



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주도 배경 및 도심지역의
온실가스에 의한 기후환경 변화 연구:
복사전달모델과 추정식과의 비교

濟州大學校 大學院

地球海洋科學科

李 秀 正

2017年 2月

석사학위논문

제주도 배경 및 도심지역의
온실가스에 의한 기후환경 변화 연구:
복사전달모델과 추정식과의 비교

제주대학교 대학원

지구해양과학과

이 수 정

2016년 12월

제주도 배경 및 도심지역의 온실가스에 의한 기후환경 변화 연구 : 복사전달모델과 추정식과의 비교

지도교수 송 상 근

이 수 정

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2016年 12月

이수정의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장	원	재홍	인
위	원	송 상근	인
위	원	김 태현	인

제주대학교 대학원

2016年 12月

A Study on Climate Environmental Change due to
Greenhouse Gases at Background and Urban Center
sites on Jeju Island: Comparison between Radiative
Transfer Model and Simplified Expressions

Soo-jeong Lee
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Science

2017. 2.

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 재료 및 방법	5
2.1. 연구방법 및 자료	5
2.2. 단순 추정식과 모델 구성	8
2.2.1. 단순화된 추정식	8
2.2.2. 대기복사전달모델	10
제 3 장 결과 및 고찰	14
3.1. 제주도 배경 및 도심지점에서의 온실가스 농도 변화 분석	14
3.1.1. 연변화 및 월/계절 변화	14
3.1.2. 주중/주말 및 시간 변화	25
3.2. 제주도 배경 및 도심지점에서의 복사강제력 및 기온변화	28
3.2.1. 단순 추정식을 이용한 복사강제력 및 기온변화 산출	28
3.2.2. 대기복사전달모델을 이용한 복사강제력 및 기온변화 산출	33
3.3. 아시아 배경지점의 온실가스 농도 변화에 따른 복사강제력 및 기온변화 비 교	42
3.3.1. 온실가스 농도변화 분석	42
3.3.2. 대기복사전달모델을 이용한 복사강제력 및 기온변화 비교	47

제 4 장 요약 및 결론	55
참 고 문 헌	58
Abstract	63

List of Figures

- Fig. 1. Geographical locations of two monitoring sites (Yeon-dong and Gosan) for greenhouse gases concentration (open circle, ○) on Jeju, South Korea and Asia background site and Mauna Loa for greenhouse gases (circle, ●). 7
- Fig. 2. Annual mean concentrations of CO₂ at and background sites (Gosan) and urban center (Yeon-dong) on Jeju Island during 2010–2015. ... 15
- Fig. 3. The number of households at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. 16
- Fig. 4. Traffic volume at Gosan and Yeon-dong during 2010–2014. 15
- Fig. 5. Total precipitation at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. 17
- Fig. 6. Annual mean concentrations of CH₄ and N₂O at background sites (Gosan) on Jeju Island during 2010–2015. 18
- Fig. 7. Monthly concentrations of CO₂ at (a) Gosan and (b) Yeon-dong on Jeju Island during 2010–2015. 20
- Fig. 8. Box plots for monthly variations of CO₂ concentrations at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. 21
- Fig. 9. Monthly variations of CH₄, and N₂O concentrations at background sites (Gosan) on Jeju Island during 2010–2015. 24
- Fig. 10. Weekday and weekend variations of mean CO₂ concentrations at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. 25
- Fig. 11. Diurnal variations of hourly mean CO₂ concentrations at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. 27
- Fig. 12. Mean radiative forcing and mean temperature changes calculated from the simplified expressions for greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. Except for the radiative forcing (F) and mean temperature change (T). 29

Fig. 13. Mean radiative forcing and mean temperature changes simulated by the SBDART for greenhouse gas (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) at Gosan and Yeon-dong during 2010-2015. Except for the radiative forcing (F) and mean temperature change (T).	34
Fig. 14. Monthly vertical profiles of ozone observed at Pohang during (a) 2010, (b) 2011, (c) 2012, (d) 2013, (e) 2014, and (f) 2015.	38
Fig. 15. Comparison of radiative forcing by CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O between IPCC fourth, fifth assessment report and result of Gosan and Yeon-dong during 2010-2015 simulated by the SBDART.	41
Fig. 16. Annual mean concentrations of CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O site (Gosan, Anmyeon-do, Minamitorishima, Ryori, Waliguan, Ulaan) and Mauna Loaduring 2010-2015.	43
Fig. 17. Monthly mean concentrations of CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O at Asia background site (Gosan, Anmyeon-do, Minamitorishima, Ryori, Waliguan, Ulaan) and Mauna Loa during 2010-2015.	46
Fig. 18. Annual mean radiative forcing by CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O at Asia background site and Mauna Loa during 2002-2015.	48
Fig. 19. Annual mean temperature change by CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O at Asia background site and Mauna Loa during 2002-2015.	49
Fig. 20. Box plots for CO ₂ radiative forcing at Asia background sites and Mauna Loa during 2010-2015.	53
Fig. 21. Comparison of mean radiative forcing by CO ₂ between simplified expression, SBDART model with US62 and user specified.	54

List of Tables

Table 1. Simplified expressions for calculating radiative forcing of greenhouse gases such as CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O (IPCC, 2013).	8
Table 2. Input parameter on several factors for the estimation of radiative forcing at study area during the study period (2002–2015).	13
Table 3. A statistical summary of CO ₂ concentrations (ppm) at Gosan and Yeon-dong during the study period.	22
Table 4. Monthly variations mean radiative forcing by CO ₂ concentration at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015 calculated from the simplified expressions.	31
Table 5. Monthly variations mean radiative forcing by CH ₄ , N ₂ O concentration at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015 calculated from the simplified expressions.	32
Table 6. Monthly variations of radiative forcing and temperature change simulated by the SBDART for CO ₂ concentration at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015.	36
Table 7. Monthly variations of radiative forcing changes simulated by the SBDART for CH ₄ , N ₂ O concentration at Gosan during 2010–2015. ..	37
Table 8. Correlation between radiative forcing and ozone in 25 km–30 km at the Gosan and Yeon-dong during the study period (2010–2015).	40
Table 9. Annual growth rate of CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O concentration at Asia background site and Mauna Loa.	45
Table 10. Comparison of mean radiative forcing by CO ₂ between simplified expression and SBDART model with US62 atmospheric profile at Asia background site and Mauna Loa during 2002–2015.	52

1. 서론

일반적으로 온실가스는 대기의 선택적 복사 흡수 성질 때문에 단파장인 태양 복사에너지를 투과시키고, 지표로부터 방출되는 장파 복사를 대부분 흡수하여 지표의 온난화를 야기한다. 이러한 온실가스는 대기 중 체류기간이 각각 다른데, CO₂의 대기 중 체류기간은 50~200년 정도이며, CH₄과 N₂O는 각각 12년, 120년이다. 이렇듯 긴 체류시간으로 한 번 배출되면 대기에 지속적으로 누적되어 지구 온난화를 가속시키는 역할을 한다(기상청, 2013). 지구온난화에 기여하는 정도에 따라 온실가스별로 지구온난화지수(Global Warming Potential)을 가지며, CO₂의 지구온난화지수를 1로 보았을 때, CH₄과 N₂O의 지구온난화지수는 각각 21, 310로 CO₂보다 높다(Denman et al., 2007; Lelieveld et al., 1998). 그러나 배출량 측면에서 CO₂의 배출량이 다른 온실가스에 비해 훨씬 많기 때문에 CO₂는 온실효과에 대한 기여도가 약 60~63%로서 CH₄(20%)과 N₂O(6%)에 비해 매우 높게 차지하여 지구온난화에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다(Hofmann, 2006).

오늘날 온실가스에 의한 지구온난화는 화석연료의 연소와 산업 활동에 따른 인위적 오염물질 방출로 인해 전 지구적인 문제로 대두되고 있으며, 미래를 위해 해결해야 할 가장 시급한 문제 중 하나이다(IPCC, 2013). 온실가스의 배출량과 농도는 인간의 산업 활동이 활발해진 1차 산업혁명시대(18세기 후반)을 지나오면서 급격하게 증가해 왔다(IPCC, 2007). 세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization)의 2015 온실가스 보고서와 미 해양대기국(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에 따르면, CO₂의 전 지구적 농도가 1차 산업혁명 이전(1750년)에는 280 ppm이었으나 이후 급격하게 증가하여 왔다고 보고된 바 있다. 예를 들어, 1999년 연평균 368 ppm에서 2015년 400 ppm으로 지난 17년간 약 1.9 ppm/yr씩 증가한 셈이며, 산업혁명 이전인 1750년과 비교하여 144% 증가하였다(WMO, 2016; <http://www.noaa.gov/>). 또 다른 온실가스인 CH₄와 N₂O는 산업혁명 이전에는 각각 700 ppb, 270 ppb이었으나, 1999년 1783 ppb,

314 ppb에서 2015년에는 1845 ppb, 328 ppb로 측정되어 지난 17년간 3.6, 0.8 ppb/yr 씩 증가한 추세이며, 산업혁명 전과 비교하면 CH₄와 N₂O는 각각 256%, 121%씩 증가했다(WMO, 2014; NOAA, 2014).

한반도의 경우, 안면도 지구대기감시관측소에서 1999년 CO₂ 농도는 370.7 ppm에서 2015년에 407 ppm으로 지난 17년간 약 2.1 ppm/yr씩 증가하여 전 지구적 연평균 증가율보다 다소 높게 나타났다(기상청, 2014). 참고로 한반도의 다른 배경지점에서 2015년 CO₂ 연평균 농도는 고산 406.5 ppm, 독도 404.3 ppm, 울릉도 404.2 ppm의 순으로 나타났다. 안면도의 CH₄와 2015년 평균 농도는 1976.6 ppb로 1999년과 비교하여 지난 17년간 66 ppb 증가하여 5.6 ppb/yr씩 증가하였고, N₂O는 1999년 314 ppb에서 2015년에 327.4 ppb로 증가하여 0.7 ppb/yr씩 증가하였다. 한편, 제주도는 대도시와 멀리 떨어져 있어 지리적 및 기상학적으로 도심지로부터 배출되는 인위적 오염물질의 영향을 비교적 덜 받는 청정지점이다. 그러나, 2014년 제주지역 도로부문 온실가스 배출량 증가율이 2013년에 비해 27.8% 증가하여 전국 평균인 5%의 5배가 넘으며, 전국에서 가장 높은 것으로 나타났다(<http://www.ts2020.kr>). 이것 외에도 여러 가지 요인들에 의해 제주도에서도 온실가스 농도가 가파르게 증가하는 추세이다. 따라서 지구온난화의 주범으로 간주되는 온실가스 농도증가는 전 세계적으로는 물론이고, 한반도 및 제주지역에서도 기후변화에 있어 매우 중요한 사안이다.

현재와 미래의 기후변화에 대응방안을 제시하고 미래의 기후를 전망하기 위해서 기후환경 변화에 영향을 미치는 대표적인 요인인 온실가스를 보다 정확하게 분석하는 것이 중요하며 오늘날 온실가스 농도 변화에 대해 국내·외에서는 많은 선행연구가 수행되어오고 있다(박기준 등, 2005; 반영운 등, 2012; 정유란 등, 2007; 조창범 등, 2005; Brittain et al., 2013; Büns et al., 2012; Cervený et al., 2002; Chung et al., 2000; Keeling et al., 1976; Liu et al., 2009; McNeil et al., 2003; Pearman and Hyson, 1981; Shoichi et al., 2003; Ziska et al., 2004). 온실가스 농도에 대해 배경과 도심지점을 비교 분석한 결과, 2002년 기간 미국의 대도시와 시골 지역의 CO₂ 농도 변화 분석 결과, 대도시에서 시골지역에 비해 CO₂ 농도가 현저하게 높았는데, Baltimore는 CO₂ 평균 농도가 466 ppm, 그로부터 약 10 km 떨어진 공원은 401 ppm, 50 km 떨어진 농장에서는 385 ppm으로 나타났

으며(Ziska et al., 2004), 국내 연구 중 2006~2007년간 도시와 전원의 CO₂ 농도 분석 결과 서울, 수원, 이천의 연평균 대기 중 CO₂ 농도는 각각 439 ppm, 419 ppm, 416 ppm으로 나타났다(정유란 등, 2007). 이와 같이 배경과 도심지점 간 CO₂ 농도 차이가 있음을 확인하였다. 제주도 내에서는 고산을 중심으로 CO₂ 농도 변화 분석에 대한 연구가 다양하게 수행되어 왔으나, 대부분의 연구가 고산지점에 국한되어 이루어졌다(주옥정 등, 2007; 김승연 등, 2011, 김승연 등, 2014).

지구온난화의 주된 물질인 온실가스는 지구-대기 시스템의 에너지 균형이 받는 영향에 있어 양(+의 복사강제력)으로 작용한다(IPCC, 2013). 복사강제력이란, 지구가 흡수하는 일사량과 그 중 다시 우주로 방출되는 에너지의 차이로, 1m² 면적 당 W 단위를 이용해서 정량화하여 나타내며, 지구가 방출하는 에너지보다 흡수하는 에너지가 더 커서 지구의 온도가 올라갈 때는 양의 강제력이라고 하고, 반대의 경우는 음의 강제력이라고 한다(<http://www.doopedia.co.kr>). 정부 간 기후변화 위원회(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)는 지구대기 중의 온실가스들의 농도를 바탕으로 지구 복사강제력을 계산한다.

최근 IPCC 4차, 5차 보고서에 따르면, 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 2005년 CO₂, CH₄, N₂O의 증가로 인한 복합 복사강제력인 2.3(2.1~2.5) W/m²보다 23% 증가하였으며, CO₂ 단독으로는 1.68(1.33~2.03) W/m²의 복사강제력이 추정된바 있다(IPCC, 2013). 이외에도 미국 Hawaii Mauna Loa를 중심으로 복사강제력에 대해 분석한 Hofmann et al.(2006)의 연구에 의하면, CO₂에 의한 복사강제력은 1979년 1.03 W/m²였으나, 2004년 1.63 W/m²로 증가하였으며, Iacono et al.(2008)은 대기의 구성요소가 변했을 경우를 가정하여 복사강제력을 산출하였는데, CO₂, CH₄, N₂O의 농도가 각각 369 ppm, 1760 ppb, 316 ppb로 증가하였을 경우 1.68 W/m²의 복사강제력을 가진다고 하였다. 국내의 경우, 온실가스와 복사강제력에 대한 국내 연구(송상근 등, 2014a, 2014b)에서 국내 공항별(인천공항 외 14 곳) 항공기에서 배출되는 온실가스(특히 CO₂)가 복사강제력에 미치는 영향을 비교분석한 바 있었지만 배경과 도심지점에서의 복사강제력 및 기온변화를 비교 분석한 연구는 극히 드물고, 아시아지역을 중심으로 한 연구도 없었다.

따라서 본 연구에서는 제주도의 배경(고산)과 도심지점(연동)을 대상으로 온실가스 농도의 시간변화(연별, 월별, 주중/주말, 시간)를 살펴보고, 온실가스 농도에 따른 제주도 배경과 도심지점의 기후환경 변화 즉, 복사강제력과 기온변화를 추정식과 대기 복사전달모델을 이용하여 분석하였다. 또한, 한반도와 아시아 배경지점에서의 온실가스 농도 변화와 이에 따른 복사강제력의 변화를 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구방법 및 자료

제주도 고산(배경)과 연동(도심) 지점에서 온실가스 농도에 따른 복사강제력 및 기온변화를 분석하기 위해 먼저 제주도 고산과 연동 지점의 온실가스 농도 자료를 이용하였다. 제주도에서는 고산과 연동지점에서 온실가스 농도를 관측하고 있는데, 기상청에서는 한반도 배경대기를 분석하기 위하여 제주도 서쪽에 위치한 고산에 기후변화 감시소를 설치하여 2002년부터 현재까지 CO₂를 비롯한 온실가스를 지속적으로 측정하고 있다. 또한 연동지점의 CO₂ 농도 관측은 제주도 보건환경연구원이 관리하고 있으며 2010년부터 현재까지 CO₂ 농도를 측정하고 있다. 배경과 도심지점을 비교하기 위해 연구기간을 2010~2015년으로 정하였다. 고산지점은 WMO에서 권고하는 지역급 관측소의 환경조건을 만족하는 국가 배경지역이고, 연동지점(33°29' N, 126°29' E)은 2016년에 인구가 4만 명으로 제주도 내에서 노형동과 이도 2동(각각 인구 5만 명)에 이어 3번째로 인구가 많은 도심지에 속한다(<http://www.jeju.go.kr>).

연구 대상지점에서 CO₂ 농도는 비분산적외선(NDIR: Non-dispersive infrared Dual Wavelength)방법으로 측정되었다. NDIR은 CO₂ 농도값을 정확히 측정하기 위해 여러 개의 파장으로 나누어 측정하기 때문에 정밀도가 좋으며 압력, 수분, 먼지 등에도 측정할 수 있어서 환경오염 분야에서 주로 사용되며, 장시간 연속으로 실시간 측정이 가능하고 측정값이 흔들림 없이 거의 정확하기 때문에 대중적으로 사용되는 방법이다(이재영 등, 2007).

한반도와 아시아 배경지점과의 비교를 위해 우리나라 고산과 안면도, 일본 Ryori와 Minamitorishima, 중국 Waliguan, 몽골 Ulaan 관측소를 선정하였고, 추가로 지구에서 처음으로 온실가스 관측을 시작하여 오랜 기간 관측 자료를 확보하고 있으며, 지구의 대표적인 지구급 관측소 미국 Hawaii Mauna Loa도 선정하였다(Fig. 1). 아시아 배경 지점의 온실가스 농도 자료는 WMO에서 운영하고 있

는 GAW (Global Atmosphere Watch)프로그램의 온실가스 세계자료센터 (WDCGG: World Data Center for Greenhouse Gases)에서 제공받았다. 지구대 기감시관측소란 지구환경의 실태를 정확히 파악하기 위해 구축한 것으로 지구급 관측소를 24군데, 지역급 관측소는 400여 개가 있다. 지구급 관측소는 인위적인 오염원이 거의 없는 곳 이고, 지역급 관측소는 오염원과의 거리가 40~60 km 이상 떨어져 있고 인위적으로 배출되는 오염물질의 영향이 비교적 적은 곳이다.

연동(도심)과 고산지점(배경) 및 아시아 배경지점에 대한 전체적인 온실가스 농도 변화를 비교하고자 월별 온실가스 농도 자료를 이용하여 시계열 분석(연/월 변화, 요일/시간변화) 및 통계분석을 수행하였다. 비교분석에 이용된 연구기간은 연동지점의 경우 2010~2015년이며, 고산, 안면도, Ryori, Minamitorishima, Waliguan, Mauna Loa 경우 2002~2015년이다. 고산 기후변화감시소는 2002년부터 온실가스를 측정하고 있으나, 2012년 이후의 CH₄ 자료는 결측이 많으며 신뢰성이 부족하여 제외하였고 Minamitorishima, Waliguan, Ulaan의 경우에는 N₂O 를 측정하지 않아 CO₂와 CH₄에 대해서만 분석하였다. 제주 고산 및 아시아 배경 지점의 연평균 증가율을 산정하기 위해 연구기간(2002~2015년) 온실가스 농도 자료를 이용하여 Mann-Kendall (MK) 검정법을 실시하였다. MK 검정법은 증가와 감소를 반복하는 자료의 경향을 분석하기 위해 주로 적용되는 방법으로서 선형 추세의 기울기(slope), 즉 평균 증가율을 추정하기 위하여 흔히 이용되는 방법이다(Anttila et al., 2010; Simmonds et al., 2004).

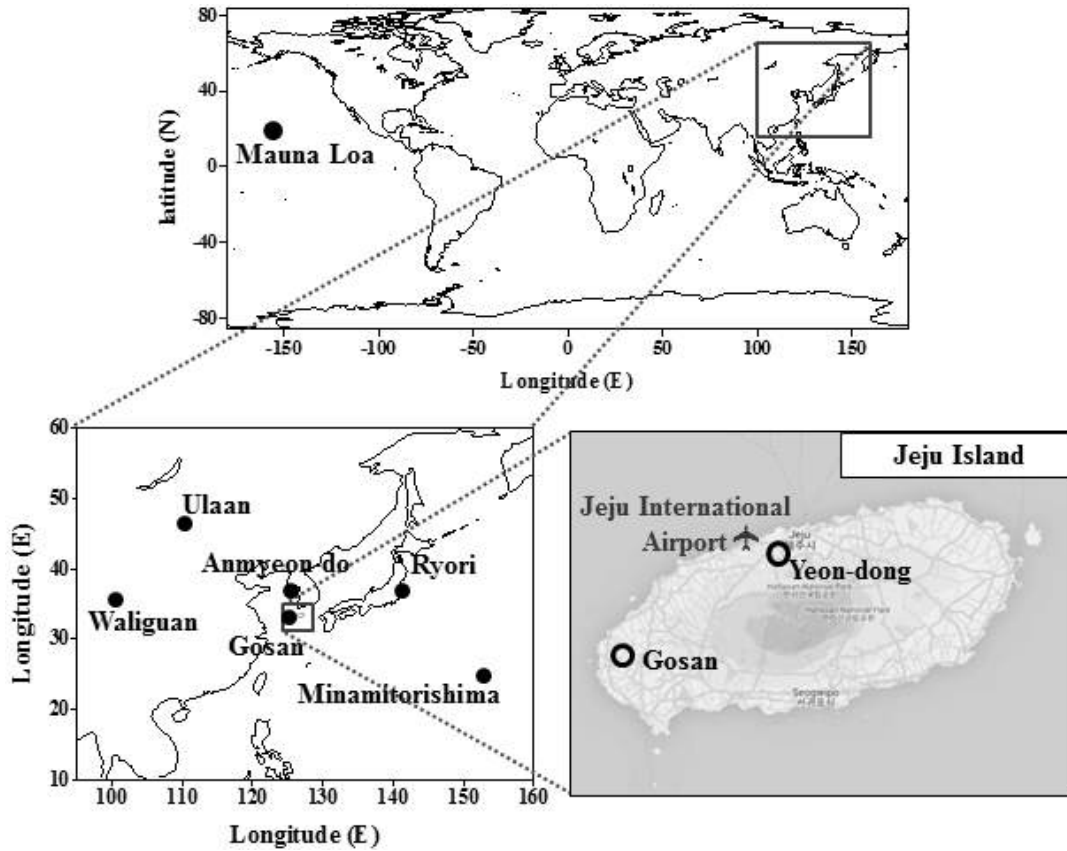


Fig. 1. Geographical locations of two monitoring sites (Yeon-dong and Gosan) for greenhouse gases concentration (open circle, ○) on Jeju, South Korea and Asia background site and Mauna Loa for greenhouse gases (circle, ●).

