도시 - 전원간 이산화탄소(CO₂) 농도구배 예비관측 결과

정유란 · 이규종 · 이변우*

서울대학교 식물생산학부

(2007년 7월 20일 접수; 2007년 12월 4일 수락)

Preliminary Report of Observed Urban - Rural Gradient of Carbon Dioxide Concentration across Seoul, Suwon, and Icheon in South Korea

Uran Chung, Kyu-Jong Lee and Byun-Woo Lee*

Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received July 20, 2007; Accepted December 4, 2007)

ABSTRACT

Urban atmosphere may play as a harbinger for the future climate change with respect to temperature and CO₂ concentration. The Seoul metropolitan area is unique in rapid urbanization and industrialization during the last several decades, providing a natural CO₂ dome with increased temperature. This study was carried out to evaluate the feasibility of using the urban-rural environmental gradient in replacement of the IPCC mid-term scenario (after 30-50 years). For this, we measured atmospheric CO₂ concentration and air temperature at three sites with different degree of urbanization (Seoul, Suwon, and Icheon). Results from 11-month measurement can be summarized as follows: (1) The annual mean CO₂ concentration across 3 sites was in the order of Seoul (439 ppm) > Suwon (419 ppm) > Icheon (416 ppm), showing a substantial urban-rural environmental gradient. (2) The diurnal fluctuation in CO₂ concentration was greater in summer than in winter, showing the effect of photosynthesis on local CO₂ concentration. (3) The daily maximum CO₂ concentration was observed at 0500 LST in spring and summer, 0800 LST in autumn, and 0900 LST in winter, showing the sunrise-time dependence. (4) The observed hourly maximum CO₂ concentration averaged for the whole period was 446 ppm in Seoul at 0700 LST, while the minimum was 407 ppm in Suwon at 1500 LST. (5) Compared with the background atmospheric concentration of CO₂ in Anmyeon-do (377.4 ppm annual mean), CO₂ concentration of the study sites was higher by 14% in Seoul, by 10% in Suwon, and by 9% in Icheon. The observed CO₂ concentration in Seoul reached already 98% of the 2030-2040 projection (450 ppm) and 80% of the 2040-2050 projection (550 ppm) under the IPCC BAU scenario, showing a feasibility of using the CO₂ dome of Seoul as a natural experimental setting for the mid-term climate change impact assessment.

Key words: Urban CO₂ dome, Urban-rural environmental gradient, IPCC scenario

I. 서 언

대기 중 CO₂ 농도는 산업혁명 이전의 280 ppm보다 30% 이상 증가하여 1994년에는 358 ppm, 1999년에는 376 ppm을 기록하였으며(Park *et al.*, 2005),

2100년까지는 540-970 ppm으로 증가할 것으로 예측된다. 이러한 온실가스의 농도증가는 지난 100년간 지구 의 평균적인 온도를 0.6°C 상승시켰으며, 100년 후의 기온은 지금보다 약 1.4-4.0°C 상승시킬 것으로 예측 되었다(IPCC, 2007). CO₂는 다른 온실가스에 비해

대기 중에 다량으로 존재할 뿐만 아니라 발생량과 소모량을 추정하는데 있어 어려움이 많고, 주요 발생 원인이 석탄 및 석유와 같은 화석연료의 소비이므로 인류의 성장발달과 더불어 가장 중요한 온실가스로 지적된 바 있다(Conway *et al.*, 1988; Cunnold *et al.*, 1994; Marland *et al.*, 1997; Chung and Tans, 2000). 이러한 대기 중 CO₂ 농도증가는 지구온난화와 기후변화를 초래하여 해수면 상승, 사막화, 생태계의 변화 등을 유발할 수 있으므로 지구온난화 방지를 위한 체계적인 대책 수립을 위해 지속적인 감시와 관측이 필요하다. 이러한 조건하에서의 식물반응을 바르게 평가하고 모의결과를 검증하기 위해서는 반드시 실험대상 식물을 상승된 기온과 증가된 CO₂ 농도 조건에서 충분한 기간 동안 재배하여 그 반응을 검토해야 한다. 이런 조건에 맞는 대규모의 환경조절실험은 사실상 불가능하므로 chamber를 이용한 소규모, 단기실험을 통해 불완전한 정보를 얻는데 그쳤다. 가장 주목할 만한 대규모의 장기실험인 Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) 사업의 경우 막대한 경비를 들여 노지조건의 CO₂ 농도증가를 실험했으나(Kimball *et al.*, 2002), 기온상승조건을 충족시키지 못한 것이 한계로 지적되었다(Ainsworth and Long, 2005).

