 1997년도에 각각 366.1, 367.4, 369.0 ppm, MLO는 360.6, 362.9, 363.9 ppm, SMO는 359.3, 361.4, 362.1 ppm, SPO는 357.2, 359.2, 360.2 ppm으로 나타나, MAN을 제외한 국내, 외의 여타 지점들 모두 뚜렷하고 규칙적인 증가 추세를 알 수 있다.

4. 요약

지속적인 모니터링을 통한 폭넓은 데이터 베이스의 구축, 보다 확대된 연구 및 지역별 자료축적, 정확한 농도변화양상 관측과 경향성 추정 등을 통해 현재의 오염상태를 이해하고 장래의 대기질을 관리할 수 있다. 본 연구에서는 1995년 8월~1997년 12월까지 전남 무안기상대에서 관측한 이산화탄소와 세계적 배경관측지점인 Point Barrow (Alaska), Mouna Loa (Hawaii), American Samoa, Amundsen Scott (South Pole) 관측자료에 대한 동시비교를 통하여, 이산화탄소의 장기적인 변화추세를 파악하고 그 의미를 살펴보았다.

먼저, 월주기의 농도변화를 살펴보면, MAN의 경우 1월부터 서서히 농도가 증가하여 4월에 정점(380 ppm)을 이룬 후 점점 감소한다. 겨울에 비해 상대적으로 연료의 사용이 적으며(저배출), 활발한 광합성이 이뤄지고(고소모), 청정한 공기가 유입되는 8월에 최저치(366 ppm)를 보였으며, 그 후로는 12월까지 지속적으로 농도가 완만하게 상승하였다. 국내 측정점인 TAP와 KSN 지역의 월별 변화양상 역시 매우 유사하게 나타났다. 월주기 변화경향은 위도차에 따라 다양하게 나타나는데, 특히 북반구에서(남반구에 비해) 상대적으로 고위도로 갈수록 큰 진동폭을 보였다. 이러한 원인으로는 공기순환의 차이와 특히 북반구에서 왕성한 식생 활동과 산업활동으로 인해 CO₂의 발생원과 소멸원이 다양하게 분포된데 따른 결과로 분석된다(송병현과 조하만, 1999; 환경부, 1998; 이명인과 강인식, 1997). 월별 진동폭을 살펴보면, MAN 지점을 비롯한 국내지점 모두와 열대지역인 BRW 지점에서 여타 지점에 비해 높은 진동폭을 보였다.

계절별 농도의 변화양상에서 연구지역인 MAN의

계절별 농도변화를 살펴보면, 봄과 겨울에는 고농도의 경향성을, 여름과 가을에는 저농도의 경향성을 보였다. 이는 CO₂의 주 배출원이 화석연료(98% 이상)의 연소인 것을 감안할 때(EPA, 1997), 봄과 겨울의 경우 인간활동 및 난방과 관련된 북풍계열의 풍향이 한반도와 중국대륙으로부터 주로 유입된 데 따른 결과로 사료된다. 또한 북반구 지역의 경우 봄과 겨울철에 고위도로 갈수록 고농도 분포가 잘 나타나고 있으며(BRW와 MLO), 계절별 변화 역시 뚜렷하게 나타나고 있다. 반면 타 계절에는 저위도 해양의 청정한 공기가 유입되는 남풍계열이 주를 이루어 해풍의 빈도가 높아짐으로써 비교적 저농도를 보인 것으로 여겨진다. 이를 통해 CO₂가 계절적 및 지역적 농도분포의 차이를 잘 나타내며, 월별 경향비교에서 발견한 것과 같이 측정점별 계절간 농도변화의 폭이 다양하게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 위도차이에 따른 발생원과 소멸원간의 복합적이고 상대적인 관계를 잘 반영한데 따른 것으로 볼 수 있다(기상연구소, 1999; 송병현과 조하만, 1999).

위도별 및 측정점간의 농도분포에 대한 연계성을 파악하기 위해, MAN 지역과 세계의 타 관측점의 결과에 대한 상관분석을 실시하였다. 그 결과, 남극 지역에 위치한 관측지점과의 음의 상관관계가 나타나는 것을 제외하고, 나머지 세 지역은 모두 무안지역과 강한 양의 상관성을 보여 주었다. 특히, MAN과 알래스카에 위치한 BRW와의 상관관계가 가장 큰 것으로 나타났다. 반면, 위도가 낮은 MLO나 SMO 등에서는 상관성의 강도가 다소 감소되고, 극지인 SPO에서는 가장 낮은 상관성과 함께 추세 기울기도 음으로 반전되는 것이 확인되었다. 24시간을 주기로 이루어지는 단주기적 농도변화의 양상이 지점별로 이질성이 크게 나타나는데 반해, 계절별 규모처럼 비교적 긴 시간적 규모로 진행되는 변화에 대한 분석결과에서는 위도별로 상당한 수준의 유사성이 존재한다는 것을 인식시켜 주었다(송병현과 조하만, 1999; 과학기술처, 1994).

