

## 대기복사전달모델을 이용한 제주지역 도심 및 배경지점에서의 온실가스에 따른 복사강제력 영향 연구

이수정<sup>1)</sup> · 송상근<sup>2)\*</sup> · 한승범<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(주)에코브레인, <sup>2)</sup>제주대학교 지구해양학과

(접수일: 2017년 8월 31일, 수정일: 2017년 11월 24일, 게재확정일: 2017년 12월 11일)

### Influence of Greenhouse Gases on Radiative Forcing at Urban Center and Background Sites on Jeju Island Using the Atmospheric Radiative Transfer Model

Soo-Jeong Lee<sup>1)</sup>, Sang-Keun Song<sup>2)\*</sup>, and Seung-Beom Han<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Eco Brain Co., Ltd., Jeju, Korea

<sup>2)</sup>Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju, Korea

(Manuscript received 31 August 2017; revised 24 November 2017; accepted 11 December 2017)

**Abstract** The spatial and temporal variations in radiative forcing (RF) and mean temperature changes of greenhouse gases (GHGs), such as CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O, were analyzed at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) on Jeju Island during 2010~2015, based on a modeling approach (i.e., radiative transfer model). Overall, the RFs and mean temperature changes of CO<sub>2</sub> at Yeon-dong during most years (except for 2014) were estimated to be higher than those at Gosan. This might be possibly because of its higher concentrations at Yeon-dong due to relatively large energy consumption and small photosynthesis and also the difference in radiation flux due to the different input condition (e.g., local time and geographic coordinates of solar zenith angle) in the model. The annual mean RFs and temperature changes of CO<sub>2</sub> were highest in 2015 (2.41 W m<sup>-2</sup> and 1.76 K) at Yeon-dong and in 2013 (2.22 W m<sup>-2</sup> and 1.62 K) at Gosan (except for 2010 and 2011). The maximum monthly/seasonal mean RFs and temperature changes of CO<sub>2</sub> occurred in spring (Mar. and/or Apr.) or winter (Jan. and/or Feb.) at the two sites during the study period, whereas the minimum RFs and temperature changes in summer (Jun.-Aug.). In the case of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, their impacts on the RF and mean temperature changes were very small (an order of magnitude lower) compared to CO<sub>2</sub>. The spatio-temporal differences in these RF values of GHGs might primarily depend on the atmospheric profile (e.g., ozone profile), surface albedo, local time (or solar zenith angle), as well as their mass concentrations.

**Key words:** Greenhouse gases, radiative forcing, urban center and background sites, Jeju, radiative transfer model

\*Corresponding Author: Sang-Keun Song, Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, 102 Jejudaehak-ro, Jeju 63243, Korea.  
Phone: +82-64-754-3431, Fax: +82-64-725-2461  
E-mail: songsk@jeju.ac.kr

## 1. 서 론

기후변화에 의한 지구온난화의 핵심 역할을 하는 온실가스는 인간의 산업 활동이 활발해진 1차 산업혁명시대(18세기 후반)를 지나오면서 급격하게 증가해 왔다(IPCC, 2013). 세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization)의 2015 온실가스 보고서에 따르면(WMO, 2016), CO<sub>2</sub>의 전 지구적 농도가 1차 산업혁명 이전(1750년)에는 280 ppm이었으나 이후 급격하게 증가하여 왔다고 보고된 바 있다. 예를 들어, 2015년 CO<sub>2</sub> 농도는 400 ppm으로 산업혁명 이전인 1750년과 비교하여 약 1.4배 증가하였으며, CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O는 산업혁명 이전(각각 700 ppb와 270 ppb)과 비교하여 2015년에 1845 ppb와 328 ppb으로 관측되어 각각 약 2.6배와 1.2배로 증가하였다.

우리나라의 배경지점인 안면도 지구대기감시관측소에서는 1999년부터 온실가스 관측을 시작하여 CO<sub>2</sub> 농도가 371 ppm이었으나, 2015년에는 407 ppm으로 지난 17년간 약 2.1 ppm yr<sup>-1</sup>씩 증가하여 전 지구적 연평균 증가율(1.8 ppm yr<sup>-1</sup>)보다 다소 높게 나타났다(KMA, 2014). 같은 해(2015년) 다른 배경지점인 제주도 고산의 CO<sub>2</sub> 연평균 농도는 406.5 ppm으로 나타났으며, 독도와 울릉도는 각각 404.3 ppm과 404.2 ppm으로 기록되었다. 2015년 안면도 CH<sub>4</sub>의 평균 농도는 1977 ppb로 1999년과 비교하여 과거 17년 동안 약 66 ppb 증가하여 연평균 증가율이 5.6 ppb yr<sup>-1</sup>이었으며, N<sub>2</sub>O는 1999년에 314 ppb에서 2015년에 327 ppb로 증가하여 연평균 증가율이 0.7 ppb yr<sup>-1</sup>으로 나타났다. 한편, 인위적 오염물질의 영향을 비교적 덜 받는 제주도에서도 2014년 도로부문 온실가스 배출량 증가율이 1년 전인 2013년에 비해 28% 정도 증가하여 전국 평균인 5%의 약 5배가 넘게 나타난바 있다(<http://www.ts2020.kr>).

최근 IPCC 5차 보고서에 따르면(IPCC, 2013), 산업혁명 이전(1750년)을 기준으로 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC-11, CFC-12 등) 농도 변화에 따른 2011년의 총 복사강제력은 2.83 (2.26~3.40) W m<sup>-2</sup>로 추정되어, 2005년 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O에 따른 총 복사강제력 2.3 (2.1~2.5) W m<sup>-2</sup>보다 23% 정도 증가하였으며, CO<sub>2</sub> 단독으로는 1.68 (1.33~2.03) W m<sup>-2</sup>로 추정된 바 있다. 미국 하와이 Mauna Loa에서 CO<sub>2</sub>에 따른 복사강제력 산출에 의하면, 1979년에 1.03 W m<sup>-2</sup>였으나 2004년에 1.63 W m<sup>-2</sup>로 증가한 것으로 발표된 바 있다(Hofmann et al., 2006). 또한 Iacono et al. (2008)은 대기의 구성요소가 변했다고 가정하여 3가지 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)의 농도가 각각 369 ppm, 1760 ppb, 316 ppb로 증가했을 경우, 이들의 총 복사강제력은 1.68 W m<sup>-2</sup>로 추정된다고 밝혔다. 한편, 우리나라 안

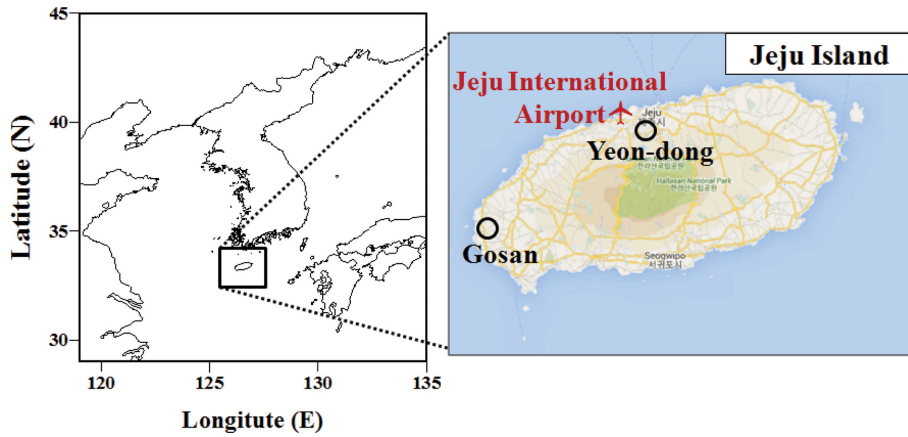
면도에서 CO<sub>2</sub> 농도 변화 및 복사강제력 산출 결과를 보면, 1999년부터 2006년까지 8년간 복사강제력이 약 0.29 W m<sup>-2</sup> (11.9%) 정도 증가하였는데(Kim et al., 2007), 이는 전 지구적 복사강제력의 증가(0.18 W m<sup>-2</sup> (7.4%))보다도 더 큰 수치를 나타냈다. 이외에도, 국내 공항별(인천공항 외 14 곳) 항공기에서 배출되는 온실가스(특히, CO<sub>2</sub>)에 의한 복사강제력을 산출한 결과, 가장 복사강제력이 높게 산출된 인천공항에서 약 30 mW m<sup>-2</sup>로 추정된바 있다(Song et al., 2014a, 2014b)(항공기 CO<sub>2</sub> 배출에 의한 전 지구 복사강제력은 약 18~28 mW m<sup>-2</sup>, IPCC, 1990).

