

ORIGINAL ARTICLE

최근 제주도 도심과 배경지점에서의 CO₂ 농도 변화 및 복사강제력 영향 연구

이수정 · 송상근* · 박연희

제주대학교 해양과학대학 지구해양과학과

A Study on Changes in CO₂ Concentrations and their Impact on Radiative Forcing at Urban Center and Background Sites on Jeju Island in Recent Years

Soo-Jeong Lee, Sang-Keun Song*, Yeon-Hee Park

Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

The spatial and temporal variations of CO₂ concentrations and radiative forcing (RF) due to CO₂ were examined at urban center (Yeon-dong) during 2010-2015 and background sites (Gosan) during 2010-2014 on Jeju Island. The RF at the two sites was estimated based on a simplified expression for calculating RF for the study period. Overall, annual mean CO₂ concentrations at the Yeon-dong and Gosan sites have gradually increased, and the concentrations were higher at Yeon-dong (401-422 ppm) than at Gosan (398-404 ppm). The maximum CO₂ concentrations at the two sites were observed in winter or spring, followed by fall and summer, with higher concentrations at Yeon-dong. The RF at Yeon-dong (annual mean of up to 0.70 W/m² in 2015) was higher than that at Gosan (up to 0.46 W/m² in 2014), possibly because of higher CO₂ concentrations at Yeon-dong resulting from population growth and human activities (e.g., fossil fuel combustion). The highest monthly mean RFs at Yeon-dong (approximately 0.92 W/m²) and Gosan (0.52 W/m²) were observed in spring 2015 (Yeon-dong) and spring 2013 (Gosan), whereas the lowest RFs (0.17 and 0.31 W/m², respectively) in fall 2011 (Yeon-dong) and summer in 2012 (Gosan).

Key words : CO₂, Radiative forcing, Human activity, Urban center site, Jeju

1. 서론

오늘날 온실가스에 의한 지구온난화와 성층권에서의 오존층 파괴는 화석연료의 연소와 산업 활동에 따른 인위적 오염물질 방출로 인해 전 지구적인 문제로 대두되고 있으며, 특히 기후변화로 인한 지구온난화는 우리가

미래를 위해 해결해야할 가장 시급한 문제 중 하나이다 (IPCC, 1999). 선행연구에 따르면(Hofmann, 2006), 지구온난화의 주요 원인물질인 온실가스, 이산화탄소 (CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등, 중에서 CO₂는 온실효과에 대한 기여도가 약 60~63%로서 CH₄과 (20%)과 N₂O(6%)에 비해 매우 높게 차지하여 지구온

Received 17 April, 2016; Revised 17 April, 2016;

Accepted 2 May, 2016

*Corresponding author : Sang-Keun Song, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Phone: +82-64-754-3431

E-mail: songsk@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

난화에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 CO₂의 배출량과 농도는 인간의 산업 활동이 활발해진 1차 산업혁명시대(18세기 후반)에 급격하게 증가해왔다(IPCC, 2007). CO₂의 전 지구적 농도가 1차 산업혁명 이전에는 280 ppm이었으나 이후 급격하게 증가하여 1999년 연평균 367.6 ppm에서 2013년 396.5 ppm으로 15년 사이 약 29 ppm 증가하였다(연간 약 1.9 ppm씩 증가)(WMO, 2014). 반면 한반도의 연평균 CO₂ 농도는 1999년에 370.7 ppm에서 2013년에 402.4 ppm으로 연간 약 2.1 ppm씩 증가하여 전 지구적 연평균 증가율보다 다소 높게 나타났다(KMA, 2014). 따라서 지구온난화의 주범으로 간주되는 CO₂ 배출은 전 세계적인 이슈는 물론 우리나라에서도 기후변화에 있어 매우 중요한 인자임에 틀림없다.

지구온난화의 주된 물질인 온실가스는 지구-대기 시스템의 에너지 균형에 받는 영향에 있어 양(+)의 복사강제력으로 작용한다. Kiehl et al.(1993)에 의하면, 산업혁명 이전(약 1750년)의 온실가스 농도는 CO₂ 280 ppm, N₂O 0.29 ppm, CH₄ 0.8 ppm, CFC-11과 CFC-12는 모두 0 ppb이었으나, 1993년 와서는 점차 증가하여 CO₂ 353 ppm, N₂O 0.31 ppm, CH₄ 1.7 ppm, CFC-11 0.28 ppb, CFC-12 0.48 ppb로 나타나, 산업혁명시대를 기준으로 1993년의 온실가스에 의한 전 지구적인 복사강제력은 약 2.1 W/m²로 추정되었다. 또한 최근 IPCC 보고서에 따르면(IPCC, 2013), 산업혁명 이전(1750년)을 기준으로 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O, CFC-11, CFC-12 등) 농도 변화에 따른 2011년의 복사강제력은 총 2.83(2.26~3.40) W/m²으로 산출되었으며, CO₂ 단독으로는 1.68(1.33~2.03) W/m²의 복사강제력이 추정된바 있다. 이외에도 Hofmann et al.(2006)의 연구에서, IPCC 보고서에서 제시된 복사강제력 계산을 위한 단순화된 방정식(IPCC, 2007)을 이용하여 1979~2004년 동안 온실가스 농도에 의한 총 복사강제력을 산출한 결과 최근으로 올수록 꾸준히 증가하고 있음을 밝혔다. 한편 온실가스와 복사강제력에 대한 국내 연구(Song et al., 2014a, 2014b)에서 국내 공항별(인천공항 외 14곳) 항공기에서 배출되는 온실가스(특히 CO₂)가 복사강제력에 미치는 영향을 비교분석한 결과, 가장 복사강제력이 높게 산출된 인천공항에서 약 30 mW/m²로 추정된바 있다(항공기에 CO₂ 의한 전 지구적 복사강제력은 18~28

mW/m², IPCC, 1999).

기후변화에 영향을 미치는 요인들이 어떻게 변하는지 분석하지 않고서는 정확하게 미래의 기후를 전망할 수 없으며, 현재와 미래의 기후변화에 대응방안을 제시하기 위해서 기후변화에 영향을 미치는 요인들의 변화(예, 온실가스 농도 변화)를 보다 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 이러한 기후변화에 대한 연구에 있어, 동북아시아의 대표 배경지점인 제주도 고산을 중심으로 온실가스(특히 CO₂) 농도 변화 및 특성분석과 관련하여 많은 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 대부분 고산지점에만 국한되어 연구가 이루어졌다(Ju et al., 2007; Kang et al., 2010; Kim et al., 2014; Kim et al., 2011). 게다가 CO₂ 농도에 영향을 미치는 인위적인 요인을 파악하기 위해서는 배경지역의 CO₂ 농도를 도심지역의 농도 변화와 비교분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 가장 청정한 지역인 제주도의 도심지점(연동)과 배경지점(고산)을 대상으로 CO₂ 농도의 시간변화(연별, 월별, 주중/주말 등)를 살펴보았으며, CO₂ 농도에 따른 도심과 배경지점의 복사강제력과 그 영향을 비교분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 지역

본 연구의 목적은 청정지역인 제주의 도심과 배경지점을 대상으로 CO₂ 농도 변화를 비교분석하고 CO₂ 농도에 의한 복사강제력을 산출하는 것이다. 제주도에서 CO₂ 농도를 관측하는 지점은 고산지점(배경)과 연동지점(도심) 두 곳이 있다. 기상청에서는 한반도 배경대기를 분석하기 위하여 제주도 서쪽에 위치한 고산에 기후변화 감시소를 설치하여 2002년부터 현재까지 CO₂를 비롯한 온실가스를 지속적으로 측정하고 있다(Ju et al., 2007; Kim et al., 2014; Kim et al., 2011). 또한 연동지점은 제주도 보건환경연구원에서 관리하고 있으며 2010년부터 현재까지 CO₂ 농도를 측정하고 있다. 고산 기후변화 감시소(33°17' N, 126°12' E)는 도심지와 멀리 떨어진(연동지점으로부터 약 35 km) 해안가에 바로 인접하며, 주로 북북서풍 및 북서풍이 우세하여(Park et al., 2010), 지리적 및 기상학적으로 도심지로부터 배출되는 인위적 오염물질의 영향을 비교적 덜 받는 청정지점이다(Fig. 1).

