

## 이산화탄소의 단주기적 농도변화 특성

송기범<sup>1</sup> · 윤용훈<sup>2</sup> · 김기현<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 지구과학과 대기환경연구실, 143-747 서울특별시 광진구 군자동 98

<sup>2</sup>기상연구소 지구대기감시관측소, 357-960 충청남도 태안군 안면읍 송언리 1764-6

### Short-term Variability of Carbon Dioxide within and across the Korean Peninsula: Case Study during 1995-1997

Ki-Bum Song<sup>1</sup> · Yong-Hoon Youn<sup>2</sup> · Ki-Hyun Kim<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

<sup>2</sup>Korea Global Atmosphere Watch Observatory, Meteorological Research Institute, Chung-Nam 357-961, Korea

**Abstract:** This study was conducted to analyze the patterns associated with the short-term variability of CO<sub>2</sub> concentrations over 24-h scale within and across the Korean Peninsula. In the course of our study, we compared the data sets obtained from Moo-Ahn (MAN) station located in the far western coastal area of Korea with those determined from major background observatory stations around the world from the periods of Aug. 1995 to Dec. 1997. The mean CO<sub>2</sub> concentration of the MAN area for the whole study periods, when computed using the daily mean values, was found out to be 374.5±6.6 ppm (N=884); seasonal mean values were found out to be 378±5.2 (spring: N=181), 372±10.2 (summer: N=210), 372±7.2 (fall: N=243), and 376±5.4 ppm (winter: N=206). When the data from MAN was compared with those of major background stations, the effects of both daily and seasonal components appear to vary distinctively across different stations. Those effects are expected to reflect the mixed effects of various factors which include: seasonal pollution patterns, weather conditions, vegetation, and so forth. Based upon this comparative analysis, we suspect that the MAN area is under the strong influence of anthropogenic source processes relative to all the other stations under consideration. If that is not the case, the existence of enhanced CO<sub>2</sub> level may be rather ubiquitous phenomena in Korea. More detailed inspection of CO<sub>2</sub> behavior from various respects is strongly desired in the future.

key words: global warming, greenhouse gas, background, vegetation, seasonal factor

**요약:** 본 연구에서는 전남 무안지역을 중심으로 1995년 8월부터 1997년 12월의 총 884일 기간 동안 관측된 CO<sub>2</sub> 농도자료와 국의 주요 배경대기관측지점에서 관측된 농도자료를 토대로, CO<sub>2</sub>의 단주기적 변화경향성에 대한 지역적 차이를 비교 해석하였다. 동기간 동안 무안지역에서 관측된 이산화탄소의 전체적인 일평균 농도는 374.5±6.6ppm으로, 그리고 계절별로는 378±5.2 (봄: N=181), 372±10.2 (여름: N=210), 372±7.2 (가을: N=243), 376±5.4ppm (겨울: N=206)의 평균치로 나타났다. 무안지역을 중심으로 관측된 일주기 경향성을 포인트 배로우(Point Barrow)를 위시한 주요 외국 관측점들과의 결과와 비교하였을 때, 단순히 일주기 중심의 경향성 (주야간대의 농도차이)에 덧붙여, 계절적 요인의 작용으로 인한 일주기의 계절별 변화요인 (진동폭 변화, 최고농도의 형성 시점 등)이 지역별로 다양하게 나타난다는 점을 확인하였다. 특히 무안지역은 주야간대의 주기를 중심으로 볼 때, 여타 지역과는 정반대로 주저야간의 경향이 뚜렷하였다. 그리고 일주기를 다시 계절적으로 비교하였을 때, 일일 내내 비교적 고농도가 지속되거나 (봄, 겨울철), 상대적으로 낮은 농도가 24시간동안 지속되는 경향 (여름, 가을철)으로 뚜렷하게 구분되었다. 이는 겨울철 연료의 과배출, 중국대륙으로부터 오염물질의 유입여부 등 연구지역 주변환경의 계절별 오염양상, 공기순환, 기상변화, 식생의 변화 등이 복합적으로 작용하여 나타나는 결과로 보인다. 이러한 결과들을 토대로 볼 때, 여타 요인들에 비해 무안지역은 인위적 오염원의 영향이 강하게 작용하는 것으로 사료된다. 따라서 무안지

\* Corresponding author, E-mail: khkim@sejong.ac.kr

역을 중심으로 한 농도변화의 경향성에 대한 해석은 여타 외국의 주요 관측점에 대한 결과와 달리, 한반도를 포괄하는 광역적인 차원의 배경농도를 대표하는 것이 아니라, 무안지역을 중심으로 보다 국부적인 차원에서 진행되는 농도변화를 반영하는 경향이 큰 것으로 추정된다. 그렇지만 이러한 경향이 한반도에 광역적으로 나타나는 현상일 가능성도 배제할 수 없다. 이에 대한 판단은 안면도를 중심으로 후속적으로 진행된 연구결과들에 대한 면밀한 검토가 수반되어야 할 것으로 보인다.

주요어: 지구온난화, 온실기체, 이산화탄소, 배경대기, 식생, 계절적 요인

## 서론

지구의 대기환경에서 온실기체가 지속적으로 증가함으로써 인해 지구온난화(global warming)가 촉진되고 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다(IPCC, 1995, EIPP, 1999). 지구온난화는 기상이변, 사막화, 해수면 상승, 생태계 파괴와 같은 여러 가지 환경재난을 초래할 것으로 예측되고 있다(IPCC, 1995, 1996, 1997). 특히 온실기체의 증가와 상당 수준 연관성이 있는 것으로 보이는 기상재해는, 날이 갈수록 그 규모와 빈도가 확충되고 있는 실정이다. 지난 100 여 년 동안 지상 대기와 해수면 온도는 온실기체의 증가로 인해 0.3~0.6℃ 가량 상승하였다는 것이 확인되었다(IPCC, 1995). IPCC의 예측에 따르면 2030년경에는 CO<sub>2</sub> 농도가 산업혁명 이전의 두 배에 달하게 되며, 지구 평균기온이 1.5~4.5℃ 상승하여, 해수면이 20cm 정도 상승할 것으로 보고 있다. 그리고 2100년경에는 기온이 약 3~6.5℃, 해수면은 약 65cm 정도 상승할 것으로 예측하고 있다(IPCC, 1995).

온실기체의 주성원으로는 수증기(H<sub>2</sub>O), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 아산화질소(N<sub>2</sub>O), 염화불화탄(CFCs), 수소불화탄소(HFC), 과불화탄소(PFC), 육불화황(SF<sub>6</sub>) 등이 있다. 이들 온실기체의 대기 중 농도는 배출량과 밀접한 관련이 있으며, 특히 에너지 사용에 따른 온실기체의 배출비중은 전체배출량의 80% 이상을 차지한다. 이 중 CO<sub>2</sub>의 기여도는 약 55%를 차지하는 것으로 밝혀지고 있다(IPCC, 1995, EPA, 1997, 1998, 1999, 1999b). 1997년 기준으로 한국의 온실기체 배출량(1.8%)은 미국(25.2%), 중국(10.4%), 일본(5.7%) 등에 이어 11위를 차지하고 있다(김용표 외, 1999). 지구온난화에 대한 높은 기여도로 인하여, CO<sub>2</sub>는 타 온실기체들에 비해 비중 있게 다루지고 있는 실정이다.