앞서 언급한 바와 같이, 국내외적으로 온실가스 농도 및 이에 따른 복사강제력 관련 연구는 대부분 배경지점을 중심으로 국한되어 수행되어 온 반면, 이러한 도심지점과 배경지점에서의 복사강제력 및 기온변화를 비교 분석한 연구는 극히 드물다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 청정지역인 제주도의 도심지점(연동)과 배경지점(고산)을 대상으로 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) 농도의 시간적 변화(연변화, 월변화 등)를 분석하였으며, 대기복사전달모델을 이용하여 온실가스 농도에 따른 두 지점에서의 복사강제력과 기온변화를 추정하고 서로 비교 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대상지역, 자료 및 방법

본 연구에서는 제주도 도심 및 배경지점을 대상으로 온실가스 농도에 따른 복사강제력 및 기온변화를 분석하고자 한다. 제주도에서 온실가스 농도를 관측하는 지점은 연동과 고산 2곳뿐이며, 각각의 위치는 Fig. 1에 나타낸다. 연동지점은 온실가스 중 CO<sub>2</sub>만 관측하고 있으며, 제주도 보건환경연구원에서 2010년~현재까지 관리·운영해 오고 있다. 고산지점에서는 3가지 온실가스 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O에 대해 기상청에서 한반도 배경대기를 분석하기 위한 목적으로 기후변화감시소를 설치하여 2002년~현재까지 지속적인 농도 관측을 수행해 오고 있다. 연동지점은 2017년 3월 기준 인구 약 43,000명으로 제주도 내에서 노형동(약 54,000명)과 이도 2동(약 51,000명)에 이어 세 번째로 인구가 많으며, 최근 인구/건물 밀집 및 관광객 수가 급증하고 있는 도심지에 속한다(<http://www.jeju.go.kr>). 고산지점은 WMO에서 권고하는 지역급 관측소의 환경조건을 만족하는 국가배경지역이며, 제주도 서쪽 해안가에 바로 인접하여 주위에 오염물질 배출원이 매우 적은 청정지역이라 할 수 있다(Fig. 1). 따라서 본 연구에서는 도심지점으로 연동을 배경지점으로 고산을 선정하였으며, 또한 두 지점을 비교분석하기 위하여 연구기간을 2010~2015년으로 정하였다. 여기서, 고



**Fig. 1.** Geographical locations of two monitoring sites, such as Yeon-dong (urban center) and Gosan sites (background), for greenhouse gases (GHGs) concentrations (open circle, ○) on Jeju Island.

산지점의 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 농도는 2010년에 3개월(1~3월), 2011년에 7개월(6~12월)의 자료 부재이며, CH<sub>4</sub>는 2010년 1~3월과 2011년 6~12월 자료 부재 이외에도 이후 4년간(2012~2015년) 자료의 부재로 인해 분석에서 제외하였다. 두 지점의 지리적 및 기상학적 특성은 선행연구(Lee et al., 2016)에 잘 나타나 있다.

제주도 도심 및 배경지점을 대상으로 온실가스에 따른 복사강제력을 산출하기 위하여 대기복사전달모델을 이용하였으며, 산업혁명 이전(1750년)의 온실가스 농도를 기준으로 연구기간(2010~2015년)에 해당하는 온실가스 농도에 의한 복사강제력을 산출하여 서로 비교하였다. 본 연구에 이용된 대기복사전달모델에 대한 자세한 내용은 2.2절에 나타난다. 일반적으로 복사강제력은 하향 복사속(radiation flux, 직달 일사와 하향산란의 합)과 상향 복사속을 계산하여 정량적으로 추정한다. 즉, 순 복사속은 하향 복사속(직달 일사와 하향산란의 합)에서 상향 복사속을 뺀 값이며, 최종적으로는 연구대상 두 지점(연동과 고산)의 온실가스 농도에 따른 순 복사속에서 산업혁명 이전의 배경농도에 따른 순 복사속의 차이가 복사강제력이 된다(식 1). 여기서 산업혁명 이전의 온실가스 농도는 CO<sub>2</sub> 280 ppm, CH<sub>4</sub> 700 ppb, N<sub>2</sub>O 270 ppb의 관측값을 이용하였다.

$$\Delta F = (F^{\downarrow} - F^{\uparrow}) - (F_{\text{Back}}^{\downarrow} - F_{\text{Back}}^{\uparrow}) \quad (1)$$

F<sup>↓</sup> = 연구대상지역 해당연도(2010~2015) 온실가스 농도에 의한 하향 복사속

F<sup>↑</sup> = 연구대상지역 해당연도(2010~2015) 온실가스 농도에 의한 상향 복사속

F<sub>Back</sub><sup>↓</sup> = 산업혁명 이전(1750년)의 온실가스 배경농도에 의한 하향 복사속

F<sub>Back</sub><sup>↑</sup> = 산업혁명 이전(1750년)의 온실가스 배경농도에 의한 상향 복사속

대상지역 온실가스 농도에 따른 평균 지상기온의 변화는 여러 선행연구에서 제시한 복사강제력(ΔF)과의 선형관계식을 이용하여 산출하였다(IPCC, 1990; Lim et al., 2006; Song et al., 2014a). 요약하면, 온실가스 농도에 따른 평균 지상기온 변화 ΔT<sub>s</sub>는 방정식 ΔT<sub>s</sub> ≈ λ · ΔF로 나타내고, 여기서 λ (K/(W m<sup>-2</sup>))는 기후민감도 변수, ΔF (W m<sup>-2</sup>)는 대류권계면에서의 복사강제력을 나타낸다. 기후민감도 변수(λ)는 비균질적으로 분포된 기후변화 인자에 의해 복사강제력은 일부 영향을 받는 것으로 밝혀졌으며, 이러한 영향을 CO<sub>2</sub> 기후민감도 변수(λ<sub>CO2</sub>)에 대한 배출물질 i의 기후민감도 변수(λ<sub>i</sub>)의 비율로 나타내며 “efficacy(ri)”라 정의하였다(Hansen et al., 2005). 즉 r<sub>i</sub> = λ<sub>i</sub>/λ<sub>CO2</sub>로 나타내며, 이를 ΔT<sub>s</sub> 산출식에 대입하면, 최종적으로 배출물질 i의 복사강제력에 의한 평균기온 변화식은 ΔT<sub>s</sub> ≈ r<sub>i</sub> · λ<sub>CO2</sub> · ΔF로 나타낼 수 있다. 여기서 λ<sub>CO2</sub>는 Ponater et al. (2006)이 제시한 0.73 (K W<sup>-1</sup> m<sup>2</sup>)의 값을 이용하였으며, CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O의 r<sub>i</sub> 값은 각각 1.18 (Ponater et al., 2006)과 1.02 (Hansen et al., 2005)를 이용하였다.