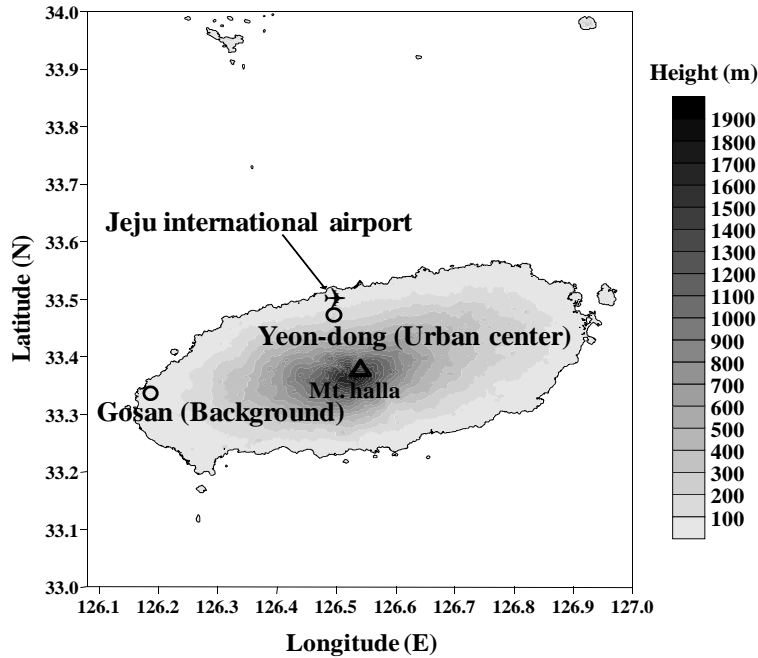


Fig. 1. Geographical locations of two monitoring sites (Yeon-dong and Gosan) for CO₂ concentration (open circle, ○) on Jeju Island.

연동지점(33°29' N, 126°29' E)은 2016년 2월 기준 인구 44,117명으로 제주시에서 노형동(인구 54,595명)과 이도2동(인구 51,655명)에 이어 3번째로 인구가 많은 도심지에 속한다(http://www.jeu.go.kr).

2.2. 연구방법

연동(도심) 및 고산지점(배경)의 CO₂에 대한 전체적인 농도 변화를 비교하고자 시간별 CO₂ 농도 자료를 이용하여 시계열 분석(연변화, 월변화, 주중/주말 및 시간 변화) 및 통계분석을 수행하였다. 비교분석에 이용된 연구기간은 연동지점의 경우 2010~2015년, 고산지점의 경우는 2010~2014년이다. 고산의 2015년 자료는 현재 이용할 수 없는 관계로 제외하였다. 이외에도 제주도 배경농도의 일반적인 연평균 증가율을 산정하기 위하여 최근 13년간(2002~2014년) CO₂ 자료를 이용하였으며, mann-kendall (MK) 검정법을 통해 살펴보았다. MK 검정법은 증가와 감소 추세를 반복하는 자료의 경향을 분석하기 위해 주로 적용되는 방법으로서 선형 추세의 기울기(slope), 즉 평균 증가율을 추정하기 위하여 흔히 이

용되는 방법이다(Anttila et al., 2010; Simmonds et al., 2004).

제주도 전역의 CO₂ 공간분포를 보다 상세히 살펴보기 위하여, 2014년 1년간의 제주도 내 약 100여 곳의 환경기초시설에서 수집한 CO₂ 연간 배출량을 기반으로 CO₂ 농도를 산출하였다. CO₂ 배출량에서 농도로의 환산식은 아래 식(1)에 나타난다. 온실가스 배출량에서 농도로의 환산은 정상상태 가정을 이용하였다(Seinfeld and Pandis, 2006).

$$[X]_{ss} = (q/A \times H) \times \tau + [X_0] \tag{1}$$

여기서 [X]_{ss}는 정상상태의 온실가스 농도(단위부피당 질량), q는 배출량(단위시간당 질량), A는 배출면적, H는 경계층의 높이, τ는 flushing time, [X]₀는 CO₂의 배경농도를 나타낸다. 즉, 100여 곳의 환경기초시설에서 배출된 CO₂의 농도 변화는 각 지점에서의 배출량, 배출면적(각 지점의 가로×세로), 경계층 고도(약 1 km), 기온, 배출구를 통해 물질이 빠져나가는 시간(flushing

time) 등을 이용하여 산출하였다. “flushing”이 온실가스의 유일한 제거 메커니즘이라 가정하였다. 이때 flushing time은 배출장소의 길이를 평균 풍속으로 나누어 계산하였다. 기온과 풍속 자료는 2014년 환경기초시설의 각 배출원에서 가장 가까운 관측지점의 기상자료를 이용하였으며(http://sts.kma.go.kr), CO₂의 배경농도는 국가배경지점인 제주 고산의 2014년 연평균 자료를 이용하였다. 한편, 이러한 환경기초시설에서의 CO₂ 계절변화를 살펴보고자 먼저 각 지점의 연간 CO₂ 배출량에 월별 에너지 총 소비율을 가중치(weighting)로 주어 최종적으로 월별 배출량을 산출하고, 산정된 월별 배출량에 식(1)의 환산식을 적용하여 월별 CO₂ 농도를 구한 후 다시 계절별 평균농도를 추정하였다.

도심과 배경지점의 CO₂ 농도에 의한 복사강제력을 산출하기 위하여 Hansen et al.(1988)의 연구결과를 기초로 한 단순화된 방정식을 적용하였다(IPCC, 2007).

$$\Delta F = a \ln(C/C_0) \tag{2}$$

$$\Delta F = a \ln(C/C_0) + \beta (\sqrt{C} - \sqrt{C_0}) \tag{3}$$

$$\Delta F = a \{g(C) - g(C_0)\} \tag{4}$$

여기서 식(2)의 상수(a)는 3차원 기후/기상 입력장 자료(Myhre et al., 1998)를 이용한 복사전달 계산에 기초를 둔 새로운 상수(5.35)로 대체하였다. 이것은 각 지점별 CO₂ 농도 변화에 따른 복사강제력의 변화량을 계산하기 위하여 단순화된 식을 의미한다. 식(3)의 상수(a와 β)와 식(4)의 상수(a)는 각각 Shi(1992)와 Hansen et al.(1988)의 1차원 전구 평균 기상입력 자료를 바탕으로 산출되었다. 그리고 아래 첨자 “0”은 온실가스의 배경농도를 의미한다. 복사강제력 계산식의 신뢰도(5% 이내)는 복사모델을 이용한 복사강제력 추정값의 비교 연구를 통하여 증명되었다(IPCC, 2007). 복사강제력 추정식에 이용된 CO₂ 배경농도는 국내에서 처음으로 온실가스 농도를 관측하기 시작한 1999년의 안면도 지구대기감시관측소의 측정 자료(370.7 ppm)를 사용하였다.