지구온난화에 대응하기 위해 범세계적으로, 온실기체의 배출에 대한 감시, 에너지 저소비형 산업구조로의 전환, 청정에너지로의 소비대체를 통한 환경 친화적 에

너지 공급체계의 구현 등과 같은 분야에 많은 노력을 기울이고 있다. 한국 또한 이러한 국제사회의 노력에 동참코자 이미 1993년 12월에 기후변화협약에 가입하였다. 그리고 1998년에는 에너지, 산업부문 배출저감 시책 강화, 폐기물 부문 대책, 온실기체 저감 기반조성을 위한 기후변화협약 대응 종합대책 등을 내놓았다. 과학적인 관점에서 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 연구는 전남 무안기상대에서 관측한 CO<sub>2</sub>와 기상 자료를 토대로 하여, 한반도의 국지적 규모에서 진행되는 지구온난화의 경향성을 파악하기 위해 CO<sub>2</sub>의 시간별 변화양상, 시간의 흐름에 따른 계절별 변화양상 등을 분석하고, 국내의 관측망의 단주기적 농도변화추세를 비교하여 분석하였다. 또한 기상요소들과의 상관 분석 등을 통한 자료 분석과 여기에 수반된 농도변화의 의미를 도출하고자 하였다.

## 연구방법

본 연구에서는 전라남도 무안군 해제반도에 위치한 무안 기상대(전남 무안군 해제면 광산리 242-2)에서 관측이 이루어진 CO<sub>2</sub>와 주요 기상인자의 관측자료를 시간적 변화경향을 파악하기 위해 세부적으로 분석하였다. 무안 기상대는 동쪽을 제외한 삼면이 바다이며, 해발고도가 비교적 낮은 지점(해발고도: N 23.3m, 35° 06', E 126° 17')에 위치한다(Fig. 1). 기상청은 1993년에 이르러 본 지점에 온실기체 관측소를 설립하였다.

본 관측소는 세계 여타 주요 관측점에서 수행하는 것과 유사하게, 온실기체 연속 관측 시스템을 갖추고,

현지의 대기 성분을 관측하는 현지(in-situ) 관측소에 해당한다. 1994년 1월부터 CO<sub>2</sub> 관측을 시작한 이래, 같은 해 2월에는 CFCs (CFC-11, CFC-12)를, 1995년 3월부터는 N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>에 대한 관측업무를 수행하였다. 그러나 1997년 말 업무의 효율화와 세계기상기구/지구대기감시 (WMO (World Meteorological Organization)/GAW (Global Atmospheric Watch)) 계획에 따른 관련 업무 통합 차원에서 배경대기관측소를 안면도 (해발고도: 47 m, N 36° 31', E 126° 19')로 이전하였다. 따라서 1998년 4월을 기점으로 온실기체의 관측은 안면도를 중심으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 1995년 8월부터 1997년 12월까지 약 29개월간 무안 기상대에서 관측한 CO<sub>2</sub>와 기상요소 (기온, 기압, 습도, 강우량, 풍향, 풍속)에 대한 관측자료를 이용하여 여러 가지 비교분석을 실시하였다. CO<sub>2</sub>의 측정에는 연속관측장비인 비분산 적외선 분석기 [Non-Dispersive InfraRed (NDIR); ULTRAMAT-5E, Siemens Co., Germany]가 사용되었다. 본 관측기기는 CO<sub>2</sub>와 같

이 원소가 대칭형으로 배열된 분자구조의 기체가 특정 파장(CO<sub>2</sub>의 경우 4.7μm)에서 적외선을 흡수하는 성질을 이용하는 방식이다. 적외선 방식을 위해 IR source는 약 700℃까지 가열하며, 발생된 적외선(파장은 1~10μm)은 광분리기를 이용하여 비교셀(reference cell)과 시료 셀(sample cell)에 동일하게 조사시킨다. 분석시료는 시료셀로, 표준가스는 비교셀로 유입이 이루어진다. 양쪽 셀을 통과한 적외선은 복사량의 차이로 인해 수신부의 압력차를 유도한다. 이와 같은 압력차를 전기저항으로 전환해 줌으로써 CO<sub>2</sub>의 농도를 정량화한다. 본 관측기기는 시료 및 표준기체공급장치, 분석기(analyzer), 검출기(detector), 데이터 시스템 등으로 구성되어 있다. 또한 본 기기는 연속관측이 가능하며, 측정범위는 250~500ppm에 해당한다. 셀(cell) 길이는 180mm, 출력 시그널은 DC 4~20mA이다.

연속측정에 따른 측정장비의 이상 또는 주변환경의 급격한 변화와 같은 외부적 요인에 의해 발생 가능한 이상 데이터들을 구별하기 위해, 본 연구의 주 대상인 CO<sub>2</sub>의 경우 1분 간격으로 연속 관측된 자료를 1차적으로 1시간 간격에서 평균과 표준편차(σ)를 구하였다. 다시 이를 토대로 평균에서 ±2σ 범위를 초과하는 자료를 제외하였다. 기본적인 처리과정을 거친 CO<sub>2</sub> 자료는 해석의 편의상 일, 월, 계절 평균농도 등으로 재구분 또는 재산출하여 사용하였다.

## 결과 및 토론

### 전체 자료의 경향성과 연구지역의 기상조건

본 연구는 무안지역(이하 영어 약칭 MAN (Moo-Ahn)으로 부름)에서 이산화탄소에 대한 관측이 이루어진 1995년 8월부터 1997년 12월까지의 2년 5개월의 기간 동안 이산화탄소의 농도분포를 이용하여 다양한 통계적 비교를 시도해 보았다. 전체 기간 동안 총 884일의 일별 자료로부터 관측된 농도의 평균치는 374.5±6.6 ppm을 보여 주었다. 전체적인 경향을 조금 더 세부적으로 이해하기 위해, 모든 일별 자료를 계절별로 분리해서 통계량을 조사해 보면, 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 계산되었다. 따라서 봄과 겨울의 순서로 농도가 감소하고, 여름과 가을에 가장 낮은 농도가 나타

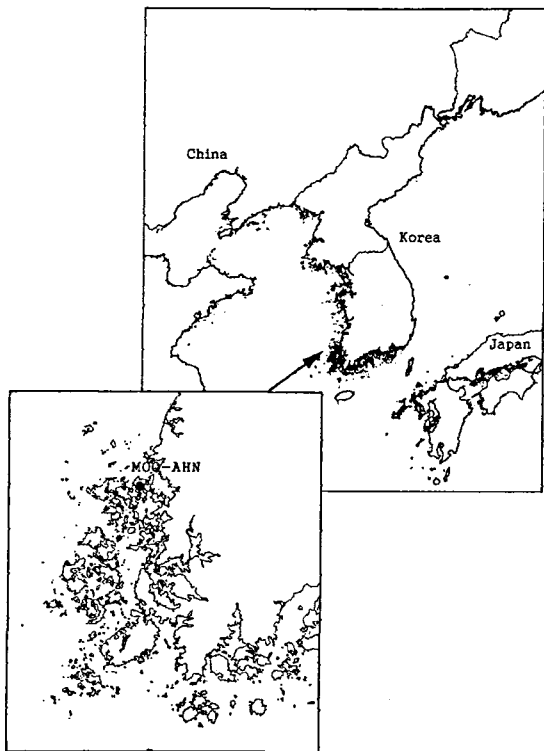


Fig. 1. Location of Moo-Ahn (MAN) station (35° 06' N, 126° 17' E) in Korea.