## 2.2 모델구성 및 입력 자료

본 연구에 이용된 대기복사전달모델은 흡수대 모델인 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) 모델이며, 0.25~4.0 μm의 단파, 4.0~100 μm의 장파, 그리고 0.25~100 μm의 전 파장영역에서 다중산란 및 방출 대기에 대한 대기과 지표면에서의 복사속을 계산한다(Ricchiazzi et al., 1998). 본

**Table 1.** Input parameters in the SBDART model for calculating radiative forcing due to greenhouse gases (GHGs) at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) on Jeju Island.

Site	Latitude (°N)	Longitude (°E)	GHGs	Wavelength (mm)	Surface albedo properties	Atmospheric profile
Yeon-dong	33.29	126.29	CO <sub>2</sub>	2.0-20.0	Vegetation	User specified*
Gosan	33.17	126.10	CO <sub>2</sub>	2.0-20.0	Vegetation	User specified
			CH <sub>4</sub>	5.0-10.0		
			N <sub>2</sub> O	5.0-10.0		

\*The vertical profiles of meteorological variables, such as air pressure, air temperature, water vapor density, and ozone density, were used in the SBDART model.

연구에서는 온실가스에 따른 복사강제력을 계산하기 위하여 각 물질별 전자기파를 흡수하는 주요 파장영역에 따라 다르게 구분하였다. 즉, CO<sub>2</sub>는 2.0~20.0 μm, CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O는 5.0~10.0 μm의 파장영역에 대해 모델링을 수행하였다. SBDART 모델에서 상향 및 하향으로의 복사전달 방정식들은 Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer (DISORT) 방법으로 적분되며 (Stamnes et al., 2000), 이러한 방법은 수평으로 평행한 대기 성층에서 복사전달 문제를 해결하는데 있어 수치적으로 안정된 해를 제공한다(Ricchiazzi et al., 1998). 또한 이 모델은 기본적으로 지표면에서 100 km 고도까지 총 33개의 층으로 구성되어 있고, 대류권에서는 1 km 연직해상도를 가진다. 본 연구에서는 구름 또는 에어로졸에 의한 효과를 배제하기 위하여 순수 기체 대기(즉, 레일리 대기)의 경우에 대해 연구 대상지역의 온실가스에 따른 복사강제력을 계산하였다.

SBDART 모델 수행을 위한 주요 입력변수는 대기 프로파일(기온, 기압, 오존밀도 등), 지표면 분광 알베도, 파장별 복사량, 태양천정각(solar zenith angle, SZA) 등이 있다(Ricchiazzi et al., 1998). 사용자들은 모델에서 기본적으로 제공하는 입력변수들의 적절한 값을 선택하거나, 직접 데이터베이스를 만들어 대상지역 고유의 특성을 반영하여 모델을 실행할 수 있다. Table 1은 SBDART 모델을 수행하기 위해 필요한 주요 입력변수를 나타낸다. 본 연구의 두 지점(연동과 고산)에서 이용된 지표면 분광 알베도는 모델 내에서 제공하는 표면 유형(해수, 호수, 맑은 물, 초목, 눈, 모래) 중에서 초목(vegetation) 환경의 값을 이용하였으며, SZA는 두 지점의 위·경도와 날짜 및 시간을 지정해 줌으로써 모델 내에서 각각 따로 계산되었다. 또한 이 모델에서는 총 6개의 대기 프로파일(열대, 중위도 여름, 중위도 겨울, 극 여름, 극 겨울, 미국 표준대기 US62)이 기본적으로 제공된다(McClatchey and Selby, 1972). 이러한 대기 프로파일은 고도별 기압, 기온, 수증기 밀도, 오존 밀도의 연직 자료를 포함하고 있으며, 필요에 따라 사용자가 대기 프로파일을 직

접 구성할 수 있다. 본 연구에서는 산업혁명 이전(1750년)에 대한 복사속(식 (1))을 계산하기 위해 모델 내 기본 대기 프로파일(US62)을 적용하였으며, 해당연도(2010~2015)의 복사속을 계산하기 위해서는 제주지역의 특성을 반영한 대기 프로파일을 구성하였다. 즉, 대상지역의 연동은 고층관측이 수행되고 있지 않아 제주 고산의 고층기상자료를 이용하여 두 지점의 기압 및 기온 연직 프로파일(지상~33 km 고도)을 구성하였으며, 하루 2번 관측되는 연직 자료의 월평균을 분석에 이용하였다. 또한 수증기 밀도는 아래의 수증기압 방정식(식 (2))를 통해서 식 (3)과 같이 산출하였는데(KMA, 2017), 마찬가지로 두 지점 모두 제주 고산의 고층기상자료를 이용하였다.

$$e = \rho_v R_v T \quad (2)$$

$$\rho_v = \frac{e}{R_v T} \quad (3)$$

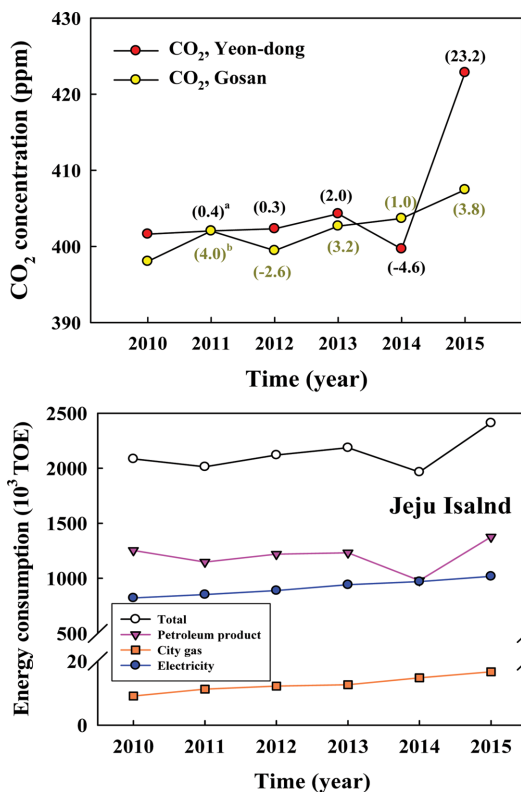
여기서,  $e$ 는 수증기압(hPa),  $\rho_v$ 는 수증기의 밀도(kg m<sup>-3</sup>),  $R_v$ 는 수증기에 대한 비기체 상수( $R_v = 461 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ),  $T$ 는 수증기의 온도(K)를 나타낸다. 또한 상대습도(RH)를 이용한 수증기압( $e$ )의 산출식은 다음과 같다.

$$e = RH \times \frac{e_s}{100} \quad (4)$$

여기서,  $e_s$ 는 포화수증기압을 나타내며 다음과 같다.

$$e_s = 6.1078 \exp \frac{19.8t}{273+t} \approx 6.1 \exp 0.073t \quad (5)$$

여기서  $t$ 는 기온(°C)을 나타내며, 식 (5)에서 구해진  $e_s$ 를 식 (4)에 대입하여  $e$ 를 구하고 이를 다시 식 (3)에 대입하여 최종적으로 수증기 밀도( $\rho_v$ )를 계산하였다. 이외에도, 오존 밀도의 경우 고산 및 연동지점에서는 오존의 연직관측을 수행하지 않으므로 국내 유일한 포항기상대(36°01'48", 129°22'12")의 오존존데 자료를 이용하였다. 이 자료는 대류권 및 성층권을 중심으로 오존의 연직분포를 살펴보기 위해 1995년부터 현재까



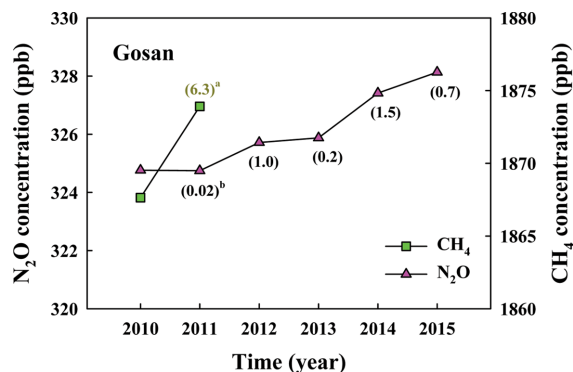
**Fig. 2.** Annual mean concentrations of CO<sub>2</sub> (ppm) at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) and energy consumption (10<sup>3</sup> TOE) on Jeju Island during 2010~2015. Values at Gosan site in 2010 and 2011 represent yearly mean CO<sub>2</sub> concentrations, which were calculated using the data sets except for CO<sub>2</sub> concentrations during Jan.-Mar. 2010 and Jun.-Dec. 2011 due to data unavailability. The superscripts “a” and “b” in parenthesis indicate the increased concentrations compared to those in just previous year at Yeon-dong and Gosan sites, respectively.