대상지역 CO₂ 농도에 따른 평균기온의 변화는 주요 변수인 복사강제력 ΔF와의 선형관계식을 이용하여 산출하였으며(IPCC, 1990; Lim et al., 2006), 이에 대한 자세한 설명은 이전 연구에 잘 나타나 있다(Song et al.,

2014a). 요약하면, CO₂ 농도변화에 따른 평균 지표온도 변화(ΔT_s)는 방정식 $\Delta T_s \approx \lambda \cdot \Delta F$ 로 나타낼 수 있고, 여기서 λ(°K/(Wm⁻²))는 기후민감도 변수, ΔF(W/m²)는 대류권계면에서의 복사강제력을 의미한다. 기후민감도 변수(λ)는 복사강제력 유형, 예를 들면 비균질적으로 분포되는 기후변화 인자에 의해 일부 영향을 받는 것으로 나타나, 이러한 영향을 Hansen et al.(2005)에서는 “efficacy(τ_i)”라 정의하였다. 즉, CO₂ 기후민감도 변수(λ_{CO2})에 대한 배출물질 i 기후민감도 변수(λ_i)의 비율을 의미한다(τ_i=λ_i/λ_{CO2}). 이를 위식에 적용하면, 최종적으로 배출물질(i)의 복사강제력에 의한 평균 기온변화식은 $T_s \approx \tau_i \cdot \lambda_{CO2} \cdot \Delta F$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 λ_{CO2}는 Ponater et al.(2006)이 제시한 0.73 °K/(Wm⁻²)의 값을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 도심 및 배경지점의 CO₂ 농도 시·공간 분포

3.1.1. 연변화 및 월/계절 변화

도심(연동) 및 배경지점(고산)에서 CO₂ 농도 분포의 경향을 살펴보고자 연구기간동안 시계열 분석(연변화, 월변화, 주중/주말 및 시간변화) 및 통계분석을 수행하였다. Fig. 2는 연동(2010~2015년)과 고산(2010~2014년)

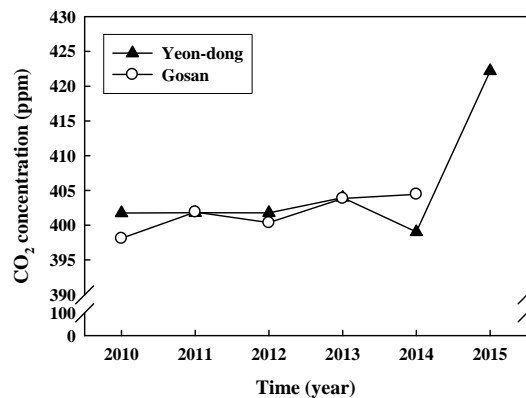


Fig. 2. Annual mean concentrations of CO₂ at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) on Jeju Island during 2010-2015 (Yeon-dong) and 2010-2014 (Gosan). CO₂ concentrations for Jan and Mar 2010, Jun-Dec 2011, and the whole period of 2015 at Gosan were excluded due to data unavailability.

Table 1. A statistical summary of CO₂ concentrations (ppm) at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) on Jeju Island during the study period

Month	Yeon-dong (2010-2015)	Gosan (2010-2014)
Jan	410.5±16.2 ^a (409) ^b 337-505 ^c (4440) ^d	402.9±5.1 (402.8) 389-430 (2738)
Feb	415.3±18.5 (415) 321-496 (3985)	404.6±5.3 (404) 389-429 (2381)
Mar	409±22.0 (408) 318-506 (4417)	403.8±5.2 (404) 387-429 (2662)
Apr	405.7±18.2 (403) 336-496 (4225)	403.8±5.4 (404) 385-428 (3180)
May	408.3±22.1 (403) 314-514 (4449)	404.6±6.1 (404) 382-437 (2762)
Jun	400.0±18.6 (397) 317-519 (4222)	401±5.4 (402) 386-427 (2072)
Jul	395.8±18.3 (392) 313-520 (4434)	398.1±5.5 (398) 373-430 (2381)
Aug	396.8±18.0 (393) 328-498 (4448)	395.5±6.4 (395) 375-420 (1871)
Set	397.2±17.6 (397) 311-476 (4287)	394.9±5.5 (394) 378-421 (1972)
Oct	406.5±17.8 (403) 323-498 (4414)	399.4±4.8 (400) 380-419 (2549)
Nov	410.4±19.3 (407) 347-514 (4299)	401.6±6.1 (401) 379-422 (2571)
Dec	405.2±18.3 (404) 321-512 (4418)	402.8±5.3 (403) 381-440 (2733)

CO₂ concentrations for Jan and Mar 2010, Jun-Dec 2011, and the whole period of 2015 at Gosan were excluded due to data unavailability.

^aMean±1σ

^bMedian

^cMin.-Max

^dNumber of data

에서의 연평균 CO₂ 농도를 나타낸다. 고산지점은 2010년 1월과 3월, 2011년 6~12월까지 자료 부재로 인해 분석에서 제외하였다. 대부분(2014년 제외) 연동지점(401~422 ppm)이 고산보다(약 398~404 ppm) 높은 농도가 관측된 반면, 2014년만 고산이 연동보다 약간 높게(5 ppm) 나타났다. 이것은 2014년 연동지점이 고산지점보다 많은 강수량(월평균 최대 2.5배)에 의한 세정작용

(washout)이 주요 원인인 것으로 추정된다(그림 제외). 참고로 최근 10여 년간(2002~2014년) 배경지점인 고산에서 CO₂ 농도의 연평균 증가율을 MK 검정을 통해 산정한 결과 약 2 ppm/년 이상 증가하는 추세를 보였다.

Table 1과 Fig. 3은 연구기간동안 연동과 고산지점의 월별 CO₂ 농도의 통계분석과 시계열을 각각 나타낸다. 전반적으로 두 지점 모두 겨울철 또는 봄철에 가장 높은

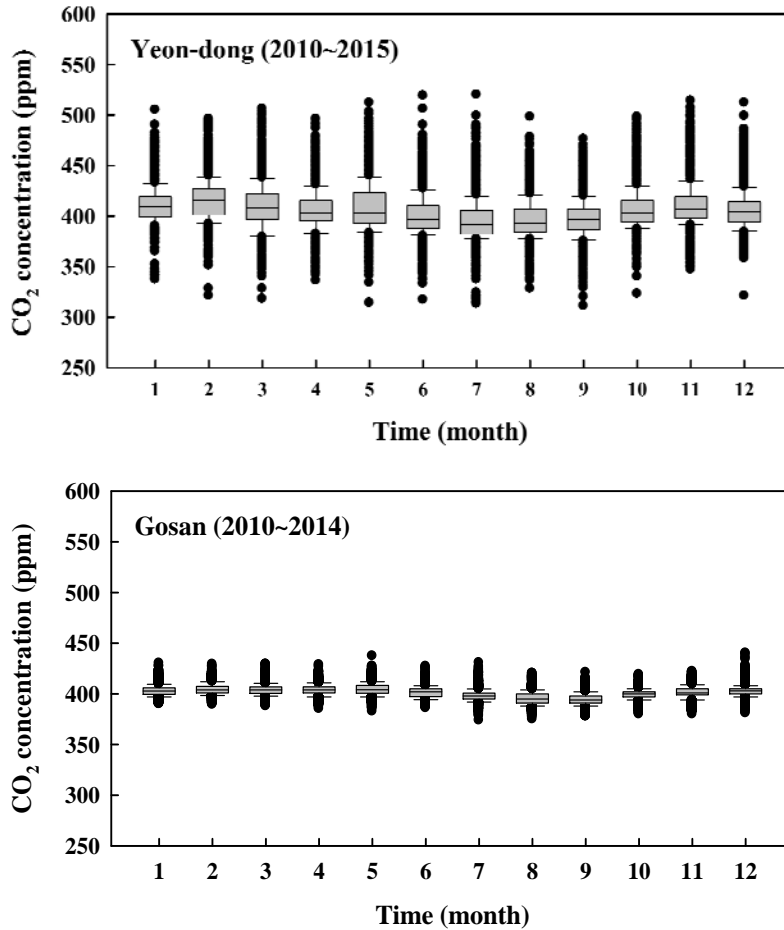


Fig. 3. Box plots for monthly variations of CO₂ concentrations at urban center (Yeon-dong) in 2010-2015 and background sites (Gosan) in 2010-2014. CO₂ concentrations for Jan and Mar 2010, Jun-Dec 2011, and the whole period of 2015 at Gosan were excluded due to data unavailability.