도시화(urbanization)는 IPCC의 미래 기후변화 기후 시나리오에 상응하는, 즉 기온상승 및 CO₂ 농도증가를 유발하는 것으로 관찰되어 현재의 도시기후는 미래에 닥쳐올 기후변화의 ‘전조’(harbinger)라 할 수 있다(Idso *et al.*, 2001; 2002). 따라서 대도시에 이미 형성되어있는 이와 닮은 “천연실험실”을 이용하여 작물의 반응을 비교 실험한다면 CO₂ 농도증가 혹은 기온상승 중 한 가지 조건 하에서만 식물반응을 살피는 기존연구에 비해 훨씬 적은 비용으로 현실에 더욱 가까운 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 북미, 유럽, 아시아, 호주의 대도시를 중심으로 CO₂ 농도를 측정할 결과 모든 대도시에서 이러한 조건이 관찰되는 것은 아니다. 사막이나 위성도시로 둘러싸인 대도시(미국의 아리조나주 피닉스시, 메릴랜드주 볼티모어시)에서는 주변 시골지역에 비해 기온상승과 CO₂ 농도증가가 현저하였는데, 아리조나주 피닉스시의 연 평균 CO₂ 농도는 390 ppm으로 주변 시골지역과 별반 차이가 없었지만 겨울철 최고 CO₂ 농도가 시골지역보다 67.4%나 증가하였으며, 종종 아침의 CO₂ 농도가 여름철보다는 겨울철이 더 높았다(Idso *et al.*, 2002). 또한 메릴랜드

주 볼티모어시는 평균 CO₂ 농도가 466 ppm, 시로부터 약 10 km 떨어진 공원은 401 ppm, 50 km 떨어진 시골 농장에서는 385 ppm으로 나타나 도시-전원 간 CO₂ 농도차이가 있음을 확인하였다(Ziska *et al.*, 2004). 이러한 도시기후를 이용한 식물반응의 연구는 드문데, 미국의 뉴욕에서 서양버드나무 클론의 생장을 도시-시골 간 환경차이에 의해 해석한 연구(Gregg *et al.*, 2003), 볼티모어지방에서 휴경지토양의 1차생산력을 도시-시골 간 비교한 연구(Ziska *et al.*, 2004) 등 극소수가 있을 뿐이며, 농작물반응 혹은 작부체계영향을 연구한 사례는 아직 보고된 바 없다. 우리나라 수도권(경기, 서울, 인천)은 세계적으로 그 유례가 드문 급격한 도시화 및 산업화를 겪었으며, 특히 서울은 서쪽을 제외한 3면이 산으로 둘러싸였고, 주변의 지표피복이 삼림이나 농경지보다 위성도시의 주거 및 상업지역으로 구성되어있어 도시기후특성이 세계 다른 대도시에 비해 매우 뚜렷하다(Chung *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2003).

따라서 본 연구는 서울 도심과 전원 지역간 CO₂ 농도 차이가 IPCC 중단기 기후변화 시나리오에 상응하는지의 여부를 확인하기 위한 기초자료를 수집하여 우리나라 수도권의 도시기후를 IPCC 기후시나리오를 재현한 “천연실험실”로 활용할 수 있는지를 평가하고자 수행하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 장소선정 및 자료수집

도심과 전원간 CO₂ 농도구배를 평가하기 위해 수도권의 도심-근교-전원 특성을 갖춘 지역에 각각 장소를 선정하고 대기 중 CO₂ 농도를 2006년 6월 19일부터 9월 5일까지는 5분 간격으로 연속 측정하였으며, 2006년 9월 6일부터 2007년 6월 25일까지는 10분 간격으로 연속 측정하였다. 선정기준은 토지이용과 지표피복을 배경으로 Choi *et al.*(2003)의 방법에 따라 추정된 도시열섬강도(Urban Heat Island Intensity)의 차이가 뚜렷하고 일장이 작물 발육에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 유사위도(남북으로 50 km 이내)에 위치한 지역 안에서 선정하였다. 따라서 선정된 도심 지역은 서울기상관측소(서울특별시 종로구 송월동, 37° 34'N), 부도심지역은 수원 서울대학교 농장(경기도 수원시 권선구 서둔동, 37° 16'N), 전원지역은 이천 기

Fig. 1. Location of the study sites (Seoul: 37° 34'N, Suwon: 37° 16'N, and Icheon: 37° 15' N) and reference site (Korea Global Atmosphere Watch Center; Anmyeon-do, 36° 32'N).