났다는 것을 확인할 수 있다. 실제로 계절별 농도의 변화에서 절대값의 변화가 크지 않다는 점을 감안하면, 여름철의 경우 큰 표준편차 값에서 알 수 있듯이 여타 계절에 비해 상대적으로 농도의 변화가 크다는 점을 확인할 수 있다.

이산화탄소의 농도 변화추이를 보다 체계적으로 분석하기 위해서는, 농도의 변화를 기상인자와 연계하여 해석하는 것도 중요하다. 따라서 이산화탄소와 함께 무안 기상대에서 동시관측이 이루어진 기온, 강수량, 풍향, 풍속, 상대습도, 해면기압 등의 변화추이를 통계적으로 정리한 결과를 Table 1에 제시하였다. 표에 따르면 측정기간 중 기온은 온대지역의 전형적인 하고동저(夏高冬低)의 경향을 보였다. 강수량의 경우, 대체로 여름, 봄, 가을, 겨울의 순으로 감소하는 추세를 보였다. 그런데 봄, 여름, 가을의 강수량 차이는 작았지만, 상대적으로 겨울의 강수량이 작은 것으로 나타났다. 풍향은 봄철에 북북서풍, 여름철에 남남서풍, 가을철에 북북동

풍, 겨울철에 북풍이 주를 이루는 경향을 나타냈다. 대체적으로 봄, 가을, 겨울은 북풍 계열이, 여름에는 남풍 계열이 지배적인 경향을 보였다(Fig. 2). 상대습도는 강수량이 가장 높은 여름에 최대치를 보였으며, 가을, 봄, 겨울의 순으로 점차 감소하였다. 그러나 여름을 제외한 나머지 계절은 매우 유사하게 나타났다. 기압은 여름에 저기압을, 겨울에 상대적으로 고기압의 경향을 보였다. 풍속은 이산화탄소의 농도와 유사하게 봄, 겨울에 높고 여름, 가을에 낮게 나타났다.

### 비교관측 대상지점의 환경

이산화탄소는 높은 화학적 안정성과 긴 대기체류시간으로 인해 지구 규모의 순환을 거치게 된다. 따라서 단순히 특정 지점의 농도분포 해석에 국한되는 것 보다, 관측된 자료를 광역적 차원의 자료와 비교함으로써 보다 광역적 현상과 연계하여 해석하는 것이 의미있을 것으로 보인다. 본 연구에서는 이러한 점을 감안하여,

Table 1. A statistical Summars of CO<sub>2</sub> and relevant enviromental parameters measured from MAN Station(Aug. 1995~Dec. 1997)

	Spring	Summer	Fall	Winter	Total
	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range	Mean±SD(N) Range
CO <sub>2</sub> (ppm)	377.8±5.2(181) 366.2~393.9	373.2±8.6(198) 353.3~395.0	372.1±7.2(242) 357.1~429.7	376.1±4.2(201) 366.2~389.7	374.5±6.6(822) 356.3~395.0
Temp. (°C)	11.1±5.1(184) (0.9~21.3)	24.5±2.9(215) (17.6~29.1)	15.8±5.4(273) (1.9~27.8)	2.3±3.0(212) (-5~1.9)	13.7±9.0(884) -5.0~29.1
Rainfall (mm)	1.3±2.1(61) (0~9.8)	1.9±2.7(83) (0~12.7)	1.2±2.0(76) (0~12.9)	0.4±0.8(84) (0~4.6)	1.2±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. (mscc <sup>-1</sup> )	2.5±1.0(184) (1.0~5.7)	2.4±1.1(215) (0.9~6.3)	2.4±1.0(273) (0.6~5.8)	2.6±1.3(212) (0.2~6.7)	2.5±1.1(884) 0.2~6.7
RH (%)	64.8±14.0(184) (33.9~96.1)	80.6±9.6(215) (57.0~98.6)	66.3±12.5(273) (34.4~97.6)	64.5±17.3(212) (33.0~97.9)	69.0±15.0(884) 33.0~98.6
Pressure (HPa)	1017±6.3(184) (1002.8~1029. )	1008±3.8(215) (995.3~1015.2)	1018±5.4(273) (1003.8~1031.2)	1025±4.7(212) (1005.7~1036.9)	1017±7.7(884) 995~1037

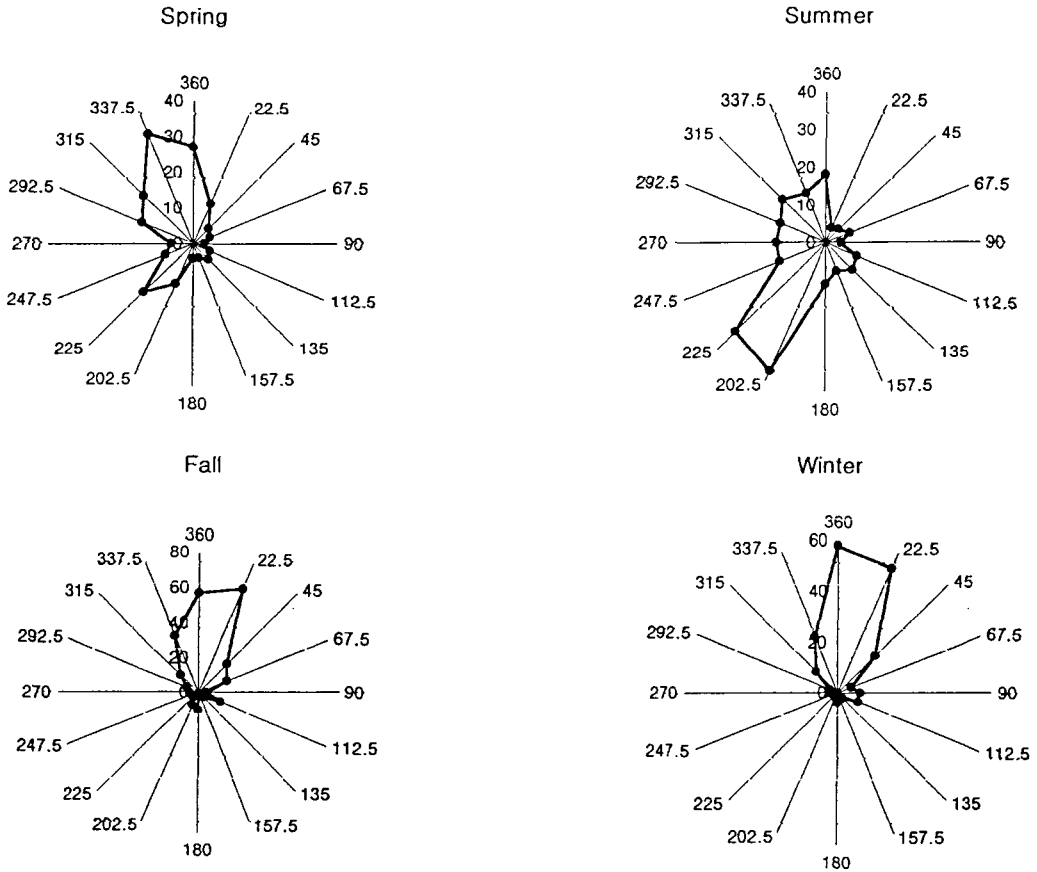


Fig. 2. Frequency distribution of wind rose in MAN from Aug. 1995 to Dec. 1997.