CO₂ 농도가 나타났으며, 다음으로 가을철과 여름철 순서이다(Table 1). 겨울철은 주거 및 상업 지역 등 여러 지역에서 난방 및 산업시설의 화석연료 사용 증가로 인해 CO₂ 농도가 높게 나타났으며, 여름철과 가을철에는 식물의 광합성 작용에 의한 활동이 활발하기 때문에 비교적 낮은 농도가 나타난 것으로 사료된다(Chung and Tans, 2000; Ju et al., 2007). 또한 연동지점에서 각 월에 포함하는 자료(CO₂ 농도) 중에서 최고값은 대부분 500 ppm을 넘고(많은 자료가 450 ppm 이상) 최저값은 300~350 ppm 사이로 나타나지만, 고산지점은 각 월에 포함하는 자료들 모두가 370~440 ppm 사이로 나타났

다(Fig. 3). 즉 고산지점은 큰 변동 없이 일정한 값을 유지하는 반면, 연동지점은 도시의 전형적인 특징이 잘 반영되어 농도 변동이 훨씬 큰 것으로 사료된다. 월별 CO₂ 평균농도를 보면(Table 1), 연동지점에서 평균농도의 최고값이 나타난 월은 2월로 약 415±19 ppm이며, 최저값이 나타난 월은 7월로 약 396±18 ppm이다. 고산지점에서 평균농도의 최고값이 나타난 월은 2월과 5월로 각각 405±5 ppm과 405±6 ppm이며, 최저값이 나타난 월은 9월로 약 395±6 ppm이다. 두 지점 중 연동지점이 고산지점에 비해 최고값과 최저값 차이가 2배 이상의 큰 폭으로 나타났다.

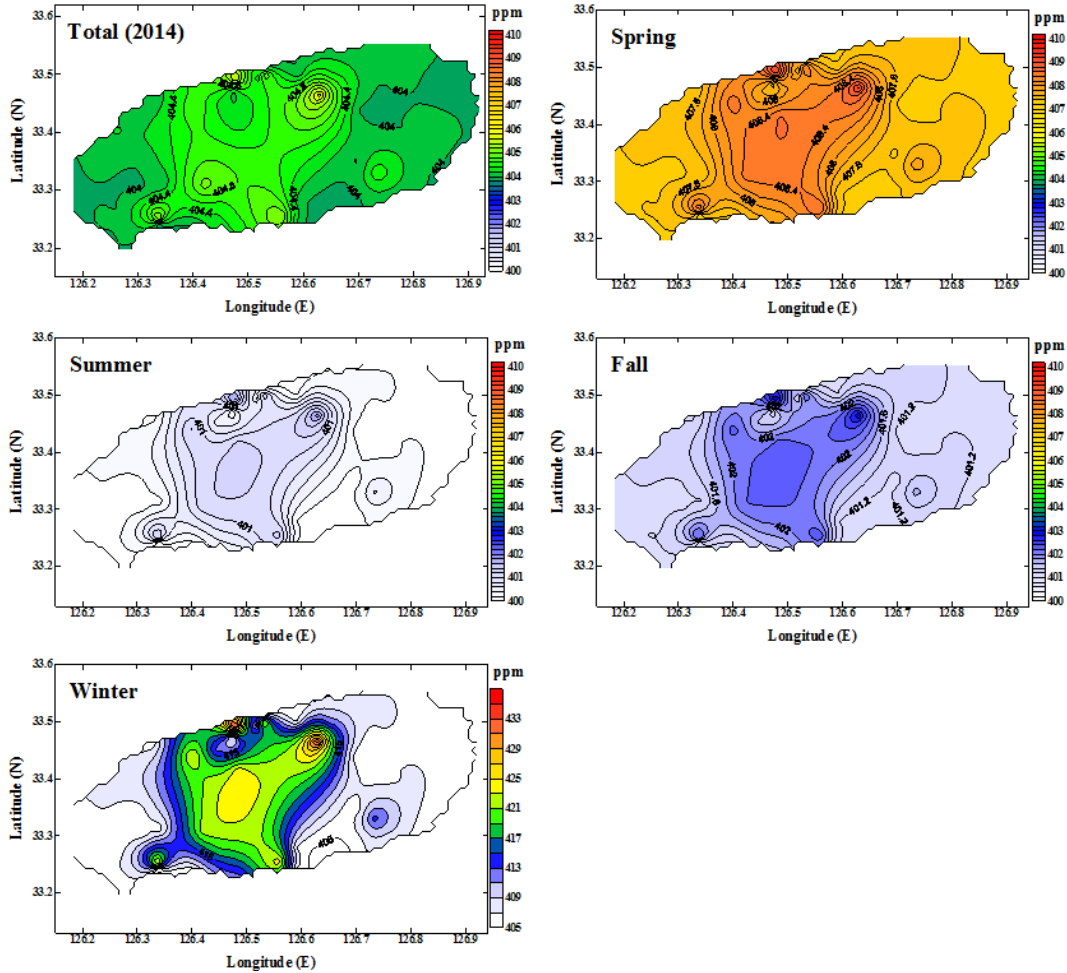


Fig. 4. Total distribution and seasonal variations for CO₂ concentrations (ppm) converted from CO₂ emitted at basic environmental treatment facilities (more than 100 sites) on Jeju Island in the year of 2014. The range (Min. to Max) of color bar for winter is different from the other seasons because of higher CO₂ concentrations in winter.

대상지역 CO₂ 농도의 공간분포를 보다 상세히 살펴 보기 위하여, 2014년 1년간 제주도 내 100여 곳의 환경기초시설에서 배출된 CO₂로부터 CO₂ 농도를 산출하였다(Fig. 4). 2.2절에 제시된 식(1)을 이용하여 CO₂ 배출량을 농도로 환산하였으며, 입력 자료 중 배출면적은 각 시설의 면적을, 기온과 풍속은 각 시설에 가장 가까운 기상관측지점의 평균 자료를 이용하였다. 전반적으로 환경기초시설 중에서 하수처리장, 매립장, 정수장 등이 위치한 곳에서 고농도 CO₂가 추정되었다. 특히 제주도 내 북동쪽에 위치한 제주시의 회천매립장 및 북부광역 환경관

리센터와 북쪽에 위치한 하수처리장에서 연평균 약 406 ppm으로 가장 높은 농도가 나타났다. 다음으로 제주도 내 남서쪽에 위치한 서귀포시의 서광정수장 및 남부광역 환경관리센터와 남쪽에 위치한 쓰레기매립장, 그리고 제주시의 북쪽에 위치한 음식물 처리장에서 연평균 약 405 ppm으로 높게 추정되었으며, 기타 나머지 지점에서는 403~404 ppm 정도로 조금 낮게 산정되었다. 이는 제주시가 서귀포시보다 많은 인구나 함께 여러 환경기초시설의 오염물질 처리량이 많기 때문인 것으로 판단된다. 또한 계절별로 보면, 겨울철이 가장 높게(평균 약 410 ppm)

산출되고 다음으로 봄철(408 ppm), 가을철(401 ppm), 여름철(400 ppm) 순서로 추정되었다.