MAN 지역의 1995, 1996, 1997년도 농도는 각각 369.9, 375.1, 374.4 ppm으로 나타났다. 단순히 연도별 평균을 이용하여 증감율을 비교하면 95~96년에 약 5 ppm의 증가를 보였지만, 96~97년에 오히려 0.7 ppm의 감소가 이루어진 것으로 확인된다. 따

라서 시간적 변화에 비교적 강한 규칙성을 보이는 여타 지역에서는 거의 일관성 있게 증가율이 확인된 반면, MAN 지역에서는 보다 복잡한 요인의 작용으로 그러한 시그널을 확인하기가 어려운 것으로 보인다. 3년간 관측자료가 확보된 TAP 지역도 모두 일관성 있게 증가의 경향을 보였지만, 제한적인 비교기간동안 연도간 증가양상은 어느 정도 불규칙하다는 것이 확인되었다. 연평균 증가율에 있어서, 기상관측연보를 통해 나타난 것처럼, 제주도 KSN의 경우 1990년 대비 1995년도에 약 2.4%, TAP는 1991년 대비 1998년도에 약 3%가 각각 증가하였다. 여타 국외지점에서도 모두 일관성 있게 1 ppm을 초과하는 수준의 연간농도증가율을 보였다. 그렇지만 기간 중 관측된 MAN 지역의 결과는(우리 나라와 같이 빠르게 산업화가 진행되는) 지역의 전반적 추세를 잘 반영하지 못할 뿐더러, 세계적 증감추세로부터도 차이가 나는 결과란 점을 확인할 수 있다(일반적으로 수 십년 규모의 긴 대체체류시간을 갖는 이산화탄소는 여타 대기오염물질에 비해(전지구적으로) 농도분포의 균질성을 띠는 것으로 잘 알려져 있다). 따라서 본 연구의 결과, 현 시점에 배경관측이 이루어지는 TAP와 같은 지역의 자료에 대해서도 지역적 대표성의 여부에 대한 객관적 평가가 시급하게 이루어져야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구에 필요한 세계 주요 관측점의 모든 관련 자료들을 인터넷 상에 공개해 주신 NOAA, CMDL의 Carbon Cycle Group 관계자들에게 충심으로 감사드리는 바이다. 본 연구자료의 축적에 일익을 담당하신 모든 관계자 분들에게도 깊은 감사를 드리는 바이다. 이 논문은 2000년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-015-DP0453).

참고 문헌

- 과학기술처, 기상청, 기상연구소(1994) 온실기체 감시 시스템 개발 연구(II) - 제 2차년도 최종보고서.
- 기상연구소(1999) 온실기체 변동감시(<http://www.metri.kr/appliweb/greenhouse.html>).
- 기상청(1997) 온실기체 관측연보, 제 1권 1995-1996년 관측자료.

- 기상청 (1998) 온실기체 관측연보, 제 2권 19975년 관측자료.
- 기상청 (1999) 온실기체 관측연보, 제 1권 1998년 관측자료.
- 송기범, 윤용훈, 김기현 (2000) 이산화탄소의 단주기적 농도변화 특성에 관한 연구, 한국지구과학회지, 21(5), 437-448.
- 송병현, 조하만 (1999) 화학이동 모델을 이용한 전지구 CO₂ 분포 모사 실험, 한국기상학회지, 35(4), 531-538.
- 이근준, 정용승 (1993) 한국의 태안반도에서 관측된 이산화탄소의 배경농도에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 61-68.
- 이명인, 강인식 (1997) 한반도 기온변동성과 온난화, 한국기상학회지, 33(3), 429-443.
- 한국대기환경학회 (1999) 한국대기환경학회 지구환경분과회 주최 세미나-지구대기 환경변화와 대응전략.
- 환경부 (1998) G-7 프로젝트(지구 규모 대기환경기초 및 기반 기술) 개발 사업의 세부 과제-지구 대기 조성 변화 감시의 제 2단계 제 3차년도 연차 보고서: 연구기관-기상청, 기상연구소, 152-155.
- US EPA (1997) Mobile Source Emission Factor Model (MOBILE5a), U.S. Environmental Protection Agency, Office of Mobile Sources, EPA. Ann Arbor, Michigan.
- US EPA (1998) National Air Pollutant Emission Trends Procedures Document, Sections 1, 4 and 6, 1985-1996, Projections 1999-2010, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-454/R-98-008.
- US EPA (1999) National Air Pollutant Emissions Trends Report, 1900-1999, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- US EPA (1999b) National Air Pollutant Emissions Trends Report, 1900-1998, U.S. Environmental Protection Agency, Emission Factors and Inventory Group, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- IPCC (1995) Climate change 1995-The Science of Climate Change (Including Summary for Policymakers). Report of IPCC Working Group I.
- IPCC (1996) Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (3 volumes).
- IPCC (1997) The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability (Including Summary for Policymakers), A special Report of IPCC Working Group II.