

제주도 고산지역 CO₂ 농도의 단기 변동에 영향을 미치는 요인 분석

Influencing Factors for Short-term Variations of Carbon Dioxide Concentration at the Gosan Site in Jeju, Korea

김승연 · 이상덕* · 김덕래 · 이재범 · 송창근 · 최광호¹⁾ · 한진석
국립환경과학원 기후대기연구부, ¹⁾남서울대학교 교양과학부
(2014년 5월 21일 접수, 2014년 8월 14일 수정, 2014년 9월 17일 채택)

Seung-Yeon Kim, Sang-Deok Lee*, Deok-Rae Kim, Jae-Bum Lee,
Chang-Keun Song, Kwang-Ho Choi¹⁾ and Jin-Seok Han
Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research
¹⁾*Department of General Education, NamSeoul University*
(Received 21 May 2014, revised 14 August 2014, accepted 17 September 2014)

Abstract

This study examined the short-term variability of CO₂ concentrations measured at the Gosan site (33° 17'N, 126° 10'E) in Jeju, Korea for the last 9 years from 2002 to 2010. The weekly distribution shows higher CO₂ concentrations during weekends than weekdays which implies the impact of local emissions because Jeju Island is one of the top tourist attraction in Korea. In diurnal variation, CO₂ concentration reached the maximum at 6 am and the minimum at 1 pm. The high CO₂ concentrations were mostly associated with lower wind speed (below 4 m/s) and easterlies, which was typical of summer night. In other seasons, however, the high concentrations were encountered under strong westerlies (8~16 m/s), which implies the influence of Chinese outflows. CO₂ concentrations were found to be highly correlated with meteorological parameters including wind speed, temperature, humidity, and solar radiation except for winter.

Key words : Gosan, CO₂, Short-term variation, Meteorological parameters

1. 서 론

온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, CFCs)는 양의 복사강제
력으로 작용하여 지구온난화에 기여하고 있으며, 산

업화시대 이후의 증가는 지난 만년 동안 가장 높
은 추세를 보이고 있다(IPCC, 2007). 특히 인간 활동
에 의해 주로 배출되는 이산화탄소(이하 CO₂)는 산
업화시대 이후 대기 중에 약 41% 정도 증가하였고,
지구온난화에 대한 기여도는 64% (최근 5년간은
82%) 수준으로, 메탄(18%), 염화불화탄소(12%), 아
산화질소(6%)보다 매우 높은 것으로 보고되고 있다

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7310, E-mail : deogielee@korea.kr

(WDCGG, 2013).

대기 중 CO_2 농도는 경년, 계절 변동(장기 변동)부터 종관, 일 변동(단기 변동)에 이르기까지 다양하게 변화한다. 경년 변동은 주로 전지구 플렉스의 변동으로부터 기인하며, 계절 변동은 흡수/배출원의 변화를 반영한다. 단기 변동은 기상과 지표 플렉스 간의 상호작용에 의해 발생하며 (Parazoo *et al.*, 2008), 일종의 noise로 볼 수도 있지만 지역의 지표 CO_2 플렉스, 수직혼합의 강도, 종관 기상 시스템에 의한 대기 중 수송에 대한 좋은 지시자가 될 수도 있다 (Shirai *et al.*, 2012).

CO_2 의 단기 변동을 이해하기 위해서는 기상인자와 연계하여 해석하는 것이 중요하다 (Song *et al.*, 2000). 지금까지의 연구에 의하면 CO_2 농도는 지역에 따라 기상인자와 밀접한 관련이 있으며, 종관장이 CO_2 의 분포 및 변동에 중요한 역할을 하고 있다는 것을 밝혀냈다 (García *et al.*, 2010, 2008; Pérez *et al.*, 2009; Parazoo *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2007). 우리나라에서도 양수리 생태단지 (Rhee *et al.*, 2007)와 서울 관악산 (Ghosh *et al.*, 2010), 전남 무안 (Song *et al.*, 2000; Jeon and Kim, 1997) 등에서 측정된 CO_2 농도를 이용하여 기상인자와의 상관성에 대해 연구한 바 있으나, 제주 고산에서는 풍향과의 상관성에 대해서만 한정적으로 이루어졌다 (Ju *et al.*, 2007a).

또한, 연속적으로 측정된 CO_2 농도 자료는 그 지역을 대표하는 배경대기를 선정하기 위해, 관측지점의 위치 및 환경에 따라 다양한 필터링 방법을 사용하고 있다. Zhou *et al.* (2003)는 배경대기 지역에서 쓰이는 전형적인 CO_2 자료 선정 방법 (e.g. 통계적인 방법)은 일정한 풍향을 가지는 해양 지역 및 극 지역에 적합한 방법으로, 기상인자 · 지형 · 환경조건에 영향을 받는 지역에서는 그 지역에 맞는 자료 선정 방법이 필요하다고 언급하였다. Kim and Choi (2001)도 연속관측 자료가 배경대기 관측 자료로써 대표성을 갖기 위해서는 청정 지역에 위치한다 할지라도 풍향의 변화에 따라 주변 지역의 영향을 받기 때문에 최대한 배제하여야 하고, 또한 적용되는 처리 방식에 따라 CO_2 농도가 큰 차이를 나타낼 수 있으며, CO_2 농도는 풍계에 따라 주변지역의 CO_2 발생원이 큰 영향을 미친다고 지적한 바 있다. 제주도 고산은 한반도의 영향이 적은 배경대기 지역에 위치하고 있으나, 제주 지역의 국지적인 영향 및 중국으로부터의

장거리 이동 영향을 받고 있으므로 (Kim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2008) 이들의 영향을 고려한 적절한 자료 선정 방법이 필요하며, 그러기 위해서는 기상인자에 따른 CO_2 농도 경향 파악이 중요하다.