3.1.2. 주중/주말 및 시간 변화

Fig. 5는 6년간(2010~2015년) 연동지점과 5년간(2010~2014년) 고산지점에서 요일별(주중/주말) CO₂ 농도를 나타낸다. 연동지점의 6년간 주중과 주말의 평균 CO₂ 농도는 각각 약 405 ppm, 403 ppm으로 주중이 주말보다 다소 높게 나타났다. 반면, 고산지점의 5년간 주중과 주말 평균은 각각 약 401 ppm과 402 ppm으로 주말에 약간 높게 나타났으나 큰 차이는 아니었다. 일반적으로 주중과 주말 변동 경향은 자연적인 요인보다 인위적인 요인으로 인해 발생한다(Cerveny and Coakley, 2002). Kim et al.(2014)의 연구에서도 본 연구결과와 비슷하게 제주도 고산에서(2002~2010년) 주말의 CO₂ 농도(391.6 ppm)가 주중(390.3 ppm)보다 더 높게 나타났는데, 이것을 관광객 증가로 인하여 주말에 더 많은 사람들이 방문하고 차량들이 이동하였기 때문인 것으로 추정하였다. 그러나 본 연구의 연동지점은 고산에 비해 다른 패턴(주중이 주말보다 높음)을 보였는데, 도시지역은 대체로 주중이 주말보다 인위적 산업 활동(화석연료 연소 등)의 증가로 인해 에너지 사용량이 많아지기 때문에 상대적으로 농도가 낮은 것으로 추정된다.

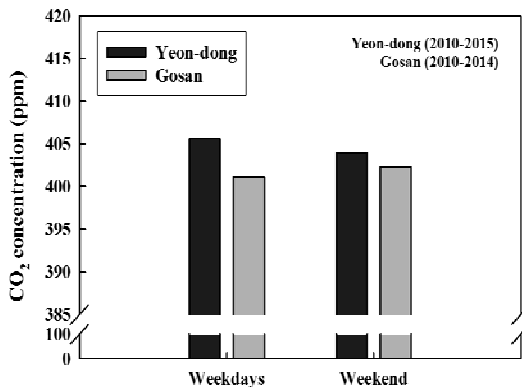


Fig. 5. Weekday and weekend variations of mean CO₂ concentrations at urban center (Yeon-dong) in 2010-2015 and background sites (Gosan) in 2010-2014. CO₂ concentrations for Jan and Mar 2010, Jun-Dec 2011, and the whole period of 2015 at Gosan were excluded due to data unavailability.

Fig. 6은 연동(2010~2015년) 및 고산지점(2010~2014년)에서의 시간별 CO₂ 농도의 변화를 나타낸다. 전반적으로 두 지점의 CO₂ 농도는 모두 출퇴근 시간에 가장 높게 나타났으며, 주간의 업무 시간대인 오전과 이른 오후에 상대적으로 낮은 농도가 나타났다. 이러한 패턴과 농도의 차이는 연동지점이 고산지점에 비해 훨씬 뚜렷하게 나타났다. 시간별로 자세히 살펴보면, 연동지점은 대략 오전 9시부터 농도가 낮아지기 시작하여 15~16시까지 지속적으로 감소하다가 그 이후 다시 증가하는 추세를 보였다. 연구기간동안 최고농도가 나타난 시간은 20~22시로 약 405(2014년)~430(2015년) ppm이며, 최저농도가 나타난 시간은 14~15시로 약 391(2014년)~413(2015년) ppm이 나타나 하루 동안의 변동 폭은 약 14~16 ppm으로 상당히 큰 편이었다. 고산지점의 시간별 변화 경향은 연동지점과 유사한 패턴이었으며, 최고농도가 나타난 시간은 대체로 4~7시로 약 401(2012년)~405(2014년) ppm이며, 최저농도가 나타난 시간은 14~16시로 약 393(2010년)~402(2013년) ppm이 나타나 변동 폭은 약 3~8 ppm으로 연동지점에 비해 매우 작았다. 이것은 2002~2010년 동안 고산지점에 나타난 최고농도 및 최저농도 시간대(각각 6시와 13시)와 거의 유사하였다(Kim et al., 2014). 일반적으로 온실가스 배출에 영향을 미치는 요인 중 하나가 자동차 등록대수로 알려져 있으며, 특히 CO₂ 농도는 교통량과 비례한다(Ban et al., 2012; Kwon, 1965). 인구와 차량이 많은 연동의 경우 퇴근시간과 겹쳐 야간에 통행량이 급증하고 또한 야간에 적은 일사량과 대기 안정으로 인해 나타나는 혼합고 감소가 대기확산을 저지하므로 상대적으로 농도가 증가한 것으로 추정된다.

3.2. 도심 및 배경지점의 CO₂ 농도에 따른 복사강제력 및 기온변화 산출

Table 2와 3은 최근 6년간(2010~2015년) 연동지점과 5년간(2010~2014년) 고산지점에서 CO₂ 농도에 따른 복사강제력 추정식을 적용하여 산출한 연평균(Table 2) 및 월평균 복사강제력과 기온변화(Table 3)를 나타낸다. Table에 제시한 모든 복사강제력은 2.2절의 식(2)를 이용하여 산출하였다. 식(2)를 사용한 CO₂ 복사강제력 추정값은 식(3)과 식(4)에 의한 복사강제력의 약 0.9배로서 조금 낮게 추정되었다. 여기서 복사강제력 추정식에