상관측소(경기도 이천시 부발읍 신하리, 37° 15'N)로 선정하였다(Fig. 1). CO₂ 농도는 자동측정기(Telaire 2655, Spectrum Inc., U.S.A)를 이용하여 자상으로부터 1.5 m 높이에서 10분 간격으로 연속 측정하였으며, 표준가스(390 ppm)를 이용하여 주기적(월 1회)으로 보정하였다. 제조사 사양에 의한 정확도는 0 ppm에서 4000 ppm 범위에서 $\pm 5\%$ 이다.

WMO(1978)에서 지역급 배경대기 관측소의 입지조건은 인구나 산업 중심지로부터 멀리 떨어진 농촌지역이 적절하며, 년중 지역 오염원이 비교적 적은 곳이어야 한다고 권고하였다. 따라서 화석연료 사용과 같은 인간활동이 빈번하고 급격한 산업화로 이루어진 우리나라 수도권의 도시기후가 IPCC 중단기 기후시나리오에 상응하는지를 판단하기 위해서는 인위적인 영향을 받지 않고 관측된 배경대기 CO₂ 농도자료와의 비교가 필수적이다. 따라서 우리나라 배경대기관측소로 지정된 충남 태안군 안면읍 송언리 소재 지구대기감시센터(Korea Global Atmosphere Watch Center)의 2005년 CO₂ 자료를 세계온실가스자료센터(World Data Centre for Greenhouse Gases, 이하 WDCGG; <http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg.html>)에서 수집하였다. 배경

대기 CO₂ 농도자료를 기준으로 서울, 수원, 이천의 CO₂ 농도구배를 계산하고 상호 비교하였다.

2.2. 측정자료의 품질 관리

2006년 6월 19일부터 2007년 6월 25일 동안 관측된 자료의 총 개수는 서울이 6,743개, 수원이 5,569개, 이천이 6,790개이며, 배경대기관측소 안면도의 2005년 CO₂ 자료는 6,377개이다. 결측의 주원인은 대부분 전원공급 문제로 발생하였는데, 서울의 경우 전원을 연결하지 못해 충전지(6V)로 전원을 공급하였다. 이 때 충전지 수명에 맞추어 자료를 수집하지 못할 경우 결측이 발생하였으며 2007년 3월부터 5월 20일 까지의 결측은 3지점의 센서의 이상 유무와 보정을 위해 모두 수거하였기 때문이다. 배경대기관측소 안면도 2005년 자료에서는 7월에서 9월에 결측이 많았는데, 장마와 2005년 9월 태풍(나비)으로 인한 결측인 것으로 판단된다.

배경대기관측소의 CO₂ 농도산정은 WDCGG 자료 처리 방법으로 구하고 있는데, 단계를 1, 2, 3으로 나누어 산정하고 있다. 단계 1은 원시자료에서 1시간 관측 자료가 60개 이상인 경우의 농도값을 사용하고, 단계 2에서는 단계 1을 거친 자료 중에서 시간 평균 농도값이 표준편차 0.6 ppm을 초과하는 자료를 제거한다. 단계 3은 단계 2의 자료에서 매시간 평균 농도값이 인접하는 양쪽 자료의 차이가 0.6 ppm을 초과할 경우 제거된 농도이다(Park *et al.*, 2005). 따라서 단계 3의 농도값은 인위적인 오염원이 배제된 농도라고 볼 수 있다. 그러나 이러한 방법의 단점은 실제 적용할 수 있는 자료의 수가 적어질 수 있다는 것이다. 따라서 본 실험에서는 5분 간격으로 측정할 경우는 1시간 관측 자료수가 12개였으나 10분 간격으로 할 경우 절반으로 줄어서 배경대기관측소의 자료처리 방법을 이용할 수 없었으므로 결측을 제외한 모든 자료를 매시간 평균하는 방법으로 산출하였다.

III. 결 과

3.1. CO₂ 농도의 연평균 및 계절평균 특성

서울에서는 최소 농도가 377 $\pm$ 27 ppm으로 8월에 나타났다고, 수원과 이천에서는 370 $\pm$ 29 ppm, 359 $\pm$ 52 ppm으로 7월에 나타났으며 서울>수원>이천 순으로 나타났다(Table 1). 최대 농도의 경우 서울에서는 5월에

Table 1. Monthly mean concentration of CO₂ at three experimental and one reference sites. Measurements were made from the 19th of June 2006 to the 25th of June 2007