지 주 1회(대략 0600 UTC) 관측을 지속적으로 실시 해오고 있다. 여기서, 2010년 1월, 4~6월, 9월, 11월과 2012년 8~9월, 2013년 1월, 2014년 12월은 오존의 연 직분포 자료 부재로 분석에서 제외하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 도심 및 배경지점에서의 온실가스 농도 분석

연구기간(2010~2015년) 제주도 연동 및 고산지점의 온실가스 농도에 따른 복사강제력과 기온변화를 비교 분석하기 위하여, 먼저 두 지점의 온실가스 농도의 시·공간적 변화를 살펴보았다. Figure 2는 연구기간동안 두 지점의 연평균 CO<sub>2</sub> 농도(괄호 안의 숫자는 전년



**Fig. 3.** Annual mean concentrations of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O at Gosan site on Jeju Island during 2010~2015. Values at this site in 2010 and 2011 represent yearly mean CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O concentrations, which were calculated using the data sets except for their concentrations during Jan.-Mar. 2010 and Jun.-Dec. 2011 due to data unavailability. Additionally, mean CH<sub>4</sub> concentrations during 2012~2015 were excluded due to lack of its concentration data during the same period. The superscripts “a” and “b” in parenthesis indicate the increased concentrations compared to those in just previous year for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O, respectively.

도 대비 증가량)와 제주도 에너지 소비를 나타낸다. 고산지점의 2010년과 2011년 CO<sub>2</sub> 농도는 각각 3개월(1~3월)과 7개월(6~12월)의 자료 부재로 인해 이 기간이 제외된 연평균을 의미하며(2.1절 참조, 분석에서도 제외하였다. 전반적으로, 연동지점은 연구기간동안 2014년을 제외하고 꾸준히 증가하는 패턴이며, 고산지점도 4년간(2012~2015년) 미세한 증가 패턴을 보였다. 또한, 2014년을 제외하고 대부분 연동지점(400~422 ppm)이 고산보다(399~407 ppm) 높은 농도가 관측되었다. 연동지점의 CO<sub>2</sub>는 2010년 대비 2015년에 약 20 ppm 증가, 고산지점은 2012년 대비 2015년에 약 8 ppm 증가하여 각각 연간 3.3 ppm과 1.3 ppm씩 증가하는 추세였다. 이외에도, 고산지점과 달리 연동지점의 CO<sub>2</sub> 농도는 2010~2013년까지 미세하게 증가, 2014년에 감소, 그리고 2015년에 다시 큰 폭의 증가를 보였다. 지역별 자료의 부재로 제주도 전체 에너지 소비의 연변화와 비교한 결과(Fig. 2), 연동지점이 제주도 인구밀집 지역임을 감안해 볼 때(고산에 비해 인구수 5.2배, 세대수 4.8배) 이 지점의 CO<sub>2</sub> 농도 연변화는 화석연료 및 전력 사용에 따른 에너지 소비가 일부 영향을 준 것으로 추정할 수 있다(Korea Energy Economics Institute, 2016). 또한 CO<sub>2</sub>는 식물의 광합성에 의해 소멸 메커니즘을 가지는데 배경지점인 고산은 연동에 비해 산림이 많아 광합성 작용이 활발하여 상대적으로 낮은 농도를 나타낸 것으로 사료된다.

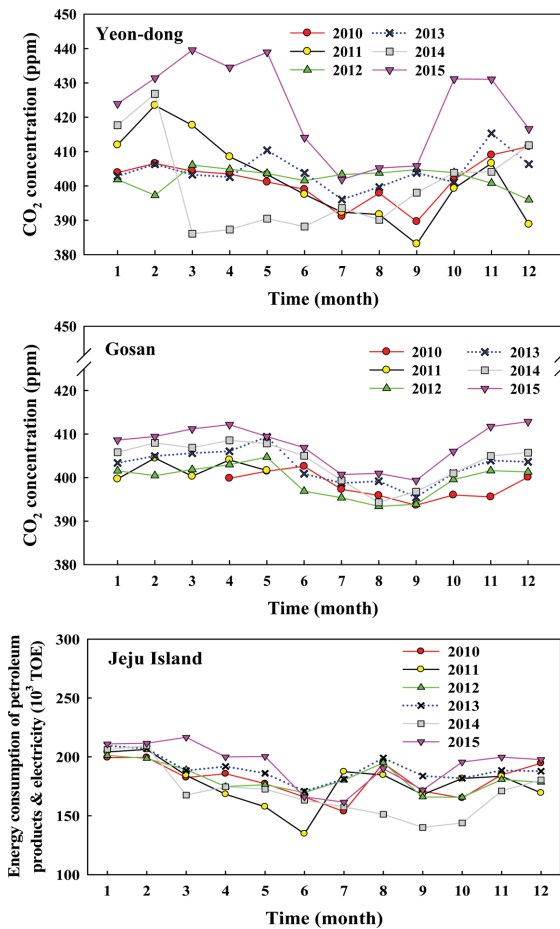


Fig. 4. Same as Fig. 2 except for the monthly variations of CO<sub>2</sub> concentrations and energy consumption.

Figure 3은 2010~2015년 기간 고산지점의 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 농도의 연변화를 나타내며, 괄호 안의 숫자들은 전년도 대비 증가률을 의미한다. 2.1절에서 언급했듯이, 2010년과 2011년 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 농도는 각각 3개월(1~3월)과 7개월(6~12월)의 자료 부재로 인해 이 기간을 제외하고 연평균을 산정하였으며, 추가적으로 CH<sub>4</sub>는 2012~2015년 동안에도 관측 자료가 없는 관계로 연평균 산정 및 분석에서 제외하였다. 따라서 대기 중 CH<sub>4</sub>는 2010년과 2011년의 연평균 농도만 있어 연변화 경향을 설명하는데 한계가 있으며, N<sub>2</sub>O는 2012~2015년 동안 해마다 매우 미미한 농도 차이로 뚜렷한 증가 패턴이 나타나지 않았다.

연구기간동안(2010~2015년) CO<sub>2</sub> 농도의 월/계절 변화를 보면(Fig. 4), 대부분 연구기간동안(2012년과 2015년 제외) 연동지점의 CO<sub>2</sub> 농도는 겨울철과 늦가을에 가장 높은 편이고, 다음으로 봄철 순이며, 여름철에

가장 낮게 관측되었다. 하지만 2015년의 CO<sub>2</sub> 농도는 봄철에 월등히 높고, 다음으로 가을철, 겨울철, 여름철 순서로 나타난 반면, 2012년은 전체적으로 뚜렷한 월/계절 변화가 나타나지 않았다. 한편, 고산지점은 2012~2015년 동안(자료 부재로 2010년과 2011년은 제외) 대체로 늦가을부터 봄철까지 높게 나타났으며, 여름철에 상대적으로 가장 낮았다. 겨울철에는 주거 및 상업 지역 등 여러 인구/건물 밀집지역에서 주로 난방 및 산업시설의 화석연료 사용 증가로 인해 CO<sub>2</sub> 농도가 높게 나타나는데(Chung and Tans, 2000), 앞서 언급한 바와 같이 연동지점이 고산지점에 비해 많은 인구수 및 세대수로 인한 인위적 활동이 더 활발하여 높은 농도가 관측된 것으로 추정된다. 또한 여름철에는 식물의 광합성 작용과 함께 기온증가로 인해 대기 연직혼합이 활발해져 CO<sub>2</sub> 농도가 낮아지는 반면 겨울철에는 식물의 광합성 활동이 줄어들어 상대적으로 높은 농도가 나타나는데(Pearman and Hyson, 1981), 고산지점이 연동보다 산림이 많아 활발한 광합성 작용으로 인해 대부분(2010년과 2014년 일부 월은 제외) 낮은 농도가 나타난 것으로 사료된다.