2.2. 단순 추정식과 모델 구성

2.2.1. 단순화된 추정식

도심과 배경지점의 CO₂ 농도에 의한 복사강제력(ΔF)을 산출하기 위하여 Hansen et al.(1987)의 연구결과를 기초로 한 단순화된 방정식을 적용하였다 (Table 1).

Table 1. Simplified expressions for calculating radiative forcing of greenhouse gases such as CO₂, CH₄, and N₂O (IPCC, 2013).

Greenhouse Gases	Simplified expressions for calculation radiative forcing (ΔF) (W/m ²)	Constants
CO ₂	$\Delta F = \alpha \ln(C/C_0)$	$\alpha = 5.35$
	$\Delta F = \alpha + \beta(\sqrt{C} - \sqrt{C_0})$	$\alpha = 4.841, \beta = 0.0906$
	$\Delta F = \alpha\{g(C) - g(C_0)\}$	$\alpha = 3.35$
CH ₄	$\Delta F = \alpha(\sqrt{M} - \sqrt{M_0}) - \{f(M, N_0) - f(M_0, N_0)\}$	$\alpha = 0.036$
N ₂ O	$\Delta F = \alpha(\sqrt{N} - \sqrt{N_0}) - \{f(M_0, N) - f(M_0, N_0)\}$	$\alpha = 0.12$

C: ambient CO₂ concentration (in ppm).

M: ambient CH₄ concentration (in ppb).

N: ambient N₂O concentration (in ppb).

C₀=280 ppm, M₀=700 ppb, and N₀=270 ppb (IPCC, 2013).

$g(C) = \ln(1 + 1.2C + 0.0005C^2 + 1.4 \times 10^{-6}C^3)$

$f(M, N) = 0.47 \ln[1 + 2.01 \times 10^{-5}(MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15}M(MN)^{1.52}]$

여기서 첫 번째의 상수(α)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 온실가스 농도 변화에 따른 복사강제력을 계산하기 위하여 단순화된 식이다. 두 번째 식의 상수(α 와 β)와 세 번째 식의 상수(α)는 각각 Shi (1992)와 Hansen et al. (1988)의 1차원 지구 평균 기상입력 자료를 바탕으로 산출되었다(송상근 등, 2014). 그리고 아래 첨자 “0”은 온실가스의 배경농도를 의미

한다. 복사강제력 계산식의 신뢰도(5% 이내)는 복사모델을 이용한 복사강제력 추정값의 비교 연구를 통하여 증명되었다(IPCC, 2007). 복사강제력 추정식에 이용된 온실가스 배경농도는 IPCC 보고서(IPCC, 2013)에 따른 산업혁명이전(1750년)의 CO₂, CH₄, N₂O 농도인 280 ppm, 700 ppb, 270 ppb를 이용하였다.

대상지역 온실가스 농도에 따른 평균기온의 변화는 주요 변수인 복사강제력(ΔF)와의 선형관계식을 이용하여 산출하였다(IPCC, 1990; Lim et al., 2006).

$$\Delta T_s \approx \lambda \cdot \Delta F \quad (1)$$

여기서 λ (°K/(Wm²))는 기후민감도 변수, ΔT_s (°K)는 평균 지표온도 변화, ΔF (W/m²)는 대류권계면에서의 복사강제력을 의미한다(송상근 등, 2014). 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(r_i)”라 정의하였으며, CO₂ 기후민감도 변수 (λ_{CO_2})에 대한 배출물질 i 기후민감도 변수(λ_i)의 비율을 의미한다.

$$r_i = \lambda_i / \lambda_{CO_2} \quad (2)$$

식 2를 식 1에 적용하면, 최종적으로 배출물질(i)의 복사강제력에 의한 평균 기온 변화식은 다음과 같다.

$$\Delta T_s \approx r_i \cdot \lambda_{CO_2} \cdot \Delta F \quad (3)$$

여기서 λ_{CO_2} 는 Ponater et al.(2006)이 제시한 0.73 (°K/(Wm²))의 값을 이용하였다. CH₄와 N₂O의 r_i 값은 각각 1.18(Ponater et al., 2006)과 1.02(Hansen et al., 2005)를 이용하였다(송상근 등, 2014b).

2.2.2. 대기복사전달모델

본 연구에서는 단순화된 추정식을 이용하여 산출한 복사강제력 변화량과 3차원 대기복사전달모델 결과를 비교 분석하였다. 사용한 복사전달 모델은 흡수대 모델인 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART) 모델이다. SBDART 모델은 단파 (0.25~4.0 μm), 장파 (4.0~100 μm), 전 파장 영역 (0.25~100 μm)에서 다중산란 및 방출 대기에 대한 대기과 지표면에서의 복사속을 계산한다(송상근 등, 2014; Ricchiazzi et al., 1998). SBDART 모델은 지표면에서 100 km 고도까지 33개 층으로 구성되어 있고 25 Km까지는 1 km 연직해상도를 가지며, 모델에 포함된 상향 및 하향으로의 복사전달 방정식들은 Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer (DISORT) 방법으로 적분될 수 있다(Stamnes et al., 2000). 이러한 방법은 수평으로 평행한 대기 성층에서 복사전달 문제를 해결하는데 있어 수치적으로 안정된 해를 제공한다(Ricchiazzi et al., 1998). 하향 총 복사속(직달 일사와 하향산란의 합)에서 상향 복사속을 뺀 것이 순 하향 복사속이 된다. 최종적으로는 연구대상지점에서 온실가스 농도에 따른 하향 총 복사속과 배경농도에 따른 하향 총 복사속의 차가 총 복사강제력이 된다(식 4).

$$\Delta F = (F_{\downarrow} - F_{\uparrow}) - (F_{Back\downarrow} - F_{Back\uparrow}) \quad (4)$$

F_{\downarrow} : 연구대상지점 농도에 의한 하향 복사속

F_{\uparrow} : 연구대상지점 농도에 의한 상향 복사속

$F_{Back\downarrow}$: 배경농도에 의한 하향 복사속

$F_{Back\uparrow}$: 배경농도에 의한 상향 복사속

SBDART 모델 실행을 위해 대기 프로파일, 에어로졸, 지표면 알베도, 파장별 복사량 등과 같은 여러 입력 변수를 위한 데이터베이스(예, atms.dat)를 운용한다(Ricchiazzi, 1998). 사용자들은 SBDART에서 기본적으로 제공하는 입력 변수들의 메뉴에서 적절한 값을 선택하여 실행하거나, 특정 입력 변수에 대한 정보를 데이터베이스를 만들어 연구지역 고유의 특성을 반영하여 모델을 실행할 수

있다. 본 연구의 주요 입력변수는 Table 2에 나타내었다. 이 외, 태양천정각은 태양 천체력 내부 알고리즘을 이용하여, 지정된 시간 및 지리적 좌표에서 계산된다. 태양천정각이란 지면에서 수직방향과 태양이 이루는 각도를 말한다. 시간에 따라 태양이 떠 있는 위치가 달라지면서 태양천정각도 달라지는데, 그에 따라 일사량이 달라져 복사강제력에도 영향을 미친다.

SBDART는 또한 6개의 기본 표면 유형(해수, 호수, 맑은 물, 초원, 눈, 모래)이 표면의 분광 반사율을 매개 변수화하기 위해 사용된다. 다양한 표면 조건의 분광 반사율은 이러한 기본 유형의 조합에 의해 근사된다. 또한, 이 모델에서는 전형적인 기후 조건을 모델링하기 위해 대기과학자들이 널리 사용하여온 6개의 표준 대기 프로파일인 열대, 중위도 여름, 중위도 겨울, 극 여름, 극 겨울 그리고 미국 표준대기 US62가 기본으로 제공된다(McClatchey et al., 1972). 이러한 표준 대기들은 압력, 온도, 수증기밀도, 오존 밀도의 연직 분포를 포함하고 있다. 또한 필요한 경우에는 기압, 기온, 수증기 밀도, 오존 밀도 등과 같은 특정 입력 변수를 고려하여 사용자가 직접 대기프로파일을 구성하고 모델을 실행할 수 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 복사강제력을 계산하기 위해 제주지역의 특성을 반영한 대기프로파일을 구성하여 모델을 수행하였다. 즉, 1~33 km까지 1 km 간격의 고도층에 해당하는 기압, 기온, 수증기 밀도는 제주도 고산지점의 고층기상자료를 이용하였다. 대기의 전체 압력에서 수증기에 의한 압력을 수증기압이라고 하며 다음의 상태방정식으로 나타낸다(<http://web.kma.go.kr>).

$$e = \rho_v R_v T \quad (5)$$

여기서 ρ_v 는 수증기의 밀도(Kg/m^3), R_v 는 수증기에 대한 비기체 상수이며, 그 값은 $R_v = 461(JK^{-1}kg^{-1})$ 이다. T 는 수증기의 온도(K)를 나타낸다. 위 식에 의한 수증기의 밀도는 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다(<http://web.kma.go.kr>).

$$\rho_v = \frac{e}{R_v T} \quad (6)$$

상대습도를 이용한 수증기압의 산출식은 다음과 같다.

$$e = RH \times \frac{e_s}{100} \quad (7)$$

여기서 RH 는 상대습도이며, 대기가 포함하고 있는 수증기의 양을 나타내는 수치이다. e_s 는 포화수증기압이며, 산출식은 다음과 같다.

$$e_s = 6.1078 \exp \frac{19.8t}{273+t} \approx 6.1 \exp 0.073t \quad (8)$$

여기서 t 는 기온(°C)이다. 제주도 고산지점에서 하루에 두 번 관측하고 고층 기상자료의 월평균 값을 이용하였으며, 고산지점에서는 오존 연직분포를 관측하지 않아서 포항 기후변화감시소에서 오존 존대를 이용하여 관측하고 있는 오존 연직분포 자료를 제공받아 이용하였다. 아시아 배경지점은 고층기상자료 및 오존 농도 연직분포자료를 구할 수 없어 모델에서 제공하는 기본 대기 프로파일 중 가장 유사한 미국 표준대기 US62를 적용시켰으며, 한반도와 아시아 배경지점을 비교할 때는 다른 아시아 배경지점과 동일하게 고산과 안면도 지점에서도 US62 대기프로파일을 이용하여 모의하였다. 복사전달모델에 이용된 온실가스 배경농도는 추정식과 마찬가지로 산업혁명이전(1750년)의 CO₂, CH₄, N₂O 농도인 280 ppm, 700 ppb, 270 ppb를 이용하였다. 평균 기온변화를 추정식과 비교하기 위해 복사전달모델에 의해 산출된 복사강제력에 기온 변화식을 적용하여 평균기온변화를 산출하였다.

Table 2. Input parameter on several factors for the estimation of radiative forcing at study area during the study period (2002–2015).

Site	Station Category	Latitude	Longitude	GHGs	Lower wavelength	Upper wavelength	Surface Albedo Properties	Atmospheric Profile
Korea Yeon-dong	Regional	33.17	126.10	CO ₂	2.0	20.0	Vegetation	User Specified
Korea Gosan	Regional	33.17	126.10	CO ₂	2.0	20.0	Vegetation	User Specified /US62
				CH ₄	5.0	10.0		
				N ₂ O	5.0	10.0		
Korea Anmyeon-do	Regional	36.53	126.32	CO ₂	2.0	20.0	Vegetation	US62
				CH ₄	5.0	10.0		
				N ₂ O	5.0	10.0		
Japan Ryori	Regional	39.03	141.82	CO ₂	2.0	20.0	Vegetation	US62
				CH ₄	5.0	10.0		
				N ₂ O	5.0	10.0		
Japan Minamitorishima	Global	24.28	153.98	CO ₂	2.0	20.0	Vegetation	US62
				CH ₄	5.0	10.0		
China Waliguan	Global	36.28	100.92	CO ₂	2.0	20.0	Vegetation	US62
				CH ₄	5.0	10.0		
Mongolia Ulaan	Regional	44.45	111.08	CO ₂	2.0	20.0	Sand	US62
				CH ₄	5.0	10.0		
USA Hawaii Maunaroa	Global	19.539	-155.578	CO ₂	2.0	20.0	Vegetation	US62
				CH ₄	5.0	10.0		
				N ₂ O	5.0	10.0		

3. 결과 및 고찰

3.1. 제주도 배경 및 도심지점에서의 온실가스 농도 변화 분석

3.1.1. 연변화 및 월/계절 변화

배경(고산) 및 도심지점(연동)에서 온실가스 농도의 경향을 살펴보고자 연구기간(2010~2015년)동안 시간에 따른 농도변화 분석과 통계분석을 수행하였으며, Fig. 2는 연동과 고산(2010~2015년)에서의 연평균 CO₂ 농도를 나타낸다. 고산지점의 CO₂ 농도는 2010년 1~3월, 2011년 6~12월의 자료 부재로 인해 분석에서 제외하였다. 고산과 연동지점에서 CO₂ 농도는 꾸준히 증가하는 추세를 보이며, 2014년을 제외하고 대부분 연동지점(399~422 ppm)이 고산보다(약 398~407 ppm) 높은 농도가 관측되었다. 연동지점에서 CO₂는 2010년에 비해 2015년에 21 ppm 증가하였고, 고산지점은 2010년에 비해 2015년에 9 ppm 증가하여 연동과 고산지점에서 각각 연간 약 3.5 ppm, 1.5 ppm씩 증가하는 추세이다.

본 연구에서 CO₂ 연변화의 특성을 살펴본 결과(Fig. 2), 고산과 연동의 특징이 서로 다르게 나타났다. 이를 파악하기 위해 CO₂ 농도변화에 영향을 주는 인위적인 요인 중 환경조건(세대 수, 교통량, 외부 유입 등) 및 기상조건(강수량 등)을 살펴보았다(Figs. 3-5). 교통량 자료의 경우, 2015년 자료가 공개되지 않은 관계로 분석에서 제외하였다. 2010년에는 고산과 연동지점에서 교통량이 많았으나, 다른 년도에 비해 강수량이 많아 세정효과에 의해 농도가 낮게 나타났으며, 2011년에는 두 지점에서 전년도 대비 세대 수의 변화는 거의 없으며, 교통량이 감소하였으나 강수량이 전년 대비 감소하여 CO₂ 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다. 2012년에는 두 지점에서 모두 교통량 감소와 강수량 증가로 인해 농도가 낮게 나타났으며, 2013년에는 두 지점 모두 세대 수와 교통량은 증가했지만 강수량이 감소하여 농도가 높게 나타난 것으로 추정된다. 또한 2014년에는 연동지점에서 교통량과 세대 수가 증가하였지만, 강수량이 비교적 많아서 농도가 낮게 나타났으며, 고산지점의 경우에는 교통량이 감소하고, 강수량도 비교적 많음에도 농

도가 높게 나타난 것은 외부 유입의 영향으로 추정된다. 2015년에는 두 지점에서 모두 강수량이 많았지만 세대 수의 급격한 증가(특히, 연동)로 인해 CO₂ 농도가 높게 나타난 것으로 사료된다.

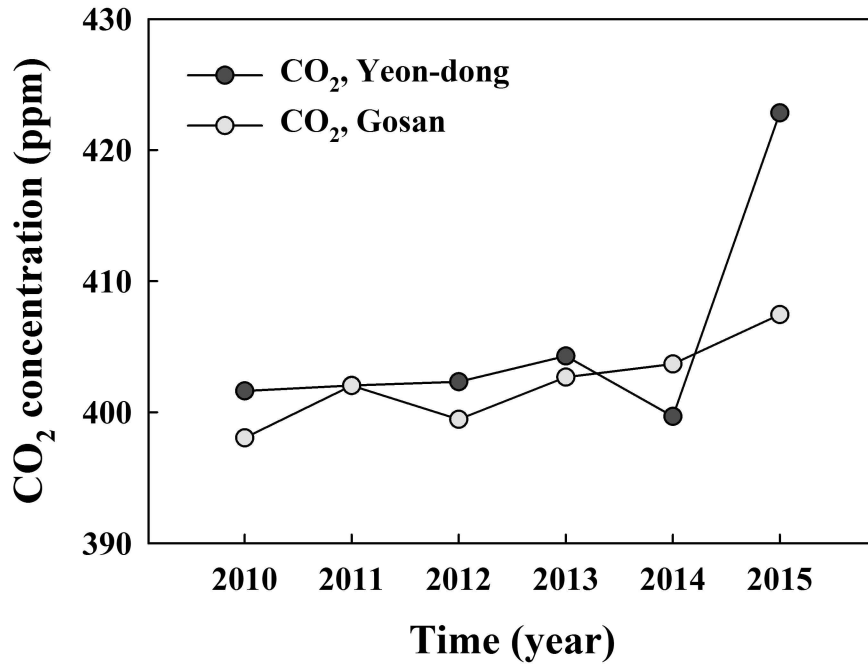


Fig. 2. Annual mean concentrations of CO₂ at and background sites (Gosan) and urban center (Yeon-dong) on Jeju Island during 2010–2015.

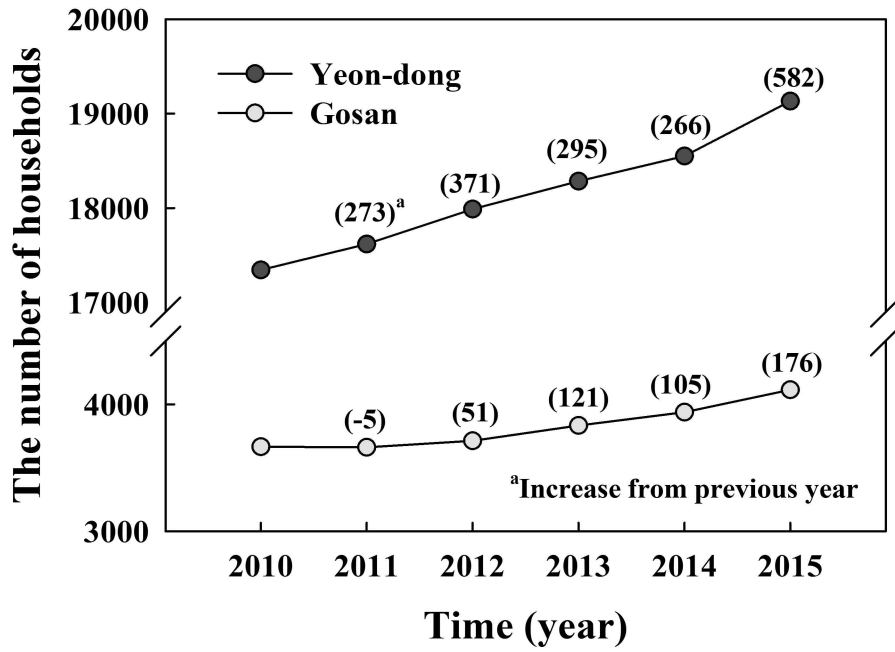


Fig. 3. The number of households at Gosan and Yeon-dong during 2010-2015.

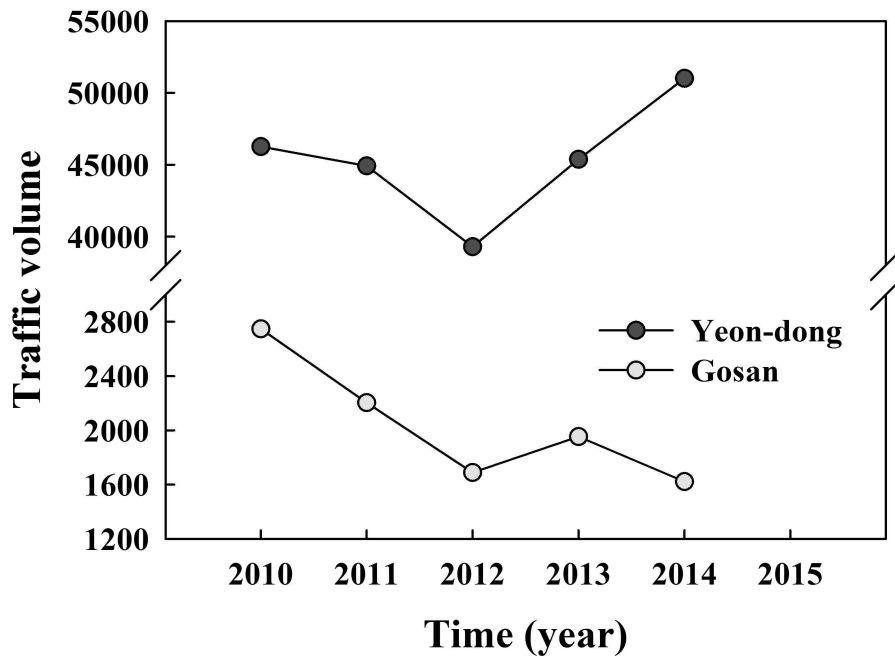


Fig. 4. Traffic volume at Gosan and Yeon-dong during 2010-2014.