관측이 이루어진 MAN지역을 중심으로 한 이산화탄소의 농도변화에 대한 해석에 덧붙여, 미국의 해양기상청에 의해 자료관리가 이루어지고 있는 세계 4대 주요 배경관측점의 자료를 활용하였다. 이들 지점은 다음과 같다: (1) Mauna Loa, Hawaii(약칭: MLO, 국가: U. S., 해발고도: 3397m, N 19° 32', W 155° 35'), (2) American Samoa(약칭: SMO, 국가: U. S., 해발고도: 30m, S 14° 15', W 170° 34'), (3) Point Barrow, Alaska (약칭: BRW, 국가: U. S., 해발고도: 11m, N 71° 19', W 156° 36'), (4) Amundsen Scott (South Pole) (약칭: SPO, Antarctica, 해발고도: 2810m, 89° 59' S, 24° 48' W)의 자료가 본 기준에 해당한다.

각 측정점은 여러 가지 기후권역을 대표한다. 예를 들어, 제 1, 2에 해당하는 MLO와 SMO 지점은 열대기후를 대표한다. 반면 제 3의 BRW는 한대기후, 제 4의 SPO는 극지 기후를 대표한다고 할 수 있다. 이들 지역

의 이산화탄소는 현장에서 실시간 연속관측방식으로 분석된 결과(in-situ analysis)에 기초하는 것이다. 따라서 측정점간의 농도분포를 객관적으로 수행하기 위해, MAN 지역과 동일하게 시간대별로 자료를 정리한 후 다시 일별 단위의 처리를 가하였다. 최종적으로 MAN 지역의 농도자료와 직접적인 비교를 위해, 동일한 관측 기간(95/8~97/12)에 해당하는 자료를 추출하여 분석을 시도하였다.

이와 같이 설정된 비교지점과 본 연구지점에 대한 기본적인 이산화탄소의 분포특성을 비교하기 위한 한 가지 방편으로 각 측정점의 농도자료를 이용하여 빈도분포를 비교해 보았다. Fig. 3에 의하면 지점별로 최빈 농도가 현저한 차이를 보인다는 점을 알 수 있다. 열대에 해당하는 MLO, SMO와 극지인 SPO에서 모두 365ppm 정도의 최빈값을 보였다. 이와 같은 농도수준은 활발한 광합성으로 탄소소모가 큰 열대 지역의 특

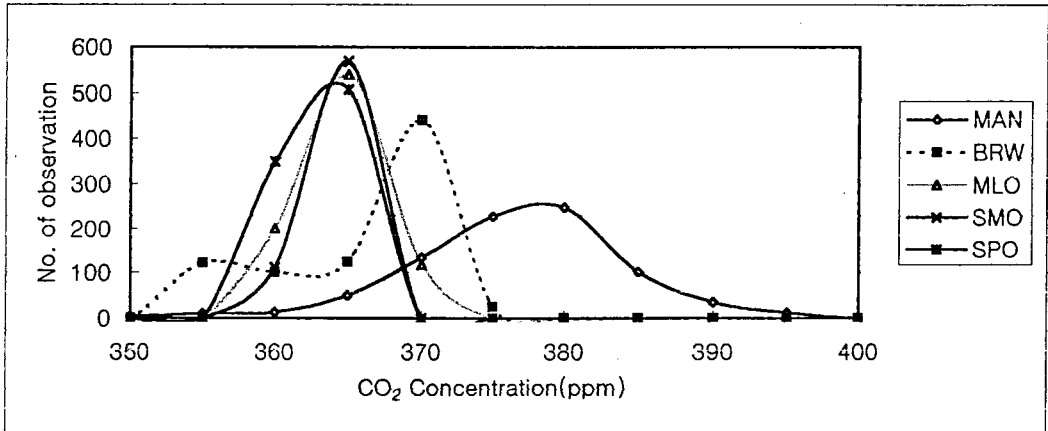


Fig. 3. A plot of frequency distribution of CO<sub>2</sub> concentration among different study sites. Symbols for the stations denote: MAN(Moo-Ahn, Korea), BRW(Point Barrow, Alaska), MLO(Mauna Loa, Hawaii), SMO(American Samoa), and SPO(Amundsen Scott, South Pole).

성이 어느 정도 반영된 것으로 보인다. 반면, 한대지역인 BRW에서는 370ppm에 가까운 최빈값이 확인되었다. 반면 본 연구의 주 대상인 무안지점은 최빈값이 380 ppm에 가까운 정도로 오염원(주변 지역 또는 중국과 같은 장거리 오염원)의 영향을 직·간접적으로 받고 있을 것으로 추정된다.

### 일주기 농도변화와 조절인자

본 연구의 관측점인 MAN과 여타 지점들간에서 진행되는 농도변화의 양상을 가장 짧은 주기로 비교하기 위하여, 우선적으로 24시간 규모로 진행되는 농도변화의 양상을 파악하였다. Fig. 4에 제시된 MAN 지역의 일주기 농도변화는 계절에 상관없이 거의 유사하게 뚜렷한 주저야고(晝低夜高)의 경향성을 일관성 있게 보여주었다. 그리고 이러한 일주기를 계절별로 보면, 봄과 겨울에 비해 여름과 가을에 낮은 농도를 취하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 따라서 이와 같은 경향성에 대한 해석은 크게 두 가지의 관점에서 접근할 필요가 있다. 가장 우선적으로는 순수하게 24시간을 주기로 진행되는 현상의 요인을 분석하는 것이고, 그 다음으로는 이러한 단주기적 현상이 보다 긴 시간적 관점(예를 들면, 계절별 주기성)에서 어떠한 경향성을 유지하는 가에 대해 의미를 부여하는 것이다.