월별로 자세히 보면(Fig. 4), 연동지점의 CO<sub>2</sub> 농도는 2015년 3월에 가장 높고 2011년 9월에 가장 낮았으며, 고산지점은 2015년 12월에 가장 높게 2012년 8월에 가장 낮게 관측되었다. 또한 전반적으로 연동의 CO<sub>2</sub> 농도는 연도별 월변화 폭이 큰 반면, 고산 배경지점은 상대적으로 월변화 폭이 작고 연도별로 월변화가 서로 유사하였다. 고산 배경지점과 달리, 연동에서 CO<sub>2</sub> 농도의 연도별 월변화 폭이 크게(특히, 2014년과 2015년) 차이가 나는 원인을 살펴보기 위해 제주도 전체(지역별 자료 부재로) 석유제품과 전력 사용에 따른 에너지 소비의 월변화를 분석하였다(Fig. 4). 제주도 석유제품과 전력 사용에 따른 월별 에너지 소비 자료는 각각 한국석유공사 공공데이터([http://www.knoc.co.kr/sub05/sub05\\_13\\_4\\_2.jsp](http://www.knoc.co.kr/sub05/sub05_13_4_2.jsp))와 한국전력공사 전력빅데이터 센터(<http://home.kepcoco.kr/kepcoco/BD/bigData/main/bigDataMain.do>)에서 수집하였다. 대체로 2015년에는 1~5월과 10~12월에 에너지 소비가 높고, 2014년에는 1~2월과 11~12월에 높은 패턴이었으며, 이것은 같은 연도의 연동지점 CO<sub>2</sub> 농도의 월변화 패턴과 일부 비슷하였다. 또한 다른 연도의 에너지 소비의 월변화도 대부분 겨울철 또는 늦가을에 높은 편이었다. 연동지점의 자료가 아니라 정확한 해석에는 한계가 있겠지만, 연동지점(제주 도심지)의 연도별(특히, 2014년과 2015년) CO<sub>2</sub> 농도의 월변화 패턴은 일부 석유제품과 전력 사용에 따른 에너지 소비의 영향으로 추정할 수 있다.

연구기간동안(2010~2015년) 고산지점에서의 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O의 월변화를 살펴보았다(Fig. 5). 고산지점의 CH<sub>4</sub>

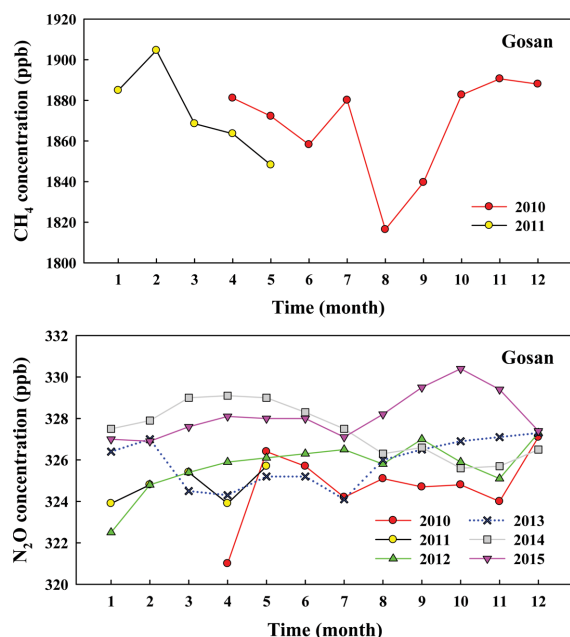


Fig. 5. Same as Fig. 3 except for the monthly variations of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O concentrations.

농도는 자료 부재의 기간이 너무 많아(2.1절 참조) 자료의 신뢰성이 매우 떨어지므로 월/계절 변화를 분석하기가 어려웠다. 한편 N<sub>2</sub>O의 경우, CO<sub>2</sub>에 비해 전체 연구기간동안 월/계절 변동의 특성이 뚜렷하지 않았으며, 연도별로 최고 또는 최저 농도가 나타난 월이 서로 다른 양상을 보였다. 대류권에서 소멸하는 메커니즘을 가진 CO<sub>2</sub>(주로 여름철 식생에 의해)와 CH<sub>4</sub>

(대기 중 OH 라디칼과의 반응에 의해)과 달리, N<sub>2</sub>O는 성층권에서 주로 광분해로 소멸되므로 지상 관측 지점인 고산에서 N<sub>2</sub>O 농도의 계절적 변화를 명확하게 설명하기에는 많은 한계가 있는 것으로 사료된다(KMA, 2013).

### 3.2 온실가스에 따른 복사강제력 및 기온변화 추정

Table 2는 대기복사전달모델(SBDART)을 통한 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 연평균 복사강제력과 기온변화를 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 고산지점의 2010년 1~3월과 2011년 6~12월은 자료 부재로 인해 복사강제력 산정에서 제외하였으며, 대기 프로파일의 오존밀도 또한 2010년 1월, 4~6월, 9월, 11월과 2012년 8~9월, 2013년 1월, 2014년 12월의 자료 부재로 인해 두 지점의 복사강제력 산정에서 제외하였다. 따라서 연동지점은 2011~2015년 고산지점은 2012~2015년에 대해 분석하였다. 전반적으로, 연동과 고산지점에서 추정된 연평균 복사강제력은 각각 2.12 (2012년)~2.41 W m<sup>-2</sup> (2015년)와 2.10 (2012년)~2.22 W m<sup>-2</sup> (2013년)의 범위였으며, 연평균 기온변화는 각각 1.55 (2012년)~1.76 K (2015년)와 1.53 (2012년)~1.62 K (2013년)로 나타났다. IPCC 5차 보고서에서 전 지구적 온실가스에 따른 총 복사강제력이 2005년에 1.68 W m<sup>-2</sup>에서 2011년에 2.83 W m<sup>-2</sup>으로 증가하였고(IPCC, 2013), 하와이 Mauna Loa에서는 CO<sub>2</sub>에 따른 복사강제력이 1979년 1.03 W m<sup>-2</sup>에서 2004년 1.63 W m<sup>-2</sup>으로 약 30년 가까이 지나면서 불과 0.6 W m<sup>-2</sup> 정도 증가하였다(Hofmann et al., 2006). 따라서 연동과 고산지점에서의 연도별 복사강제력 값 차이는 비록 연구기간과 대상지역은 다르지만 전 지구 또는 배경지점의 값과 비

Table 2. Yearly variations of radiative forcing and mean temperature changes due to CO<sub>2</sub> concentrations for the period from 1750 (background CO<sub>2</sub> = 280 ppm) to the respective years (2010~2015) (see Eq. (1)) at urban center (Yeon-dong) and background sites (Gosan) on Jeju Island.