Year	Month	Reference [#]			Seoul			Suwon			Icheon		
		Mean (ppm)	S.D.*	No. ⁺	Mean	S.D.*	No. ⁺	Mean	S.D.*	No. ⁺	Mean	S.D.*	No. ⁺
2006	June	390	9	693	443	23	600	415	34	600	417	22	600
	July	388	10	347	405	42	699	370	29	728	359	52	744
	August	388	11	110	377	27	744	380	46	523	435	38	744
	September	390	11	276	431	22	720	381	33	251	411	17	720
	October	394	10	702	448	23	744	435	28	744	409	18	744
	November	393	6	606	4306	40	720	440	30	563	433	36	720
	December	393	12	744	466	26	744	444	30	565	426	50	735
2007	January	391	7	639	459	28	732	458	23	625	424	57	744
	February	394	8	394	464	24	480	454	24	480	435	51	480
	May	398	8	606	468	23	272	416	33	207	407	27	272
Average		392	9	512	439	28	646	419	31	529	416	37	650

*Standard deviation

⁺Number of data[#]Anmyeon-do, Korea Global Atmosphere Watch Center

468±23 ppm, 수원은 1월에 458±23 ppm, 이천은 2월에 435±51 ppm으로 나타났고, 역시 서울>수원>이천의 순으로 나타났다. 최소 농도는 서울과 수원, 이천이 모두 7-8월로 여름철에 나타났으나 서울은 최대 농도가 봄철에 나타난 반면 수원과 이천은 겨울철에 최고 농도를 보였다. 배경대기관측소 안면도에서도 2005년에는 388±11 ppm으로 7월과 8월에 저농도가 나타났고, 398±8 ppm으로 고농도는 5월에 나타났다. 또한 최근 5년간의 분석에서도 최소 농도는 대체로 8월과 9월에 나타났으며, 최대 농도를 보이는 월은 제각기 달랐다(Park *et al.*, 2005).

12개월간의 관측결과를 종합해보면 연 평균 대기 중 CO₂ 농도는, 서울이 439±28 ppm, 수원이 419±31 ppm, 이천이 416±37 ppm으로, 서울>수원>이천의 CO₂ 구배가 나타남을 알 수 있다. 서울이 수원보다 20 ppm, 이천보다는 24 ppm이 높고, 수원은 이천보다 4 ppm 차이로 수원과 이천의 연 평균 대기 중 CO₂ 농도차이가 낮게 나타났다. 배경대기관측소 안면도는 2000년 377 ppm이 관측된 이후, 2005년에는 392 ppm으로 측정되었다. 그러나 WDCGG의 배경농도 산정방법에 의한 안면도의 배경 CO₂ 농도는 현재 377 ppm으로 산정되어 있다(Park *et al.*, 2005). 이것을 기준으로 볼 때 서울은 62 ppm, 수원은 42 ppm, 이천은 39 ppm의 편차를 보였다. 또한 우리나라는 대기 중 CO₂ 농도변동이 자연생태계에서 식생의 광합성

작용에 의한 영향 외에 뚜렷한 계절풍의 영향을 받을 수 있다. Cho *et al.*(1995)은 우리나라 배경대기관측소의 경우 겨울과 봄에는 주풍향이 인간활동이 집약된 아시아권으로부터 불어오는 대륙성 바람의 경우 높은 CO₂ 농도를 보였으며, 여름에는 주풍향이 해양성 바람인 경우 낮은 CO₂ 농도를 보임으로써 계절에 따른 풍계의 변화가 CO₂ 농도변화의 일차적 요인으로 작용할 수 있다고 하였다. 따라서 3지점의 바람의 방향에 따른 CO₂ 농도를 고려해 볼 필요가 있는데, 배경대기관측소 안면도는 해안에 위치하여 여름철에 대부분 남동풍일 때 CO₂ 농도를 보이고, 겨울철에는 대륙성 바람의 영향으로 다른 방위에서도 CO₂ 농도를 보였다. 그러나 내륙의 도심에서 전원에 이르는 3지점에서는 모든 방위에서 관측된 CO₂ 농도로서(Fig. 5), 본 연구에서는 풍정을 고려하지 않았다.

3.2. 시간대별 CO₂ 농도의 연평균 특성

관측기간 중 수집된 시간대별 CO₂ 농도자료의 분포를 크기 순서대로 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95%로 나타내었다(Fig. 2). 25%에서 75%에 속하는 자료의 개수 즉 자료의 집중도를 비교해보면 3지점 가운데 수원자료가 열악함을 알 수 있다. 하지만 10%에서 90%까지 범위를 기준으로 보면 오후 시간대에 변동폭이 커지는 서울, 수원에 비해 이천의 경우 일중 지속적으로 큰 변이를 보여준다. 이는 서울과 수원은 주로

Fig. 2. Diurnal variation of mean CO₂ concentration at Seoul (top), Suwon (middle), and Icheon (bottom) sites from the 19th of June 2006 to the 25th of June 2007. Symbols in the graph indicate 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 percentile in ascending order.