먼저 전자의 관점에서 현상을 정리하면, 다음과 같다. CO<sub>2</sub> 농도는 자정 이후 오전시간에 전반적으로 고농

도의 경향을 보이는데, 대기가 비교적 안정한 6~9시 사이에 하루 중 최고농도를 기록하였다. 기온이 상승하는 낮 시간대에는 농도가 빠르게 감소하여, 15~16시경에는 최저 농도를 나타내었다. 시간의 흐름에 따라 계속해서 저농도를 유지하다가, 일몰시간대(18시)에 기온의 하강과 함께 고농도로 반전하였다. 이와 같은 외형적인 경향성을 자세히 분석해 보면, 다음과 같이 설명할 수 있다. 특히 이른 오전 시간대에 고농도가 지속되는 경향성은 야간대에 형성되는 역전층의 영향으로 인해, 늦은 오후 시간부터 발견되는 고농도치가 새벽 시간대까지 지속적으로 유지된 데 따른 결과로 볼 수 있을 것이다. 낮 시간대에는 특별한 배출원의 영향을 받지 않지만, 저녁 시간대에는 다시 오염된 외부지역의 공기가 유입되므로 인해, 농도의 재상승이 이루어지는 것으로 보인다(또 다른 관점에서 보면, 낮 시간대에 배출된 CO<sub>2</sub>가 저녁시간대에 역전층 등의 형성으로 낮은 고도권에 갇혀 있다가, 오후 시간대에 대기의 혼합이 활발해짐에 따라 확산효과 등으로 인해 희석될 수도 있다). 이와 같은 요인들에 덧붙여, 연구대상지역이 해안 지역에 있다는 점도 한 가지 요인으로 작용하였을 것으로 보인다. 이는 예를 들어, 낮시간대에는 상대적으로 청정한 해풍이 주를 이루겠지만, 오후 시간대에는 인위적오염원에 취약한 육풍이 주를 이루는 경향을 예상할 수 있기 때문이다. 어느 정도 차이는 있겠지만, 이와 같은 순환이 계절을 거치며 지속되는 것으로 보인다. 수

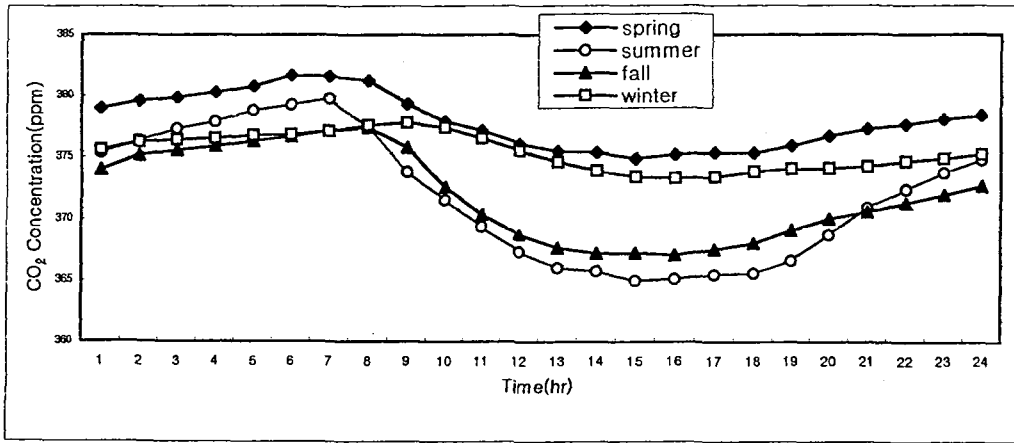


Fig. 4. Differences in diurnal variation patterns of CO<sub>2</sub> in MAN area between different seasons. Hourly mean concentrations for each season were derived after grouping the whole data into spring (3-5), summer (6-8), fall (9-11), and winter (12-2).

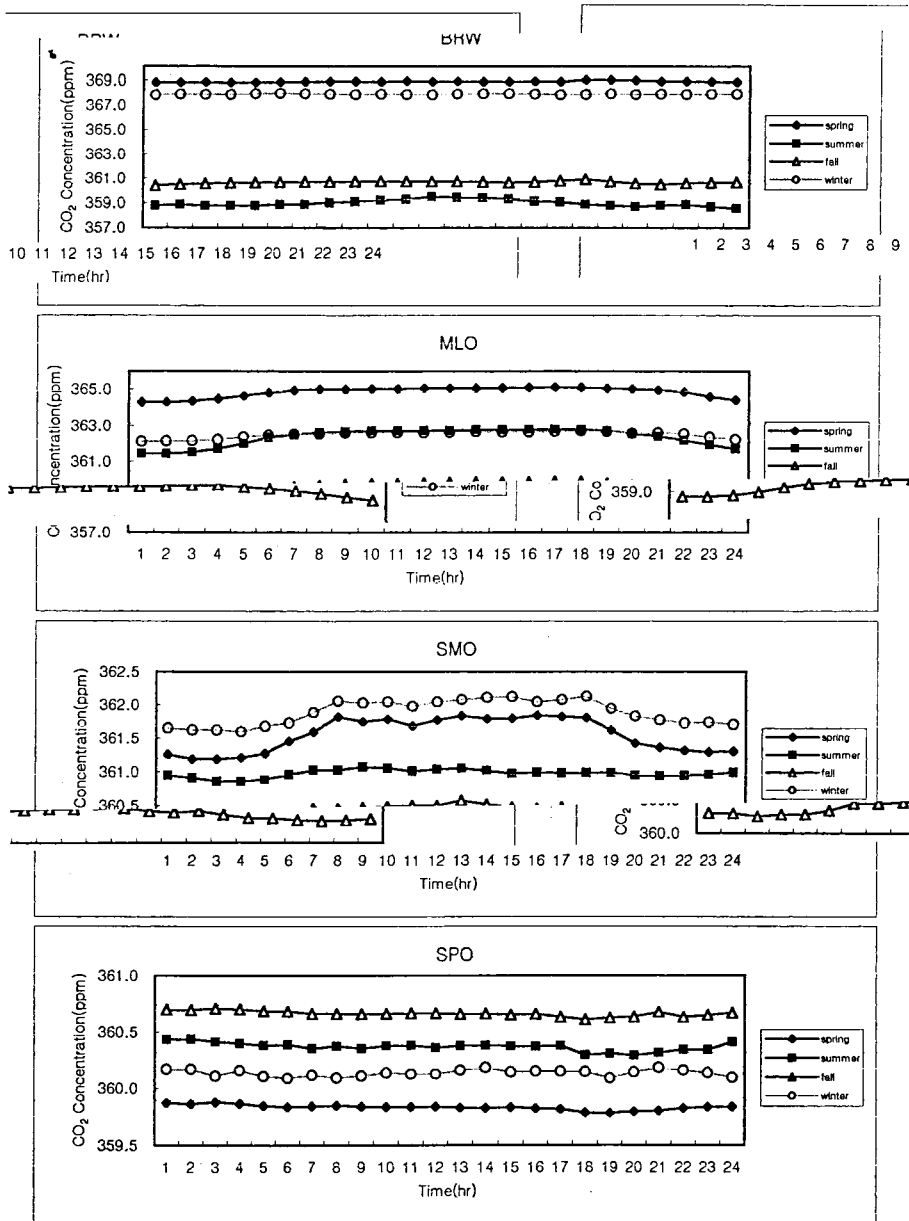
은과 같은 가스성 오염물질의 단주기 분포에서도 이와 같은 경향성이 확인된 바 있다(Kim and Kim, 2001).