그러므로 본 연구에서는 환경부 지구대기측정소 (고산)에서 '02~'10년까지 약 9년 동안 연속적으로 관측한 대기 중 CO_2 농도 자료를 바탕으로, 대기 중 CO_2 농도 특성을 파악하기 위해 시계열적 분포 특성을 살펴보았으며, 단기 변동에 영향을 미치는 기상인자에 대해 분석함으로써, 적절한 배경대기 자료 선정 및 장거리 이동 연구에 대한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 측정 지점

환경부에서는 한반도 배경대기질 수준을 분석하기 위하여 국내의 국지적인 오염원에 의한 영향이 적은 청정지역인 제주도 고산에 지구대기측정소를 설치하여, 2002년부터 2011년 5월까지 CO_2 를 비롯한 6종의 온실가스를 지속적으로 측정하였다 (Kim *et al.*, 2011; Ju *et al.*, 2007b). 측정지점은 제주도 북제주군 한경면 고산리 서쪽 ($33^\circ 17'N$, $126^\circ 10'E$)에 위치하며 (그림 1), 해발고도는 72 m이고, 지리적 특징은 남서쪽은 바다로 둘러싸여 있으며 북동쪽은 제주시, 서귀포시 등 주거지역이 위치해 있다. 또한, 동아시아 지역으로 살펴봤을 때, 한반도, 중국 대륙, 일본의 경계지역에 위치

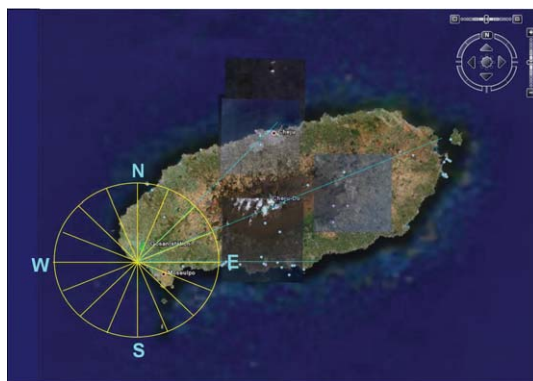


Fig. 1. Status of global climate change monitoring station at Gosan, Jeju.

하고 있기 때문에, 대기오염물질의 장거리 이동을 연구하기 적합한 곳으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2008). 따라서 많은 국제공동연구(PEM-WEST A and B, Ace-Asia, ABC)가 제주도 고산에서 이뤄졌으며(Nakajima *et al.*, 2007; Huebert *et al.*, 2003; Hoell *et al.*, 1996, 1997), 현재도 계속 많은 연구기관에서 온실가스 및 여러 대기오염물질들을 측정 중에 있다.

2.2 측정 방법 및 자료

대기 중 시료 채취는 측정소 건물 옆에 설치된 지상으로부터 약 10 m 기상탑 상단에 설치된 대기 시료의 채취통을 통해 이루어지며, 외부 공기를 흡입펌프를 이용하여 내부로 유도한다. 시료 채취 입구는 원통형으로 열린 부분이 아래로 향하게 하였고, 필터를 통해 입자나 빗물이 침투하지 않도록 조치하였다. 1차 여과를 통해 유입된 시료는 제습기의 cold trap을 통해 1차적으로 대부분의 수분을 제거하게 되고, 2차 여과장치 및 cooling system을 거친다. CO₂ 농도 분석에 사용되는 비분산적외분석기(Non-dispersive InfraRed analyzer; NDIR, Ultramat-6)는 1일 1회 측정 시료보다 낮은 농도와 높은 농도의 WMO 표준가스를 이용해 두 점 교정을 시행하여 보정한 후, 30초 주기의 CO₂ 농도 자료를 연속적으로 측정하게 된다. 본 연구에서는 측정 장비의 운영상 이상 자료 및 주변 환경의 급격한 변화로 인해 발생하는 오차를 줄이기 위해 평균 농도로부터 $\pm 3\sigma$ 범위를 벗어나는 값들을 outlier로 간주하고 분석에서 제외하였다. 또한, 매시간 평균농도 계산 시 30초 원시자료가 60개 미만일 경우도 자료에서 제거하였다. 상기 과정으로 선별된 자료를 이용해 시간평균, 일평균, 월평균 농도 자료를 산출하였으며, '02~'10년 동안의 약 9년 자료를 가지고 분석하였다. 기상 자료는 지구대기측정소 인근에 위치한 기상청 제주도 고산 기상관측소에서 CO₂ 농도 자료와 동 시간에 관측한 풍향, 풍속, 기온, 습도, 강수, 해면기압, 일사량에 대한 시간 자료를 이용하였다.

2.3 자료 분석

본 연구에서는 단기 변동을 중점적으로 분석하였으나, 한반도 배경대기 중 CO₂에 대한 전체적인 농도 분포 경향을 살펴보고자, 시계열 분석 및 장기 변동(계절별, 월별) 분석을 우선적으로 수행하였다. 단기 변동을 살펴보기 위해서는 주중/주말을 나누어

분석하였고, 하루 중 시간별 농도 분포를 계절별로 분석하였다.

대기 중 농도 변화에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 요인 중에서 발생원을 제외하고 가장 큰 영향을 주는 요소로는 기상인자로 알려져 있으며(Kim *et al.*, 2007; Park *et al.*, 1991), 이에 본 연구에서는 대기 중 CO₂ 농도와 기상인자(풍향, 풍속, 기온, 습도, 강수, 해면기압, 일사량)와의 관련성을 조사하였다. 우선, 대기 오염도 해석에 가장 중요한 기상인자인 풍향, 풍속과의 관계를 살펴보았다. 풍향은 22.5° 간격의 방위별 분석, 풍속은 2 m/s 간격의 구간별 분석을 통해 CO₂ 농도와의 연관성을 분석하였다. 그리고 CO₂ 일 변동에 영향을 미치는 기상인자들에 대해 살펴보고자 Pearson 상관분석을 수행하였으며, 상관성이 크게 나타난 기상인자들과의 일 변동과 비교·분석하였다. 상관성 분석이 무의미한 풍향에 대해서는 제주 지역의 영향을 받는 풍향(NNE-NE-ENE-E-ESE)은 육풍, 육풍을 제외한 나머지 풍향은 해풍으로 나누어 일 변동을 살펴보았다.

3. 결 과

3.1 CO₂ 농도 분포 특성

고산 지역의 CO₂ 농도 경향을 살펴보고자 단기 변동(주중/주말, 일)뿐만 아니라 장기 변동(계절, 월)에 대해서도 살펴보았다. 그림 2는 '02~'10년 동안 CO₂ 농도의 시간평균 자료에 대한 확률밀도함수 및 시계열 분포이다. 고산의 CO₂ 농도는 주로 350~430 ppm 사이에 정규분포를 보이고 있었고, 평균값과 중위수는 각각 390.7 ± 10.5 ppm, 391.4 ppm, 최빈값은 395.0 ppm(N=72,188)이다. CO₂ 농도는 여름에 낮아지고 겨울에 높아지는 계절 변동을 보이고 있으며, 계속해서 증가하는 추세를 보이고 있다.