오후에서 야간에 이르는 시간에 화석연료 사용과 같은 인간활동에 의한 인위적인 영향을 많이 받지만, 이천은 주간, 야간 모두 인위적인 영향을 받고 있기 때문이라 할 수 있다. 서울, 수원, 이천에서 2006년 6월 19일부터 2007년 6월 25일(2007년 3월 3일-5월 22일까지 결측)까지 관측된 대기 중 CO₂ 농도의 시간별 평균을 구하면 3지점 모두 일출 전(서울: 0700 LST, 수원: 0600 LST, 이천: 0600 LST, Local Standard Time)에 최대 농도를 보였다(Table 2). 이는 배경대기

관측소의 2005년도 최대 농도발생시각 07시와 같은 경향이다. 반면 최소 농도가 나타나는 시각은 약간씩 다른데, 서울이 16시, 수원이 15시, 이천은 19시에 최소 농도가 나타남으로써 서울과 수원은 배경대기관측소 안면도의 최소 농도가 나타나는 18시보다 일찍 나타났고, 이천은 1시간 늦게 나타났다. 최대 CO₂ 농도는 서울이 442±37 ppm으로 가장 높고, 수원과 이천은 430±40 ppm, 419±48 ppm으로 서울>수원>이천 순으로 나타났다. 최소 CO₂ 농도는 서울이 428±50 ppm, 수원이 408±45 ppm, 이천이 411±45 ppm으로 수원<이천<서울 순으로 수원이 가장 낮게 나타났다.

최대 및 최소 농도가 지역간 약간의 시간차이는 있지만 식물의 광합성 활동이 활발하며 대류활동 역시 왕성한 오후 시간대에 저농도가 나타나고, 일출 직전 혹은 직후에 고농도가 나타났다. 이는 일출 직후에 비교적 고농도를 나타낸 배경대기관측소 안면도(Park *et al.*, 2005)의 결과와는 비슷하였으나 배경대기관측소 안면도의 경우 일몰 직전에 저농도가 나타난 것과는 달리 서울과 수원에서는 광합성작용이 활발한 오후 시간대에 나타났고, 이천만 일몰 직후에 나타나 배경대기관측소와 비슷한 경향을 보였다.

3지점의 시간별 평균 CO₂ 농도를 전체 주야간으로 나타내면 서울과 수원의 경우 주야간의 차이가 3 ppm, 10 ppm으로 야간 CO₂ 농도가 더 높다(Fig. 3). 그러나 이천은 배경대기관측소와 같이 주야간의 변동 폭이 0.4 ppm 미만이다.

대기 중 CO₂의 시간대별 변이를 표준오차로 나타내면, 서울의 경우 최대편차가 50 ppm으로 오후 4시에, 최소편차는 새벽 2시에 37 ppm으로 나타났다. 수원은 오후 7시에 46 ppm으로 최대편차가 나타났으며 최소 편차는 아침 6시에 40 ppm이었다. 한편 이천은 최대 편차가 오전 7시에, 최소편차는 오후 5시에 나타나서 배경대기관측소의 최대편차가 나타난 오전 11시와 야간 11시에 최소편차가 나타나는 시간과 일치하지 않으나 경향은 비슷하다고 할 수 있다.

3.3. 시간대별 CO₂ 농도의 계절특성

앞서 대기 중 CO₂ 농도의 일변화가 뚜렷하였는데 이는 식물의 호흡과 광합성 때문인 것으로 해석된다. 식물의 호흡과 광합성작용이 CO₂ 농도의 일변화에 영향을 주는 것이라는 것을 설명하기 위해서는 계절별로

Table 2. Hourly mean concentration of CO₂ at three experimental and one reference sites. The measurement period was the same as in Table 1