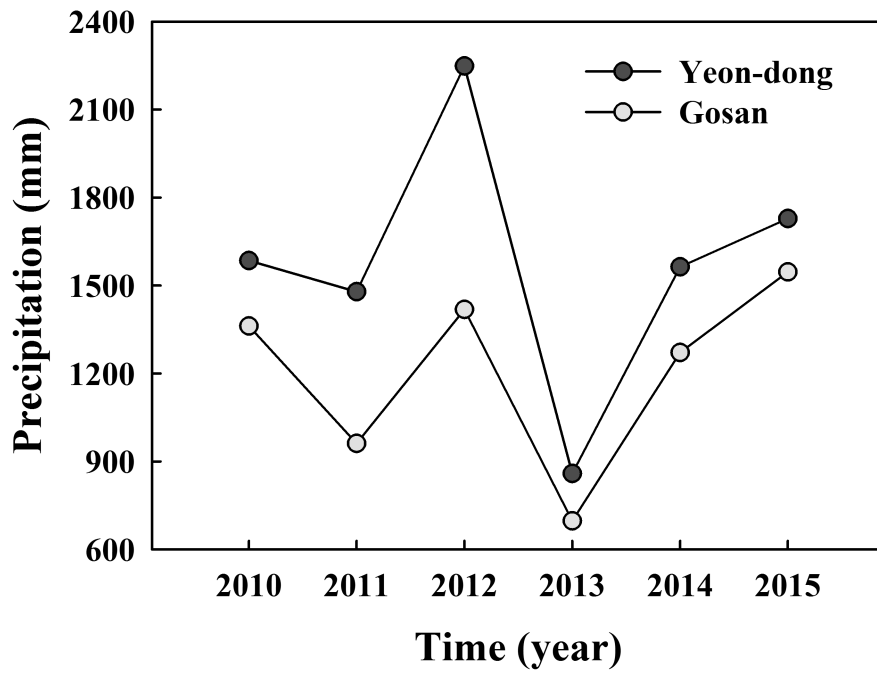


Fig. 5. Total precipitation at Gosan and Yeon-dong during 2010-2015.

Fig. 6는 2010~2015년 기간 고산지점에서 CH₄와 N₂O의 농도 연변화를 나타낸다. 고산지점의 CO₂, N₂O 농도는 2010년 1~3월, 2011년 6~12월의 자료 부재, CH₄는 2010년 1~3월과 2011년 6월 이후의 자료 부재로 인해 분석에서 제외하였다. 대기 중 CH₄은 CO₂ 농도보다 대략 200분의 1 정도로 적은 양이지만 꾸준히 증가하고 있으며, N₂O 또한 증가율은 작지만 CO₂, CH₄와 마찬가지로 꾸준히 증가하는 추세를 보인다. 고산지점의 CH₄의 경우, 2010년도에 비해 2011년에 약 6 ppb 증가하였고, N₂O는 2010년에 비해 2015년에 약 3 ppb 증가하였다. CO₂, CH₄, N₂O는 자연적이고 인위적인 발생원을 모두 다 가지고 있으며, 특히 인위적인 요인(연료 연소)은 대기 중 온실가스의 연속적인 증가에 중요한 요인이 된다(박기준 등, 2005).

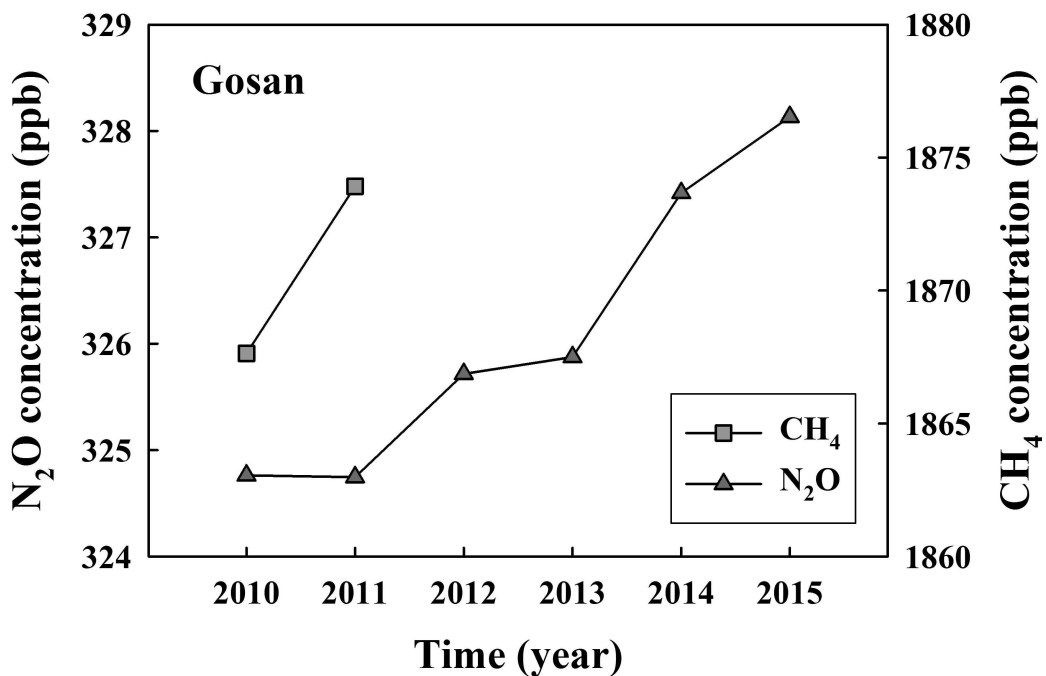


Fig. 6. Annual mean concentrations of CH₄ and N₂O at background sites (Gosan) on Jeju Island during 2010–2015.

Figs. 7~8과 Table 3은 각각 연구기간동안 연동과 고산지점의 CO₂ 농도의 월 평균 농도와 박스플롯, 그리고 통계분석 결과를 나타낸다. 전반적으로 두 지점에서 CO₂의 농도는 봄철에 가장 높고, 다음으로 겨울철, 가을철 순이며, 여름철에 가장 낮게 나타났다(Fig. 7). 이는 여름철에는 식물의 광합성 작용이 이루어지고, 기온이 높아져 대기에 연직혼합이 활발해지면서 CO₂ 농도가 낮아지는 반면, 겨울철에는 식물의 광합성 활동이 줄어들고 CO₂가 봄철까지 누적되기 때문에 최고값을 보이게 된다(Pearman and Hyson, 1981). 겨울철에도 높은 농도를 보이는데 겨울철에는 주거 및 상업 지역 등 여러 지역에서 난방 및 산업시설의 화석연료 사용 증가로 인해 CO₂ 농도가 높게 나타난다(Chung and Tans, 2000). 또한, 한반도는 CO₂ 계절변동 특징은 바람에 의한 수송과 식생의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있는데, 중국에서 불어오는 편서풍이 강한 계절에 대체로 한반도의 CO₂ 농도가 높고, 북서태평양에서 깨끗한 남서풍이 들어오는 여름철에 CO₂ 농도가 낮게 나타나는 경향을 보인다(기상청, 2013).

Fig. 8을 보면 알 수 있듯이 고산지점은 각 월에 포함하는 자료들 모두가 380~440 ppm 사이로 나타났지만, 연동지점에서 각 월에 포함하는 자료(CO₂ 농도) 중에서 최고값은 대부분 500 ppm을 초과하고 최저값은 311~354 ppm 사이로 나타났다. 즉 고산지점은 큰 변동 없이 일정한 값을 유지하는 반면, 연동지점은 도심의 전형적인 특징이 잘 반영되어 농도 변동이 훨씬 큰 것으로 사료된다(이수정 등, 2016).

월별 CO₂ 평균농도를 보면(Table 3), 연동지점에서 평균농도의 최고값이 나타난 월은 2월로 약 416.0 ppm이며, 최저값이 나타난 월은 7월로 약 396.4 ppm이다. 고산지점에서 평균농도의 최고값이 나타난 월은 5월로 405.7 ppm이며, 최저값이 나타난 월은 9월로 약 395.8 ppm이다. 연동과 고산지점에서 최저값과 최고값의 차이는 각각 20 ppm, 10 ppm으로 연동지점의 최고값과 최저값의 차이가 고산지점에 비해 약 2배 정도 크게 나타났다.

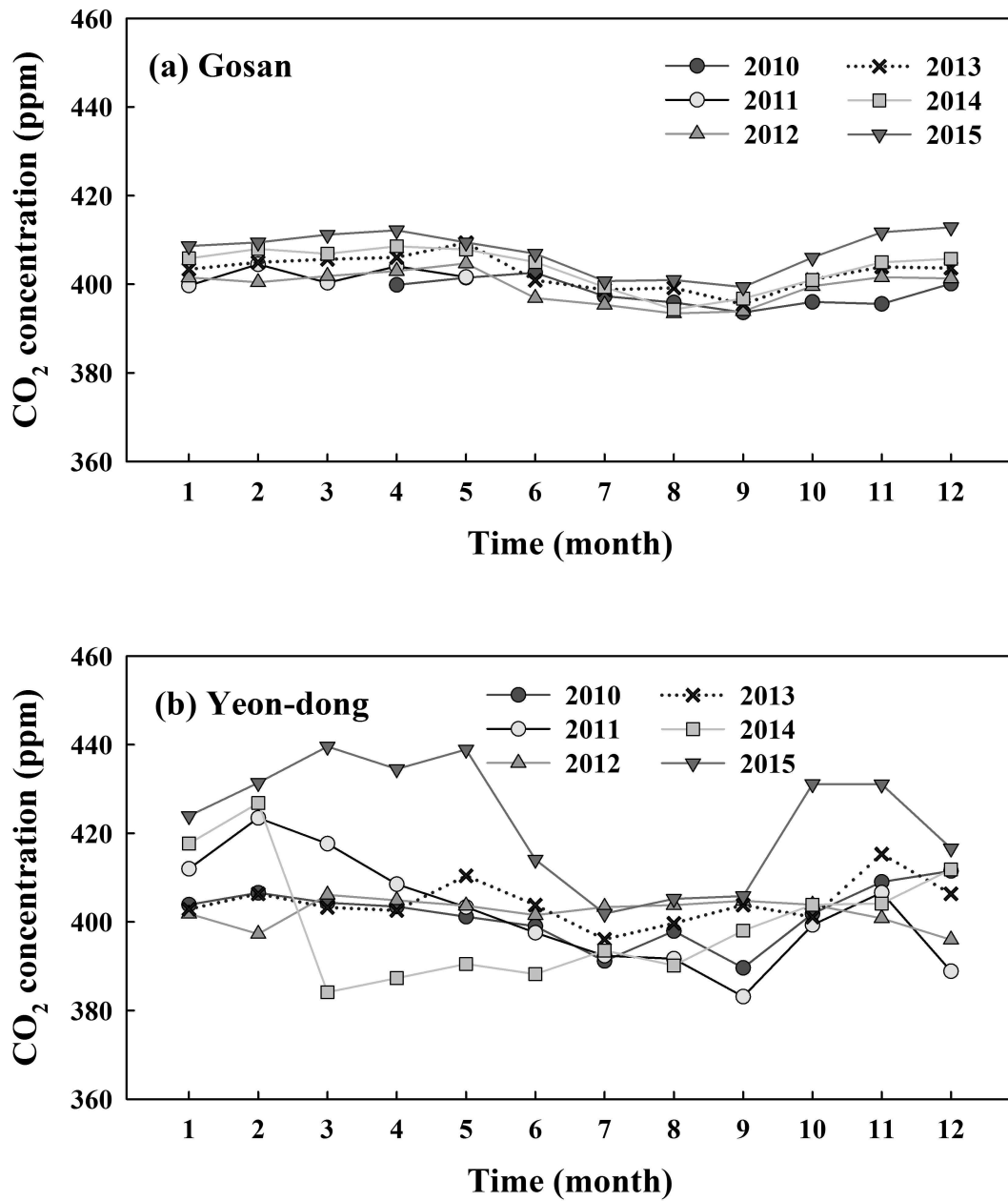


Fig. 7. Monthly concentrations of CO₂ at (a) Gosan and (b) Yeon-dong on Jeju Island during 2010-2015.

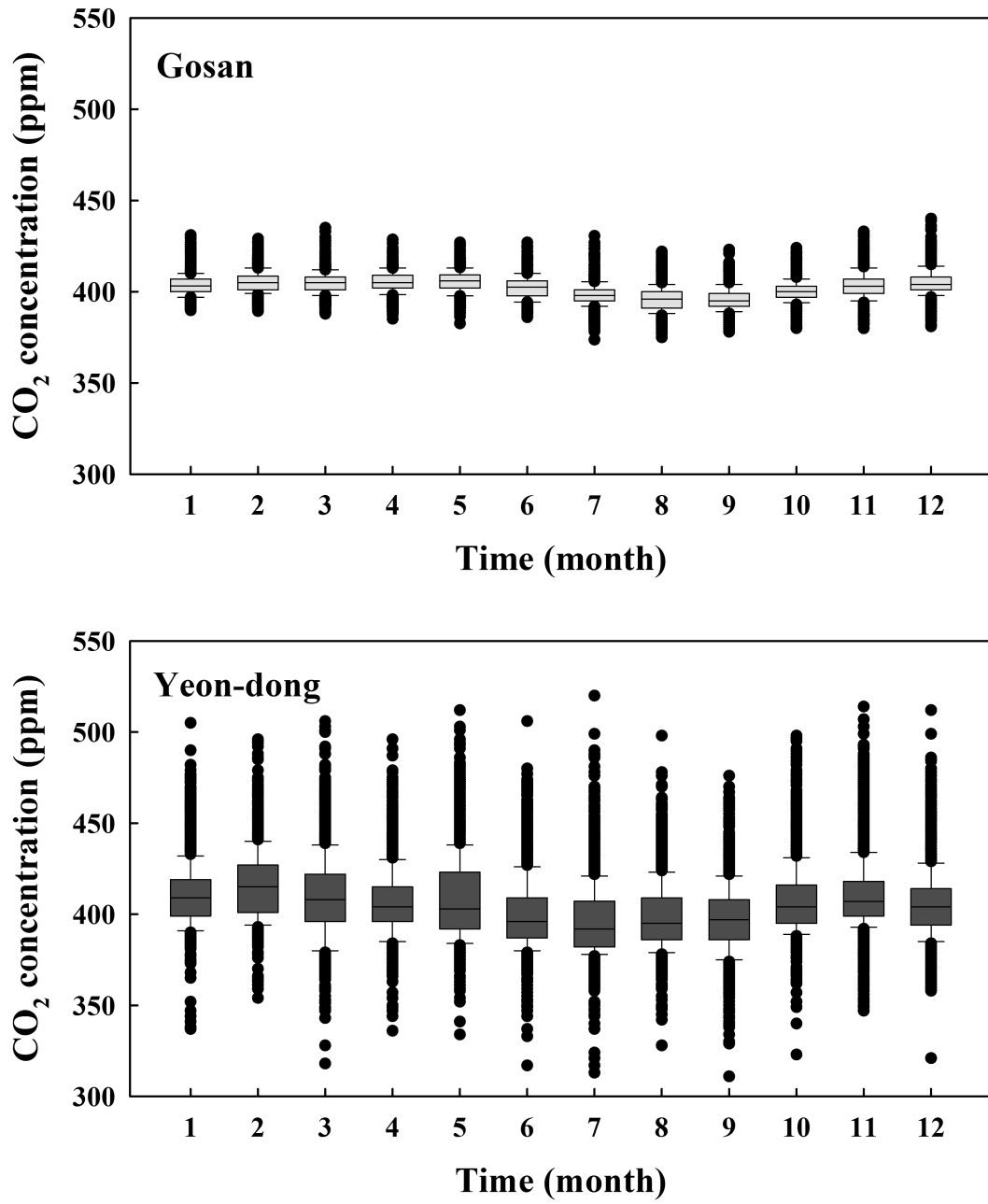


Fig. 8. Box plots for monthly variations of CO₂ concentrations at Gosan and Yeon-dong during 2010-2015.

Table 3. A statistical summary of CO₂ concentrations (ppm) at Gosan and Yeon-dong during the study period.

Month	Gosan (2010–2015)	Yeon-dong (2010–2015)
Jan	403.6±5.5 ^a (403.1) ^b 390–431 ^c (2849) ^d	410.6±16.4 ^a (409) ^b 337–505 ^c (3740) ^d
Feb	405.3±5.6 (405) 389–429 (2101)	416.0±18.2 (415) 354–496 (2830)
Mar	404.9±5.9 (405) 388–435 (2453)	409.5±22.0 (408) 318–506 (3265)
Apr	405.3±5.7 (405) 385–429 (2632)	406.4±18.1 (404) 336–496 (3084)
May	405.7±6.1 (406) 383–427 (2410)	407.9±21.7 (403) 334–512 (3361)
Jun	402.2±6.1 (402) 386–427 (1559)	400.1±19.1 (396) 317–506 (2562)
Jul	398.3±5.9 (398) 374–431 (1773)	396.4±19.1 (392) 313–520 (3206)
Aug	396.0±6.9 (396) 375–422 (1561)	398.7±18.4 (395) 328–498 (3242)
Set	395.8±6.0 (395) 378–423 (1994)	397.7±18.3 (397) 311–476 (3310)
Oct	400.3±5.2 (400) 380–424 (2575)	407.4±17.9 (404) 323–498 (3749)
Nov	403.4±7.5 (403) 380–433 (2799)	410.3±18.7 (407) 347–514 (3320)
Dec	404.8±6.6 (404) 381–440 (2960)	405.3±18.1 (404) 321–512 (3580)

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.

Fig. 9은 2010~2015년 기간 고산지점에서 CH₄와 N₂O의 월평균 농도를 나타낸다. CH₄의 농도는 여름철인 8월에 가장 낮게 나타났다. 이는 여름을 제외한 계절에는 대륙에서 공기가 유입되는데 중국 내륙지역은 CH₄의 가장 많은 발생원들이 분포하여 있기 때문에 한반도는 이에 대한 영향을 많이 받기 때문이다. 뿐만 아니라 여름철에는 지표가 가열되어 혼합고가 높아지기 때문에 희석되어 농도가 낮아진다. 또한, CH₄ 분자의 85%가 산화에 의해 대류권내에서 제거된다. 이 과정에서 OH 라디칼이 작용하는데,



여름철에는 CH₄ 소멸 메커니즘의 주요 물질인 OH 라디칼의 농도가 높아지기 때문에 CH₄ 농도가 낮아진다(Tohjima et al., 2002). 그러나 CH₄은 논이나 밭에서 박테리아에 의해 식물 성분이 분해되면서 가축류의 생리학적 작용으로 배출되는데(Dlugokencky et al., 1993), 고산지점의 경우는 논농사와 밭농사가 많이 이루어지고 있기 때문에 그 만큼 많은 양의 CH₄을 방출하여 계절 변동폭은 CO₂ 만큼 크지 않은 것으로 사료된다. N₂O 농도 또한 여름철 강한 태양에너지에 의해 지표면이 가열되면 혼합고가 높아져 여름에 낮고 겨울에 높은 계절특성을 나타내지만 CO₂나 CH₄에 비해서는 월변동이나 계절변동이 크지 않다. N₂O는 대류권에서 소멸하는 메커니즘을 가진 CO₂와 CH₄과 달리 성층권에서 소멸하는 메커니즘을 가지므로 N₂O의 농도는 계절과는 상관성이 작다(기상청, 2013).

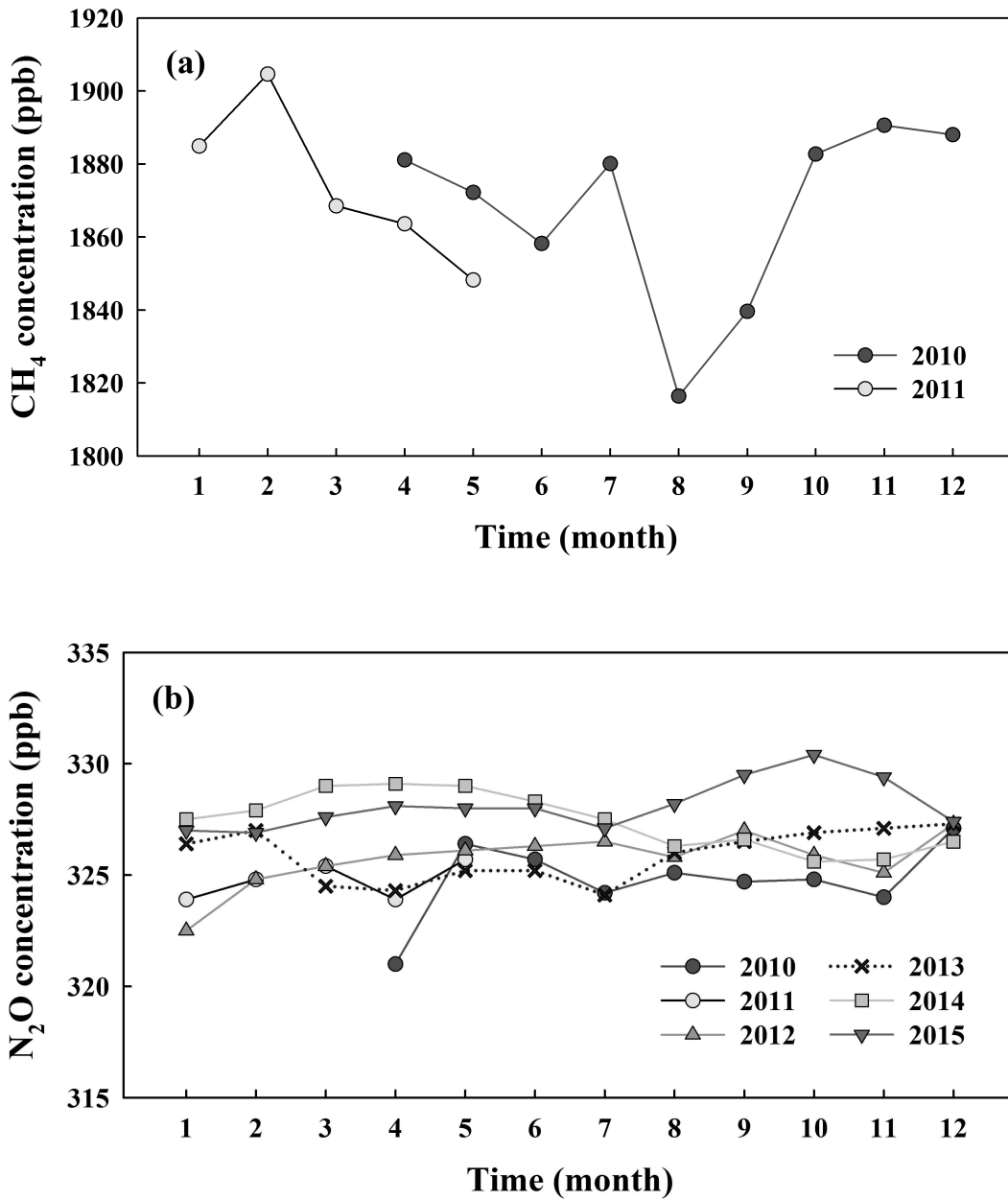


Fig. 9. Monthly variations of CH₄, and N₂O concentrations at background sites (Gosan) on Jeju Island during 2010–2015.