그림 3은 이 기간 동안의 시간평균 CO₂ 농도 자료를 이용하여 계절별, 월별 시계열 변화를 박스 그래프로 나타냈으며, 박스 그래프의 아래로부터 CO₂ 농도의 5-, 10-, 25-, median, 75-, 90-, 95-percentile, 점선은 평균값이다. 평균 계절 변동을 살펴보면, 봄에 가장 높은 농도를 보이고, 여름에 낮아졌다가 다시 가을부터 농도가 높아지는 경향을 보이고 있다. 각 계절별 평균 농도는 393.5 ppm(봄), 388.1 ppm(여름),

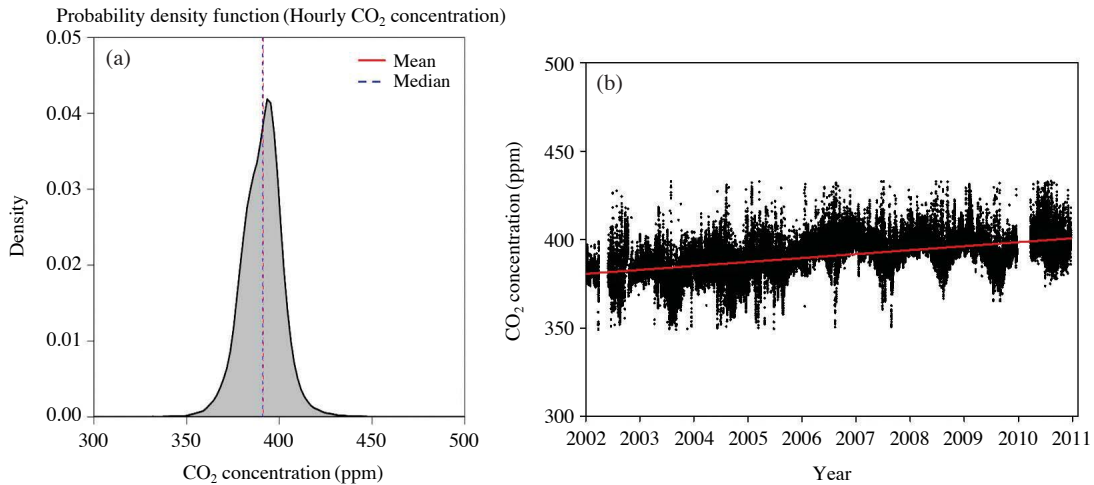


Fig. 2. (a) Probability density function and (b) time series of hourly mean CO₂ concentration at Gosan.

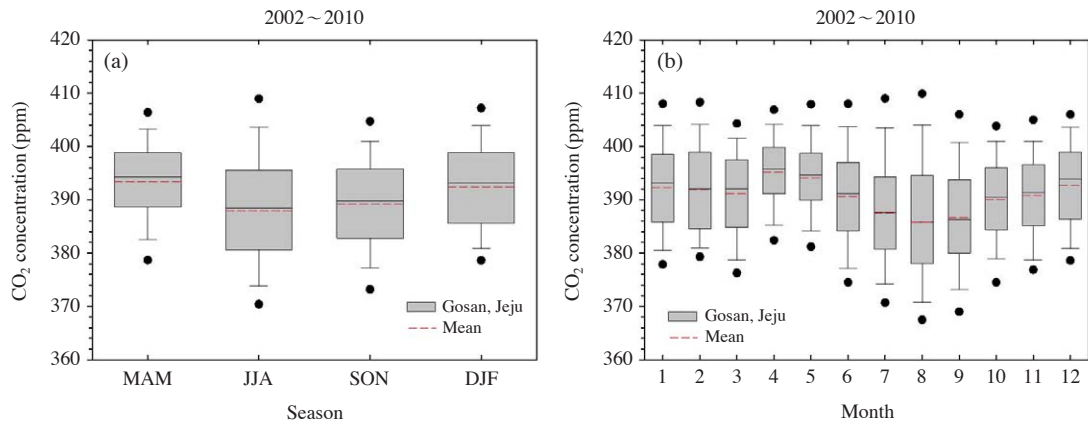


Fig. 3. A box diagram for (a) seasonal cycle and (b) monthly variations of CO₂ concentrations at Gosan for the period 2002~2010.

389.0 ppm (가을), 392.3 ppm (겨울)이며, 최고(봄)와 최저(여름) 농도 차이가 5.4 ppm으로 나타났다. 월 변동을 살펴보면, 4월에 395.4 ppm으로 가장 높은 농도를 보인 반면 8월에 385.9 ppm으로 가장 낮은 농도를 보이고 있으며, 그 차이는 9.5 ppm이다. 이러한 변동은 흡수/배출원의 계절적 변동을 반영하는 것으로, 겨울과 봄에 고농도를 보인 것은 난방 및 산업시설 등에서 화석 연료 사용으로 인한 것이며, 여름과 가을에 저농도를 보이는 것은 식물의 광합성 작용에 의한 활동이 많기 때문인 것으로 알려져 있다(Ju *et al.*,

2007b; KMA, 2006; Chung and Tans, 2000). 특히 여름철의 경우, 큰 표준편차 값에서 알 수 있듯이 다른 계절에 비해 상대적으로 농도 변화가 크게 나타났는데, 이에 대해서는 3.2와 3.3에서 분석하였다.

그림 4a는 주중/주말에 따른 CO₂ 농도 변동 결과로, 주중평균은 390.3 ± 0.4 ppm, 주말평균은 391.6 ± 0.5 ppm으로 주중보다 주말의 CO₂ 농도가 더 높게 나타났다. 주중/주말 변동 경향은 자연적인 요인보다는 인위적인 요인으로 인해 발생하는데 (Cerveny and Coakley, 2002), 제주도가 관광 지역이기 때문에 주

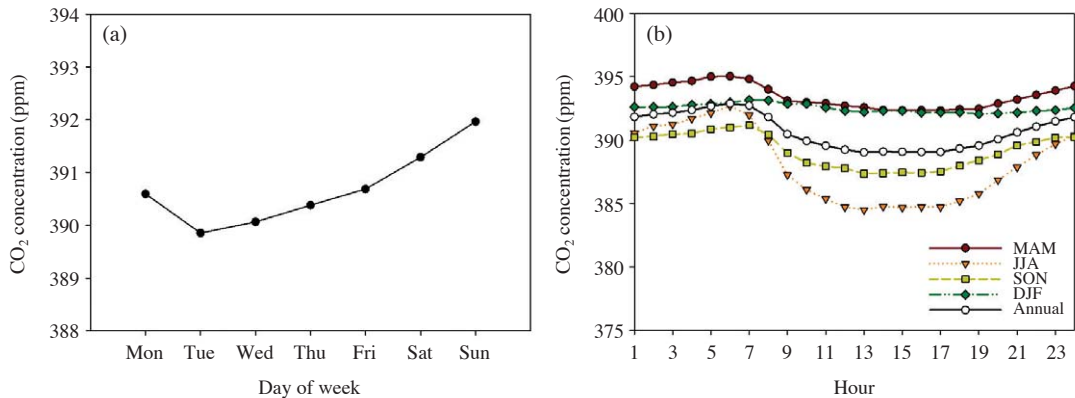


Fig. 4. (a) Weekly and (b) diurnal variations of CO₂ concentrations at Gosan for the period 2002~2010.