Site	Yeon-dong		Gosan		
	Year	$\Delta F$ (W m <sup>-2</sup> )	Temp. change (K yr <sup>-1</sup> )	$\Delta F$ (W m <sup>-2</sup> )	Temp. change (K yr <sup>-1</sup> )
	2010	2.00 (1.93) <sup>a</sup>	1.46	2.10 (1.88)	1.53
	2011	2.13 (1.93)	1.56	2.29 (1.93)	1.67
	2012	2.12 (1.94)	1.55	2.10 (1.90)	1.53
	2013	2.25 (1.96)	1.64	2.22 (1.94)	1.62
	2014	2.13 (1.90)	1.55	2.20 (1.96)	1.61
	2015	2.41 (2.20)	1.76	2.20 (2.00)	1.61

Values at Yeon-dong and Gosan sites were calculated using the data sets except for the vertical ozone profiles during Jan., Apr.-Jun., Sept., and Nov. 2010, Aug.-Sept. 2012, Jan. 2013, and Dec. 2014, due to data unavailability (see Section 2.2). In addition, the CO<sub>2</sub> concentrations at Gosan site in 2010 and 2011 were excluded from the calculation of radiative forcing and mean temperature changes, due to data unavailability during Jan.-Mar. 2010 and Jun.-Dec. 2011, respectively (see Section 2.1).

<sup>a</sup>The numbers in parenthesis were calculated from the simplified expressions for calculating radiative forcing of greenhouse gas CO<sub>2</sub>.

**Table 3.** Yearly variations of radiative forcing and mean temperature changes due to CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O concentrations for the period from 1750 (background CH<sub>4</sub> = 700 ppb and N<sub>2</sub>O = 270 ppb) to the respective years (2010~2015) (see Eq. (1)) at the background site (Gosan) on Jeju Island.

GHGs	CH <sub>4</sub>		N <sub>2</sub> O	
	Year	$\Delta F$ (W m <sup>-2</sup> )	Temp. change (K yr <sup>-1</sup> )	$\Delta F$ (W m <sup>-2</sup> )
2010	0.301	0.356	0.145	0.148
2011	0.538	0.635	0.169	0.172
2012	-	-	0.149	0.152
2013	-	-	0.153	0.156
2014	-	-	0.149	0.152
2015	-	-	0.146	0.149

Values at Gosan site were calculated using the data sets except for the vertical ozone profiles during Jan., Apr.-Jun., Sept., and Nov. 2010, Aug.-Sept. 2012, Jan. 2013, and Dec. 2014, due to data unavailability (see Section 2.2). In addition, the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O concentrations at this site in 2010 and 2011 were excluded from the calculation of radiative forcing and mean temperature changes, due to data unavailability during Jan.-Mar. 2010 and Jun.-Dec. 2011, respectively. In the case CH<sub>4</sub>, its mean concentrations during 2012~2015 were also excluded from the radiative forcing and mean temperature changes due to lack of its concentration data during the same period (see Section 2.1).

교할 만한 수준으로 의미가 있다고 판단된다. 한편, 고산지점의 2011년 복사강제력은 그 해 6~12월 동안 CO<sub>2</sub> 농도 자료가 없는 관계로 여름철이 고려되지 않아 연동지점보다 다소 높게 추정된 것으로 사료된다 (Table 2). 참고로, 두 지점 모두 2011년도에 동일 기간(1~5월)에 대한 복사강제력을 산출한 결과 연동지점이 2.32 W m<sup>-2</sup>로 고산지점의 2.29 W m<sup>-2</sup>보다 다소 높게 산출되었다. 이러한 두 지점의 복사강제력 차이는 고산에 비해 연동지점의 높은 CO<sub>2</sub> 농도(연동에서 많은 에너지 소비(Figs. 2와 4), 상대적으로 작은 광합성 작용)와 모델링 수행시 농도 이외에도 입력조건(SZA의 시간변화 및 지리(위치) 좌표 등)에 따른 복사속 차이가 일부 영향을 준 것으로 추정된다.

본 연구에서는 CO<sub>2</sub>에 따른 복사전달모델(SBDART)의 결과와 IPCC에서 제시되고 있는 복사강제력 단순 추정식(IPCC, 2007)에 의해 산출된 복사강제력을 서로 비교하였다(Table 2의 괄호). IPCC 추정식은 대상 지역 CO<sub>2</sub> 농도 변화에 의존하여 복사강제력을 계산하는 단순화된 식을 의미하며, 대상지점별 산업혁명 이전의 CO<sub>2</sub> 배경농도와 해당연도의 CO<sub>2</sub> 농도를 각각 입력자료로 이용하여 복사강제력을 계산한다. 즉, 연동과 고산 두 지점의 해당연도 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 순 복사속과 산업혁명 이전의 CO<sub>2</sub> 배경농도에 따른 순 복사속의 차이가 복사강제력이 된다. 여기서 CH<sub>4</sub>과 N<sub>2</sub>O는 산출된 복사강제력 수치가 너무 작고 자료의 수가 적어서 정확한 비교분석이 어려운 관계로 제외하였다. 전반적으로, 두 지점 모두 SBDART에 의해 산출된 CO<sub>2</sub>에 의한 복사강제력은 추정식을 통해 산출된 것과 비교해 다소 높게(각각 최고 1.2배) 나타났다. 단순 추정식은 전 지구 규모에서 대상지역의 기

상조건 등 여러 요소가 상수로 입력하게 되어 있는 반면, SBDART 모델은 대상지역의 위치와 시간 변화에 따라 기상조건(대기 프로파일, SZA에 의한 시간변화 등)을 적절히 고려하여 모델링을 수행하므로 보다 현실적인 결과가 산출된 것으로 사료된다(Song et al., 2014b). 또한 SBDART 모델과 달리 IPCC 단순 추정식은 대상지점별 CO<sub>2</sub> 농도에 따라 복사강제력이 크게 좌우되므로 CO<sub>2</sub> 농도가 높은 연동지점이 고산지점보다 상대적으로 높은 복사강제력이 산출된 것으로 사료된다.

Table 3은 고산지점에서 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O에 의한 연평균 복사강제력과 기온변화를 나타낸다. 2.1절과 2.2절에 언급한 바와 같이, CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O 농도 자료의 부재기간, 모델 입력 자료 중 오존 연직 자료의 부재기간을 제외하고 각각 연평균 복사강제력과 기온변화를 산출하였다. 연구기간동안 CH<sub>4</sub>에 의한 복사강제력과 기온변화는 각각 0.301 (2010년)~0.538 W m<sup>-2</sup> (2011년), 0.356 (2010년)~0.635 K (2011년)의 범위로 나타났으나, 많은 자료 부재로 인해 이 지점에서의 복사강제력 및 기온변화에 대한 비교분석은 어려웠다. 한편, N<sub>2</sub>O에 의한 복사강제력과 기온변화는 2010~2011년(자료 부재로 인해)을 제외하고 각각 0.146 (2015년)~0.153 W m<sup>-2</sup> (2013년), 0.149 (2015년)~0.156 K (2013년)의 범위로 연구기간동안 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다.

연구기간동안 모델링을 통해 산출된 연동 및 고산 지점의 CO<sub>2</sub>에 의한 월평균 복사강제력과 기온변화를 보면(Table 4), 고산 배경지점의 복사강제력 2.18 (1.16~2.71) W m<sup>-2</sup>보다 도심지에 위치하는 연동지점의 복사강제력이 2.21 (1.22~2.82) W m<sup>-2</sup>로 다소 높게 산출되었다. 2010년과 2011년은 입력 자료(예, CO<sub>2</sub>



**Table 4.** Same as Table 2 except for the monthly variations of radiative forcing ( $W m^{-2}$ ) and mean temperature changes ( $K month^{-1}$ ) due to  $CO_2$  concentrations during the study period.