Fig. 5에는 비교대상인 외국측정지점들의 자료를 이용하여 이와 유사한 분석을 실시하였다. 시간대별 대표 농도를 계절의 구분없이 전체자료로부터 취합하여 비교한 결과에 따르면, 대체로 상당히 유사한 농도분포의 경향성이 발견된다. 식생의 활동이 활발한 극지점(SPO)를 제외한 모든 지점에서 MAN의 경향과 정반대로 뚜렷하게 주고야저(晝高夜低)의 경향을 보이고 있다. 이들 지점의 일주기 농도분포는 Fig. 3의 빈도분포 비교에서 확인된 바와 같이(즉, MAN과 같이 외부 오염원(주로 인위적인 부분으로 추정됨)으로부터 받는 영향이 크지 않고), 대신에 자연적인 이산화탄소의 기원 또는 소멸원으로 간주할 수 있는 식생의 활동 등에 민감하게 영향을 받은 데 따른 결과로 보인다. 이러한 경향은 식생의 빈도가 가장 높은 MLO 지역에서 가장 뚜렷하게 나타난다. 그런데 냉대지역인 BRW나 열대인 SMO에서도 주고야저가 유지되는 현상은 식물의 광합성과 같은 요인들의 영향에 역행하는 결과로서, 이를 쉽게 설명하기는 어려울 것으로 보인다. 따라서 다음과 같은 사실을 추정해 볼 수도 있겠다. 식생의 활동이 가장 왕성한 오후 시간대는 많은 양의 이산화탄소가 소모되지만, 활발한 호흡을 통해 재 방출되는 양도 풍부하다. MAN을 제외한 대부분의 지역에서 낮시간대에 이와 유사한 농도경향이 유지되는 것은 결과적으로(호흡을 위시한) 배출과 관련된 요인들이 광합성과 같

은 제거(또는 침적)와 관련된 요인들에 비해 상대적으로 영향력이 크기 때문에 과생되는 결과로 추정된다. 물론 이러한 요인들에 덧붙여, 지역별 전체 식생의 개체수, 종류, 빈도 차이와 같은 주변 요인들도 이러한 결과를 초래하는 데 일조하는 것으로 보인다. 실제로 기준시점인 1시의 자료로 모든 비교 대상점의 자료를 표준화한 결과를 비교해 보면(Fig. 6), MAN 지역의 일주기 규모의 변화가 여타 연구지점에 비해 가장 강한 일교차를 보인다는 것을 확인할 수 있다.

### 일주기 변화경향에 미치는 계절적 인자의 작용

앞의 3.3절에서 제시한 두 번째 명제와 같이 어떻게 계절적 인자가 일주기의 변화경향에 영향을 미치는 가를 이해하기 위해서는 여러 가지 복잡한 접근방법이 요구된다. 이미 연구지역인 MAN에서는 일주기의 상대적 경향성이 대단히 유사하게 나타나는 것과 달리, 절대값의 크기에서 계절별 차이가 뚜렷하다는 점을 확인할 수 있다. 예를 들어, Fig. 4에 나타난 MAN 지역의 오후 시간대 농도의 계절적 차이를 비교해 보면, 봄-가을 또는 여름-겨울간의 차이가 거의 10ppm 수준으로 크게 벌어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 계절적 변화의 차이는 타 지역에서도 발견되었다(Fig. 5). 우선 BRW 지역의 경우, 역시 계절간 농도차이가 9ppm 정도로 크게 나타났다. SMO 지역은 전체적인 농도차이가 2ppm 정도로서 그 차이가 그리 크지 않으나, 계절에 따른 일주기의 변화경향이 뚜렷하게 나타난다. 특히



**Fig. 5.** Differences in diurnal variation patterns of CO<sub>2</sub> for each of compared sites between different seasons. Hourly mean concentrations for each season were derived after dividing the whole data into spring (3-5), summer (6-8), fall (9-11), and winter (12-2). Seasonal grouping scheme for SPO is not directly comparable to the other stations due to opposite climatic trends.

봄-겨울, 여름-가을간의 변화양상이 흡사하고, 봄과 겨울에 고농도를, 여름과 가을에 저농도를 보여 계절에 따른 농도의 차이가 확연하게 나타난다. 반면 MLO는 가을에 비해 봄의 농도치가 7ppm 정도로 높게 나타나지만, 여름과 겨울의 농도차이 및 일변화 양상은 매우

유사하게 나타난다. 극지방인 SPO 지역은 가을, 여름, 겨울, 봄의 순으로 농도가 낮게 나타나지만, 전체적인 농도차이가 1ppm 미만으로서 계절적인 차이 및 일주기의 농도차이가 매우 미미하다. 그러나 한가지 유의할 사실은, 계절의 특성이 뒤집어지는 SPO 지역도 (우리의



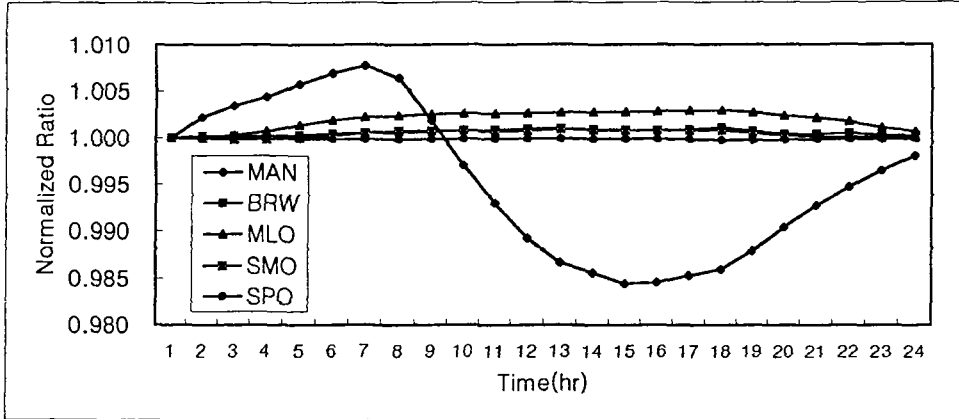


Fig. 6. Comparison of diurnal variation patterns among different study sites. The mean hourly data for each site were derived by normalizing the hourly data to that measured at 1 AM for each site. The reference concentrations for 1 AM data for each site are as follows: Moo-Ahn, Korea (MAN: 376.0 ppm), Point Barrow, Alaska (BRW: 363.6 ppm), Mauna Loa, Hawaii (MLO: 361.3 ppm), American Samoa (SMO: 361.0 ppm), Amundsen Scott, South Pole (SPO: 360.3 ppm).

겨울철에 해당하는 여름철의 농도가(우리의 여름철에 해당하는) 겨울철의 농도보다 높다는 사실이다. 이와 같은 사실을 취합컨대, 어느 정도 불규칙성이 존재하지만, 추운 겨울철과 봄에 고농도의 CO<sub>2</sub>가 발견되는 것은 전지구적으로 진행되는 현상으로 볼 수 있을 듯하다. 이와 같은 경향은 지역에 따라 너무나 다양한 방식으로 표출되기 때문에, 계절별 경향성을 해석하기 위해서는 보다 세밀한 분석이 요구된다.