중보다 주말에 더 많은 사람들이 방문하고 차량들이 이동하기 때문인 것으로 보인다. 이러한 결과는 지역적 배출량의 변화가 CO₂ 농도의 단기 변동에 영향을 주며, 고산 측정소가 제주도의 국지적인 영향을 받고 있음을 시사한다.

그림 4b는 연평균 및 계절별 일 변동 결과이다. 연평균 일 변동의 경우, 뚜렷한 주저야고의 경향을 보이고 있으며, 가장 낮은 농도가 나타나는 시간은 13시(389.0 ppm)이며, 가장 높은 농도가 나타나는 시간은 6시(392.9 ppm)로 변동폭은 3.9 ppm이다. 7시부터 점차적으로 농도가 감소하기 시작하여, 낮에 가장 낮은 농도값이 나타나며, 18시부터 점차적으로 농도가 증가한다. 최고농도가 나타나는 시각은 봄, 여름철은 6시, 가을, 겨울철은 7시로 나타났다. 또한, 계절별 변동폭을 살펴본 결과, 여름(8.2 ppm) > 가을(3.9 ppm) > 봄(2.7 ppm) > 겨울(1.1 ppm)의 순으로 나타났다. 전라도 무안 지역에서와 같이 일일 내내 비교적 고농도가 지속되거나(겨울, 봄), 상대적으로 낮은 농도가 24시간 동안 지속되는 경향(여름, 가을철)으로 뚜렷하게 구분되었다(Song *et al.*, 2000). 계절별 일 변동에 영향을 미치는 요인에 대해서는 3.3에서 자세히 분석하였다.

3.2 풍향과 풍속별 CO₂ 농도 분석

대기오염도 해석에 가장 중요한 기상인자인 풍향, 풍속에 대해 구간별로 나누어 분석하였다. 풍향을 통해서는 주변 오염원에서의 영향을 알 수 있으며, 풍속은 대기안정도와 관련이 있다. 풍향을 방위별 구간

을 나누어 분석한 결과에 대해 그림 5a에는 풍향빈도를, 그림 5b에는 풍향에 따른 CO₂ 농도값을 나타내었다. 풍향빈도는 봄, 겨울철에는 북풍계열(N: 17.7%(봄), 25.1%(겨울)), 여름철에는 남풍계열(SSE: 18.4%, SE: 14.1%), 가을철에는 북동풍계열(N: 15.9%, NNE: 15.5%)의 빈도가 높았다. 그러나 농도는 계절에 상관없이 대체로 동풍계열에서 높게 나타났다. 고산 측정소의 동쪽은 제주도의 주거 및 산업지역이 위치해 있는 반면 동쪽을 제외한 다른 쪽은 바다와 접해 있기 때문에(그림 1), 동풍에서 높은 농도가 나타나고 있는 것으로 보인다. 그러나 여름을 제외한 다른 계절에서는 해양과 접해있는 서풍 계열에서도 농도가 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

그림 6a와 6b는 각각 풍속 구간에 따른 빈도 및 CO₂ 농도값을 나타낸 것이다. 풍속을 2 m/s 간격으로 나누어 구간 분석한 결과, 가장 높은 빈도는 4~6 m/s 구간이었으며, 2~4 m/s, 6~8 m/s, 8~10 m/s 순이었다. 주·야간 빈도 차이는 없었으나, 낮은 풍속은 여름철에 많았던 반면, 10 m/s 이상의 풍속은 겨울철에 많았다. 풍속별 CO₂ 농도는 전반적으로 4 m/s 미만까지는 평균 농도값이 392.6 ppm으로 다소 높게 나타나다가, 4~8 m/s 구간에서는 풍속이 증가할수록 점차 감소하고 있다. 8 m/s 이상에서는 풍속이 증가할수록 CO₂ 농도가 다시 증가하며, 16 m/s 이상의 강풍에서는 다시 감소하고 있다. 낮과 밤을 나누어 살펴보면 6 m/s 미만까지는 밤시간대 더 높은 농도가 나타나고, 특히 2~4 m/s 구간에서 고농도가 두드러졌으며 낮과 밤의 편차가 가장 크게 나타났다(3.3 ppm). 반

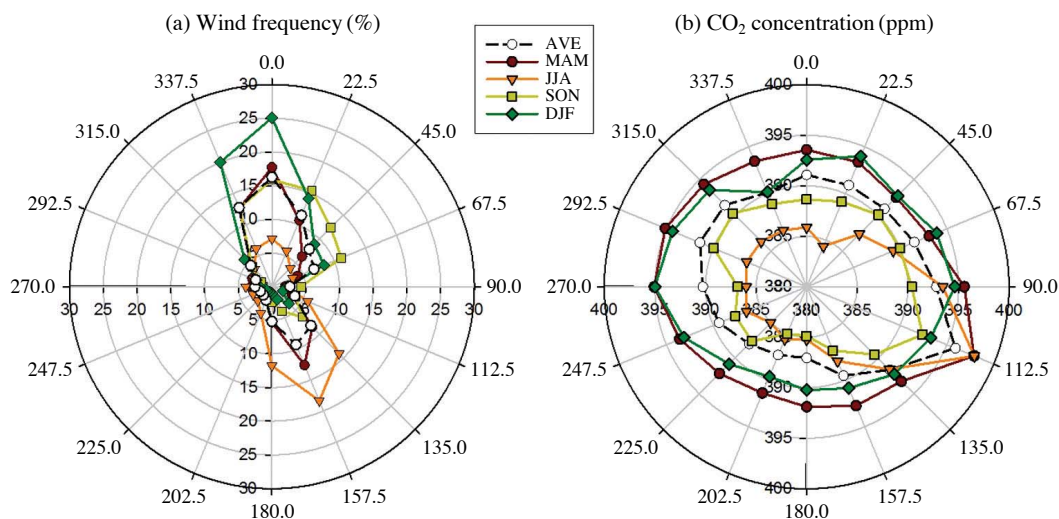


Fig. 5. (a) Wind frequency and (b) CO₂ concentrations segregated by wind direction at Gosan during the period 2002~2010.