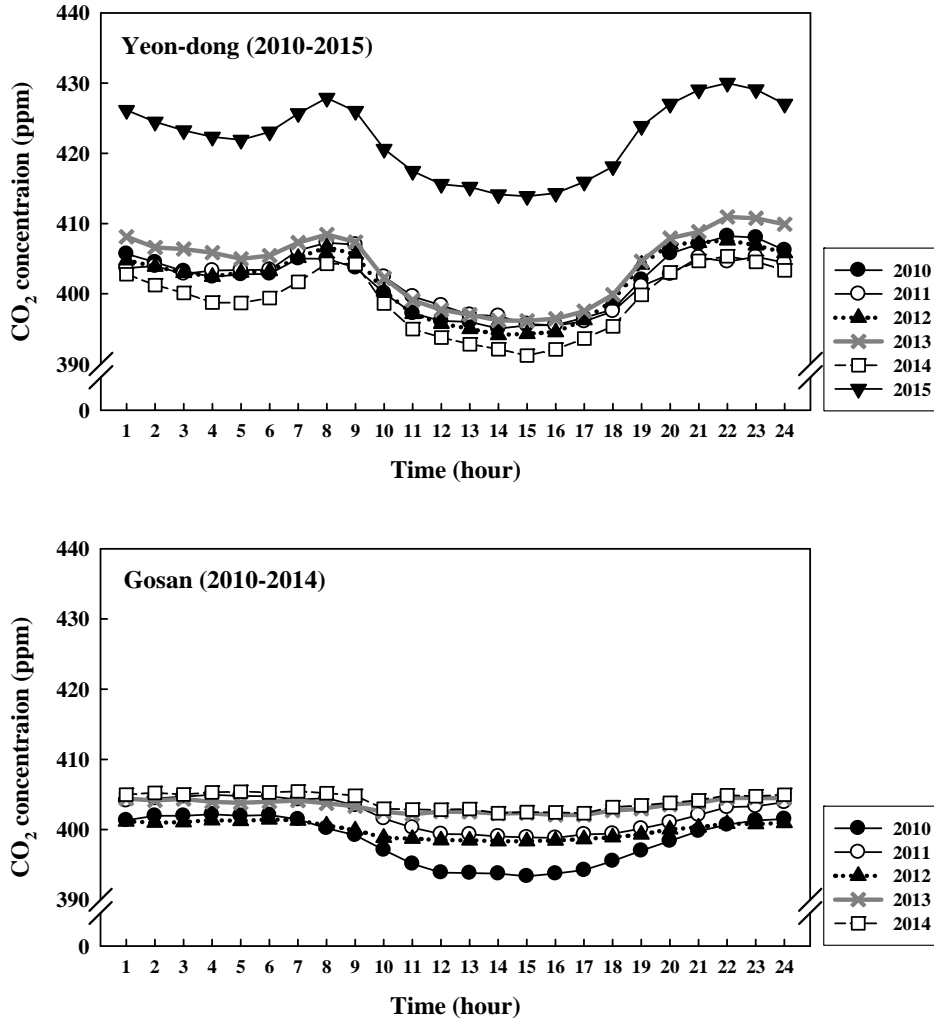


Fig. 6. Diurnal variations of hourly mean CO₂ concentrations at urban center (Yeon-dong) in 2010-2015 and background sites (Gosan) in 2010-2014. CO₂ concentrations for Jan and Mar 2010, Jun-Dec 2011, and the whole period of 2015 at Gosan were excluded due to data unavailability.

이용된 CO₂ 배경농도는 1999년의 안면도 지구대기감시 관측소의 측정 자료(370.7 ppm)를 이용하였다. 연동(도심)과 고산지점(배경)의 연평균 변화를 분석한 결과, 1999년을 기준으로 산출한 복사강제력과 기온변화는 연동지점에서 0.39(2014년)~0.70 W/m²(2015년)과 0.29(2014년)~0.51 °K/year(2015년), 고산지점에서 0.38(2010년)~0.46 W/m²(2014년)와 0.28(2010년)~0.34 °K/year(2014년)로 나타나 고산지점보다 연동지점에서 높은 복

사강제력과 기온변화가 추정되었다. 참고로 Table 2에서 산업혁명 이전(1750년, 전 지구적 평균 CO₂ 농도 약 280 ppm)을 기준으로 산출한 전체 연구기간의 연평균 복사강제력을 보면, 연동지점에서 1.89~2.19 W/m², 고산지점에서 1.88~1.96 W/m² 으로 나타났다. 이것은 산업혁명 이전(1750년)을 기준으로 산출된 2011년 CO₂ 배출량에 의한 전 지구적 복사강제력 평균 1.68 W/m²(1.13~3.33 W/m²)과 유사하게 나타났다(IPCC, 2013).

Table 2. Yearly variations of radiative forcing (for the period from 1999 to the respective year) and mean temperature changes due to CO₂ concentrations at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) on Jeju Island

Year	Yeon-dong (2010-2015)		Gosan (2010-2014)	
	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/year)	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/year)
2010	0.4303 ^a (1.9315) ^b	0.3141	0.3817 (1.8829)	0.2787
2011	0.4310 (1.9322)	0.3147	0.4324 (1.9336)	0.3156
2012	0.4308 (1.9320)	0.3145	0.4052 (1.9064)	0.2958
2013	0.4599 (1.9611)	0.3357	0.4516 (1.9527)	0.3296
2014	0.3940 (1.8952)	0.2876	0.4598 (1.9609)	0.3356
2015	0.6957 (2.1969)	0.5079	-	-

CO₂ concentrations for Jan and Mar 2010, Jun-Dec 2011, and the whole period of 2015 at Gosan were excluded due to data unavailability.

^aMean radiative forcing was calculated for the period from 1999 (background CO₂=370.7 ppm) to the respective year (2010-2015 for Yeon-dong and 2010-2014 for Gosan)

^bMean radiative forcing was calculated for the period from pre-industrial (1750, background CO₂=280 ppm) to the respective year (2010-2015 for Yeon-dong and 2010-2014 for Gosan)

Table 3. Monthly variations of radiative forcing and mean temperature changes due to CO₂ concentrations at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) on Jeju Island during the study period

Year	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
Month	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/month)	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/month)	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/month)	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/month)	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/month)	ΔF (W/m ²)	Temp. change (°K/month)
Jan	0.459/-	0.011/-	0.570/0.408	0.013/0.01	0.432/0.437	0.010/0.010	0.455/0.458	0.011/0.011	0.633/0.485	0.015/0.011	0.726/-	0.017
Feb	0.492 ^a /0.391 ^b	0.013 ^c /0.010 ^d	0.716/0.438	0.019/0.011	0.376/0.428	0.009/0.011	0.498/0.459	0.013/0.012	0.736/0.457	0.019/0.012	0.819/-	0.021
Mar	0.469/- ^e	0.011/-	0.645/0.411	0.015/0.007	0.473/0.439	0.011/0.010	0.444/0.481	0.010/0.011	0.202/0.496	0.005/0.012	0.917/-	0.022
Apr	0.453/0.397	0.011/0.010	0.510/0.460	0.012/0.011	0.454/0.441	0.011/0.011	0.442/0.486	0.011/0.012	0.216/0.512	0.005/0.012	0.825/-	0.020
May	0.448/0.428	0.011/0.010	0.444/0.422	0.010/0.010	0.457/0.465	0.011/0.011	0.536/0.520	0.013/0.012	0.273/0.504	0.006/0.012	0.920/-	0.022
Jun	0.403/0.437	0.010/0.011	0.397/-	0.010/-	0.416/0.367	0.010/0.009	0.438/0.430	0.011/0.001	0.238/0.466	0.006/0.011	0.581/-	0.014
Jul	0.300/0.380	0.007/0.009	0.309/-	0.007/-	0.428/0.354	0.010/0.008	0.360/0.390	0.008/0.009	0.310/0.403	0.007/0.009	0.396/-	0.009
Aug	0.369/0.360	0.009/0.008	0.249/-	0.006/-	0.445/0.314	0.010/0.007	0.396/0.401	0.009/0.010	0.260/0.355	0.006/0.008	0.467/-	0.011
Set	0.264/0.325	0.006/0.008	0.170/-	0.004/-	0.466/0.325	0.011/0.008	0.455/0.346	0.011/0.009	0.379/0.367	0.009/0.009	0.474/-	0.012
Oct	0.432/0.354	0.010/0.008	0.412/-	0.010/-	0.451/0.402	0.011/0.009	0.399/0.421	0.009/0.010	0.449/0.423	0.011/0.010	0.801/-	0.019
Nov	0.527/0.349	0.013/0.009	0.492/-	0.012/-	0.412/0.432	0.010/0.011	0.606/0.462	0.015/0.011	0.465/0.475	0.011/0.012	0.758/-	0.018
Dec	0.551/0.409	0.013/0.010	0.247/-	0.006/-	0.351/0.430	0.008/0.010	0.494/0.459	0.012/0.011	0.565/0.483	0.013/0.011	0.643/-	0.015

CO₂ concentrations for Jan and Mar 2010, Jun-Dec 2011, and the whole period of 2015 at Gosan were excluded due to data unavailability.