3.1.2. 주중/주말 및 시간 변화

Fig. 10은 6년간(2010~2015년) 고산과 연동지점에서의 요일별 CO₂ 농도를 나타낸다. 고산지점의 경우 주중(월~금)에서 주말(토~일)로 갈수록 농도가 증가하는 양상을 보였으며, 일요일에 가장 높은 농도가 나타났다. 고산지점에서의 6년간 월요일부터 금요일까지 평균과 토, 일요일 평균은 각각 약 402 ppm과 403 ppm으로 주말에 약간 높게 나타났으나 큰 차이는 아니었다. 반면, 연동지점은 화요일에 가장 높은 CO₂ 농도를 보였다가 토요일부터 감소하여 일요일에 가장 낮은 농도를 보였으며, 6년간 주중과 주말의 평균 CO₂ 농도는 각각 약 406 ppm, 404 ppm으로 주중이 주말보다 다소 높게 나타났다. 일반적으로 주중과 주말 변동 경향은 자연적인 요인보다 인위적인 요인으로 인해 발생한다(Cervený and Coakley, 2002). 일반적으로 고산과 같은 교외지역은 주중보다 주말에 농도가 높게 나타난다. 도심지역은 대체로 주중이 주말보다 인위적 산업 활동(교통량 증가, 화석연료 연소 등)의 증가로 인해 에너지 사용량이 많아지기 때문에 상대적으로 농도가 높아지게 된다(Brittain M. et al., 2013; Liu H. Z. et al. 2012; Wentz et al., 2002).

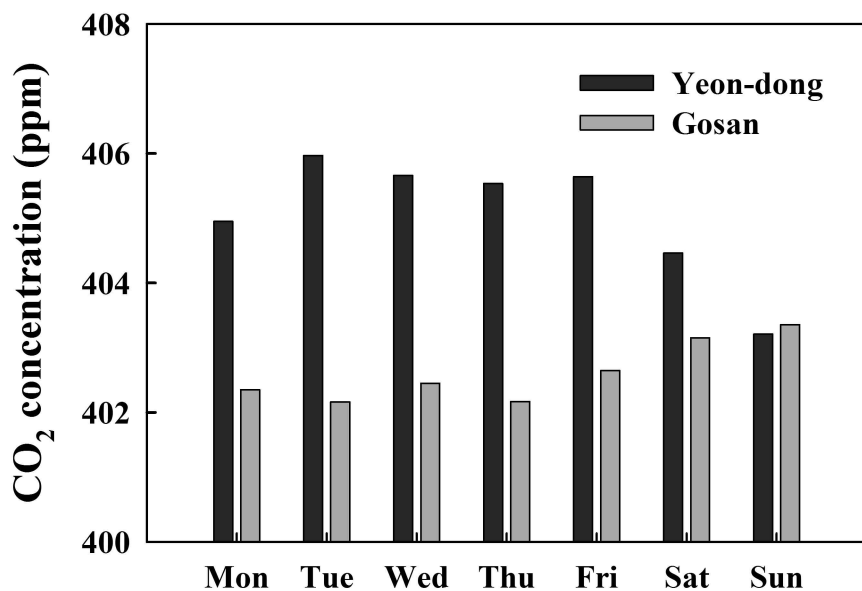


Fig. 10. Weekday and weekend variations of mean CO₂ concentrations at Gosan and Yeon-dong during 2010-2015.

고산과 연동지점에서의 시간별 CO₂ 농도를 분석한 결과(Fig. 11), 전반적으로 두 지점의 CO₂ 농도는 모두 출퇴근 시간에 가장 높게 나타났으며, 오전과 이른 오후에 상대적으로 낮은 농도가 나타났다. 이러한 패턴과 농도의 차이는 연동지점이 고산지점에 비해 훨씬 뚜렷하게 나타났다. 시간별로 살펴보면, 고산지점에서 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 나타났다. 연동지점에서는 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 고산지점에 비해 상당히 큰 편이었다.

도심은 주로 오후-야간 시간대에 인위적인 활동에 의해 영향을 받지만 외곽지는 주·야간 모두 인위적인 영향을 받기 때문에 도심지에서 변동폭이 더 크게 나타난다(Büns et al., 2012). 일반적으로 온실가스 배출에 영향을 미치는 요인 중 하나가 자동차 등록대수로 알려져 있으며, 특히 CO₂ 농도는 교통량과 비례한다(반영운 등, 2012). 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 사료된다(김승연 등, 2014).

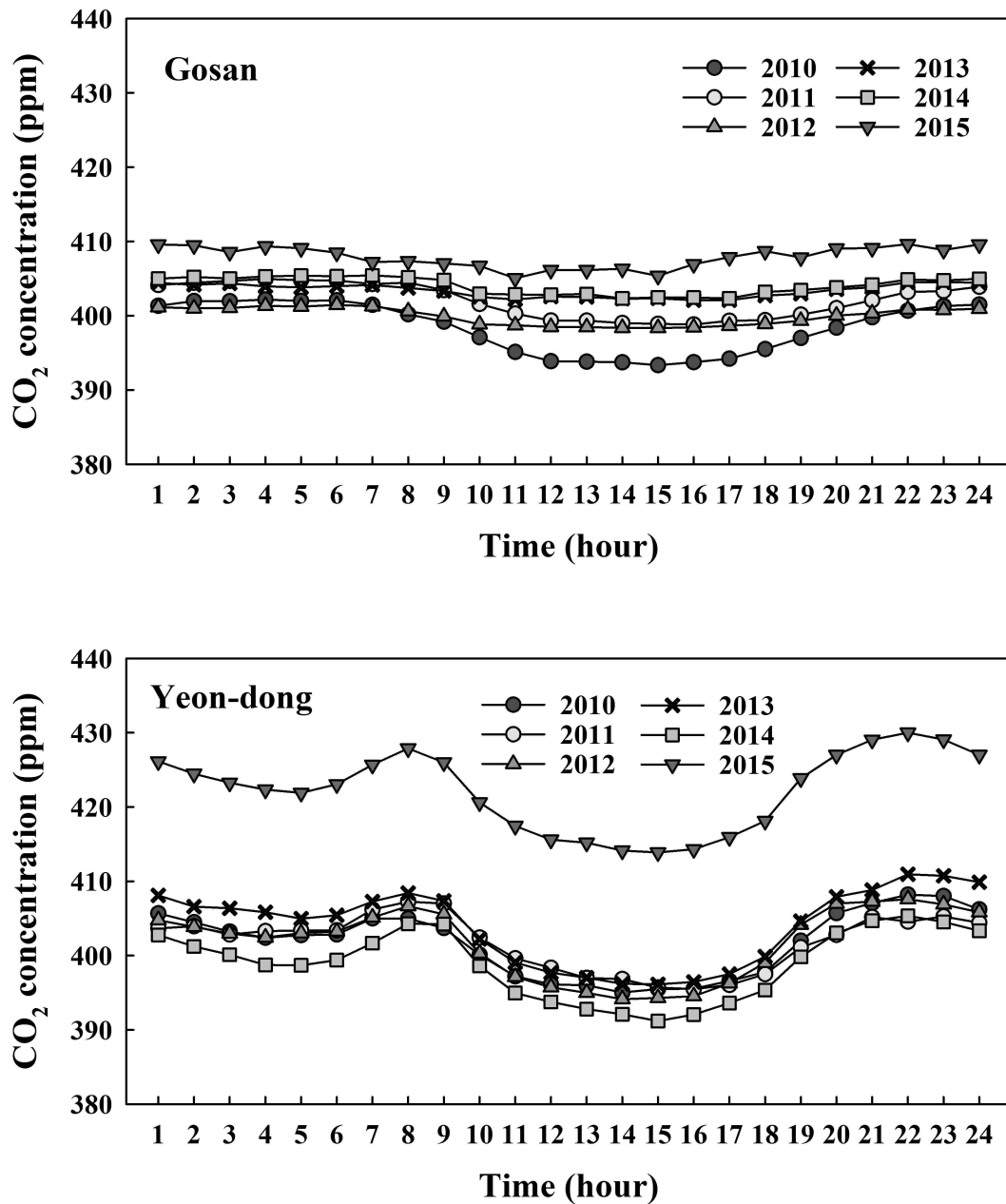


Fig. 11. Diurnal variations of hourly mean CO₂ concentrations at Gosan and Yeon-dong during 2010-2015.

3.2. 제주도 도심 및 배경지점에서의 복사강제력 및 기온변화

3.2.1. 단순 추정식을 이용한 복사강제력 및 기온변화 산출

Fig. 12(a)는 IPCC에서 제시된(IPCC, 2013) 단순화된 추정식을 이용하여 산출한 최근 6년간(2010~2015년) 고산과 연동지점에서의 CO₂ 농도에 따른 연평균 복사강제력과 기온변화를 나타낸다. 복사강제력은 Tabal 1의 CO₂ 첫 번째 식을 이용하여 산출하였다. 첫 번째 식을 사용하여 산출한 CO₂ 복사강제력 추정값은 두 번째 식과 세 번째 식에 의한 복사강제력의 약 0.9배로서 조금 낮게 산출되었다(이수정 등, 2016). 고산지점의 CO₂ 농도 자료는 2010년 1~3월과 2011년 6~12월은 자료의 부재로 인해 분석에서 제외하였다. 연동(도심)과 고산지점(배경)의 연평균 복사강제력 변화를 분석한 결과, 복사강제력과 기온변화는 연동지점에서 1.90(2014년)~2.20 W/m²(2015년)과 1.39(2014년)~1.60 °K(2015년), 고산지점에서 1.88(2010년)~2.0 W/m²(2015년)와 1.37(2010년)~1.47 °K(2015년)로 나타나 고산지점보다 연동지점에서 높은 복사강제력과 기온변화가 추정되었다.

Fig. 12(b)는 고산지점에서 2010~2015년 기간 CH₄와 N₂O에 의한 연평균 복사강제력과 기온변화를 나타낸다. CH₄의 경우 2010년 1~3월과 2011년 6월 이후는 자료의 부재로 인해 2010, 2011년의 복사강제력과 기온변화만 분석하였다. 2010, 2011년 복사강제력은 각각 0.529, 0.531 W/m²이며, 기온변화는 0.624, 0.627 °K이다. N₂O의 경우, 2010년 1~3월과 2011년 6~12월은 자료의 부재로 분석에서 제외하였다. 복사강제력과 기온변화는 0.18(2010년)~0.19(2015년) W/m², 0.18(2010년)~0.19(2015년) °K으로 2010년부터 꾸준히 증가하는 추세를 보인다.

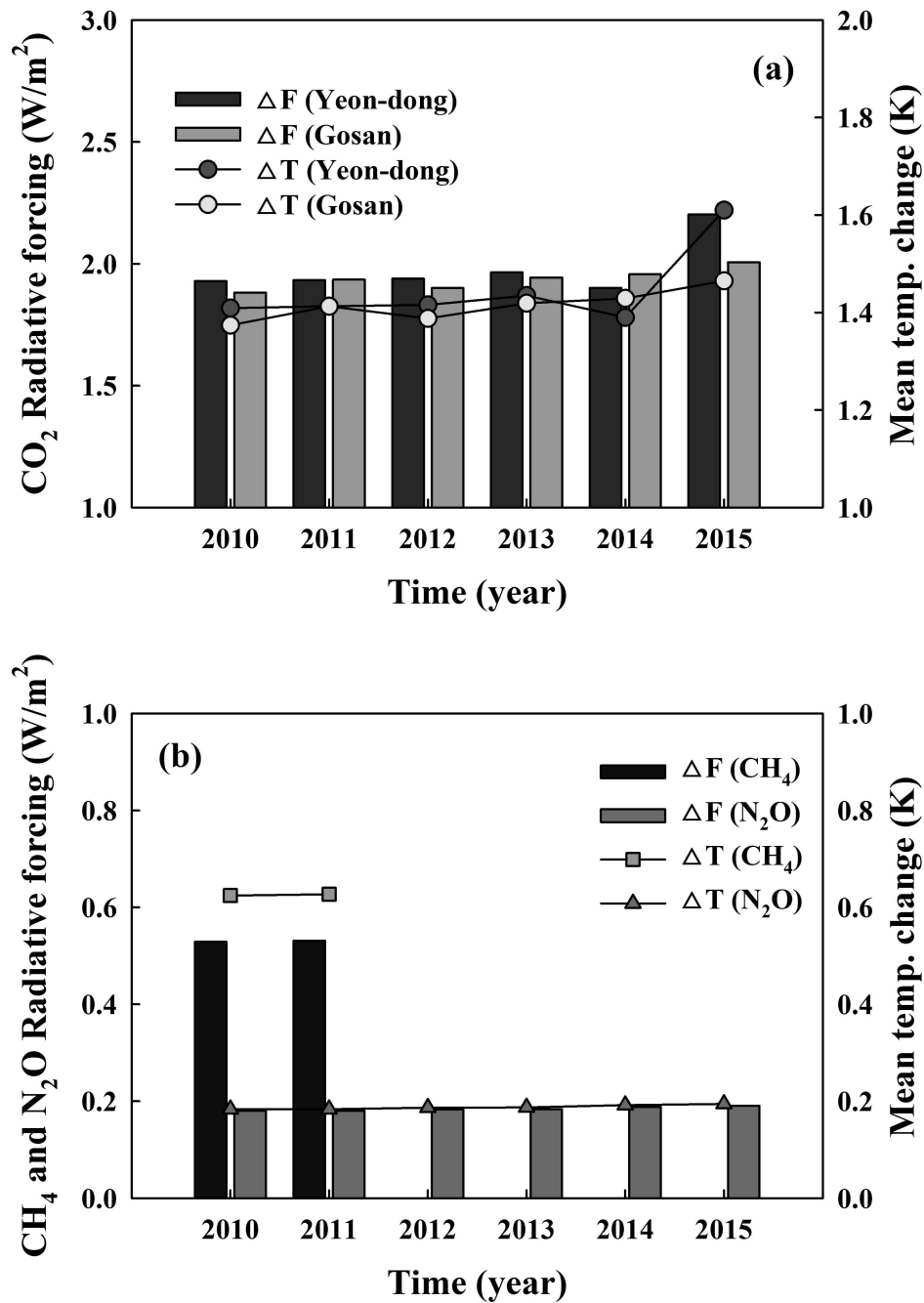


Fig. 12. Mean radiative forcing and mean temperature changes calculated from the simplified expressions for greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. Except for the radiative forcing (F) and mean temperature change (T).

Table 4는 연동과 고산지점의 CO₂ 복사강제력 월변화를 나타낸다. 전반적으로 월평균 복사강제력은 배경지점인 고산에서 1.94(1.82~2.08) W/m²보다 도심지점인 연동에서 1.98(1.68~2.41) W/m²에서 상대적으로 높게 추정되었으며, 기온변화도 마찬가지로 연동지점이 고산지점보다 높은 편이었다. 연동지점은 고산지점에 비해 인구와 차량, 산업시설의 영향을 받아 CO₂ 농도가 높게 나타났던 원인과 유사하게 인위적인 영향이 잘 반영되어 복사강제력이 높게 산출되었다. 고산과 연동지점 모두 최근으로 올수록 복사강제력이 증가하는 추세를 보였다. 두 지점 모두 대부분 연구기간에서 봄철과 겨울철에 높게 나타났으며, 가을철과 여름철에는 상대적으로 낮은 복사강제력이 산출되었다. 월별로 상세히 살펴보면, 최근 6년간 연동지점에서 가장 높은 복사강제력이 산출된 월은 2015년 3월로 약 2.4 W/m²이며, 가장 낮게 산출된 월은 2011년 9월로 약 1.68 W/m²이다. 고산의 경우, 가장 높은 복사강제력이 산출된 월은 2015년 12월로 약 2.1 W/m²이며, 가장 낮게 산출된 월은 2012년 8월에 약 1.8 W/m²이다. 월별 기온변화의 패턴도 복사강제력과 마찬가지로 연동과 고산지점 모두 겨울철에 가장 높았고, 여름철에 기온변화가 가장 낮게 나타났다.

Table 5는 연구기간(2010~2015년)에 고산지점에서 CH₄와 N₂O에 의한 평균 복사강제력의 월별 특성을 나타낸다. CH₄에 의해 평균 0.53 W/m²의 월별 복사강제력이 산출되었으며, CH₄에 의한 복사강제력은 CO₂의 월별 복사강제력 양상과 비슷하게 겨울철에 0.54 W/m²으로 가장 높고 여름철에 0.51 W/m²으로 가장 낮게 산출되었다. N₂O는 평균 0.187의 월별 복사강제력을 나타내었는데, 2015년 가을철에 0.2 W/m² 로 가장 높은 복사강제력이 산출되었다.

Table 4. Monthly variations mean radiative forcing by CO₂ concentration at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015 calculated from the simplified expressions.

Year	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
Month	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong
Jan	–	1.96/1.43	1.90/1.39	2.07/1.51	1.93/1.41	1.93/1.41	1.95/1.43	1.95/1.42	1.99/1.45	2.14/1.56	2.02/1.48	2.22/1.62
Feb	–	2.0/1.46	1.97/1.44	2.21/1.62	1.91/1.40	1.87/1.37	1.97/1.44	1.99/1.45	2.01/1.47	2.26/1.65	2.03/1.48	2.31/1.69
Mar	– ^a	1.97/1.43	1.91/1.40	2.14/1.56	1.93/1.41	1.99/1.45	1.98/1.45	1.95/1.42	2.0/1.46	1.69/1.23	2.06/1.50	2.41/1.76
Apr	1.91 ^b /1.39 ^c	1.95/1.40	1.96/1.43	2.02/1.48	1.95/1.42	1.97/1.44	1.99/1.45	1.94/1.42	2.02/1.48	1.74/1.27	2.07/1.51	2.35/1.72
May	1.93/1.41	1.92/1.38	1.93/1.41	1.95/1.43	1.97/1.44	1.96/1.43	2.03/1.48	2.05/1.49	2.01/1.47	1.78/1.30	2.03/1.48	2.40/1.76
Jun	1.94/1.42	1.90/1.31	–	1.88/1.37	1.87/1.36	1.93/1.41	1.92/1.48	1.96/1.43	1.97/1.44	1.75/1.28	2.0/1.46	2.09/1.53
Jul	1.87/1.37	1.79/1.37	–	1.81/1.32	1.85/1.35	1.95/1.43	1.89/1.40	1.86/1.35	1.90/1.39	1.82/1.33	1.92/1.40	1.93/1.41
Aug	1.85/1.35	1.88/1.29	–	1.80/1.31	1.82/1.33	1.96/1.43	1.90/1.38	1.90/1.39	1.83/1.36	1.77/1.30	1.92/1.40	1.98/1.44
Set	1.82/1.33	1.77/1.41	–	1.68/1.22	1.83/1.33	1.97/1.44	1.85/1.35	1.96/1.43	1.86/1.36	1.88/1.37	1.90/1.39	1.99/1.45
Oct	1.85/1.35	1.93/1.48	–	1.90/1.39	1.90/1.39	1.96/1.43	1.92/1.40	1.92/1.40	1.92/1.40	1.96/1.43	1.99/1.45	2.30/1.69
Nov	1.85/1.35	2.03/1.48	–	2.0/1.46	1.93/1.41	1.92/1.40	1.96/1.43	2.11/1.54	1.97/1.44	1.96/1.43	2.06/1.51	2.31/1.68
Dec	1.91/1.39	2.06/1.50	–	1.76/1.28	1.93/1.41	1.85/1.35	1.96/1.43	1.99/1.45	1.98/1.45	2.06/1.51	2.08/1.52	2.13/1.55

^adata unavailability.

^bMean radiative forcing.

^cMean temperature change.

Table 5. Monthly variations mean radiative forcing by CH₄, N₂O concentration at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015 calculated from the simplified expressions.