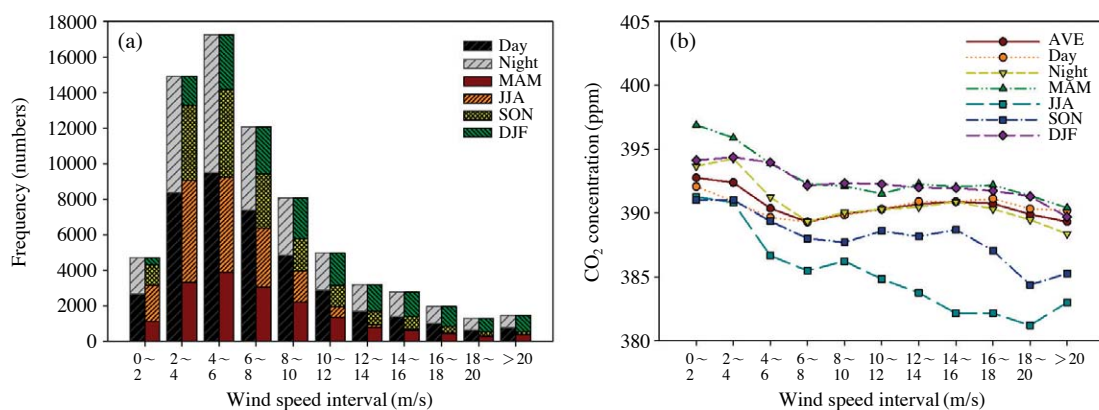


Fig. 6. (a) Frequency distribution and (b) CO₂ concentrations segregated by wind speed.

면, 6 m/s 이상부터는 낮과 밤의 차이가 거의 나타나지 않았다. 계절별로 살펴보면 특히 여름철은 4 m/s 미만 고농도가 4 m/s 이상 농도에 비해 두드러지게 높게 나타났으며, 4 m/s 미만 낮시간 농도 평균값은 389.6 ppm인 반면, 밤 시간은 393.1 ppm으로 주·야간 변동폭이 다른 계절에 비해 크게 나타났다.

이와 같은 결과를 통해, 동풍 계열의 바람이 불 때와 풍속이 4 m/s 미만일 때 CO₂ 농도가 높게 나타났으며, 이는 제주의 국지 영향이 반영된 것으로 볼 수 있다. 특히 여름철 밤시간대 낮은 풍속으로 인해 대

기가 안정되면서 고농도가 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 제주 고산 지역의 고농도 사례 분석 결과와도 일치한다(Kim *et al.*, 2011). 대체로 낮은 풍속은 대기를 안정화시키므로 국지적 영향을 더 받게 되어 고농도를 유발하며, 높은 풍속은 확산/희석작용을 하므로 농도를 감소시키게 되는 것으로 알려져 있다(García *et al.*, 2010). 따라서 낮은 풍속에서는 대기 정체로 인해 주·야간 모두 고농도가 나타나긴 하나, 낮에는 광합성 작용이 활발히 일어나고 혼합층 고도가 높으므로, 정체된 대기 중 CO₂ 농도가 감소한 것

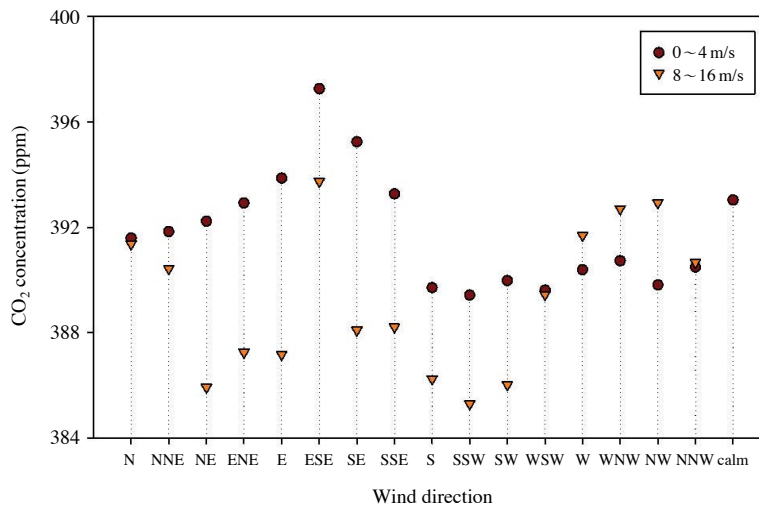


Fig. 7. CO₂ concentrations segregated by wind direction at wind speed of 0~4 m/s and 8~16 m/s, respectively.

Table 1. The result of Pearson correlation analysis between diurnal CO₂ concentrations and meteorological parameters.

	All (N=24)	MAM (N=24)	JJA (N=24)	SON (N=24)	DJF (N=24)
Wind speed	-0.681*	-0.752*	-0.739*	-0.720*	-0.124
Temperature	-0.909*	-0.873*	-0.934*	-0.929*	-0.493
Humidity	0.891*	0.798*	0.909*	0.930*	0.525*
Precipitation	0.582*	0.366	0.390	0.496	0.596
Sea level pressure	0.110	0.080	0.068	0.340	0.060
Solar radiation	-0.708*	-0.623*	-0.755*	-0.746*	-0.175

*Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

으로 보인다. 그러므로 낮은 풍속에서는 주·야간 농도 차이가 발생한 반면, 높은 풍속에서는 확산·회석 작용으로 대기가 정체되지 않으면서 주·야간 농도 차이가 발생하지 않은 것으로 보인다. 이에 대해서는 연구가 더 필요하다.

또한 고산의 경우 풍속 8 m/s 이상의 다소 강한 불안정한 대기 상태에서도 농도가 높게 나타났는데, 이에 대해 4 m/s 미만과 8~16 m/s 구간 풍속을 기준으로 각각 풍향별 CO₂ 농도를 분석해보았다(그림 7). 4 m/s 미만에서는 제주 내륙 지역에서 바람이 불어올 때(ENE~SSE 구간)와 정온(calm) 상태에서 높은 농도를 보이고 있는 반면, 8~16 m/s 구간에서는 동남동(ESE)에서도 고농도를 보이긴 했지만, 주로 서풍 계열(W~NW 구간)에서 불어올 때 높은 농도를 보이고 있었다. 고산의 서쪽은 인위적인 발생원이 전혀

존재하지 않는 해양 지역이므로, 중국으로부터의 장거리 이동 현상이 영향을 준 것으로 볼 수 있다.