^{a, c}; Mean radiative forcing and temperature change, respectively at Yeon-dong

^{b, d}; Mean radiative forcing and temperature change, respectively at Gosan

^eNot measured

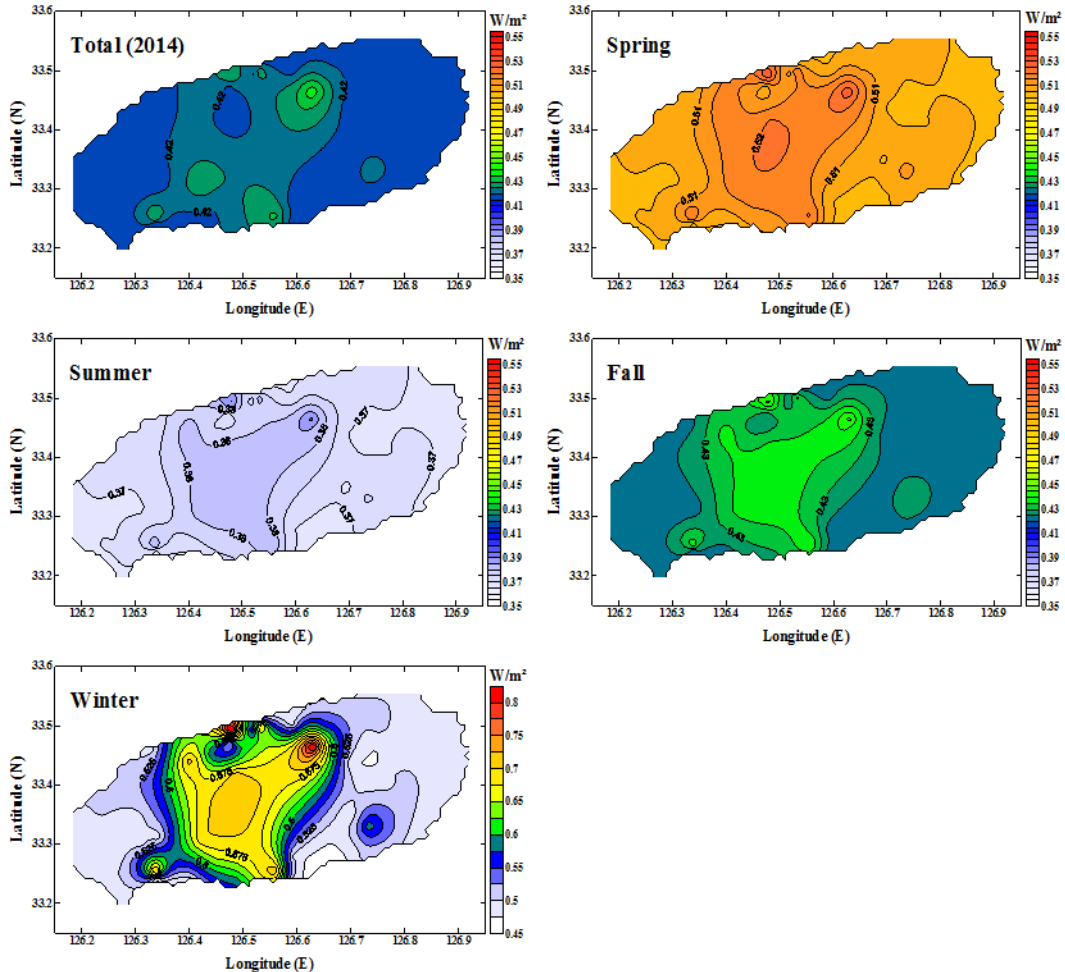


Fig. 7. Total distribution and seasonal variations for radiative forcing (W/m^2) due to CO_2 concentrations at basic environmental treatment facilities (more than 100 sites) on Jeju Island in the year of 2014. The range (Min. to Max) of color bar for winter is different from the other seasons because of higher radiative forcing estimated in winter.

연동과 고산지점의 월별 복사강제력 변화에서(Table 3), 전반적으로 월평균 복사강제력은 배경지점인 고산보다 도심지점인 연동에서 상대적으로 높게 추정되었으며, 대체로 두 지점 모두 최근으로 올수록 복사강제력이 증가하는 추세를 보였다. 두 지점에서 산출된 기온변화도 마찬가지로 연동지점이 고산지점보다 높은 편이었다. 또한 두 지점 모두 대부분 연구기간(연동 2014년 제외)에서 봄철 또는 겨울철에 높게 나타났으며, 가을철과 여름

철에는 상대적으로 낮은 복사강제력이 산출되었다. 월별로 상세히 살펴보면, 최근 6년간 연동지점에서 가장 높은 복사강제력이 산출된 월은 2015년 3월과 5월로 약 $0.92 W/m^2$ 이며, 가장 낮게 산출된 월은 2011년 9월로 약 $0.17 W/m^2$ 이다. 고산의 경우, 가장 높은 복사강제력이 산출된 월은 2013년 5월로 약 $0.52 W/m^2$ 이며, 가장 낮게 산출된 월은 2012년 8월에 약 $0.31 W/m^2$ 이다. 아울러 월별/계절별 기온변화의 패턴도 복사강제력과 마찬가지로

지로 연동과 고산지점은 모두 봄철에 가장 높았고, 가장 낮은 기온변화는 가을철(연동)과 여름철(고산)에 나타났다. 고산배경지점에 비해 인구와 차량, 산업시설이 많은 연동지점의 이러한 복사강제력 특징들은 CO₂ 농도가 높게 나타났던 원인(인위적 활동 증가)과 유사하게 인위적인 영향이 잘 반영되어 나타난 것으로 사료된다.

Fig. 7은 제주도 내 환경기초시설(약 100여 곳)의 CO₂ 연평균(2014년) 농도에 따른 복사강제력의 추정값을 나타낸다. 여기서 복사강제력 추정식(2.2절의 식(2))에 적용된 CO₂ 배경농도는 Tables 2와 3에서처럼 1999년의 안면도 지구대기감시관측소 자료(370.7 ppm)를 이용하였다. 전반적으로 CO₂ 농도가 높게 산정되었던(Fig. 4) 제주도 내 북동쪽에 위치한 제주시 회천매립장 및 북부광역 환경관리센터와 북쪽에 위치한 하수처리장에서 0.43~0.44 W/m² 이상의 높은 복사강제력이 추정되었으며(1999년을 기준으로 산출된 2014년의 복사강제력), 다음으로 제주도 내 남서쪽에 위치한 서귀포시 서광정수장 및 남부광역 환경관리센터와 남쪽에 위치한 쓰레기매립장, 그리고 북쪽에 위치한 제주시 음식물처리장에서 약 0.42 W/m²로 나타났다. 이외에 다른 지점에서는 0.41 W/m² 이하의 복사강제력이 추정되었다. 또한 계절별로 보면, 겨울철에 평균 약 0.54 W/m²(0.47~0.86 W/m²)으로 가장 높게 산출되고, 다음으로 봄철, 가을철, 여름철 순서로 나타났다. 이는 앞에서 기술한 연동(도심)과 고산지점(배경)에서 CO₂ 농도에 따른 복사강제력의 계절별 특성과 비교해 볼 때 대체로 유사한 패턴이었다(Table 3).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 제주도 내 도심(연동, 2010~2015년)과 배경지점(고산, 2010~2014년)에서의 CO₂ 농도 변화(연변화, 월변화, 주중/주말 및 시간변화)와 단순화된 복사강제력 추정식을 통해 CO₂ 농도가 복사강제력에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 복사강제력과 기온변화의 선형관계식을 이용하여 연동과 고산지점에서의 CO₂ 농도에 따른 평균기온 변화를 분석하였다. 전반적으로 연동 및 고산지점의 연평균 CO₂ 농도는 점차 증가하는 추세를 보이고 있으며, 대체로 도심지점인 연동(연평균 401~422 ppm)이 고산 배경지점(398~404 ppm)보다

높게 관측되었다. 또한 두 지점 모두 가장 높은 CO₂ 농도는 겨울철 또는 봄철에 나타났으며, 다음으로 가을철과 여름철 순서이다. 상대적으로 연동지점은 계절별(월별) CO₂ 농도의 차이가 뚜렷한 반면, 고산지점은 뚜렷한 차이가 없이 대체로 일정한 농도 패턴으로 나타났다. 주중과 주말 변화에서 연동지점은 주중이 더 높게 고산지점은 주말이 약간 더 높게 나타났으며, 일중 시간변화에서 두 지점 모두 출퇴근 시간에 가장 높았고 주간의 업무 시간대(오전부터 이른 오후까지)에 낮은 농도가 나타났다. 이러한 주중/주말 및 시간변화의 패턴은 연동지점이 고산지점에 비해 훨씬 뚜렷한 차이를 보였다. 따라서 인구가 많은 연동지점의 이러한 특징들은 인위적인 활동(화석연료 연소 등) 및 도시화 등으로 인한 도심의 전형적인 패턴을 잘 묘사하는 것으로 사료된다.