일주기 농도의 최대값과 최소값의 차이를 진동폭으로 규정할 경우, 일주기의 진동폭도 계절별로 현격한 차이를 보인다는 것을 알 수 있다. MAN 지역의 계절별 농도의 진동폭을 비교한 결과 여름철이 가장 크게 나타났다(14.7ppm), 가을(10.4ppm), 봄(6.7ppm), 겨울(4.5ppm)의 순으로 감소하였다. 이와 같은 계절별 차이는 계절별 공기순환의 차이, 발생원과 소멸원의 변화 등이 복합적으로 작용한데 따른 결과로 보인다. 이와 같은 진동폭의 차이는 각 계절별 오전 1시의 농도치를 기준으로 이용하여, 모든 계절별 일주기 자료를 표준화한 Fig. 7에서 자세하게 확인할 수 있다. 표준화한 타 지역의 계절별 일주기 변화양상은 Fig. 8에 제시한 바와 같다. 이를 통해 전 단락에서 설명한 계절별 변화양상을 재확인할 수 있는데, BRW 지역은 여름(1.0ppm), 가을(0.5ppm), 봄(0.2ppm), 겨울(0.1ppm)의 순으로 비교적 작은 규모의 진동폭을 보였다. MLO 지역은 여름(1.3ppm), 가을(1.2ppm), 봄(0.8ppm), 겨울(0.6ppm),

SMO 지역은 봄(0.6 ppm), 겨울(0.5ppm), 가을(0.3ppm), 여름(0.2ppm)의 순으로 각각 진동폭의 감소를 보이고 있다. SPO 지역은 계절적인 변동폭이 0.1ppm 정도로 매우 작게 나타났다. 여타 지역에 비해, MAN 지역에서 큰 계절별 진폭의 변화를 보이는 것은 MAN 지역이(여타 지역에 비해) 불규칙한 외부 오염원의 영향을 많이 받는데 따른 결과로 볼 수 있을 듯하다.

이와 같은 진동폭의 비교에 덧붙여, 하루 중 최고 농도를 나타내는 시간대를 비교해 보아도 계절별 차이가 존재한다는 것을 확인할 수 있다. MAN 지역의 경우, 봄은 6시, 여름은 7시, 가을은 8시, 겨울은 9시로 지연되는 양상을 보였다. MAN 지역의 경우와 달리, 외국의 관측지점들에서는 최고농도를 이루는 시간보다 차라리 고농도의 저감이 시작되는 시점에서 어느 정도 차별화가 이루어지는 것으로 보인다. 예를 들어, MLO 지역은 5시경부터 농도가 증가하여 낮 시간대에 고농도를 유지하다가 일몰시간인 19시경부터 다시 농도감소를 보인다. 비교적 고농도를 유지하는 시간대로는 겨울이 7시, 봄이 8시, 가을이 9시, 여름이 10시부터이며, 감소시간대로는 여름과 가을이 19시, 봄이 21시, 겨울이 22시가 된다. SMO 지역도 유사하게 6시경부터 증가하여 8시부터 고농도를 보이며 18시까지 유지한 후 감소하여 밤 시간 동안 저농도를 보인다. 외국 관측점에서 발견되는 이러한 현상들은 일출시간 또는 총 일사량과 같은 요인들이 계절별로 차이를 보이기 때문에, 이들 요

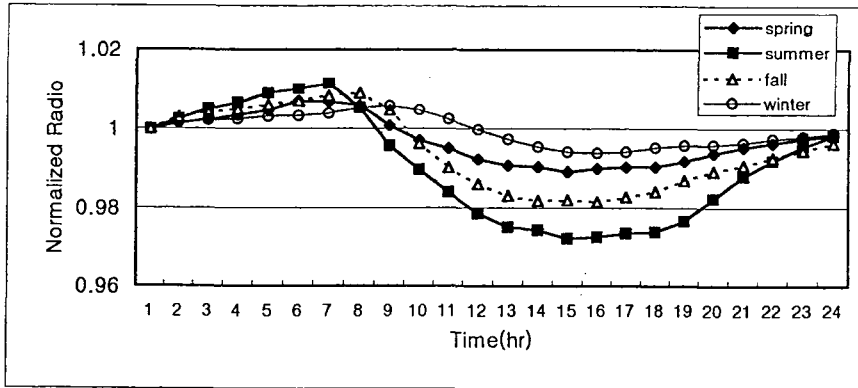


Fig. 7. Differences in diurnal variation patterns of  $\text{CO}_2$  between different seasons from the study site. Hourly data for each season were normalized to the mean concentrations observed at 1 AM such as 379.0 (spring), 375.4 (summer), 374.0 (fall), and 375.6 ppm (winter). The hourly mean concentration was derived for each season using the whole hourly data sets measured during the entire measurement periods (Aug. 1995 - Dec. 1997).

인이 복합적으로 식생 등과 관련된 생성 또는 소멸작용에 영향을 미치는데 따른 결과로 사료된다. 반면 인위적 오염원의 역할이 큰 것으로 사료되는 국내의 MAN 지점의 경우, 상대적으로 야간대의 고농도를 유도하는 역전층의 형성조건 등이 계절적으로 변동하기 때문에 그러한 영향이 최고농도의 형성시점에 어느 정도 파급적인 효과를 보이는 것으로 기대된다.

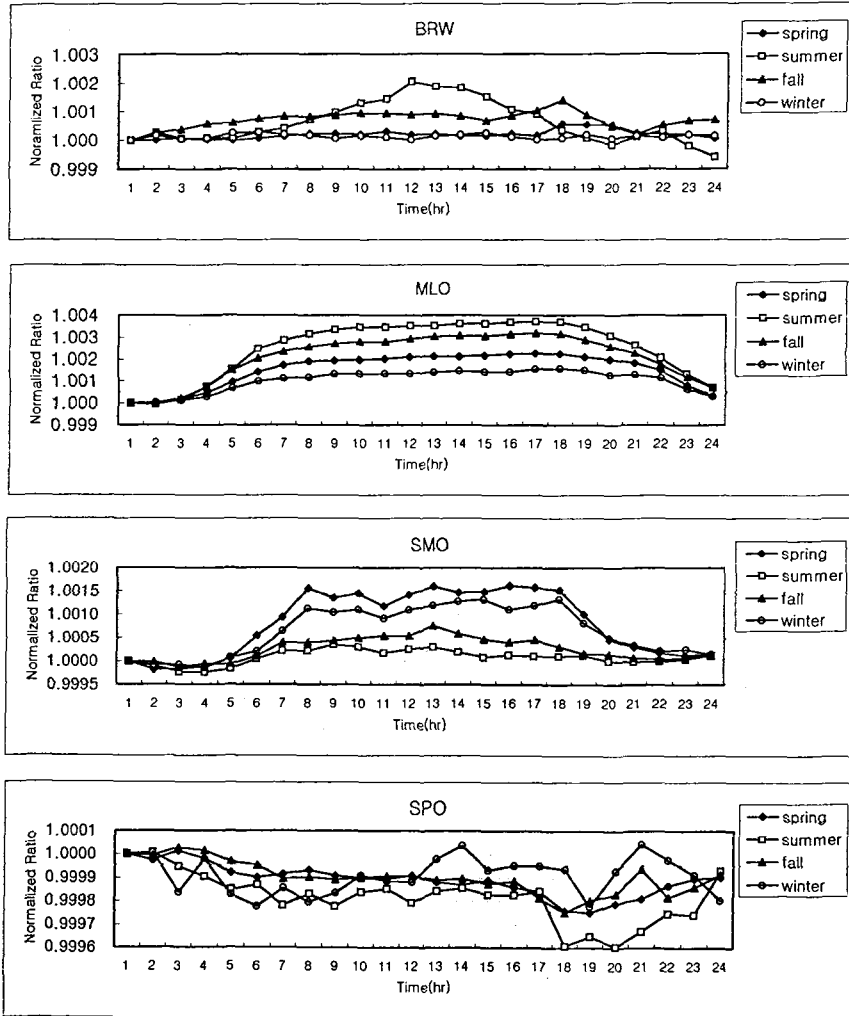
## 결론

전 세계적인 지구온난화의 변화추세를 파악하기 위해, 한반도의 국지적 규모에서 진행되는 지구온난화의 경향성을 분석하는 것은 무엇보다 중대한 과제라고 볼 수 있다. 본 연구는 1995년 8월~1997년 12월까지 전남 무안기상대에서 관측한 이산화탄소와 기상자료를 토대로, 세계의 주요 배경관측지점(Point Barrow(Alaska), Mauna Loa(Hawaii), American Samoa, Amundsen Scott(South Pole) 등을 중심으로 동일한 시간대에 이루어진 관측자료를 비교하여 일주기적 및 계절적 요인이 어떻게 이산화탄소의 단기주기적 농도경향의 결정에 영향을 미치는가를 비교 분석해 보았다.