3.3 일 변동에 영향을 미치는 영향인자 분석

표 1은 CO₂ 농도 및 기상인자의 일 변동에 대해 Pearson 상관분석을 실시한 결과이다. 여기서 풍향은 상관분석이 무의미하므로 제외하였다. CO₂ 농도의 일 변동은 풍속, 기온, 일사의 일 변동과 높은 음의 상관성을 보인 반면, 습도와는 양의 상관성을 보였다. 강수는 유의수준 내($p < 0.01$)에 있으나 낮은 상관성을 보였으며, 해면기압에 대해서는 상관성이 나타나지 않았다. 그러나 겨울철은 다른 계절과 달리 습도는 유의수준 내($p < 0.01$)에 있으나 상대적으로 낮은 상관성을 가지고 있었으며, 기온, 풍속, 일사는 유의한 관계를 보이지 않는 것으로 분석되었다. 기온, 습도,

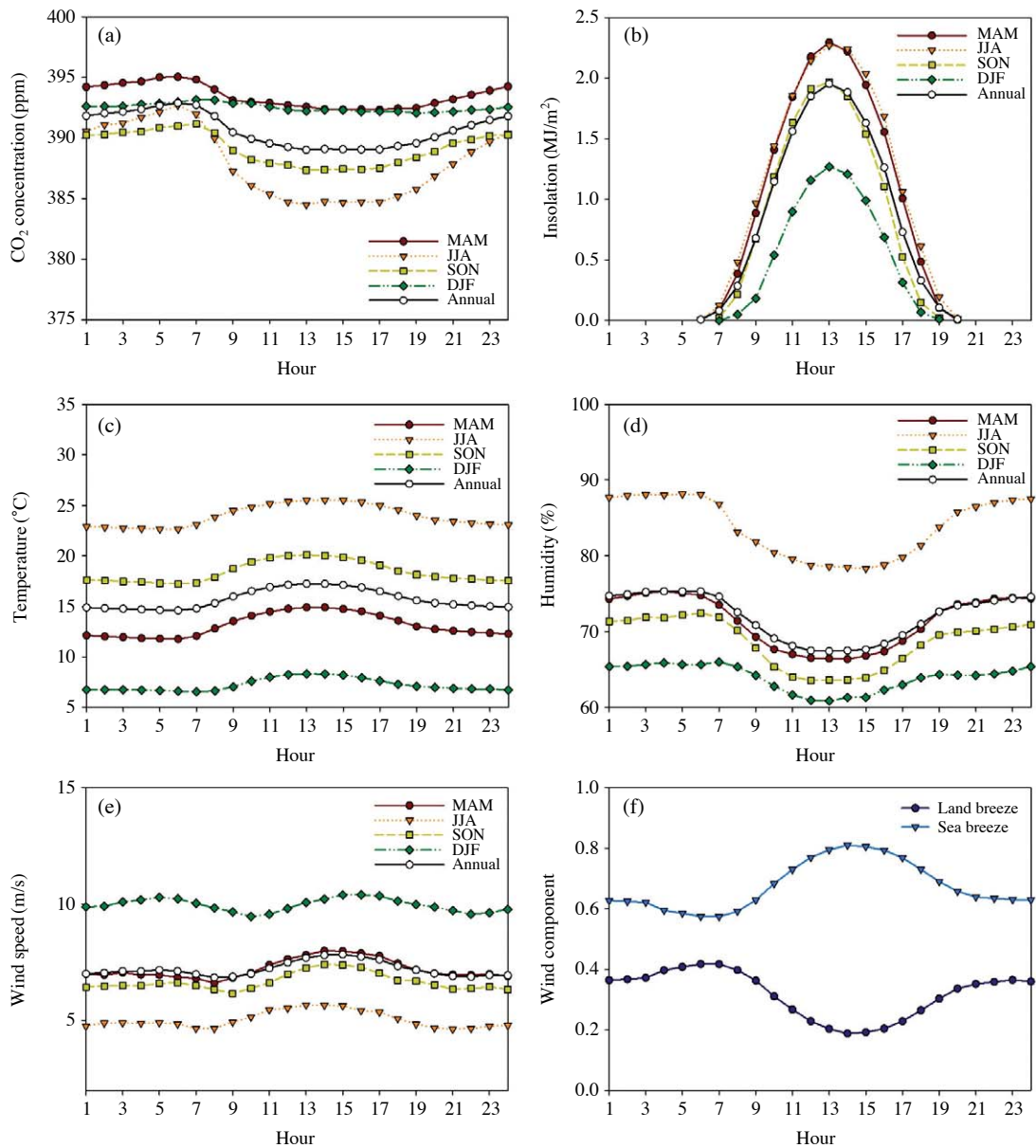


Fig. 8. (a) The diurnal variation of (a) CO₂ concentrations and (b)~(f) meteorological parameters: (b) solar radiation, (c) temperature, (d) humidity, (e) wind speed, and (f) land-sea breeze.

일사는 식생에 의한 광합성 작용을 조절하는 인자이며, 풍속은 앞서 설명한 바와 같이 대기안정도와 관련 있는 인자들이다. 그러므로 겨울철을 제외한 계절에서는 광합성과 대기안정도가 CO₂ 농도의 일 변동에 가장 중요한 인자인 것으로 나타났다.

기상요소의 일 변동을 살펴보면, 일반적으로 낮시간에는 일사량이 증가하면서 기온 상승, 습도 감소, 풍속이 증가한다. 반면, 밤시간에는 일사량이 감소하면서 기온 하강, 습도 증가, 풍속 감소의 현상이 나타난다(그림 8b~e). 그림 8f는 육풍(NNE-NE-ENE-E-

ESE)과 해풍(육풍을 제외한 나머지)으로 구분된 각 바람성분의 일변화이며, y축은 1을 최대로 해풍과 육풍의 비율을 나타낸다. 낮시간대에는 해풍의 비율이 증가하고 있는 반면, 밤에는 해풍의 비율은 감소하고 육풍의 비율이 증가하고 있었다(그림 8f). 계절별로 살펴보면 모든 기상인자들은 계절에 따라 강도 차이가 있지만, 계절에 상관없이 일정한 일 변동성을 보이고 있었다.

이와 같은 기상현상은 CO₂ 농도의 일 변동에 영향을 주는 것으로 보인다(그림 8a). 겨울철을 제외하곤, 대체로 밤시간대 높은 농도가 나타난 반면, 낮의 농도는 낮시간대에 나타났다. 낮시간대에는 일사량이 증가하고, 활발한 광합성 작용이 일어날 수 있도록 적절한 기온과 습도가 유지된다. 또한, 일사로 지면이 가열되고 풍속이 증가하면서 혼합층 고도가 높아지고 대기가 불안정해지며, 육풍보다 상대적으로 깨끗한 해풍의 영향으로 인해 CO₂ 농도가 낮아지게 된다. 반면, 밤시간대에는 일사량 감소로 인한 복사 냉각으로 지면이 차가워지고 풍속이 감소하면서 혼합층 고도는 낮아지고 대기는 안정된다. 또한, 광합성 적정 조건의 감소로 인한 호흡작용의 증가와 해풍에 비해 상대적으로 오염된 육풍의 영향으로 인해 CO₂ 농도가 높아진 것으로 보인다. 이러한 작용은 식생이 많은 여름철에 가장 활발하게 나타나므로 일 변동폭이 가장 크게 나타난 것으로 보이며, 앞서 3.1에서 여름철의 표준편차가 다른 계절보다 크게 나타난 이유이다. 최고 농도가 나타나는 시각은 일출(봄, 여름: 6시, 가을, 겨울: 7시) 직전으로 분석되었다. 일출 직전에 고농도가 나타나는 이유는 야간에 형성되는 역전층의 영향으로 인해 늦은 오후 시간부터 발견되는 고농도치가 새벽 시간대까지 지속적으로 유지되었기 때문이다(Song *et al.*, 2000).