Hour (LST)	Reference [#]			Seoul			Suwon			Icheon		
	Mean (ppm)	S.D.*	No.+	Mean	S.D.*	No.+	Mean	S.D.*	No.+	Mean	S.D.*	No.+
1	393	8	269	440	38	280	429	43	230	412	45	281
2	394	9	268	439	37	281	427	42	231	414	46	282
3	395	9	267	440	37	281	427	41	231	416	44	282
4	395	9	264	440	37	280	429	42	231	418	46	282
5	395	9	264	439	38	281	428	42	232	417	47	282
6	395	10	262	441	38	281	430	40	232	419	48	282
7	396	10	264	442	37	281	429	40	232	418	50	281
8	395	10	261	442	37	280	424	42	233	418	49	282
9	395	10	262	440	37	280	419	41	232	416	47	283
10	394	10	265	437	39	281	415	44	233	416	46	284
11	393	9	264	435	40	281	411	44	233	416	45	284
12	392	9	263	432	41	281	411	46	232	416	45	284
13	392	9	263	431	42	281	409	46	232	413	46	284
14	391	8	262	429	43	281	408	46	232	414	44	284
15	390	8	263	429	42	281	408	45	233	412	44	284
16	390	8	265	426	50	283	408	45	232	413	43	284
17	390	8	267	429	45	282	408	44	233	413	42	284
18	390	8	267	429	44	281	408	46	233	414	44	283
19	390	8	268	431	42	281	411	46	232	411	45	283
20	391	8	267	433	42	281	414	46	232	413	45	283
21	392	8	269	436	41	281	419	46	232	413	45	283
22	392	9	269	438	40	281	424	44	232	414	44	283
23	393	9	272	439	39	281	427	42	232	416	44	283
24	393	9	272	440	39	281	429	42	232	414	46	283
Average	393	9	266	436	40	281	419	44	232	415	46	283

*Standard deviation

+Number of data

[#]Anmyeon-do, Korea Global Atmosphere Watch Center

자료를 구분하여 시간별 변화를 볼 필요성이 있다. 특히 계절에 따른 일출과 일몰시간의 차이가 있으므로 실제 대기 중 CO₂ 농도의 일변화 경향도 다를 것이다. 따라서 이러한 특성을 구명하기 위하여 2006년 6월 19일부터 2007년 6월 25일까지 3지점에서 관측된 대기 중 CO₂ 농도자료를 계절별로 분류하여 시간에 따른 변화경향을 비교하였다(Fig. 4).

여름철(6-8월)에는 서울이 아침 7시에 428 ppm, 수원이 아침 6시에 411 ppm, 이천이 새벽 4시에 412 ppm으로 서울>이천>수원 순으로 고농도를 나타냈으며, 저농도는 서울이 18시에 396 ppm, 수원이 15시에 366 ppm, 이천이 19시에 395 ppm으로 저농도도 서울>이천>수원으로 나타났다.

가을철(9-11월)에는 서울이 야간 11시에 444 ppm, 수원이 아침 7시에 431 ppm, 이천이 오전 10시에 427 ppm으로 서울>수원>이천 순으로 고농도를 나타냈으며, 서울이 오후 2시에 428 ppm, 수원이 오후 3시에 409 ppm, 이천이 오후 2시에 388 ppm으로 역시 서울>수원>이천 순으로 저농도가 나타났다.

겨울철(12-2월)에는 서울이 오전 11시에 466 ppm, 수원이 저녁 9시에 456 ppm, 이천이 아침 8시에 439 ppm으로 서울>수원>이천 순으로 가장 높은 농도를 보였으며, 가장 낮은 농도는 서울과 수원 새벽 5시에 460 ppm과 447 ppm, 이천이 새벽 1시에 411 ppm으로 서울>수원>이천의 순으로 나타났다.

봄철(3-5월)에는 서울과 수원 새벽 4시에 477

Fig. 3. Day- and night-time mean concentration of CO₂ at three experimental and one reference sites from the 19th of June 2006 to the 25th of June 2007.

ppm과 442 ppm, 이천이 새벽 2시에 425 ppm으로 서울>수원>이천 순으로 최대 농도를 나타냈으며, 서울과 이천이 저녁 10시에 446 ppm과 391 ppm, 수원이 오후 12시에 387 ppm으로 최소 농도는 서울>이천>수원 순으로 나타났다.

또한 최고 농도와 최저 농도값의 차이를 보면, 여름철에 서울이 33 ppm, 수원이 45 ppm, 이천이 17 ppm으로 나타났고, 겨울철에는 서울이 6 ppm, 수원이 9 ppm, 이천이 28 ppm으로 여름철에 비해 일중 변동폭이 적음을 알 수 있다. 즉 대기 중 CO₂ 농도는 여름철에는 식생에 의한 영향이 매우 크게 작용하므로 주야간 변동폭이 크지만 겨울철에는 주야간 CO₂의 흡원(sink)과 발원(source)의 크기가 거의 일정하다고 판단할 수 있다. 그러나 Fig. 4를 보면 이천의 경우 겨울과 봄의 일변화 경향이 매우 불규칙한데, 이것은 이천 실험지가 식생영향 외에 인위적인 영향을 많이 받고 있는 것으로 볼 수 있다. 또한 서울과 수원의 경우도 봄의 일변화가 매우 불규칙하면서 여름철의 일변화와 비슷한 경향을 보였는데, 이것은 관측일이 5월 자료만으로 봄철을 대표했기 때문이며, 특히 수원의 경우 실험지 주변 일대의 잔디밭 및 논과 밭의 식생이 급성장하였는데, 이와 같이 급격한 외부환경변화가 주원인으로 작용했을 것으로 추정된다.