Year	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
Month	$\Delta F$	Temp. change	$\Delta F$	Temp. change	$\Delta F$	Temp. change	$\Delta F$	Temp. change	$\Delta F$	Temp. change	$\Delta F$	Temp. change
Jan.	-/-	-/-	2.23/2.19	1.63/1.60	2.41/2.41	1.76/1.76	-/-	-/-	2.65/2.46	1.93/1.80	2.44/2.23	1.78/1.63
Feb.	2.21/-	1.61/-	2.40/2.37	1.75/1.73	1.82/1.86	1.33/1.36	2.37/2.34	1.73/1.71	2.59/2.32	1.89/1.69	2.69/2.36	1.96/1.72
Mar.	2.41/-	1.76/-	2.41/2.34	1.76/1.71	2.28/2.22	1.66/1.62	2.51/2.54	1.83/1.85	1.98/2.35	1.45/1.72	2.82/2.41	2.06/1.76
Apr.	-/-	-/-	2.70/2.71	1.97/1.98	2.44/2.40	1.78/1.75	2.59/2.64	1.89/1.93	2.20/2.55	1.61/1.86	2.80/2.48	2.04/1.81
May	-/-	-/-	1.84/1.85	1.34/1.35	2.00/2.00	1.46/1.46	2.37/2.36	1.73/1.72	2.08/2.35	1.52/1.72	2.53/2.14	1.85/1.56
Jun.	-/-	-/-	2.19/-	1.60/-	1.83/1.76	1.34/1.28	1.65/1.62	1.20/1.18	1.64/1.85	1.20/1.35	1.91/1.82	1.39/1.33
Jul.	1.61 <sup>a</sup> /1.69 <sup>b</sup>	1.18 <sup>c</sup> /1.23 <sup>d</sup>	1.62/-	1.18/-	1.22/1.16	0.89/0.85	1.80/1.82	1.31/1.33	1.71/1.78	1.25/1.30	1.90/1.88	1.39/1.37
Aug.	1.89/1.86	1.38/1.36	1.43/-	1.04/-	-/-	-/-	2.10/2.09	1.53/1.53	1.72/1.77	1.26/1.29	1.82/1.78	1.33/1.30
Sept.	<sup>e</sup> -/-	-/-	1.99/-	1.45/-	-/-	-/-	2.09/1.97	1.53/1.44	1.96/1.94	1.43/1.42	2.11/2.03	1.54/1.48
Oct.	2.33/2.24	1.70/1.64	2.18/-	1.59/-	2.46/2.38	1.80/1.74	2.22/2.21	1.62/1.61	2.32/2.27	1.69/1.66	2.67/2.30	1.95/1.68
Nov.	-/-	-/-	2.35/-	1.72/-	2.40/2.42	1.75/1.77	2.59/2.41	1.89/1.76	2.55/2.55	1.86/1.86	2.81/2.51	2.05/1.83
Dec.	2.79/2.61	2.04/1.91	2.25/-	1.64/-	2.31/2.40	1.69/1.75	2.42/2.38	1.77/1.74	-/-	-/-	2.43/2.48	1.77/1.81

<sup>a,c</sup>Mean radiative forcing and temperature changes at Yeon-dong site, respectively.

<sup>b,d</sup>Mean radiative forcing and temperature changes at Gosan site, respectively.

<sup>e</sup>Not calculated.

**Table 5.** Same as Table 3 except for the monthly variations of radiative forcing ( $W m^{-2}$ ) and mean temperature changes ( $K month^{-1}$ ) due to  $CH_4$  and  $N_2O$  concentrations during the study period.

GHGs	Year						
	Month	2010	2011	2012	2013	2014	2015
$CH_4$	Jan.	-	0.65/0.56	-	-	-	-
	Feb.	-	0.58/0.50	-	-	-	-
	Mar.	-	0.62/0.53	-	-	-	-
	Apr.	-	0.60/0.52	-	-	-	-
	May	-	0.24/0.21	-	-	-	-
	Jun.	-	-	-	-	-	-
	Jul.	0.12 <sup>a</sup> /0.10 <sup>b</sup>	-	-	-	-	-
	Aug.	0.14/0.12	-	-	-	-	-
	Sept.	<sup>c</sup> -	-	-	-	-	-
	Oct.	0.35/0.30	-	-	-	-	-
	Nov.	-	-	-	-	-	-
	Dec.	0.60/0.51	-	-	-	-	-
$N_2O$	Jan.	-	0.18/0.13	0.19/0.15	-	0.20/0.15	0.16/0.12
	Feb.	-	0.18/0.13	0.14/0.10	0.19/0.14	0.18/0.13	0.18/0.13
	Mar.	-	0.18/0.13	0.16/0.12	0.19/0.14	0.17/0.12	0.18/0.13
	Apr.	-	0.20/0.15	0.16/0.12	0.19/0.14	0.18/0.13	0.17/0.12
	May	-	0.12/0.09	0.11/0.08	0.16/0.01	0.15/0.11	0.12/0.09
	Jun.	-	-	0.10/0.07	0.09/0.07	0.10/0.07	0.09/0.07
	Jul.	0.09/0.07	-	0.06/0.04	0.10/0.07	0.09/0.07	0.10/0.07
	Aug.	0.11/0.08	-	-	0.12/0.09	0.10/0.07	0.10/0.07
	Sept.	-	-	-	0.12/0.09	0.12/0.09	0.13/0.09
	Oct.	0.16/0.12	-	0.18/0.13	0.15/0.11	0.15/0.11	0.16/0.12
	Nov.	-	-	0.19/0.15	0.19/0.14	0.20/0.15	0.19/0.14
	Dec.	0.22/0.16	-	0.21/0.14	0.18/0.14	-	0.18/0.14

<sup>a</sup>Mean radiative forcing.

<sup>b</sup>Mean temperature changes.

<sup>c</sup>Not calculated.

농도) 부재로 인해 복사강제력과 기온변화 산출에 한계가 있어 정확한 해석이 어려웠지만, 나머지 대부분 기간에서는 연동 및 고산지점 모두 겨울철 또는 봄철에 높고 여름철에 낮은 계절적 특성을 보였다. 이것은 두 지점에서 CO<sub>2</sub> 농도의 계절 특성(겨울철, 늦가을에 높고 여름철이 낮음)과 일부 유사한 패턴이었다(Fig. 4). 연구기간동안 연동지점에서 가장 높게 산출된 복사강제력과 기온변화는 2015년 3월에 각각 약 2.82 W m<sup>-2</sup>와 2.06 K이며, 2012년 7월에 약 1.22 W m<sup>-2</sup>와 0.89 K로 가장 낮게 나타났다. 고산지점의 경우, 가장 높은 복사강제력과 기온변화는 2011년 4월에 약 2.71 W m<sup>-2</sup>와 1.98 K이며, 가장 낮게 산출된 것은 2012년 7월에 약 1.16 W m<sup>-2</sup>와 0.85 K 정도였다. 한편, 고산지점의 CH<sub>4</sub> 농도에 따른 월평균 복사강제력 및 기온변화는 연변화와 마찬가지로 자료 부재의 기간이 너무 많아 비교분석이 어려웠다(Table 5). 이외에도, N<sub>2</sub>O 농도에 의한 월평균 복사강제력과 기온변화는 연구기간동안 대체로 여름철에 가장 낮게 나타났으나 전반적으로 계절별 큰 차이를 보이지 않았고, 연도별로 최고 복사강제력 및 기온변화가 추정된 월은 서로 다르게 나타났다(Fig. 5).