겨울철은 강한 풍속 및 해풍의 영향에도 낮시간대 농도가 밤시간대에 비해 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 다른 계절과 달리 겨울철은 식생이 다른 계절에 비해 적으며, 기온과 습도가 낮고 일사도 충분치 않아 식생에 의한 광합성 작용이 활발히 일어나지 않기 때문이며, 이러한 점이 겨울철 CO₂ 농도와 기상인자에 대한 상관성이 낮게 나타난 이유라고 할 수 있다. 또한, 가을철이 봄보다 일 변동폭이 크게 나타나는데, Suh *et al.* (2005)에 의하면 봄보다 가을철의 식생지수가 더 크게 나타나므로, 가을철이 식생활

동에 의한 CO₂ 흡수/배출이 더 활발할 것으로 사료된다. 또한, Cho *et al.* (2007)에 의하면, 가을철은 봄철보다 고기압의 영향으로 인해 맑은 날이 상대적으로 더 많이 지속되며, 고기압은 낮에는 식생에 의한 광합성 작용을 활발하게 하나, 밤에는 낮은 풍속과 안정화된 대기로 인해 CO₂ 농도를 축적시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이로 인해 가을철의 일 변동폭이 봄철보다 크게 나타난 것으로 보인다.

따라서 CO₂의 일 변동은 기상인자의 영향을 받으며, 계절별로 다르게 나타나는 것은 연구지역 주변 환경에 작용하는 계절별 오염양상(특히 인위적 오염원의 영향), 공기순환, 기상변화(동아시아 지역에 주로 발생하는 몬순의 영향), 식생의 변화 등이 복합적으로 작용하여 나타나기 때문이다(Song *et al.*, 2000; Park *et al.*, 1994; Jhun, 1991).

4. 결 론

본 연구에서는 '02~'10년까지 약 9년 동안 제주도 고산의 지구대기측정소에서 측정한 CO₂ 농도 자료로, 주중/주말, 일 변동과 같은 단기 변동을 중점적으로 분석하였다. 주중/주말 변동을 분석한 결과, 관광지이기 때문에 주중보다 주말의 농도가 더 높게 나타났으며 이는 지역 배출원의 증가가 반영된 것으로 볼 수 있다. 연평균 일 변동은 뚜렷한 주고야저의 현상을 보였으며, 13시(389.0 ppm)에 가장 낮은 농도, 5시(392.9 ppm)에 가장 높은 농도가 나타났다. 계절별 일 변동폭은 여름(8.2 ppm) > 가을(3.9 ppm) > 봄(2.7 ppm) > 겨울(1.1 ppm)의 순으로 나타났으며, 다른 계절과 달리 겨울철에는 낮시간대 높은 농도가 나타났다.

풍향, 풍속별 CO₂ 농도에 대해 구간 분석을 수행한 결과, 대체로 동풍 계열의 바람이 불 때와 풍속이 4m/s 미만일 때 국지 영향으로 인해 CO₂ 농도가 높게 나타났다. 특히 여름철은 전반적으로 농도가 낮은 편이나, 밤시간대에는 낮은 풍속으로 인한 안정된 대기로 인해 고농도가 나타났으며, 이로 인해 다른 계절에 비해 큰 변동폭을 보였다. 또한, 여름을 제외한 다른 계절에서는 풍속이 다소 강한 불안정한 대기 상태 및 서풍계열의 바람에서도 높은 농도가 나타났는데, 풍향에 대한 구간 분석을 통해 장거리 이동 영

향에 의한 것으로 유추할 수 있었다.

일 변동은 풍향, 풍속, 기온, 일사, 습도와 같은 다양한 기상요소와 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 낮시간대에는 일사량 증가로 인한 기온 상승, 풍속 증가로 인한 대기 불안정, 활발한 광합성 작용, 해풍의 영향으로 인해 낮은 농도가 나타난 반면, 밤시간대에는 일사량 감소로 인한 기온 하강, 풍속 감소로 인한 대기 안정, 식물의 호흡 작용, 오염된 육풍의 영향으로 고농도가 나타났다. 반면, 겨울철엔 낮시간에도 높은 농도가 나타났는데, 다른 계절에 비해 식생이 적고 낮은 기온과 적은 일사량에 의해 식생에 의한 광합성 작용이 활발히 일어나지 않기 때문인 것으로 보인다.

이처럼 제주 고산의 CO₂ 단기 변동에는 흡수/배출원의 영향뿐만 아니라 다양한 기상인자들이 작용하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 장거리 이동에 의한 영향도 배제할 수 없는 것으로 나타났다. 앞서 언급하였듯이 기상인자 · 지형 · 환경조건에 영향을 받는 지역에서는 그 지역에 맞는 자료 선정 방법이 필요하다 하고 제시하였으며, 실제로 왈리구안 측정소의 경우에는 풍향과 풍속을 고려하여 국지적 영향 및 장거리 이동의 영향을 배제함으로써 배경대기 자료를 선정하고 있다. 환경부에서는 2012년부터 제주 고산에서 강원 고성으로 지구대기측정소를 이전하여 CO₂를 비롯한 온실가스를 측정하고 있으며, 이외에도 서울 및 부산, 경기도 양평에 관측소를 추가로 설치하여 CO₂ 농도를 측정하고 있다. 그러므로 이들 지역에 적합한 자료 선정 방법이 필요한 실정이다. 따라서 제주 고산뿐만 아니라 한반도 내에 위치한 관측소에서 측정한 온실가스의 배경대기를 선정하기 위해서는 국지적/지역적 영향을 효율적으로 제거하도록 통계적인 방법뿐만 아니라 기상인자를 적용한 자료 선정 방법이 필요할 것으로 판단되며, 본 연구는 그 방법을 선정하기 위한 기초 자료를 제시할 것으로 기대된다.

감사의 글

제주 고산 지구대기측정소의 CO₂ 자료를 제공하여 주신 환경관리공단 대기측정망 관리팀에 감사드립니다.