Year	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
Month	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O
Jan	-	-	0.54/0.63	0.18/0.18	-	0.17/0.18	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19
Feb	-	-	0.54/0.64	0.18/0.18	-	0.18/0.18	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19
Mar	- ^a	-	0.53/0.62	0.18/0.19	-	0.18/0.19	-	0.18/0.18	-	0.19/0.20	-	0.19/0.19
Apr	0.53 ^b /0.63 ^c	0.19/0.17	0.53/0.62	0.18/0.18	-	0.18/0.19	-	0.18/0.18	-	0.19/0.20	-	0.19/0.19
May	0.53/0.63	0.19/0.19	0.52/0.62	0.18/0.19	-	0.18/0.19	-	0.18/0.19	-	0.19/0.20	-	0.19/0.19
Jun	0.53/0.62	0.19/0.19	-	-	-	0.19/0.19	-	0.18/0.19	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19
Jul	0.53/0.63	0.18/0.18	-	-	-	0.19/0.19	-	0.18/0.18	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19
Aug	0.51/0.60	0.18/0.18	-	-	-	0.18/0.19	-	0.18/0.19	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19
Set	0.52/0.61	0.18/0.18	-	-	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19	-	0.20/0.20
Oct	0.54/0.63	0.18/0.18	-	-	-	0.18/0.19	-	0.19/0.19	-	0.18/0.19	-	0.20/0.20
Nov	0.54/0.63	0.18/0.18	-	-	-	0.18/0.18	-	0.19/0.19	-	0.18/0.19	-	0.20/0.20
Dec	0.54/0.63	0.19/0.19	-	-	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19	-	0.19/0.19

^adata unavailability.

^bMean radiative forcing.

^cMean temperature change.

3.2.2. 대기복사전달모델을 이용한 복사강제력 및 기온변화 산출

Fig. 13(a)는 고산과 연동지점에서 CO₂에 대해 SBDART 모델을 이용하여 복사강제력과 평균기온변화를 나타낸다. 모델에서 사용자가 직접 대기 프로파일을 구성하려면 오존 및 수증기 밀도, 기압, 기온의 연직분포 자료가 필요하다. 제주 지역의 경우, 오존 농도의 연직분포를 관측하지 않아 포항지점(36°01'48", 129°22'12")의 관측 자료를 이용하였으며, 2010년 1월, 4~6월, 9~11월과 2012년 8~9월, 2013년 1월, 2014년 12월은 오존 연직분포 자료 부재로 분석에서 제외되었다. 연동과 고산지점에서 복사강제력 각각 2.11(2012년)~2.41(2015년) W/m²와 2.10(2010년)~2.20(2015년) W/m²로 SBDART 모델로부터 모의된 복사강제력이 추정식으로 산출한 값보다 약 12%, 13% 높게 나타났다. 고산지점은 2011년에 6월 이후로 자료가 없어 1~5월까지만 분석하였다. 5월 이후에 온실가스 농도자료가 없기 때문에 여름철 복사강제력이 고려되지 않아 연동보다 고산에서 높게 산출된 것으로 사료된다. 따라서, 이 그래프에서 고산의 2011년 결과는 연 복사강제력이라고 보기 어렵다. 참고로, 2011년도에 연동에서 1~5월까지의 복사강제력만 평균한 결과 2.32 W/m²으로 고산의 2.29W/m²보다 높게 산출되었다.

Fig. 13(b)는 고산지점에서 CH₄와 N₂O의 복사강제력과 평균 기온변화이다. CH₄에 의한 복사강제력은 0.301(2010년)~0.538(2011년) W/m², N₂O에 의한 복사강제력은 0.145(2010년)~0.153(2013년) W/m²으로 추정식보다 모델값이 각각 21%, 18% 낮게 산출되었다. 이러한 차이는 단순화된 추정식은 전 지구규모를 중심으로 많은 가정들이 포함되어 있고 각 지점별 위치와 시간 변화에 따른 영향을 고려하지 못하는 데 비해 3차원 복사전달 모델인 SBDART는 대상지역의 지표면 알베도와 연직 대기 프로파일 등을 고려하여 지표면과 대기에 대한 온실가스 복사강제력 영향을 복합적으로 고려하기 때문이다(송상근 등, 2014; 송상근 등, 2015). CO₂ 복사강제력 결과 중 2011년도에 연동보다 고산에서 복사강제력이 높게 산출되었다.

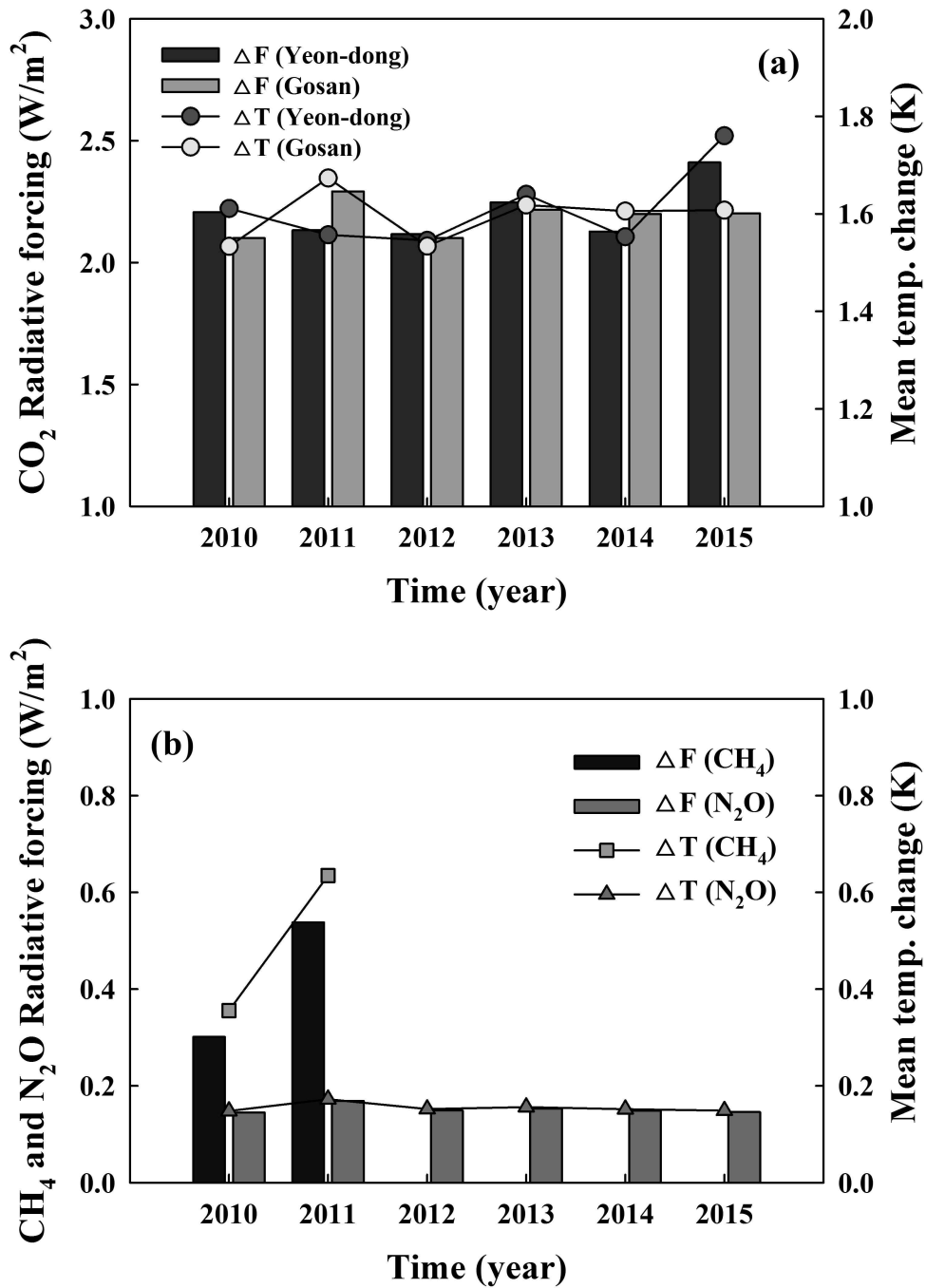


Fig. 13. Mean radiative forcing and mean temperature changes simulated by the SBDART for greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015. Except for the radiative forcing (F) and mean temperature change (T).

Table 6는 연구기간 동안 고산과 연동지점에서 모델에 의해 산출된 CO₂에 의한 평균 복사강제력 및 기온변화 결과이다. 추정식 결과와 마찬가지로 고산지점의 복사강제력 2.18(1.16~2.71) W/m²보다 연동지점의 복사강제력이 2.21(1.22~2.82) W/m²으로 높게 산출되었다. 추정식 월별 산출 결과 유사하게 여름철에 낮고 봄철에 높은 계절 특성을 보였으나, 그 특성이 추정식에 비해 훨씬 뚜렷하게 나타났다. 연동지점에서 복사전달모델에 의해 산출된 복사강제력 중 가장 높은 값을 나타낸 월은 2015년 3월로 약 2.82 W/m²이며, 가장 낮게 산출된 월은 2012년 7월로 약 1.22 W/m²이다. 고산지점의 경우, 가장 높은 복사강제력이 산출된 월은 2011년 4월로 약 2.71 W/m²이며, 가장 낮게 산출된 월은 2012년 7월에 약 1.16 W/m²이다. 여름철을 제외한 계절에는 모델 값이 추정식보다 높게 산출되었고, 여름철에는 모델 값이 추정식보다 낮게 추정되었다.

모델 모의결과의 최소-최고 편차는 연동과 고산지점에서 각각 1.60, 1.55으로 추정식의 월별 최소-최고 편차 0.72, 0.3보다 각각 2배, 5배 더 크게 나타났다. 고산과 연동지점에서 CO₂ 농도는 각각 2015년 12월(412.9 ppm)과 2015년 3월(439.6 ppm)에 가장 높고 2012년 8월(395.4 ppm)과 2011년 9월(383.1 ppm)에 가장 낮았으며, 추정식에 의한 복사강제력 산출 결과는 CO₂ 농도와 마찬가지로 2015년 12월(2.08 W/m²)과 2015년 3월(2.41 W/m²)에 가장 높고, 2012년 8월(1.82 W/m²)과 2011년 9월(1.68 W/m²)로 가장 낮았다. 반면, SBDART 모델 결과 고산과 연동지점에서 각각 2011년 4월과 2015년 3월에 가장 높게 모의되었고, 2012년 8월(1.82 W/m²)과 2011년 9월(1.68 W/m²)에 가장 낮게 모의되었다.

Table 7은 고산지점에서 CH₄, N₂O 농도에 따른 월별 복사강제력 및 기온변화 결과이다. 고산지점 CH₄, N₂O의 경우 최고농도는 각각 2011년 2월(1904.6 ppb), 2015년 10월(330.4 ppb)에 가장 높았고, 추정식 산출 결과 복사강제력 최고값은 2011년 2월(0.542 W/m²), 2015년 10월(0.198 W/m²)으로 농도 최고값이 나온 월과 동일하였다. 모델 결과에서는 2011년 2월에 0.650 W/m², 2010년 12월에 0.219 W/m²으로 가장 높게 모의되었다. 이는 추정식에는 온실가스 농도만이 변수로 들어가서 농도에 따라 복사강제력이 좌우되지만, 모델의 경우에는 농도 외에도 여러 복합적인 요인들이 적용되기 때문인데, 그 중 특히 오존의 연직분포가 큰 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

Table 6. Monthly variations of radiative forcing and temperature change simulated by the SBDART for CO₂ concentration at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015.

Year	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
Month	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong	Gosan	Yeon-dong
Jan	-	-	2.19/1.60	2.23/1.63	2.41/1.76	2.41/1.76	-	-	2.46/1.80	2.65/1.93	2.23/1.36	2.44/1.78
Feb	-	2.21/1.61	2.37/1.73	2.40/1.75	1.86/1.36	1.82/1.33	2.34/1.71	2.37/1.73	2.32/1.69	2.59/1.89	2.36/1.72	2.69/1.96
Mar	-	2.41/1.76	2.34/1.71	2.41/1.76	2.22/1.62	2.28/1.66	2.54/1.85	2.51/1.83	2.35/1.72	1.98/1.45	2.41/1.76	2.82/2.06
Apr	-	-	2.71/1.98	2.70/1.97	2.40/1.75	2.44/1.78	2.64/1.93	2.59/1.89	2.55/1.86	2.20/1.61	2.48/1.81	2.80/2.04
May	-	-	1.85/1.35	1.84/1.34	2.0/1.46	2.0/1.46	2.36/1.72	2.37/1.73	2.35/1.72	2.08/1.52	2.14/1.56	2.53/1.85
Jun	-	-	-	2.19/1.60	1.76/1.28	1.83/1.34	1.62/1.18	1.65/1.20	1.85/1.35	1.64/1.20	1.82/1.33	1.91/1.39
Jul	1.69/1.23	1.61/1.18	-	1.62/1.18	1.16/0.85	1.22/0.89	1.82/1.33	1.80/1.30	1.78/1.30	1.71/1.25	1.88/1.37	1.90/1.39
Aug	1.86 ^a /1.36 ^b	1.89/1.38	-	1.43/1.04	-	-	2.09/1.53	2.10/1.53	1.77/1.27	1.72/1.26	1.78/1.30	1.82/1.33
Set	- ^c	-	-	1.99/0.4	-	-	1.97/1.44	2.09/1.53	1.94/1.42	1.96/1.43	2.03/1.48	2.11/1.54
Oct	2.24/1.64	2.33/1.70	-	2.18/0.15	2.38/1.74	2.46/1.80	2.21/1.61	2.22/1.62	2.27/1.66	2.32/1.69	2.30/1.68	2.67/1.95
Nov	-	-	-	2.35/1.72	2.42/1.77	2.40/1.75	2.41/1.76	2.59/1.89	2.55/1.86	2.55/1.86	2.51/1.83	2.81/2.05
Dec	2.61/1.91	2.79/2.04	-	2.25/1.64	2.40/1.75	2.31/1.69	2.38/1.74	2.42/1.77	-	-	2.48/1.81	2.43/1.77

^aMean radiative forcing.

^bMean temperature change.

^cdata unavailability.

Table 7. Monthly variations of radiative forcing changes simulated by the SBDART for CH₄, N₂O concentration at Gosan during 2010–2015.

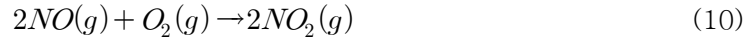
Year	2010		2011		2012		2013		2014		2015	
Month	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O
Jan	-	-	0.65/0.77	0.18/0.18	-	0.19/0.20	-	-	-	0.20/0.20	-	0.16/0.17
Feb	-	-	0.58/0.68	0.18/0.18	-	0.14/0.14	-	0.19/0.19	-	0.18/0.18	-	0.18/0.18
Mar	-	-	0.62/0.73	0.18/0.18	-	0.16/0.16	-	0.19/0.19	-	0.17/0.17	-	0.18/0.18
Apr	-	-	0.60/0.71	0.20/0.21	-	0.16/0.16	-	0.19/0.19	-	0.18/0.18	-	0.17/0.17
May	-	-	0.24/0.29	0.12/0.12	-	0.11/0.11	-	0.16/0.19	-	0.15/0.15	-	0.12/0.12
Jun	-	-	-	-	-	0.10/0.10	-	0.09/0.09	-	0.10/0.10	-	0.09/0.09
Jul	0.12/0.14	0.09/0.09	-	-	-	0.06/0.06	-	0.10/0.10	-	0.09/0.09	-	0.10/0.10
Aug	0.14 ^a /0.17 ^b	0.11/0.11	-	-	-	-	-	0.12/0.12	-	0.10/0.10	-	0.10/0.10
Set	- ^c	-	-	-	-	-	-	0.12/0.12	-	0.12/0.12	-	0.13/0.13
Oct	0.35/0.41	0.16/0.17	-	-	-	0.18/0.18	-	0.15/0.15	-	0.15/0.15	-	0.16/0.16
Nov	-	-	-	-	-	0.19/0.20	-	0.19/0.19	-	0.20/0.21	-	0.19/0.19
Dec	0.60/0.70	0.22/0.22	-	-	-	0.21/0.19	-	0.18/0.19	-	-	-	0.18/0.19

^aMean radiative forcing.

^bMean temperature change.

^cdata unavailability.

2010~2015년 기간 월별 오존 분압의 연직분포를 분석한 결과(Fig. 14), 상층의 오존 분압은 여름철인 6, 7, 8월에 낮게 나타났다. 여름철에는 오존의 광화학적 특성에 의해 오존 농도가 높아지게 되는데,



태양에너지를 흡수하는 성질을 가진 상층 오존의 농도가 높아지면 지표에 도달하는 태양복사에너지가 줄어들고 지표에서 다시 방출되는 지구복사에너지의 양도 줄어들어 복사강제력 값이 작아진다. 추정식과 달리 모델은 대상지역의 대기 프로파일을 사용자가 직접 구성하여 적용할 수 있는데 이 경우, 오존 등과 같은 요소를 고려하여 모델을 수행한다. 모델에서는 이러한 월별 대기 특성이 잘 반영되어 보다 정확한 복사강제력이 산출되고 뚜렷한 계절 특성이 나타난다.

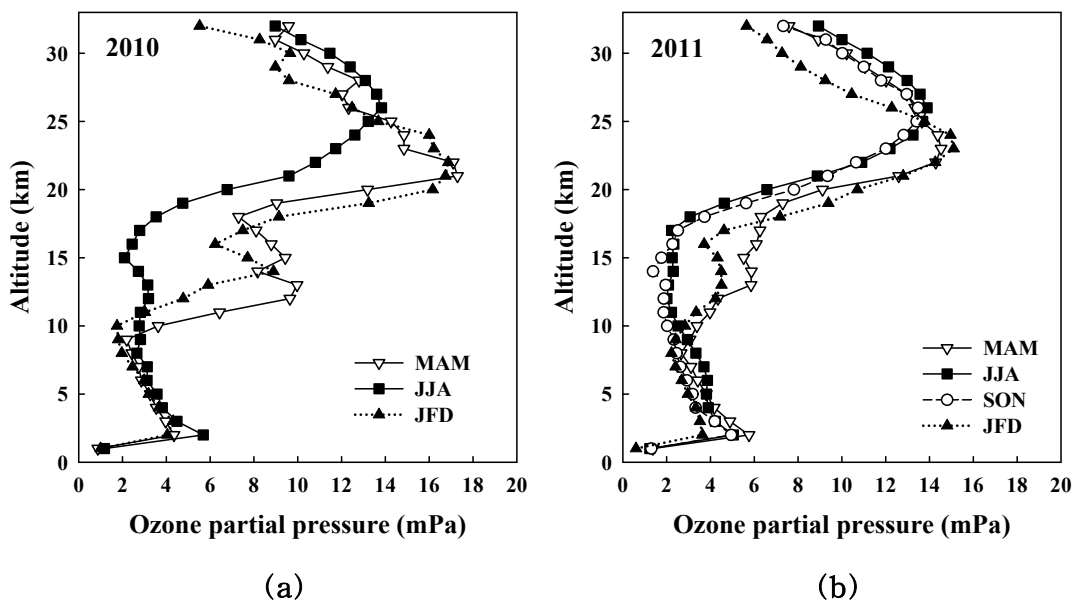
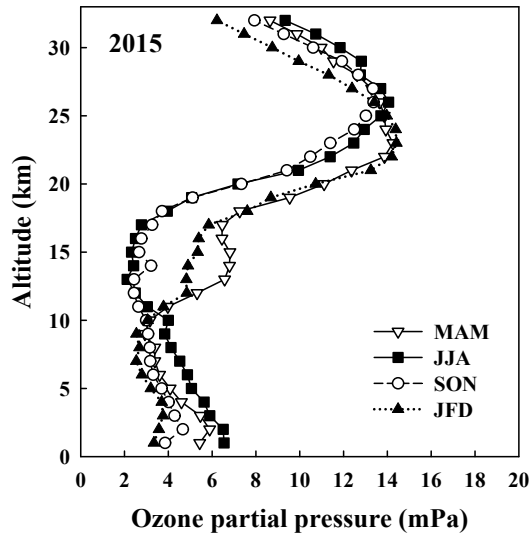
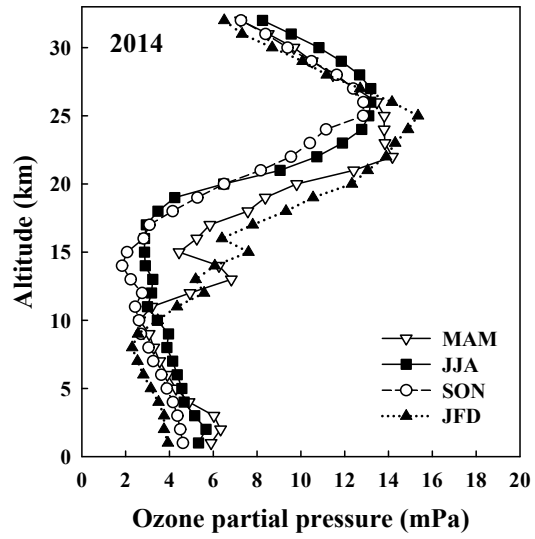


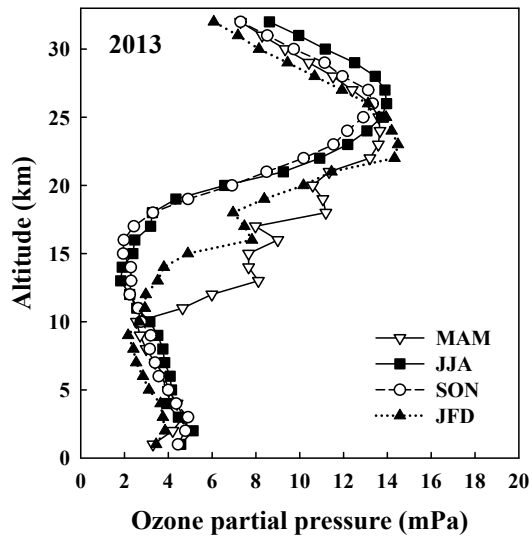
Fig. 14. Monthly vertical profiles of ozone observed at Pohang during (a) 2010, (b) 2011, (c) 2012, (d) 2013, (e) 2014, and (f) 2015.