Fig. 4. Seasonal mean CO₂ concentration in summer (A), fall (B), winter (C), and spring (D) at three experimental and one reference sites from the 19th of June 2006 to the 25th of June 2007.

Fig. 5. Hourly CO₂ concentration along with wind direction in July (left) and December (right) at three experimental and one reference sites.

IV. 결 론

배경대기관측소 안면도의 CO₂ 농도 377 ppm을 기준으로 볼 때 대기 중 CO₂ 농도가 서울이 14%, 수원이 10%, 이천이 9%가 더 높은 것으로 나타났으나 메릴랜드주의 볼티모어시의 경우처럼(Ziska *et al.*, 2004) 시골 농장(control site)보다 21%까지 큰 차이로 대기 중 CO₂ 농도를 보이지 않았다. 또한 볼티모어시의 근교와 시골 농장과의 차이는 4%인 반면 수원과 이천의 차이는 1%로 근교와 전원간 차이가 크지 않았다. 수원과 이천이 큰 차이를 보이지 않은 것은 이천이 수원에서 42 km나 떨어져 있지만, 이천시 중심지에서 멀지 않은 기상관측소에 실험지가 있어 주야간 인간활동에 의한 인위적인 영향을 받았을 것으로 판단된다.

IPCC CO₂ BAU(Business As Usual) Scenario에 의하면 2030-2040년에 450 ppm으로 증가하여 2040-2050년에 대기 중 CO₂ 농도가 자연수준의 2배인 550 ppm에 달할 것이라고 예상하였는데, 서울에서 관측된 439 ppm은 BAU Scenario(IPCC, 2007)의 2030-2040년 CO₂ 농도 450 ppm에 대해 98%에 도달하였으므로 우리나라의 도시-전원(서울-이천)간 CO₂ 농도는 미래 기후시나리오에서 20-30년 후의 모습이라고 볼 수 있을 것이다. 그리고 50년 후의 대기 중 CO₂ 농도 550 ppm을 기준으로 볼 때 서울의 대기 중 CO₂ 농도는 이미 80%에 도달하였고, 이천은 75%에 도달한 것

으로 추정할 수 있다. 따라서 우리나라의 도시-전원간 CO₂ 농도차이는 IPCC 중단기 기후변화 시나리오에 상응하는 차이가 있는 것으로 판단된다.

또한 3지점에서 모두 뚜렷하지는 않지만 대기 중 CO₂ 농도가 여름철과 가을철에 비교적 저농도를 보이는 것은 식물의 광합성작용에 의한 활동이 많기 때문인 것으로 생각되며, 특히 여름철의 야간 및 새벽에 식물의 호흡작용이 강하게 나타나므로 고농도의 CO₂가 많이 분포하였으며 이와 같은 특성은 관측지점의 식생분포 및 빈도뿐 아니라 토지이용 상태와 같은 주변의 인위적인 환경에 따라 크게 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 겨울철에는 화석연료의 사용으로 인하여 CO₂ 발생량이 증가한 것으로 추정되며 배경대기관측소와는 다르게 도시 내에 위치한 관측지점에서는 이러한 화석연료 및 인간활동 등 인위적인 영향을 직접적으로 받았을 것으로 추정된다.

적 요

본 연구에서는 서울 도심과 전원 지역간 CO₂ 농도 차이가 IPCC 중단기 기후변화 시나리오에 상응하는 차이가 있는지를 확인하기 위해 수도권의 도시기후를 IPCC 기후변화 시나리오를 재현한 “천연실험실”로 활용하고자 서울(도심), 수원(부도심), 이천(전원), 3지역에서 2006년 6월 19일부터 2007년 6월 25일(2007년 3월 3일-5월 22일까지 결측)까지 CO₂ 농도를 관측하

였으며 이 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 3지점의 연 평균 대기 중 CO₂ 농도의 구배가 서울(439 ppm)>수원(419 ppm)>이천(416 ppm)으로 나타났다.

2) 계절에 따른 CO₂ 농도의 일변화 변동폭은 여름철에 크게 나타난 반면 겨울철에는 그 폭이 완만해졌다.