References

- Cerveny, R.S. and K.J. Coakley (2002) A weekly cycle in atmospheric carbon dioxide, *Geophys. Res. Lett.*, 29(2), doi: 10.1029/2001GL013952.
- Cho, C.-H., J.-S. Kim, and H.-J. Yoo (2007) Atmospheric Carbon Dioxide Variations at Korea GAW Center from 1999 to 2006, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 43(4), 359-365.
- Chung, Y.-S. and P. Tans (2000) Monitoring greenhouse gases at Tae-Ahn Peninsula, Korea, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 36(1), 25-34.
- García, M.A., M.L. Sánchez, and I.A. Pérez (2010) Synoptic weather patterns associated with carbon dioxide levels in Northern Spain, *Sci. Total Environ.*, 408, 3411-3417.
- García, M.A., M.L. Sánchez, I.A. Pérez, and B. de Torre (2008) Continuous carbon dioxide measurements in a rural area in the upper spanish plateau, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 58, 940-946.
- Ghosh, S., K. Jung, E.C. Jeon, and K.-H. Kim (2010) Seasonal and diurnal trend of carbon dioxide in a mountainous site in Seoul, Korea, *Asian J. Atmos. Environ.*, 4(3), 166-176.
- Hoell, J.M., D.D. Davis, S.C. Liu, R.E. Newell, H. Akimoto, R.J. McNeal, and R.J. Bendura (1997) The Pacific exploratory mission-west phase B: February–March, 1994, *J. Geophys. Res.*, 102(23), 28223-28239.
- Hoell, J.M., D.D. Davis, S.C. Liu, R. Newell, M. Shipham, H. Akimoto, R.J. McNeal, R.J. Bendura, and J.W. Drewry (1996) Pacific Exploratory Mission-West A (PEM-WEST A): September–October 1991, *J. Geophys. Res.*, 101(D1), 1641-1653.
- Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima (2003) An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8633.
- IPCC (2007) Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 18 pp.
- Jeon, E.C. and J.S. Kim (1997) The effects of other greenhouse gases and meteorological elements on carbon diox-

- ide, Proceedings of the Fall Meeting of KOSAE, 211-212.
- Jhun, J.-G. (1991) On the characteristics of atmospheric circulations over East Asia associated with the transport of air pollutants, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 27(2), 180-196. (in Korean with English abstract)
- Ju, O.-J., J.-B. Lee, J.-S. Cha, and J.-S. Kim (2007a) Analysis of variation characteristics of greenhouse gases by wind direction at Gosan, Jeju in 2006, Proceedings of the Spring Meeting of KMS, 456-457.
- Ju, O.-J., J.-S. Cha, D.-W. Lee, Y.-M. Kim, J.-Y. Lee, and I.-S. Park (2007b) Analysis of variation characteristics of greenhouse gases in the background atmosphere measured at Gosan, Jeju, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(4), 487-497. (in Korean with English abstract)
- Kim, I., S. Li, and K.-R. Kim (2008) Variations of trace gases concentrations and their relationship with the air mass characteristics at Gosan, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(5), 584-593. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.-S. and J.-C. Choi (2001) Analysis of background CO₂ concentrations at Anmyeon-do using selecting method of world data center for greenhouse gases, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 17(3), 277-288. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.-Y., J.-B. Lee, J.-A. Yu, Y.-D. Hong, and C.-K. Song (2011) Analysis of the characteristics and high concentrations of carbon dioxide measured at the Gosan site in Jeju, Korea in 2007, *Climate Change Research*, 2(1), 1-14. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.-S., C.-M. Lee, K.-Y. Kim, H.-J. Jeon, J.-C. Kim, and T. 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. (in Korean with English abstract)
- KMA (2006) Report of Global Atmosphere Watch 2005, Korea Meteorological Administration, 126 pp. (in Korean)
- Nakajima, T., S.-C. Yoon, V. Ramanathan, G.-Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B.-J. Sohn, S.-W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N.-H. Lin, C.-T. Lee, D. Goto, and N. Schutgens (2007) Overview of the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia, *J. Geophys. Res.*, 112, D24S91.
- Parazoo, N.C., A.S. Denning, S.R. Kawa, K.D. Corbin, R.S. Lokupitiya, and I.T. Baker (2008) Mechanisms for synoptic variations of atmospheric CO₂ in North America, South America and Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7239-7254.
- Park, I.-S., D.-G. Rhee, and I.-G. Kang (1991) The meteorological factors governing SO₂ concentrations during the wintertime in Seoul area, *J. KAPRA*, 7(2), 96-104. (in Korean with English abstract)
- Park, K.-Y., H.-G. Lee, M.-S. Suh, K.-M. Jang, C.-H. Kang, C.-G. Hu, and Y.-J. Kim (1994) Analysis of air pollution concentrations at Cheju baseline measurement station, *J. KAPRA*, 10(4), 252-259. (in Korean with English abstract)
- Pérez, I.A., M.L. Sánchez, M.A. García, and B. de Torre (2009) A classification of CO₂ concentrations based on a binary meteorological six variable system, *Agric. For. Meteorol.*, 149, 1686-1692.
- Rhee, J.-S., J. Iamchaturapatr, S.-H. Lee, and S.-I. Choi (2007) Effect of climatic parameters on variability of CO₂ levels by on-site monitoring, *J. Korea Soc. Environ. Anal.*, 10(1), 37-39. (in Korean with English abstract)
- Shirai, T., T. Machida, H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Niwa, S. Maksyutov, and K. Higuchi (2012) Relative contribution of transport/surface flux to the seasonal vertical synoptic CO₂ variability in the troposphere over Narita, *Tellus*, 64, 19138.
- Song, K.-B., Y.-H. Youn, and K.-H. Kim (2000) Short-term variability of carbon dioxide within and across the Korean Peninsula: Case study during 1995-1997, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 21(5), 623-634. (in Korean with English abstract)
- Suh, M.-S., J.-R. Lee, J.-H. Kang, D.-K. Lee, and M.-H. Ahn (2005) On the relationship between seasonal change of vegetation and climate elements in East Asia, *J. Korean Meteor. Soc.*, 41(4), 557-570. (in Korean with English abstract)
- Wang, J.W., A.S. Denning, L. Lu, I.T. Baker, K.D. Corbin, and K.J. Davis (2007) Observations and simulations of synoptic, regional, and local variations in atmospheric CO₂, *J. Geophys. Res.*, 112, D04108.
- WDCGG (2013) WMO WDCGG DATA SUMMARY, WDCGG No. 37, 112 pp.
- Zhou, L., J. Tang, Y. Wen, J. Li, P. Yan, and X. Zhang (2003) The impact of local winds and long-range transport on the continuous carbon dioxide record at Mount Waliguan, China, *Tellus*, 55B, 145-158.