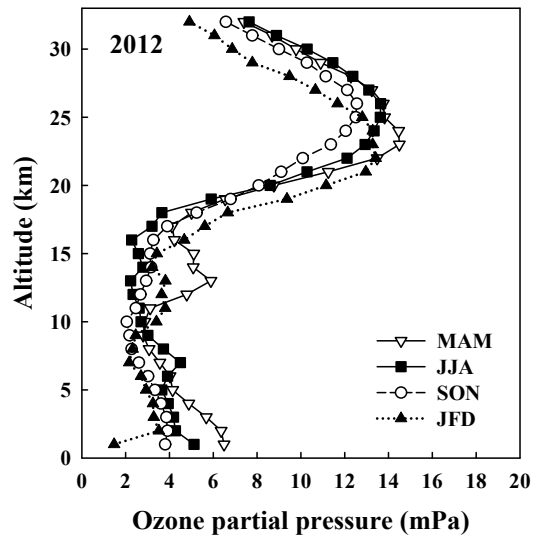
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 14. (Continued.)

상층의 오존이 복사강제력에 미치는 영향을 알아보기 위하여 peak가 나타나는 25 km부터 33 km까지 평균을 낸 값과 복사강제력의 상관성을 분석하였다(Table 8). 2011년 고산지점을 제외하고 모두 강한 음의 상관관계를 보여 상층의 오존이 많을수록 복사강제력 값이 낮아진다는 것을 알 수 있었다.

Table 8. Correlation between radiative forcing and ozone in 25 km-30 km at the Gosan and Yeon-dong during the study period (2010-2015).

Year	Site	
	Gosan	Yeon-dong
2010	-0.869	-0.606
2011	0.046	-0.435
2012	-0.261	-0.193
2013	-0.527	-0.538
2014	-0.662	-0.743
2015	-0.798	-0.670

2010~2015년 기간 고산과 연동지점에서 온실가스에 의한 복사강제력 모델 모의 결과를 IPCC 4차, 5차 보고서와 비교한 결과이다(Fig. 15). IPCC 4차, 5차 보고서에 의하면 CO₂ 배출로부터 산출한 복사강제력은 2005년에 1.66 W/m²이며, 2011년에 1.68(1.33~2.03) W/m²이다. CH₄의 농도에 기반한 추정값은 0.48(0.38~0.58) W/m²으로 2005년과 2011년에 동일하였고, N₂O는 2005년에 0.16, 2011년에 0.17 W/m²의 복사강제력을 나타냈다. 2010~2015년 기간 고산지점에서 CO₂에 의한 복사강제력은 2.1~2.29 W/m²이며, CH₄은 0.30~0.54 W/m², N₂O는 0.145~0.169 W/m²의 복사강제력을 나타냈다. 연동지점에서 CO₂에 의한 복사강제력은 2.12~2.41 W/m²로 산출되었다. 고산지점의 CH₄과 N₂O에 의한 복사강제력은 IPCC 보고서와 유사한 수준이며, 고산과 연동지점의 CO₂에 의한 복사강제력은 IPCC 보고서에 비해 비교적 높게 산출되었다.

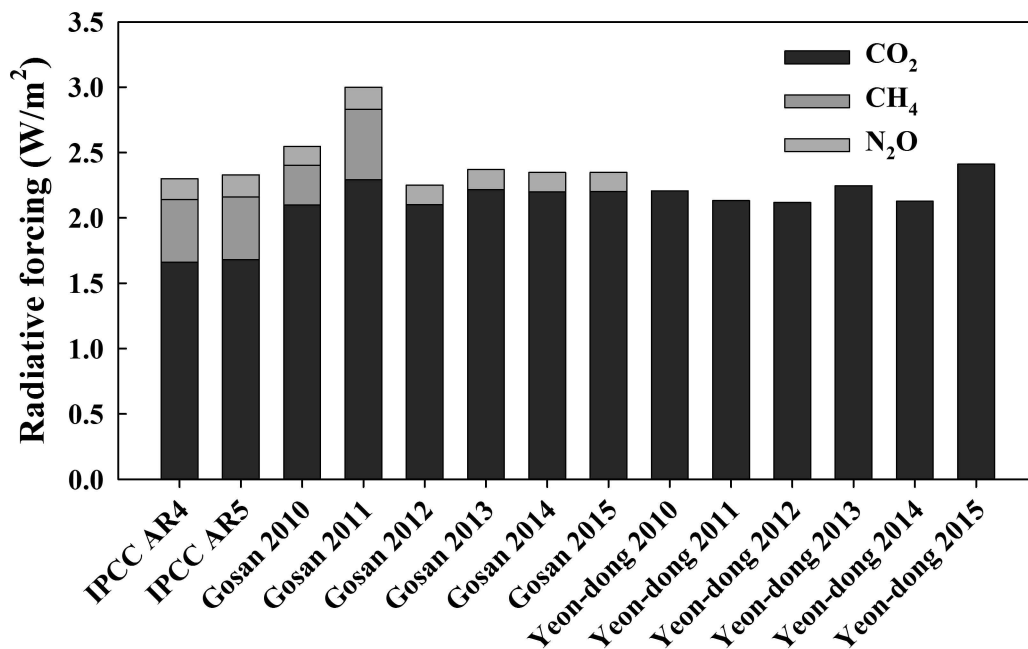


Fig. 15. Comparison of radiative forcing by CO₂, CH₄, N₂O between IPCC fourth, fifth Assessment Report and result of Gosan and Yeon-dong during 2010-2015 simulated by the SBDART.

3.3. 한반도 및 아시아 배경지점의 농도변화와 복사강제력 및 기온변화 비교 분석

3.3.1. 아시아 배경지점에서의 온실가스 농도변화 분석

Fig. 16은 한반도와 비슷한 북반구 위도 대에 위치한 미국 하와이 Mauna Loa 관측소와 일본 Ryori와 Minamitorishima 관측소, 중국 Waliguan, 몽골 Ulaan 관측소에서 측정된 온실가스 농도의 시계열을 나타낸다. Mauna Loa 관측소는 지구급 관측소로 지구에서 가장 오래된 온실가스 농도 관측소이다. 안면도, 고산, Mauna Loa, Ryori, Minamitorishima, Waliguan, Ulaan 관측소 모두 관측 이래 지금까지 꾸준히 온실가스 농도가 증가하고 있다. 특히, CO₂의 경우, 2015년에는 한반도뿐만 아니라 지구급 관측소인 Mauna Loa, Minamitorishima에서도 400 ppm을 넘기 시작했다. 연구 기간 동안의 연평균 증가율을 산정하기 위하여 연평균 자료를 이용하여 MK test를 수행하였으며(Table 9), 각 온실가스의 증가율에 대한 유의성을 판단하기 위해 유의확률 (P value)은 Z score를 이용하여 99% 신뢰구간을 기준으로 검증하였다.

고산과 안면도는 연평균 증가율이 각각 약 2.14, 2.07 ppm이며, Ryori는 2.06, Minamitorishima는 2.08, Waliguan은 2.14, Ulaan은 2.13, Mauna Loa는 2.09 ppm씩 증가하는 추세이다. 본 연구의 아시아 배경지점에서 최근 14년간 CO₂는 평균적으로 연간 2.1 ppm씩 증가하였으며, 고산과 안면도는 각각 2.07, 2.14 ppm씩 증가해 지구평균과 비슷한 추세로 증가하고 있다. 지구급 관측소인 Mauna Loa와 Minamitorishima, Waliguan에서 낮은 농도가 나타났고, 고산과 안면도에서 가장 높게 나타났다. Mauna Loa의 지난 14년 동안 CH₄ 농도 연평균 증가율은 5.26 ppb이며, Ryori와 Minamitorishima는 각각 4.6 ppb, 6.3 ppb씩 증가하고 있으며 Waliguan은 5.3 ppb, Ulaan은 5.1 ppb씩 증가하고 있다. 고산과 안면도는 9.0, 7.5 ppb으로 다른 아시아 배경지점보다 높은 증가율을 보였다. N₂O는 CO₂나 CH₄에 비해 변화 폭은 작지만 꾸준히 증가하는 추세이다. N₂O를 관측하고 있는 아시아 배경사이트가 많지 않아서 일본 Ryori지점과 지구 대표 배경사이트인 Mauna Loa와 비교하였다. 연구 대상지점의 배경대기에서 N₂O 농도가 ppb 단위의 미량기체이지만 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. Ryori와 Mauna Loa의 N₂O

농도는 지난 14년 동안 연간 각각 약 0.86, 0.89 ppb씩 증가하고 있는 실정이며, 고산 및 안면도는 각각 0.94, 0.71 ppb씩 증가하는 추세로 고산지점의 증가율은 다른 배경지점과 비교하여 약간 높고 안면도지점의 증가율은 약간 낮다.

일반적으로 대기 중 CO₂ 농도변동에 영향을 미치는 요인은 크게 해수면 온도, 식생 활동, 인위적 배출원이 있다(Keeling et al., 1995; Seinfeld et al., 1998; NOAA CMDL, 2002; McNeil et al., 2003). 대규모 산림 벌채나 해수면 온도변화가 대기 중 CO₂ 농도의 급격한 변동을 일으키는데(Seinfeld et al., 1998), 최근 한반도는 이에 속하지 않아 인간 활동의 증가가 한반도의 CO₂ 농도를 증가시키는데 상당 부분 기여하였을 것으로 사료된다(조창범 등, 2005). 또한, 한반도는 다른 지역으로부터 수송의 영향도 받는데, 역궤적분석 결과, 사업이 급성장한 중국의 북경, 상해 등 대도시 지역이 주 배출원으로 나타났다(정성기, 2006).

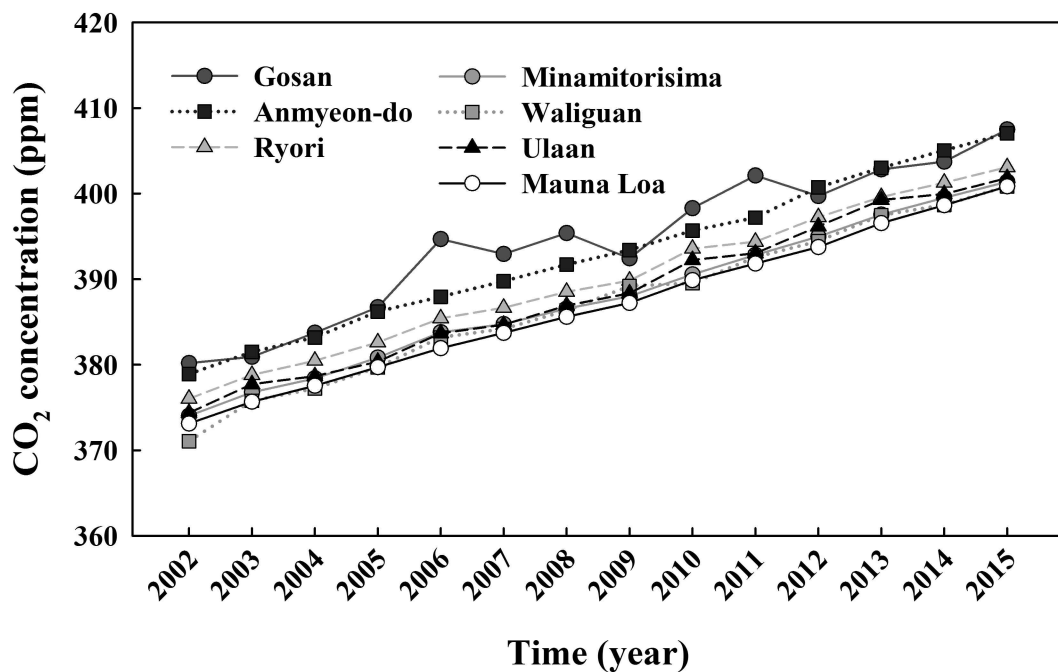


Fig. 16. Annual mean concentrations of CO₂, CH₄, N₂O site (Gosan, Anmyeon-do, Minamitorishima, Ryori, Waliguan, Ulaan) and Mauna Loaduring 2010-2015.

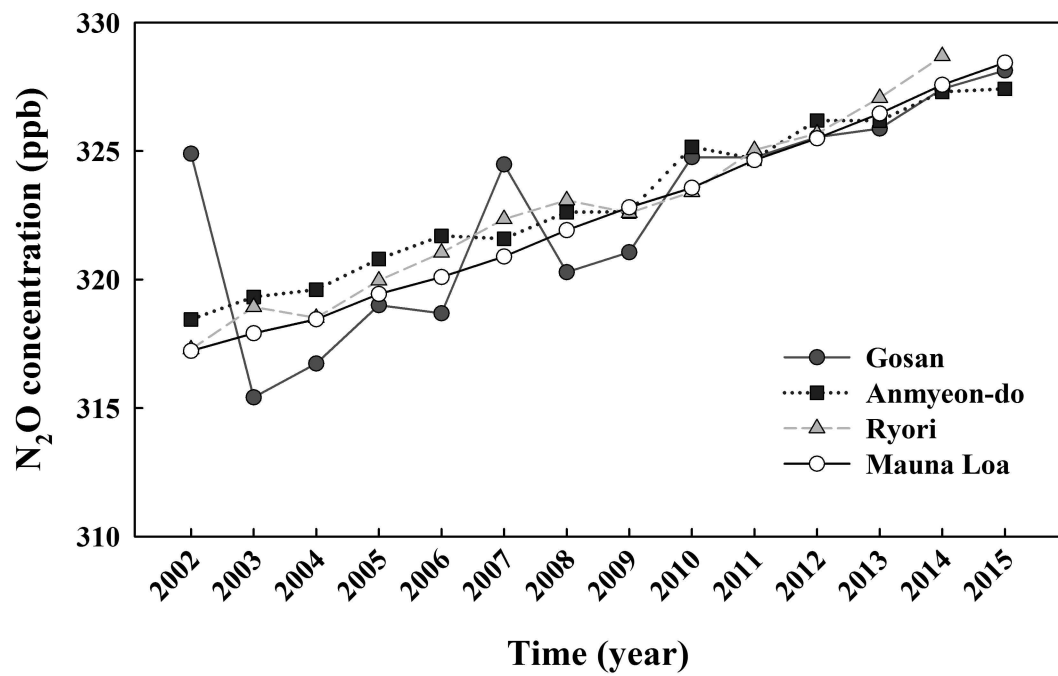
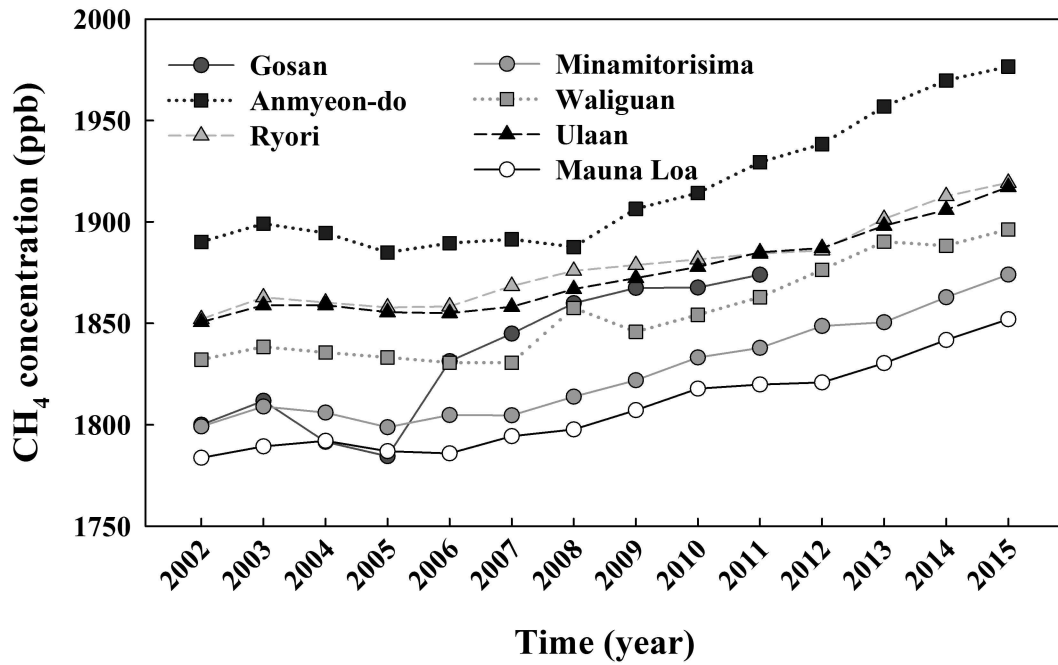


Fig. 16. (Continued.)

Table 9. Annual growth rate of CO₂, CH₄, N₂O concentration at Asia background site and Mauna Loa.

Site	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gosan	2.073 ^a	9.077	0.938
	1.430 ^b -2.597 ^c	3.948-16.486	0.331-1.179
Anmyeon-do	2.137	7.460	0.711
	1.982-2.259	2.385-11.690	0.600-0.835
Ryori	2.063	4.574	0.875
	1.946-2.191	2.833-6.360	0.688-1.121
Waliguan	2.136	5.285	
	1.999-2.380	2.242-8.240	
Mauna Loa	2.090	5.256	0.885
	2.009-2.189	3.495-6.994	0.825-0.935
Minamitorishima	2.080	6.292	
	11.964-2.196	3.610-8.187	
Ulaan	2.128	5.116	
	1.935-2.300	3.130-6.718	
average	2.101	6.151	0.852

CH₄ concentrations for 2012-2015 at Gosan and N₂O concentration for 2015 at Ryori were excluded due to data unavailability.

^arepresents the annual rate of variation

^bestimate of the lower limit of Q with a 99% confidence interval ($\alpha = 0.1$);

^cestimate of the upper limit of Q with a 99% confidence interval ($\alpha = 0.1$);

Fig. 17은 연구 대상지점에서 관측된 CO₂의 최근 14년(2002-2015년)간 월평균 농도를 나타낸다. CO₂ 농도는 봄철에 높고, 여름철에 낮은 뚜렷한 계절 변동을 보였다. 이는 여름철에는 식물의 광합성 작용이 이루어지고, 기온이 높아져 대기에 연직혼합이 활발해지면서 CO₂ 농도가 낮아지는 반면, 겨울철에는 식물의 광합성 활동이 줄어들고 CO₂가 봄철까지 누적되기 때문에 최대값을 보이게 된다 (Pearman and Hyson, 1981). 또한 계절에 따라 각기 다른 곳에서 이동해오는 기단이 계절변동에 영향을 미치는 요인이 되는데(Higuchi et al., 2002, Shoichi et al., 2003), 한반도의 경우, 중국에서 불어오는 편서풍이 강한 계절에 대체로 CO₂ 농도가 높고, 북서태평양에서 깨끗한 남서풍이 불어오는 여름철에 CO₂ 농도가 낮게 나타나는 경향을 보여주고 있다. 우리나라뿐만 아니라 북반구에서의 CO₂ 계절변동 특징은 바람에 의한 수송과 식생의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다.

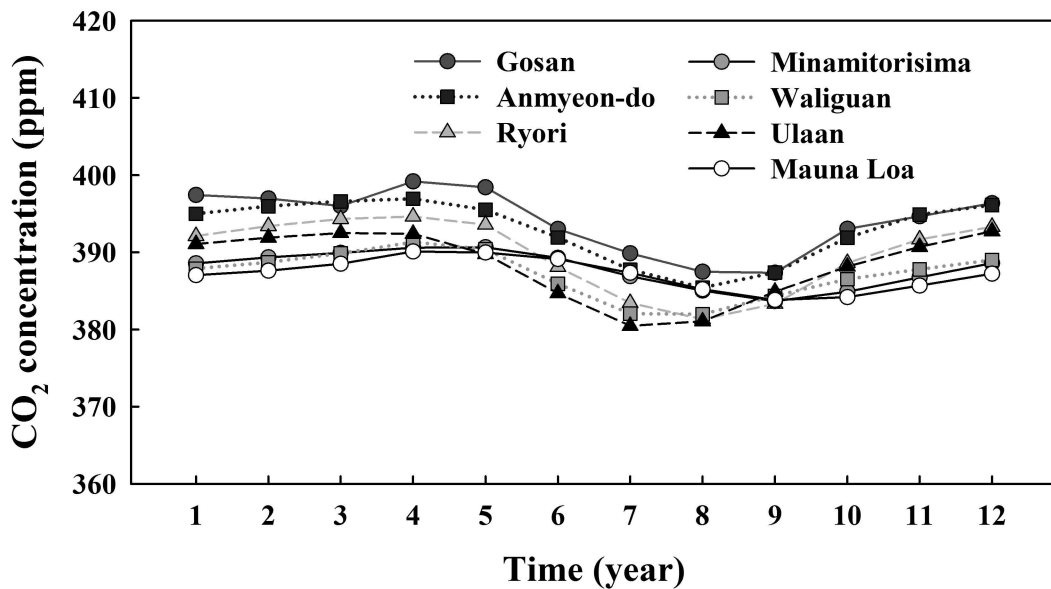


Fig. 17. Monthly mean concentrations of CO₂, CH₄, N₂O at Asia background site (Gosan, Anmyeon-do, Minamitorishima, Ryori, Waliguan, Ulaan) and Mauna Loa during 2010-2015.