3) 계절에 따른 시간대별 대기 중 CO₂ 농도는 여름철에는 대체로 새벽 5시에, 가을철에는 오전 8시에, 겨울철에는 오전 9시에, 봄철에는 새벽 5시에 고농도가 나타남으로써 고농도가 나타나는 시간대가 가을철부터 지연되었다가 다시 봄철에는 일출 전후로 옮겨갔다.

4) 시간대별 대기 중 CO₂ 농도는 일출 직후에 442 ppm(서울: 0700 LST, Local Standard Time)으로 최대 농도를 보였으며, 최소 CO₂ 농도는 광합성이 활발한 오후 시간대로 407 ppm(수원: 1500 LST)으로 나타났다.

5) 배경대기관측소 안면도에서 산정한 배경 CO₂ 연평균 농도 377 ppm에 대해 서울은 14%, 수원은 10%, 이천은 9% 높았으며, IPCC BAU Scenario의 2030-2040년 대기 중 CO₂ 농도인 450 ppm에 대해 서울은 이미 98%에 도달하였고, 2040-2050년의 550 ppm에 대해서는 80%에 도달하여 우리나라의 도시-전원(서울-이천)간 CO₂ 농도차이는 IPCC BAU Scenario의 20-30년 후의 기후변화 시나리오에 상응하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2007년 기상지진기술개발사업(CATER 2006-4301) 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ainsworth, E. A., and S. P. Long, 2005: What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE): A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* **165**, 351-372.
- Conway, T. J., P. Tans, L. S. Waterman, K. W. Thoning, K. A. Masarie, and R. H. Gammon, 1988: Atmospheric carbon dioxide measurements in the remote global troposphere, 1981-1984. *Tellus* **40B**, 81-115.
- Cho, H. M., M. K. Park, J. C. Nam, D. H. Min, K. R. Kim, B. H. Song, B. S. Kim, S. K. Kim, and Y. S. Chong, 1995: Trends of background concentration of atmospheric carbon dioxide in Korea. *Journal of the Korean Meteorological Society* **31**, 301-312. (in Korean with English Abstract)
- Choi, J. Y., U. Chung, and J. I. Yun, 2003: Urban-effect correction to improve accuracy of spatially interpolated temperature estimates in Korea. *Journal of Applied Meteorology* **42**(12), 1711-1719.
- Chung, Y. S., and P. Tans, 2000: Monitoring greenhouse gases at Tae-Ahn Peninsula, Korea. *Journal of the Korean Meteorological Society* **36**, 25-34.
- Chung, U., J. Y. Choi, and J. I. Yun, 2004: Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951-1980 and 1971-2000 in Korea. *Climatic Change* **66**, 127-136.
- Gregg, J. W., C. G. Jones, and T. E. Dawson, 2003: Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York city. *Nature* **424**, 183-187.
- Cunnold, D. M., P. J. Fraser, R. F. Weiss, R. G. Prinn, P. G. Simmonds, B. R. Miller, F. N. Alyea, and A. J. Crawford, 1994: Global trends and annual releases of CCl₃F and CCl₂F₂ estimated from ALE/GAGE and other measurements from July 1978 to June 1991. *Journal of Geophysical Research* **99**, 1107-1126.
- Idso, K. E., J. K. Hooper, S. B. Idso, G. W. Wall, and B. A. Kimball, 2001: Atmospheric CO₂ enrichment influences the synthesis and mobilization of putative vacuolar storage proteins in sour orange tree leaves. *Environmental and Experimental Botany* **48**, 199-211.
- Idso, S. B., B. A. Kimball, P. E. Shaw, W. Widmer, J. T. Vanderslice, D. J. Higgs, A. Montanari, and W. D. Clark, 2002: The effect of elevated atmospheric CO₂ on the vitamin C concentration of (sour) orange juice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **90**, 1-7.
- IPCC, 2007: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, CD-ROM.
- Kimball, B. A., K. Kobayashi, and M. Bindi, 2002: Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in Agronomy* **77**, 293-368.
- Marland, G., T. Boden, A. Brukert, J. Andres, and J. Olivier, 1997: CO₂ from fossil fuel burning updates on the magnitude distribution and uncertainty of emissions estimates. In *Fifth International Carbon Dioxide Conference: External Abstracts*.
- Park, K. J., J. C. Choi, B. C. Choi, and H. S. Chung, 2005: Variation of background-atmospheric concentration of carbon dioxide (CO₂) in Korea. *Journal of the Korean Meteorological Society* **41**, 955-965.
- WMO, 1978: International observation handbook for measurement of background atmospheric pollution. No. 491.
- Ziska, L. H., J. A. Bunce, and E. W. Goins, 2004: Characterization of an urban-rural CO₂/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia* **139**, 454-458.