3가지 온실가스 농도와 복사강제력의 월변화 비교에서 복사강제력과 농도가 높게/낮게 나타난 월이 일부는 일치하고 일부는 서로 다른 양상을 보였다(Fig. 4와 Table 4, Fig. 5와 Table 5). 이는 연구기간의 모델링 수행시 온실가스 농도 이외에도 여러 복합적인 요인들(대기 프로파일, 지표면 알베도, SZA의 시간변화 및 위치 등)이 기인한 것으로 추정된다. 또한 연동지점의 2012년 7월 CO<sub>2</sub> 농도는 다른 연도의 7월에 비해 높은 수준이었으나 같은 기간의 복사강제력은 최저(약 1.22 W m<sup>-2</sup>)로 나타났으며, 고산지점의 2011년 4월 농도는 다른 연도의 4월에 비해 낮은 수준이었으나 같은 기간 복사강제력은 오히려 가장 높게(약 2.71 W m<sup>-2</sup>) 나타났다(Fig. 4와 Table 4). 본 연구에서는 이러한 복사강제력의 변화를 보다 상세히 분석하기 위하여 연구기간동안(2010~2015년) 오존의 연직분포를 월별로 살펴보았다(그림 제외). 일반적으로 상층 오존은 태양복사를 흡수하므로 농도가 증가할수록 지표에 도달하는 태양복사에너지를 줄어들키게 하여 결국 복사강제력을 감소시키는데 기여한다(IPCC, 2013). 예를 들어, 연동지점의 2012년 7월에 높은 CO<sub>2</sub> 농도가 관측되었으나 같은 기간에 상층 오존농도는 약 7.1 ppm으로 다른 연도의 7월(6.4~6.9 ppm)에 비해 가장 높게 나타나 결국 복사강제력을 감소시킨 것으로 사료된다. 아울러 고산지점의 2011년 4월에 CO<sub>2</sub> 농도는 낮았으나 같은 기간에 상층 오존농도가 가장 낮게(약 5.2 ppm, 다른 연도의 4월에는 6.0~6.9 ppm) 나타나 복사강제력을 높이는 데 일부 기여한 것으로 추정

된다. 또한 복사강제력과 상층 오존 사이의 상관성도 음의 상관관계( $r = -0.4773 \sim -0.5618$ )가 나타났다(그림 제외).

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 6년(2010~2015년)동안 제주도 도심지점(연동)과 배경지점(고산)에서 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O)에 의한 복사강제력을 대기복사전달모형(SBDART)을 이용하여 산출하였으며, 평균 기온변화는 복사강제력과 기온변화의 선형관계식을 이용하여 산출하고 그 결과를 비교 분석하였다. 전반적으로, 연동과 고산지점의 CO<sub>2</sub>에 따른 연평균 복사강제력과 기온변화는 2014년을 제외하고 대체로 두 지점의 CO<sub>2</sub> 농도의 연변화 특성과 유사하게 연동지점이 고산지점보다 높게 추정되었다. 한편, 고산지점의 N<sub>2</sub>O에 의한 복사강제력과 기온변화는 해마다 매우 미미한 차이였으며, CH<sub>4</sub>의 경우 많은 자료 부재로 인해 비교분석이 어려웠다. 이와 같이 고산(배경지점)에 비해 연동지점의 연평균 복사강제력이 높게 추정된 것은 도심지(인구/건물 밀집지역)인 연동에서의 많은 에너지 소비와 상대적으로 작은 광합성 작용으로 인한 CO<sub>2</sub> 농도의 증가가 주요 원인으로 사료되고, 또한 모델 입력조건(SZA의 시간변화 및 지리(위치) 좌표 등)에 따른 복사속의 차이가 일부 영향을 미친 것으로 추정된다.

월 및 계절별 복사강제력 특성을 보면, 대부분 연구기간동안 두 지점 모두 CO<sub>2</sub>에 의한 복사강제력은 봄철(3월 또는 4월) 또는 겨울철(1월 또는 2월)에 높게, 여름철(6~8월)에 가장 낮게 산출되었다. N<sub>2</sub>O의 경우, 복사강제력이 높게 나타난 계절은 연도별로 일부 서로 달랐으나 가장 낮게 나타난 계절은 대부분 여름철이었다. 이외에도, 복사강제력과 온실가스 농도가 높게/낮게 나타난 월이 일부 서로 다른 양상을 보였는데, 이것은 모델링 수행시 온실가스 농도뿐만 아니라 주요 입력조건(예, 대기 프로파일의 오존분포, 지표면 알베도, SZA의 위치 및 시간변화)의 차이가 복합적으로 영향을 준 것으로 추정된다.

결론적으로, 본 연구의 주요 결과는 대상지역 온실가스에 의한 기후환경변화 예측 및 평가, 기후변화 대응방안 마련에 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 사료된다. 그러나 제주 전역을 2곳의 온실가스 관측지점만으로 해석하고 평가하기에는 공간적으로 한계가 있다. 또한 복사전달모형링 수행을 위해 필요한 대상지역의 입력 자료가 충분히 확보되고 자료의 불확실도를 보완한다면(예, 파장에 따른 지표 알베도 및 지역별 상세 오존 연직 자료 등), 향후 대상지역 기후에 미치는 온실가스에 따른 복사효과를 보다 정확하게 모의할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화감시예측 및 국가정책지원강화 사업(KMIPA 2015-2050)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2017R1A2B2003616).

## REFERENCES

- Chung, Y.-S., and P. Tans, 2000: Monitoring greenhouse gases at Tae-Ahn Peninsula, Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 25-34.
- Hansen, J., and Coauthors, 2005: Efficacy of climate forcings. *J. Geophys. Res.*, **110**, D18104.
- Hofmann, D. J., J. H. Butler, E. J. Dlugokencky, J. W. Elkins, K. Masarie, S. A. Montzka, and P. Tans, 2006: The role of carbon dioxide in climate forcing from 1979 to 2004: Introduction of the annual greenhouse gas index. *Tellus*, **58**, 614-619.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, **113**, D13103.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1990: *Climate Change 1990: IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, 410 pp.
- \_\_\_\_\_, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 996 pp.
- \_\_\_\_\_, 2013: *IPCC Fifth Assessment Report - Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 1535 pp.
- Kim, J.-S., H.-J. Yoo, J.-H. Jo, C.-H. Jo, M.-S. Kim, and J.-W. Gong, 2007: Changes in CO<sub>2</sub> concentration and radiative forcing characteristics in Anmyeondo. *Proc. of the Autumn Meeting of Korean Meteorological Society*, 228-229 (in Korean).
- Korea Energy Economics Institute, 2016: *Yearbook of Regional Energy Statistics 2016*, Korea Energy Economics Institute, 312 pp.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2013: Report of Global Atmosphere Watch 2012, KMA, 299 pp.
- \_\_\_\_\_, 2014: Report of Global Atmosphere Watch 2013, KMA, 288 pp.
- \_\_\_\_\_, 2017: Training Manual for Weatherman (Physical Meteorology), KMA, 370 pp.
- Lee, S.-J., S.-K. Song, and Y.-H. Park, 2016: A study on changes in CO<sub>2</sub> concentrations and their impact on radiative forcing at urban center and background sites on Jeju Island in recent years. *J. Environ. Sic. Int.*, **25**, 973-987 (in Korean with English abstract).
- Lim, L., D. S. Lee, R. Sausen, and M. Ponater, 2006: Quantifying the effects of aviation on radiative forcing and temperature with a climate response model. *Proc. of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC)*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 202-208.
- McClatchey, R. A., and J. E. A. Selby, 1972: Atmospheric attenuation of HF and DF laser radiation. AFCRL-72-0312, 143 pp.
- Pearman, G. I., and P. Hyson, 1981: The annual variation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration observed in the northern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, **86**, 9839-9843.
- Ponater, M., S. Pechtl, R. Sausen, U. Schumann, and G. Hüttig, 2006: Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment. *Atmos. Environ.*, **40**, 6928-6944.
- Ricchiazzi, P., C. Yang, C. Gautier, and D. Sowle, 1998: SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 2101-2114.
- Song, S.-K., Z.-H. Shon, and J.-H. Jeong, 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, doi:10.5572/KOSAE.2014.30.3.223 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 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, doi:10.5572/KOSAE.2014.30.5.411 (in Korean with English abstract).
- Stamnes, K., S.-C. Tsay, W. Wiscombe, and I. Laszlo, 2000: DISORT, A general-purpose Fortran Program for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Scattering and Emitting Layered Media: Documentation of Methodology. DISORT Report v1.1, Goddard Space Flight Center, 112 pp.
- World Meteorological Organization (WMO), 2016: Greenhouse Gas Bulletin, No. 11, WMO, 4 pp.