3.3.2. 대기복사전달모델을 이용한 복사강제력 및 기온변화 산출

SBDART 모델을 이용하여 아시아 배경지점에서 온실가스 배출에 따른 복사강제력을 산출하였다(Fig. 18). 아시아 배경지점의 연직 오존분포 및 수증기 밀도 자료를 구할 수 없어 US62 대기 프로파일을 이용하였으며, 한반도와 아시아 배경지점의 비교를 위하여 고산과 안면도지점도 US62 대기 프로파일을 이용하였다. 평균기온변화는 복사강제력과의 선형 관계식을 이용하여 산출하였다(Fig. 19).

복사강제력을 분석한 결과, 모든 지점에서 농도 증가 추세와 마찬가지로 복사강제력과 기온변화가 증가하는 추세를 보였다. 고산지점에서 지난 14년(2002~2015년)간 CO₂에 의한 평균 복사강제력 산출 값은 1.62 W/m²(1.19~1.96 W/m²)이며, 안면도지점에는 1.62(1.24~2.02 W/m²)으로 높은 CO₂ 농도가 나타난 고산과 안면도 지점에서 다른 아시아 배경지점보다 높은 복사강제력과 기온변화가 나타났다. 고산과 안면도 다음으로 Ryori (1.57 W/m²), Waliguan (1.56 W/m²), Ulaan (1.55 W/m²), Minamitorishima (1.54 W/m²), Mauna Loa (1.53 W/m²)순으로 나타났다. 국내 배경지점의 CO₂ 복사강제력을 외국의 배경지점과 비교해보면, 지구급 관측소인 Mauna Loa보다 약 5~6% 높으며, 한반도와 비슷한 위도에 있는 지역급 관측소 Ryori보다 약 3% 높게 나타나 같은 아시아 배경지점 중에서도 가장 높게 산출되었다. 참고로 추정식에 의해 산출된 복사강제력과 비교한 결과, 전반적으로 SBDART 모델에서 모의된 복사강제력이 추정식으로부터 계산된 값보다 약 11~13% 낮게 산출되었다.

2002~2015년 CH₄에 의한 평균 복사강제력은 안면도 0.186 W/m², Ryori 0.181 W/m², Ulaan 0.177 W/m², 고산 0.173 W/m², Minamitorishima 0.172 W/m², Mauna Loa 0.169 W/m² 순으로 나타났다. N₂O에 의한 평균 복사강제력은 안면도 0.0438, 고산 0.0430, 료리 0.0429, 마우나로아 0.0427 W/m²순으로 나타났다. 모델에 의해 모의된 CH₄과 N₂O 복사강제력은 추정식에 의해 산출된 결과보다 각각 2.8~3배, 3~4배 낮게 모의되었다. 평균 기온변화도 각 지점별 복사강제력의 변화 특성과 유사한 경향을 보였다.

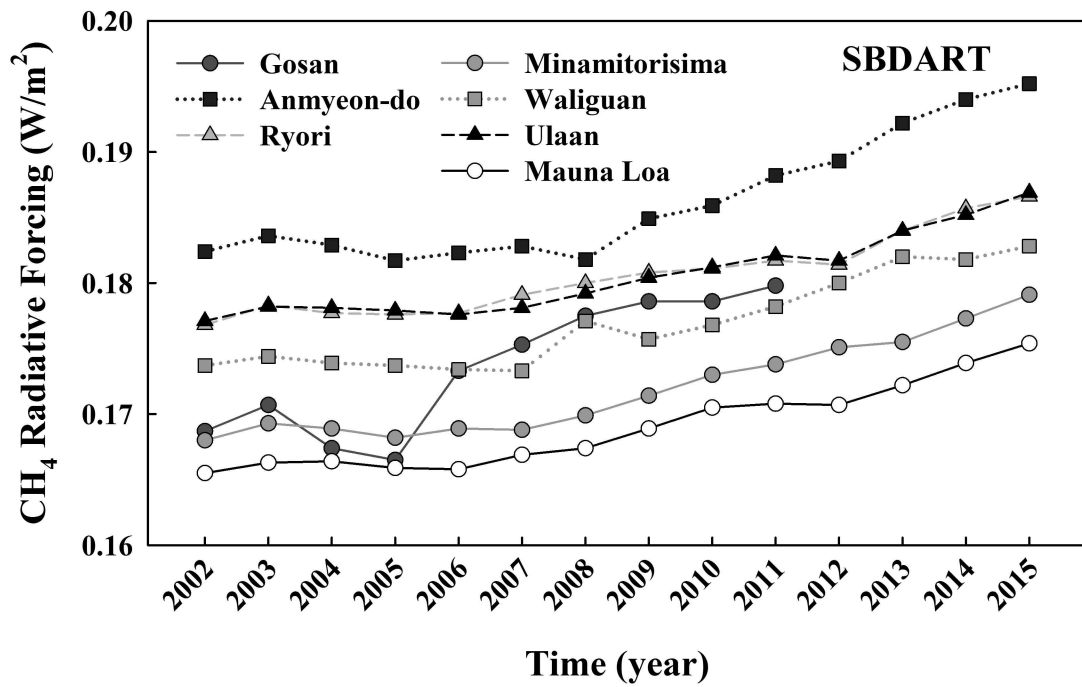
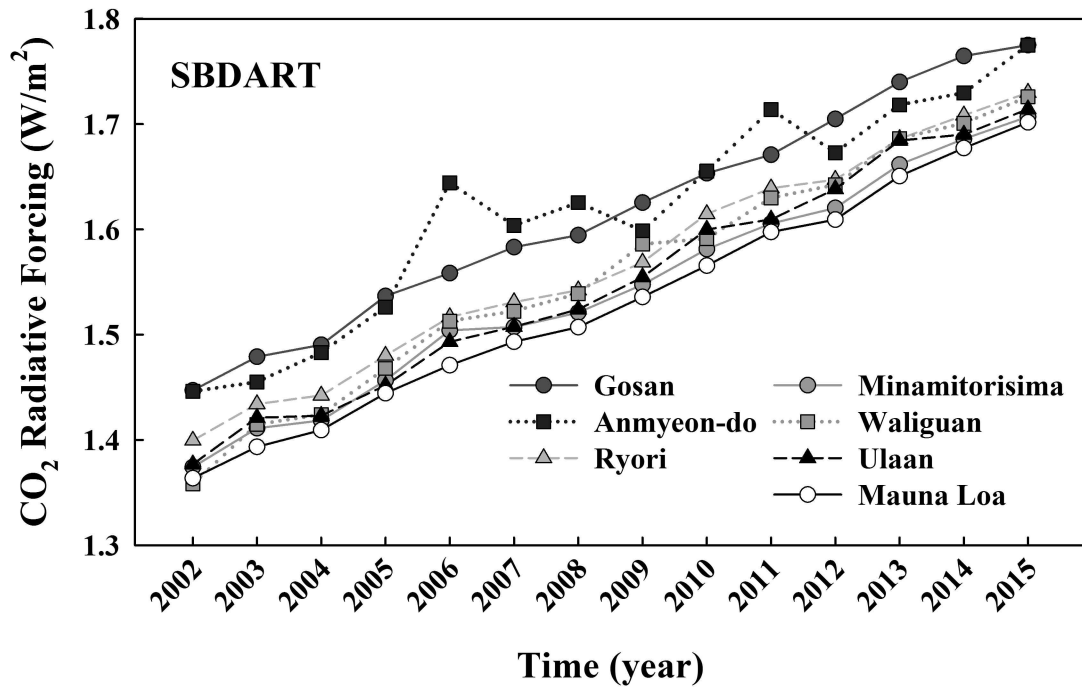


Fig. 18. Annual mean radiative forcing by CO₂, CH₄, N₂O at Asia background site and Mauna Loa during 2002-2015.

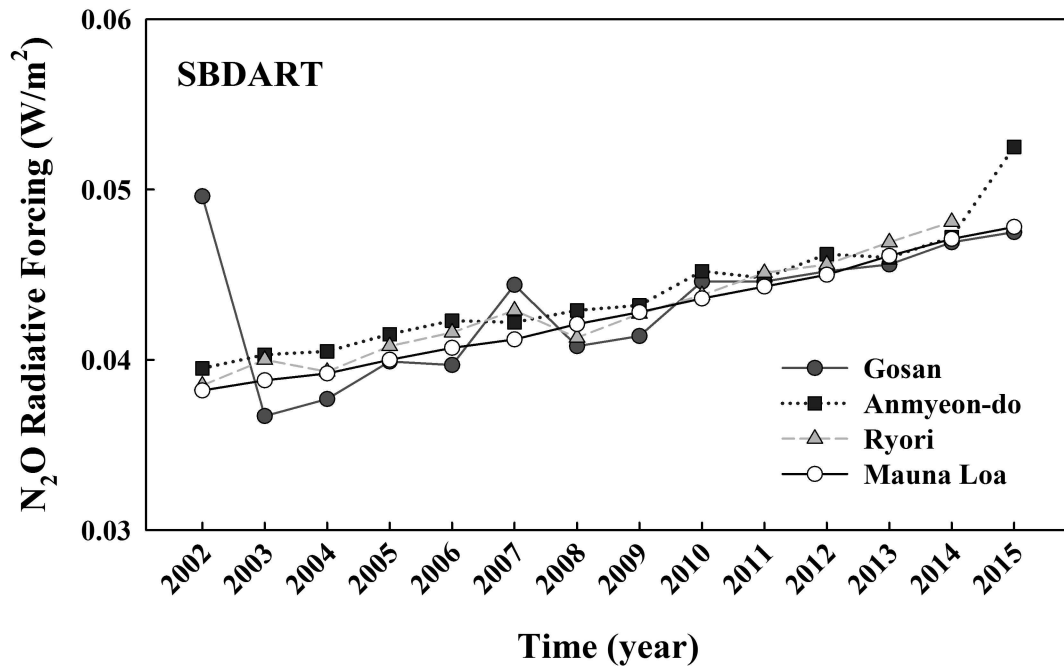


Fig. 18. (Continued.)

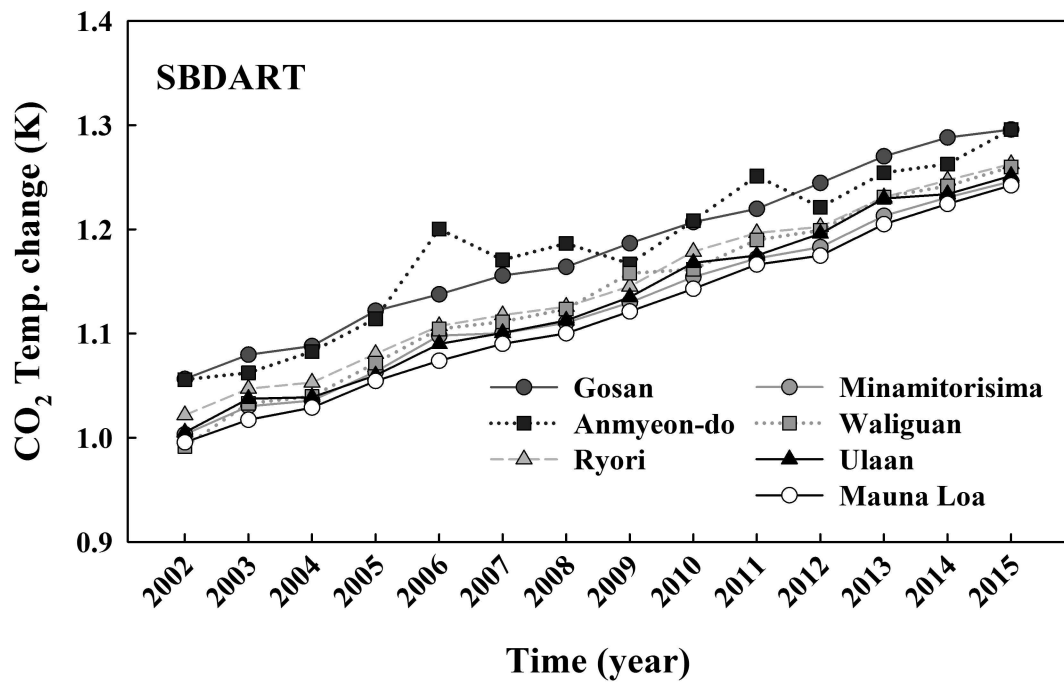


Fig. 19. Annual mean temperature change by CO₂, CH₄, N₂O at Asia background site and Mauna Loa during 2002–2015.

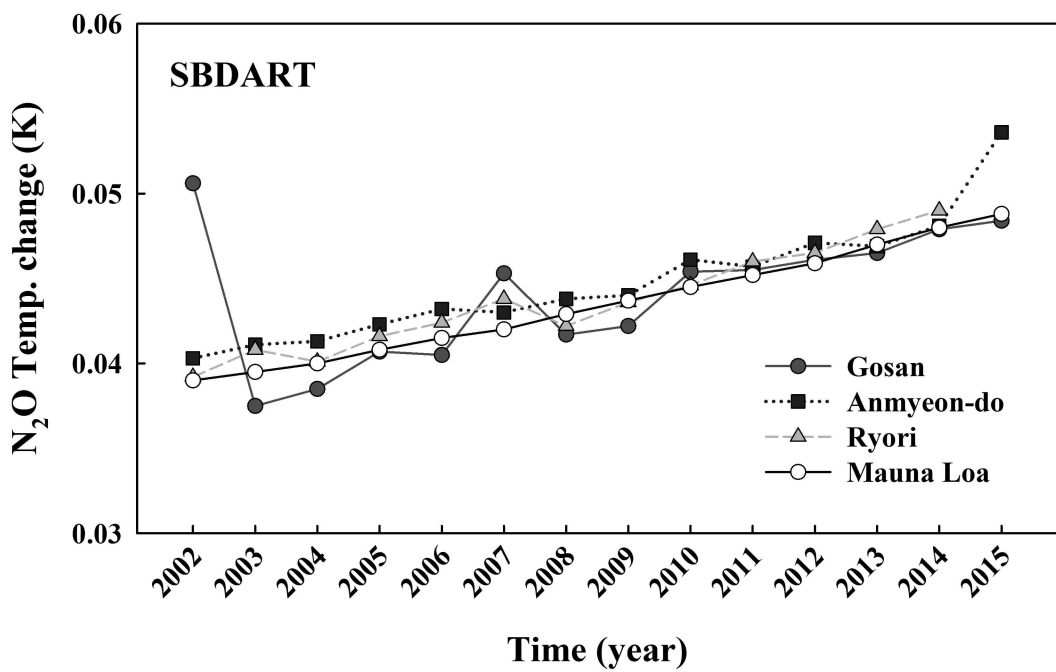
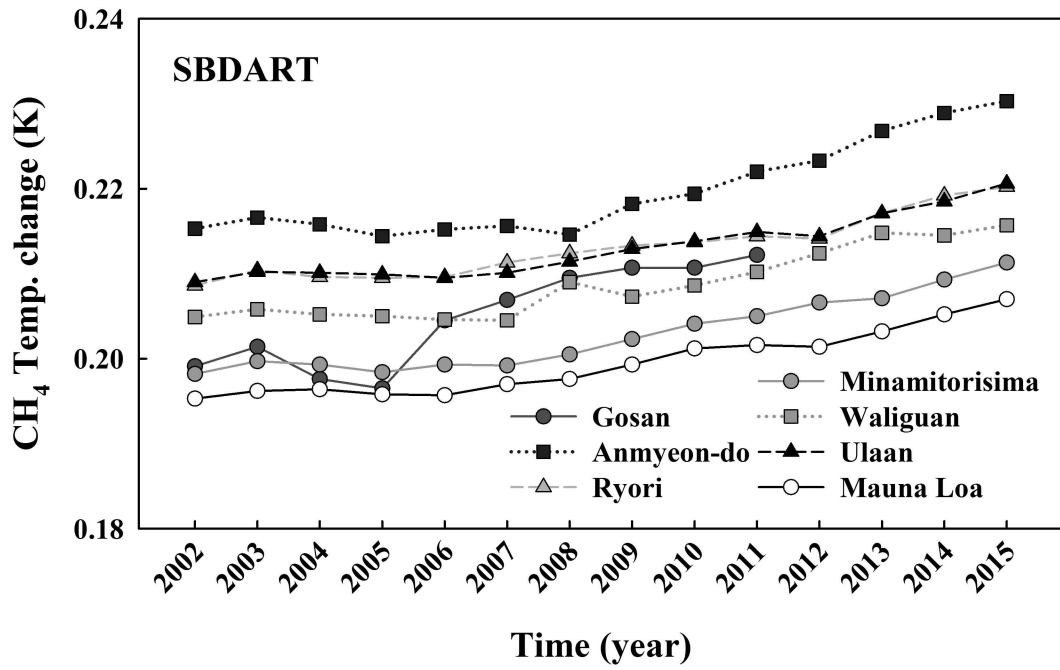


Fig. 19. (Continued.)

Table 10은 2002~2015년간 연구지점에서 CO₂에 의한 월평균 복사강제력을 나타낸다. 고산지점에서 가장 높은 복사강제력이 산출된 월은 12월(1.76 W/m²)이며, 가장 낮은 복사강제력이 산출된 월은 8월(1.45 W/m²)이다. 안면도 지점에서 복사강제력이 가장 높게 산출된 월과 가장 낮게 산출된 월은 각각 1월(1.75 W/m²)과 9월(1.47 W/m²)이며, Ryori에서는 12월(1.72 W/m²)과 8월(1.39 W/m²), Minamitorishima에서는 12월(1.61 W/m²)과 9월(1.45 W/m²), Waliguan에서는 12월(1.68 W/m²)과 7, 8월(1.43 W/m²), Ulaan에서는 12월(1.69 W/m²)과 7, 8월(1.39 W/m²), Mauna Loa에서는 2월(1.59 W/m²)와 9월(1.46 W/m²)로 나타났다. 로 추정식에 의해 산출된 결과에서는 복사강제력이 가장 높게 산출된 월과 가장 낮게 산출된 월은 고산지점에서 4월(1.87 W/m²)과 8월(1.71 W/m²)이며, 안면도에서는 4월(1.90 W/m²)과 9월(1.73 W/m²), Ryori에서는 3, 4월(1.83 W/m²)과 8월(1.65 W/m²)이며, Minamitorishima에서는 4월(1.78 W/m²)과 9월(1.68 W/m²), Waliguan에서는 4월(1.79 W/m²)과 7, 8월(1.66 W/m²), Ulaan에서는 3월(1.81 W/m²)과 7월(1.64 W/m²), Mauna Loa에서는 4, 5월(1.77 W/m²)과 9, 10월(1.69 W/m²)이다.

최소값과 최대값의 차이는 추정식의 경우, 전반적으로 CO₂ 농도가 높았던 봄철인 3, 4, 5월에 복사강제력이 높게 추정되었으며, CO₂ 낮았던 여름철과 초가을인 7, 8, 9월에 낮게 추정되었다. 반면 모델 결과, 겨울철인 1, 2, 12월에 높게 추정되었고, 여름과 초가을철인 7, 8, 9월에 낮게 산출되었다. 또한, 추정식에 의해 산출된 복사강제력은 최소값과 최대값의 차이가 0.08~0.18이었으나, 모델의 경우 0.13~0.33으로 차이가 비교적 크게 나타났다. 이는 추정식의 경우, 농도만이 변수로 고려되어 농도 변화 추세와 같은 경향을 보이지만 대기복사전달모델은 대상지역의 고유 특징과 여러 요인 즉, 표면 알베도, 태양천정각(SZA: Solar zenith angle) 등이 잘 반영되어 결과에서도 뚜렷한 계절특성이 보였다.

Table 10. Comparison of mean radiative forcing by CO₂ between simplified expression and SBDART model with US62 atmospheric profile at Asia background site and Mauna Loa during 2002–2015.

Month	Gosan	Anmyeon-do	Ryori	Minamitorishima	Waluguan	Ulaan	Mauna Loa
Jan	1.74 ^a /1.84 ^b	1.75/1.87	1.68/1.80	1.61/1.75	1.65/1.74	1.67/1.79	1.58/1.73
Feb	1.75/1.85	1.74/1.87	1.71/1.82	1.61/1.76	1.67/1.75	1.68/1.80	1.59/1.74
Mar	1.70/1.86	1.67/1.85	1.66/1.83	1.59/1.77	1.63/1.77	1.64/1.81	1.57/1.75
Apr	1.65/1.87	1.66/1.90	1.61/1.83	1.55/1.78	1.59/1.79	1.58/1.80	1.56/1.77
May	1.59/1.85	1.62/1.89	1.56/1.82	1.54/1.78	1.55/1.78	1.52/1.77	1.54/1.77
Jun	1.53/1.80	1.54/1.81	1.47/1.75	1.53/1.76	1.48/1.72	1.44/1.70	1.54/1.76
Jul	1.49/1.74	1.50/1.77	1.41/1.68	1.50/1.73	1.43/1.66	1.39/1.64	1.51/1.70
Aug	1.45/1.71	1.48/1.74	1.39/1.65	1.48/1.70	1.43/1.66	1.39/1.65	1.48/1.71
Set	1.48/1.74	1.47/1.73	1.42/1.68	1.45/1.68	1.47/1.69	1.45/1.70	1.46/1.69
Oct	1.58/1.80	1.57/1.81	1.53/1.75	1.49/1.70	1.51/1.72	1.53/1.75	1.48/1.69
Nov	1.67/1.84	1.65/1.83	1.63/1.79	1.55/1.73	1.60/1.74	1.61/1.78	1.52/1.71
Dec	1.76/1.85	1.73/1.86	1.72/1.82	1.61/1.75	1.68/1.76	1.69/1.81	1.58/1.73

^aCO₂ radiative forcing by SBDART model.

^bCO₂ radiative forcing by simplified expression.