MAN 지역의 시간대별 이산화탄소 농도는 자정 이후 이른 오전시간대에 전반적으로 고농도가 형성되는 경향을 띠는데, 특히 대기가 비교적 안정된 6-9시 사이에 하루 중 최고농도를 기록하였다. 기온이 상승하는 낮 시간대에는 농도가 빠르게 감소하여, 15-16시경에는 최

저 농도를 나타내었다. 시간의 흐름에 따라 계속해서 저농도를 유지하다가, 일몰시간대(18시)에 기온의 하강과 함께 고농도로 반전하였다. 특히 이른 오전시간대에 고농도가 지속되는 경향성은 야간대에 형성되는 역전층의 영향으로 인해, 늦은 오후시간부터 발견되는 고농도치가 새벽시간대까지 지속적으로 유지된 데 따른 결과로 볼 수 있을 것이다. 또한 밤 시간대에는 비교적 인위적 오염원의 영향이 강한 육풍이 주를 이루고, 낮에는 반대로 해풍이 주를 이룬다는 점도 이와 같은 현상을 야기하는데 어느 정도 일조할 것으로 기대된다. MAN 지역의 일주기 농도변화는 계절에 상관없이 거의 유사하게 뚜렷한 주저야고(晝低夜高)의 경향성을 일관성있게 보여주었다. 이와 같은 경향은 외부 오염원의 영향이 미미한 기타 외국의 배경관측점에서 발견되는 일주기 경향과는 뚜렷한 차이를 띠는 것으로 확인되었다. 따라서 외국 관측점들의 경우, 식생의 영향을 민감하게 받을 가능성이 높은 것으로 나타나며, 그 결과 국내지점과 달리 주고야저(晝高夜低)의 뚜렷한 경향이 지속되는 것으로 나타났다.

MAN 지역에서 발견된 이산화탄소의 일주기의 양상을 계절별로 비교해 보면, 봄, 겨울철에 대체로 높은 농도를 유지하고, 여름, 가을철에는 상대적으로 낮은 농도가 지속되는 것을 알 수 있다. 일주기에 이러한 계절적 요인이 뚜렷하게 작용하는 현상은 연구지역 주변환경에 작용하는 계절별 오염양상(특히 인위적 오염원의 영향), 공기순환, 기상변화(예를 들어, 동아시아 지역에 주



**Fig. 8.** Differences in diurnal variation patterns of CO<sub>2</sub> between different seasons for each site. Hourly data for each season were normalized to the mean concentrations observed at 1 AM such as (1) BRW: 368.8 (spring), 358.8 (summer), 360.4 (fall), and 367.8 ppm (winter), (2) MLO: 364.3 (spring), 361.5 (summer), 358.7 (fall), and 362.1 ppm (winter), (3) SMO: 361.3 (spring), 360.9 (summer), 360.3 (fall), and 361.7 ppm (winter), (4) SPO: 359.9 (spring), 360.4 (summer), 360.7 (fall), and 360.2 ppm (winter).

로 발생하는 몬순의 영향), 식생의 변화 등이 복합적으로 작용하여 나타나는 결과로 보인다(박경윤 외, 1994, 전종갑, 1991). 예를 들어, 겨울철에는 특히 연료의 과사용으로 인한 이산화탄소의 과배출, 북풍을 타고 중국 대륙으로부터 유입되는 오염된 공기, 식생의 광합성 활동 위축에 따른 이산화탄소의 저소모 요인 등이 동시에 복합적으로 작용하여, 지속적인 고농도의 경향을 유지하는데 일조할 수 있을 것으로 보인다. 반면 여름철의 경우, 국내외를 막론하고 인위적 배출원의 위축, 북

태평양으로부터 발원한 상대적으로 깨끗한 남풍의 영향 등이 어우러져서 상대적으로 낮은 농도가 유지되는데 일조하는 것으로 사료된다(환경부, 1998). 본 연구의 결과, MAN 지역의 농도경향이 외국의 주요 배경관측 점들에 비해 상대적으로 높고, 일주기의 분포경향도 특이하게 나타나는 것이 확인되었다. 이러한 현상들은 MAN 지역이 국내 연안지역의 오염유발시설 또는 중국과 같은 주변지역의 오염원의 영향에 종속되었다는 점을 강하게 시사하였다. 따라서 MAN 지역을 중심으로

이루어진 관측농도의 변화경향은 국내의 배경환경지역에 대한 경향성을 대표하기보다는 무안지역의 국부적 환경요인의 변화를 더 잘 반영하는 것으로 사료된다.

## 감사의 글

무안지역의 자료를 해외 주요 관측점과 비교가 가능하게 모든 관련자료를 정리하고 공개해 주신 NOAA, CMDL의 Carbon Cycle Group 관계자들에게 충심으로 감사드리는 바이다. 이 논문은 2000년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-015-DP0453).

## 참고문헌

김용표 · 권태규 · 강용수 · 이필재, 1999, 지구대기 환경변화와 대응전략. 한국대기환경학회 지구환경분과회 주최 세미나, 경기대학교.  
 박경윤 · 이호근 · 서명석 · 장광미 · 강창희 · 허철규 · 김영준, 1994, 제주도 고산 측정소에서의 대 기오염 배경농도 측정 및 분석. 한국대기보전학회지, 10 (4), 252-259.  
 전종갑, 1991, 대기오염물질 수송과 관련된 동부 아시아 상층 대기의 순환특성에 관한 연구. 한국기상학회지, 27 (2), 180-196.  
 조하만 외, 1998, G-7 프로젝트 (지구 규모 대기 환경 기초 및 기반 기술) 개발 사업의 세부 과제-지구 대기 조성 변화 감시의 제 2단계 3차년도 보고서, 기상청 · 기상연구소.

EIIP, 1999, Introduction to Estimating Greenhouse Gas Emissions. ICF consulting, Greenhouse Gas Committee, 8.  
 EPA, 1997, Mobile Source Emission Factor Model (MOBILE5a), U.S. Environmental Protection Agency, Office of Mobile Sources, EPA, Ann Arbor, Michigan.  
 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.  
 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.  
 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.  
 Kim, K.-H. and Kim, M.-Y, 2000, Some insights into short-term variability of total gaseous mercury in urban air, Atmospheric Environment, 35, 49-59.

2000년 8월 1일 원고 접수  
 2000년 9월 26일 수정원고 접수  
 2000년 10월 7일 원고 채택