연동과 고산지점에서 산출된 복사강제력과 기온변화는 두 지점의 CO₂ 농도 변화 특성과 유사하게 연동지점이 고산지점보다 높게 추정되었으며(연평균 및 월평균 변화 모두), 대체로 최근으로 올수록 두 지점의 복사강제력이 증가하는 추세를 보였다. 연동지점의 경우 2015년에 연평균 최고 복사강제력 0.70 W/m²와 최고 기온변화 0.51 °K/year, 고산지점은 2014년에 연평균 최고 0.46 W/m²와 0.34 °K/year으로 추정되었다. 또한 두 지점 모두 2014년을 제외한 대부분 연구기간에서 봄철 또는 겨울철에 높은 복사강제력이, 가을철과 여름철에 상대적으로 낮게 산출되었다. 특히 연동지점은 2015년 3월과 5월에 월평균 최고 0.92 W/m²와 2011년 9월에 최저 0.17 W/m², 고산지점은 2013년 5월에 월평균 최고 0.52 W/m²와 2012년 8월에 최저 0.31 W/m²가 산출되었다. 종합적으로, 본 연구의 주요 결과는 대상지역의 온난화 예측 및 평가, 기후변화 감시체계 구축에 중요한 기초자료가 될 것으로 사료된다. 그러나 제주도 전역을 2곳의 관측지점만으로 해석하고 평가하기에는 공간적으로 많은 한계가 있다. 향후 다양한 관측분석 자료의 확보와 모델링 연구(예, 대기복사전달모델)가 병행된다면 보다 상세하고 정확한 온실가스(예, CO₂)에 따른 복사효과를 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화감시예측 및 국가정책지원

강화 사업(KMIPA 2015-2050)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anttila, P., Tuovinen, J. P., 2010, Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007, *Atmos. Environ.*, 44, 30-41.
- Ban, Y. U., Jeong, J. H., Baek, J. I., Kim, Y. M., 2012, Analyzing the determinants of greenhouse gases emission characteristics: Focused on Cheongju city, J. Korean Region. Develop. Assoc., 24(2), 15-28.
- Cerverny, R. S., Coakley, K. J., 2002, A weekly cycle in atmospheric carbon dioxide, *Geophys. Res. Lett.*, 29(2), doi: 10.1029/2001GL013952.
- Chung, Y. S., Tans, P., 2000, Monitoring greenhouse gases at Tae-Ahn Peninsula, Korea, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 36(1), 25-34.
- Hofmann, D. J., Butler, J. H., Dlugokencky, E. J., Elkins, J. W., Masarie, K., Montzka, S. A., Tans, P., 2006, The role of carbon dioxide in climate forcing from 1979 to 2004: Introduction of the annual greenhouse gas index, *Tellus* 58 B, 614-619.
- Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Lebedeff, S., Ruedy, R., Russell, G., Stone, P., 1988, Global climate changes as forecast by goddard institute for space studies three-dimensional model, *J. Geophys. Res.*, 93, 9341-9364.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Nazarenko, L., Lacis, A., Schmidt, G. A., Russell, G., 2005, Efficacy of climate forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104.
- IPCC, 1990, *Climate change 1990: The Intergovernmental panel on climate change scientific assessment* Houghton, J. T., Callander, B. A., Varney, S. K. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 1999, *Intergovernmental panel on climate change special report on aviation and the global atmosphere*, Penner, J. E., Lister, D. H., Griggs, D. J., Dokken, D. J., McFarland, M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2007, *Intergovernmental panel on climate change fourth assessment report - Climate change 2007: The Physical science basis summary for policymakers*.
- IPCC, 2013, *Intergovernmental panel on climate change fifth assessment report - Climate change 2013, The Physical science basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ju, O. J., Cha, J. S., Lee, D. W., Kim, Y. M., Lee, J. Y., Park, L. S., 2007, Analysis of variation characteristics of greenhouse gases in the background atmosphere measured at Gosan, Jeju, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(4), 487-497.
- Kang, K. S., Moon, I. J., Hwang, S. M., Shin, D. S., Yoon, S. C., 2010, A study on the generation and movement of low-concentration CO₂ in Summer at Gosan, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20, 307-318.
- Kiehl, J. T., Briegleb, B. P., 1993, The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing, *Sci.*, 260, 311-314.
- Kim, S. Y., Lee, J. B., Yu, J. A., Hong, Y. D., Song, C. K., 2011, Analysis of the characteristics and high concentrations of carbon dioxide measured at the Gosan site in Jeju, Korea in 2007, *Clim. Chang. Res.*, 2(1), 1-14.
- Kim, S. Y., Lee, S. D., Kim, D. R., Lee, J. B., Song, C. K., Choi, K. H., Han, J. S., 2014, Influencing factors for short-term variations of carbon dioxide concentration at the Gosan site in Jeju, Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30(5), 423-433.
- KMA, 2014, *Report of global atmosphere watch 2013*, Meteorological Administration, Korea.
- Kwon, S. W., Kim, M. S., 1965, Measurements of the degree of atmospheric pollution in seoul, *J. Korean Chem. Soc.*, 9(3), 116-120.
- Lim, L., Lee, D. S., Sausen, R., Ponater, M., 2006, Quantifying the effects of aviation on radiative forcing and temperature with a climate response model, *Proceedings of the TAC-Conference*, Oxford, U.K.
- Myhre, G., Highwood, E. J., Shine, K. P., Stordal, F., 1998, New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2715-2718.
- Park, Y. H., Kim, K. B., Her, S. Y., Lee, Y. M., Huh, J. C., 2010, A study on the wind data analysis and wind speed forecasting in jeju area, *J. Korean Soc. Sol. Energ.*, 30(6), 66-72.
- Ponater, M., Pechtl, S., Sausen, R., Schumann, U., Hüttig,

- G., 2006, Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment, *Atmos. Environ.*, 40, 6928-6944.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2006, *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, second ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Shi, G., 1992, Radiative forcing and greenhouse effect due to the atmospheric trace gases, *Science in China, Series B*, 25, 217-229.
- Simmonds, P. G., Derwent, R. G., Manning, A. L., Spain, G., 2004, Significant growth in surface ozone at Mace Head, Ireland, 1987-2003, *Atmos. Environ.*, 38, 4769-4778.
- Song, S. K., Shon, Z. H., Jeong, J. H., 2014a, Influence of greenhouse gas emissions from commercial aircraft at korean international airports on radiative forcing and temperature change, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30, 223-232.
- Song, S. K., Shon, Z. H., Jeong, J. H., 2014b, Impact of greenhouse gas emissions from commercial aircraft on radiative forcing and temperature change at the airports in Korea: Comparison between simplified expression and radiative transfer model, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 30, 411-422.
- WMO, 2014, *Greenhouse Gas Bulletin*, No.10, 6 November 2014, WMO.