Fig. 20은 연구기간 동안 연구 대상지역에서 CO₂에 의한 복사강제력의 월별 박스플롯을 나타낸다. 한반도인 고산과 안면도는 다른 아시아 배경지점에 비해서 CO₂ 평균 복사강제력이 높게 나타났다. 평균 복사강제력은 안면도와 고산에서 가장 높고, 다음으로 Ryori, Waliguan, Ulaan, Minamitorishima, Mauna Loa 순으로 나타났다. Mauna Loa와 Minamitorishima는 변동폭이 작게 나타났다. 북반구의 대부분 지역은 계절풍에 따라 봄과 겨울철에는 내륙의 영향으로 CO₂ 농도가 높아져서 복사강제력도 높아지고 여름철에는 해양의 영향을 받아 농도가 낮아져 복사강제력도 낮아진다. 그러나 바다 한가운데 위치한 섬은 계절풍의 영향을 받지 않아 변동폭이 작다.

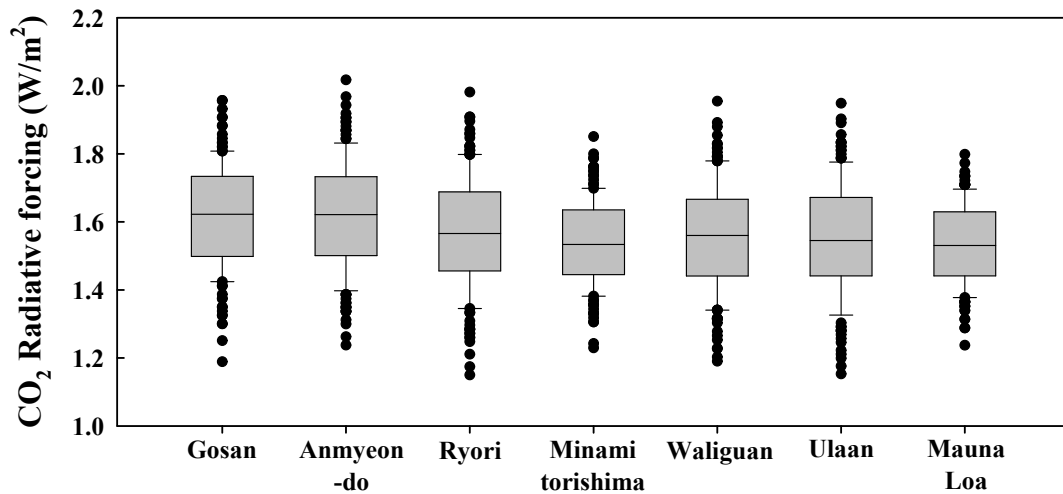


Fig. 20. Box plots for CO₂ radiative forcing at Asia background sites and Mauna Loa during 2010-2015.

Fig. 21은 2010~2015년 기간 고산지점의 복사강제력을 세 가지 방법으로 산출한 결과이다. 추정식에 의해 복사강제력을 산출했을 경우 농도와 같은 추세를 보였으며 계절특성이 크지 않았다. 고산지점을 대상으로는 두 가지 방법으로 모델을 수행하였는데, 모델 모의 방법 중 첫 번째는 직접 구성한 대기 프로파일을 사용하였고, 두 번째는 미국 표준대기인 US62 대기 프로파일을 사용하였다. 대상 지역의 대기 프로파일을 고려한 결과에서 계절특성이 가장 뚜렷하게 나타났으며 추정식으로부터 산출된 결과(평균 1.77 W/m^2 , 최소~최대는 $1.50\sim 2.0 \text{ W/m}^2$)보다 높은 복사강제력이 산출되었으나(평균 2.19 W/m^2 , 최소~최대는 $1.16\sim 2.71 \text{ W/m}^2$), US62를 사용한 결과 월별 편차가 추정식 결과보다 약간 크게 나타났으며 평균 복사강제력은 추정식에 의한 결과보다 낮게 산출되었다(평균 1.61 W/m^2 , 최소~최대 편차 $1.19\sim 1.96 \text{ W/m}^2$). 이러한 원인은 추정식보다 복사전달 모델이 여러 요인을 복합적으로 고려하기 때문이다. 이 결과를 통해 연구 대상 지역의 연직 기상자료, 오존 분포 등을 고려하여야 보다 더 정확하게 복사강제력을 산출할 수 있음을 알 수 있다.

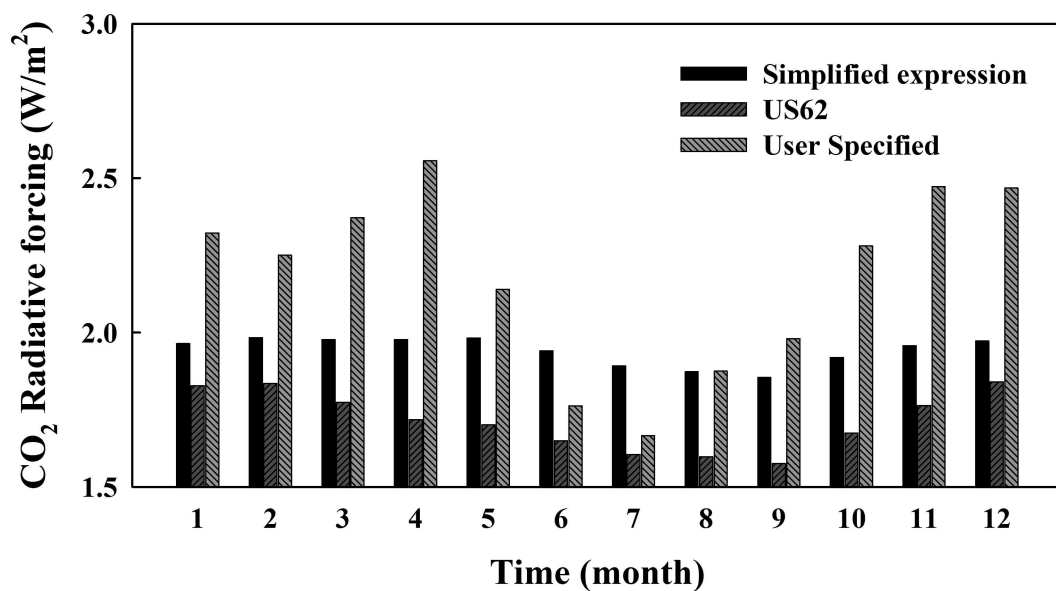


Fig. 21. Comparison of mean radiative forcing by CO_2 between simplified expression, SBDART model with US62 and User Specified.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 6년(2010~2015년)동안 제주도 배경지점(고산)과 도심지점(연동)에서 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O)에 의한 복사강제력을 IPCC 보고서에 제시된 단순화된 복사강제력 추정식과 3차원 복사전달모델인 SBDART model을 이용하여 산출하였고, 평균 기온변화는 복사강제력과 기온변화의 선형관계식을 이용하여 산출하고 그 결과를 비교 분석하였다. 또한, 한반도와 다른 아시아 배경지점 및 대표적인 지구대기감시관측소 Mauna Loa와의 기후환경 변화를 비교 분석하기 위해 온실가스 농도 변화와 그에 따른 복사강제력 및 평균 기온변화를 살펴보았다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연구기간(2010~2015년) 제주도에서 CO_2 농도는 전반적으로 고산보다 연동지점에서 높게 나타났으며, 두 지점에서 모두 증가하는 추세를 보였다. 고산과 연동지점에서 CO_2 농도는 전반적으로 봄철과 겨울철에 농도가 높게 나타났으며, 다음으로 가을철, 여름철 순서이다. 겨울철에 주거, 상업 지역 등 여러 지역에서 난방 사용이 증가하여 CO_2 농도의 증가했고, 여름철에는 식물의 광합성 작용이 활발해져 상대적으로 낮은 농도를 보였다. 고산과 연동지점의 주중과 주말의 CO_2 농도를 분석한 결과, 고산지점에서는 주중보다 주말에 약간 높게 나타났으며, 연동지점에서는 주말보다 주중에 다소 높게 나타났다. 시간별 CO_2 농도는 두 지점에서 모두 주저야고의 특성을 보였으나, 연동지점이 고산지점에 비해 그 차이가 훨씬 뚜렷하게 나타났다. 이는 도심지인 연동은 주중과 오후-야간시간대에 인간 활동에 의한 인위적인 영향을 받지만 외곽지인 고산은 주로 항상 인위적인 영향을 받기 때문이다.

2) CO_2 에 의한 평균 복사강제력은 연동이 고산지점보다 높게 산출되었는데, 이는 인구 증가와 그에 따른 인간활동(화석연료 사용)으로 인한 연동의 CO_2 농도

가 더 높아졌기 때문이다. 모델에 의해 모의된 고산과 연동의 평균 복사강제력은 각각 2.19(1.16~2.71 W/m²), 2.21(1.22~2.82 W/m²)으로 추정식에 의해 산출된 평균 복사강제력 1.94(1.82~2.08 W/m²), 1.98(1.68~2.41 W/m²)에 비해 11, 13% 높았다. 월별 복사강제력을 살펴본 결과, 추정식보다 모델모의 결과에서 계절특성이 뚜렷하게 나타났는데 이는 연구 대상지역의 고도에 따른 기압, 기온, 오존 등을 고려했기 때문이다. 특히, 성층권의 오존은 자외선을 흡수하는 성질이 있어 오존농도가 높을수록 지표에 도달하는 태양에너지가 줄어든다. 따라서 성층권에 오존량에 따라 하향 복사에너지가 달라지며, 그에 따라 다시 방출되는 상향에너지도 달라진다. 여름철에는 상층 오존의 농도가 높음에 따라 자외선이 차단되어 지표에 도달하는 양이 줄어들게 되고, 그에 따라 지표에서 다시 외부로 방출되는 에너지 또한 줄어들어 복사강제력 값이 낮게 모의되었음을 상관성 분석을 통해서 확인할 수 있다. 본 연구에서는 한반도의 오존 연직분포 관측지점이 한정되어 있기에 포항지점의 오존 연직분포 자료를 이용하였는데, 향후에는 고산 및 연동 지점에서 오존 연직분포 관측을 실시할 경우 더 정확한 복사강제력을 모의할 것으로 기대된다.

3) 한반도와 아시아 배경지점 및 지구급 관측소인 Mauna Loa의 온실가스 농도 변화를 분석한 결과 다른 배경지점에 비해 한반도에서 온실가스 농도가 비교적 높게 나타남을 알 수 있었다. 추정식에 의해 산출된 월평균 복사강제력의 경우, 전반적으로 봄철에 높았으나, 반면 모델에 의해 모의된 복사강제력은 겨울철에 높게 산출되었다. 이는 모델을 모의할 때는 지리적 위치와 시간에 따라 SZA이 내부 알고리즘에 의해 계산되고, 표면 알베도 등이 반영되어 월별 특성이 나타난 것으로 사료된다.

본 연구에서 3차원 복사전달모델을 이용하여 산출된 복사강제력 분석은 단순화된 추정식의 한계점을 보완하여 연구 대상지점의 기후환경 변화를 상세하게 파악할 수 있다. 추정식은 전 지구적 대기 특성을 보편화시켜서 하나의 상수로 적용하므로 연구지역 고유의 특성을 잘 반영하지 못한다는 한계점이 있다. 복사전달모델의 경우, 대기프로파일을 고려하지 않을 경우보다 고려하였을 때 더 정

확한 결과를 산출할 수 있다. 따라서, 보다 정확한 복사강제력을 산출하기 위해서는 연구지역의 대기 프로파일을 고려하여 복사전달모델을 수행하여야 한다. 본 연구수행의 결과로, 우리나라에서 온실가스에 의한 기후환경 변화를 예측하는데 참고가 될 것으로 보이며, 대응방안 마련에 기초적인 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 기상청, 2007, 지구대기감시보고서 2006, 기상청.
- 기상청, 2013, 지구대기감시보고서 2012, 기상청.
- 기상청, 2014, 지구대기감시보고서 2013, 기상청.
- 김승연, 이상덕, 김덕래, 이재범, 송창근, 최광호, 한진석, 2014, 제주도 고산지역 CO₂ 농도의 단기 변동에 영향을 미치는 요인 분석, 한국대기환경학회지, 30(5), 423-433.
- 박기준, 최재천, 최병철, 정효상, 2005, 한반도 배경대기지역의 이산화탄소 (CO₂) 농도 변동 특성. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 41(6), 955-965.
- 반영운, 정지형, 백종인, 김유미, 2012, 온실가스 배출특성에 따른 배출영향 요인 분석: 청주시를 중심으로. 한국지역개발학회지, 24(2), 15-28.
- 송상근, 손장호, 정주희, 2014a, 국내 대규모 공항의 항공기 온실가스 배출에 따른 복사강제력 및 기온변화 영향 연구. 한국대기환경학회지, 30(3), 223-232.
- 송상근, 손장호, 정주희, 2014b, 국내 공항의 항공기 온실가스 배출에 의한 복사 강제력 및 기온변화 영향 연구: 배출량에 의한 추정식과 복사전달모델의 비교 분석. 한국대기환경학회지, 30(5), 411-422.
- 이수정, 송상근, 박연희, 2016, 최근 제주도 도심과 배경지점에서의 CO₂ 농도 변화 및 복사강제력 영향 연구. 한국환경과학회지, 25.7: 973-987.
- 이재영, 민경덕. 2007, 비분산 적외선 흡수법을 이용한 고속응답 CO₂ 분석기의 제작 및 엔진 적용에 관한 연구. 한국자동차공학회논문집, 15(6), 102-107.
- 정성기, 2006, 제주도 고산 대기연속관측을 통한 한반도 주변 이산화탄소 방출지역 추정에 관한 연구, 서울대학교 대학원.
- 정유란, 이규중, 이변우, 2007, 도시-전원간 이산화탄소 (CO₂) 농도구배 예비관측

- 결과. 한국농림기상학회지, 9(4), 268-276.
- 조창범, 오성남, 박기준, 최병철, 박미경, 김경렬. 2005, 한반도 배경대기 중 이산화탄소의 농도 변동과 근간 (近間) 에 대한 예측. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 41(3), 371-385.
- 한국기상학회, 2006, 대기과학개론, 시그마프레스.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., and Collins, W. D., 2008, Radiative forcing by long lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13).
- Anttila, P., and Tuovinen, J. P., 2010, Trends of primary and secondary pollutant concentrations in Finland in 1994-2007, *Atmos. Environ.*, 44, 30-41.
- Brittain M. Briber, Lucy R. Hutyrá, Allison L. Dunn, Steve M. Raciti and J. William Munger, 2013, Variations in Atmospheric CO₂ Mixing Ratios across a Boston, MA Urban to Rural Gradient, *Land*, 2013, 2.3: 304-327.
- Büns, C., and Kuttler, W., 2012, Path-integrated measurements of carbon dioxide in the urban canopy layer. *Atmospheric environment*, 46, 237-247.
- Cerverny, R. S., and Coakley, K. J., 2002, A weekly cycle in atmospheric carbon dioxide. *Geophysical research letters*, 29(2).
- Chung, Y.-S. and P. Tans, 2000, Monitoring greenhouse gases at Tae-Ahn Peninsula, Korea, *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 36(1), 25-34.
- Denman, K. L., Brasseur, G. P., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., and Lohmann, U., 2007, Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Climate change 2007: The physical science basis*.
- Dlugokencky, E. J., Harris, J. M., Chung, Y. S., Tans, P. P., and Fung, I.,

- 1993, The relationship between the methane seasonal cycle and regional sources and sinks at Tae-ahn Peninsula, Korea. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 27(14), 2115-2120.
- Hansen, J., Sato, M, and Ruedy, R. Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102.D6: 6831-6864.
- Hansen, J., Sato, M, Ruedy, R, Nazarenko, L., Lacis, A., Schmidt, G. A. and Russell, G., 2005, Efficacy of climate forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104.
- Higuchi, K., Murayama, S., and Taguchi, S., 2002, Quasi-decadal variation of the atmospheric CO₂ seasonal cycle due to atmospheric circulation changes: 1979-1998. *Geophys. Res. Lett*, 29, 10.1029/2001GL013751.
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., and Collins, W. D., 2008, Radiative forcing by long lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D13).
- IPCC, 1995, IPCC Second Assessment. Secretaria do IPCC, 1995 Organização Mundial de Metereologia, Genebra, Dezembro.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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.
- Keeling, C. D., Bacastow, R. B., Bainbridge, A. E., Ekdahl, C. A., Guenther, P. R., Waterman, L. S., and Chin, J. F., 1976, Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa observatory, Hawaii. *Tellus*, 28(6), 538-551.
- Lelieveld, J. O. S., Crutzen, P. J., and Dentener, F. J., 1998, Changing

- concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50(2), 128–150.
- Lim, L., Lee, D. S., Sausen, R. and Ponater, M., 2006, Quantifying the effects of aviation on radiative forcing and temperature with a climate response model, *Proceedings of the TAC-Conference*, Oxford, UK.
- Liu, H. Z., Feng, J. W., Järvi, L., and Vesala, T., 2012, Four-year (2006 - 2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(17), 7881–7892.
- McNeil, B. I., Matear, R. J., Key, R. M., Bullister, J. L., and Sarmiento, J. L. , 2003,. Anthropogenic CO₂ uptake by the ocean based on the global chlorofluorocarbon data set. *Science*, 299(5604), 235–239.
- Myhre, G., Highwood, E. J., Shine, K. P., and Stordal, F., 1998, New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases. *Geophysical research letters*, 25(14), 2715–2718.
- NOAA CMDL, 2002, CMDL summary Report, 26, 28–50
- Pearman, G. I., and Hyson, P., 1981, The annual variation of atmospheric CO₂ concentration observed in the northern hemisphere. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C10), 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, A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2101–2114.
- Steinfeld, J. I., 1998, Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 40(7), 26–26.
- Shoichi, T., Murayama, S., and Higuchi, K., 2003, Sensitivity of inter-annual variation of CO₂ seasonal cycle at Mauna Loa to atmospheric

- transport. *Tellus*, 55B, 547-554.
- 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., and Spain, G., 2004, Significant growth in surface ozone at Mace Head, Ireland, 1987-2003, *Atmos. Environ.*, 38, 4769-4778.
- Stamnes, K., Tsay, S. C., Wiscombe, W., and Laszlo, I., 2000, DISORT, a general-purpose Fortran program for discrete-ordinate-method radiative transfer in scattering and emitting layered media: documentation of methodology. Goddard Space Flight Center, NASA.
- Tohjima, Y., Machida, T., Utiyama, M., Katsumoto, M., Fujinuma, Y., and Maksyutov, S., 2002, Analysis and presentation of in situ atmospheric methane measurements from Cape Ochi-ishi and Hateruma Island, *Journal of Geophysical Research*, 107, D12, 4148-4159.
- Wentz, E. A., Gober, P., Balling Jr, R. C., and Day, T. A., 2002, Spatial patterns and determinants of winter atmospheric carbon dioxide concentrations in an urban environment. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(1), 15-28.
- Ziska, L. H., Bunce, J. A., and Goins, E. W., 2004, Characterization of an urban-rural CO₂/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia*, 139(3), 454-458.

[인터넷 사이트]

기상청, <http://web.kma.go.kr>

제주특별자치도청, <http://www.jeju.go.kr>

교통안전공단, <http://www.ts2020.kr>

두산백과사전 두피디아, <http://www.doopedia.co.kr>

NOAA, <http://www.noaa.gov/>

A Study on Climate Environmental Change due to Greenhouse Gases at Background and Urban Center sites on Jeju Island: Comparison between Radiative Transfer Model and Simplified Expressions

Soo-jeong Lee

Department of Earth and Marine Sciences, Graduate School, Jeju National University, Jeju, Korea

Abstract

In this study, The temporal variations of CO₂ concentrations and radiative forcing (RF) due to greenhouse gas (CO₂, CH₄, and N₂O) were examined at background sites (Gosan) and urban center (Yeon-dong) during 2010–2015 in Jeju area. Overall, annual mean CO₂ concentrations at Yeon-dong and Gosan sites have gradually increased, and higher concentrations (401–422 ppm) at Yeon-dong than those (398–407 ppm) at Gosan. 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 RFs at the two sites were estimated based on simplified expressions for calculating RF for the study period. The radiative transfer model (Santa Barbara

DISORT Atmospheric Radiative Transfer, SBDART) was then used to compare with changes in the RFs calculated from the simplified expressions for greenhouse gas. Radiative forcing for CO₂ calculated from the simplified expressions at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015 were 1.94 and 1.98 W/m² respectively. Radiative forcing for CO₂ simulated by the SBDART at Gosan and Yeon-dong during 2010–2015 were 2.18 and 2.20 W/m² respectively. The CO₂ RF simulated by the SBDART was about 12~13% higher than that of the simplified expression, on average. Unlike the simplified expressions, the SBDART model utilized meteorological conditions such as vertical atmospheric profile (atms. dat) and surface albedo of the study area (i.e., Jeju). Therefore, it is to expect that the results simulated with the SBDART will be more realistic than those derived from the simplified expressions. The RF by CO₂ at Yeon-dong (2.11–2.41 W/m²) was higher than that at Gosan (2.10–2.29 W/m²), possibly because of higher CO₂ concentrations at Yeon-dong resulting from population growth and human activities (e.g., fossil fuel combustion). The highest mean RFs at Yeon-dong (approximately 2.82 W/m²) and Gosan (2.71 W/m²) occurred in Mar 2015 (Yeon-dong) and Apr 2011 (Gosan), whereas the lowest RFs (1.22 and 1.31 W/m², respectively) in fall 2011 (Yeon-dong) and summer in 2012 (Gosan). We analyzed the change in greenhouse gas concentrations in the Korea, Asia background sites and global atmosphere watch observatory (Mauna Loa). Greenhouse gas concentrations were relatively high in Korea compared to other background sites. The highest monthly mean RFs by simplified expression was observed in spring, whereas the highest monthly mean RFs by SBDART was simulated in winter. The SBDART model utilized surface albedo and solar zenith angle of the study area. As a result, monthly characteristics appeared.