

국내 공항의 항공기 온실가스 배출에 의한 복사강제력 및 기온변화 영향 연구: 배출량에 의한 추정식과 복사전달모델의 비교 분석

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

송 상 근 · 손 장 호^{1)*} · 정 주 희²⁾

제주대학교 지구해양학과, ¹⁾동의대학교 환경공학과, ²⁾부산대학교 대기환경과학과
(2014년 6월 18일 접수, 2014년 7월 14일 수정, 2014년 8월 5일 채택)

Sang-Keun Song, Zang-Ho Shon^{1)*} and Ju-Hee Jeong²⁾
Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University
¹⁾*Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University*
²⁾*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*
(Received 18 June 2014, revised 14 July 2014, accepted 5 August 2014)

Abstract

In this study, spatial and temporal variations of radiative forcing (RF) and mean temperature changes due to greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) emitted from commercial aircraft were examined based on the simplified expression at the airports in Korea during 2009~2010. The radiative transfer model (SBDART) was used to compare with the RF and mean temperature changes calculated from the simplified expressions for greenhouse gas CO₂. The RF simulated by the SBDART was about 67% higher than that of the simplified expression, on average. The highest mean RF (up to 9.0 mW/m² for CO₂) and mean temperature changes (up to 9.7×10^{-5} °K/day for CO₂) for all GHGs occurred at Ulsan airport during the study period, whereas the lowest RF and temperature changes at Yangyang (for CO₂) and Sacheon airports (for CH₄ and N₂O). In the case of CH₄ and N₂O, their effects to the RF and mean temperature change were negligible compared to CO₂.

Key words : Greenhouse gas emissions, Radiative forcing, Mean temperature change, Airport, Aircraft, Simplified expression, Radiative transfer model, SBDART

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-890-2078, E-mail : zangho@deu.ac.kr

1. 서 론

지구대기에 미량 포함되어 있는 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 등)는 주로 지구복사(장파복사)를 흡수하여 지표부근의 기온을 상승시키는 역할을 하는 것으로 잘 알려져 있다. 이러한 온실가스의 배출량과 농도는 산업혁명 이후 인위적 배출원의 급격한 증가에 의해 크게 증가하고 있다(IPCC, 2013). 예를 들어, 전 지구적으로 인위적 배출원에 의한 CO_2 의 연 배출량은 1970년 28.7 Gt CO_2 -eq/yr로 보고된 이후로 2004년에는 약 1.7배 증가한 약 49.0 Gt CO_2 -eq/yr로 나타났다. 이 외에도 우리나라 안면도 지구대기감시 관측소에서 지난 7년(1999~2005년) 동안 온실가스 관측 자료를 분석한 결과, 한반도 부근의 온실가스 농도 증가율이 전 지구 평균농도의 증가율보다 높게 나타났음을 발표하였다(<http://www.kma.go.kr>). 즉, CO_2 , CH_4 , N_2O 의 전 지구 평균농도 증가율은 각각 1.9 ppm/yr, 3.7 ppb/yr, 0.8 ppb/yr인 반면, 한반도(안면도)에서의 증가율은 2.7 ppm/yr, 4.6 ppb/yr, 0.9 ppb/yr으로 나타났다.

온실가스의 인위적 배출원 중에서 육상교통(도로, 철도 등) 및 해상교통의 수송에 의한 배출은 주로 지표 근처에 집중되고 있으며, 이는 대상지역의 기후변화에 상당한 영향을 미친다는 연구결과가 발표된 바 있다(Uherek *et al.*, 2010). 반면, 물류수송 수단의 한 부분을 차지하는 항공기로부터 온실가스의 배출은 지표뿐만 아니라 지상으로부터 다양한 고도에 이르기까지, 즉 대기경계층 내에서의 항공기 이·착륙(LTO: Landing/Take-Off)과 대류권에서의 항공기의 상승(climb) 및 하강(descend), 그리고 순항(cruise)에 의해서 배출된다. 항공기는 지표에서 대류권 상부까지 비행하면서 배출되고 있는 물질은 대류권 오존농도의 변화를 초래하고, 또한 배출가스로 인한 비행운(contrail) 생성은 태양복사의 반사 및 지구 장파복사를 흡수한다(Stuber and Forster, 2007; Travis *et al.*, 2002; Schumann, 1997).

항공기에서 배출되는 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O 등) 및 입자상물질(PM_{10})과 기후변화에 대한 연구로서, 각 배출물질에 따라 CO_2 , H_2O , soot(검댕), 비행운(contrail)은 지구온난화에 주로 기여하는 반면(Lee *et al.*, 2009; Travis *et al.*, 2002), 황산염 에어로솔, NO_x

에 의한 CH_4 감소 등은 지구냉각화를 유발시키는 것으로 밝혀졌다(Lee *et al.*, 2009). 그들은 2000~2005년 사이 항공에 의한 전체 복사강제력(Total aviation RF)이 약 14%까지(항공기-권운(aviation-induced cirrus)에 의한 RF 제외) 증가하며, 특히 2005년의 항공에 의한 복사강제력은 약 55 mW/m²로 전체 인위적 복사강제력의 3.5% 정도 차지하는 것으로 보고하였다. 또한 항공기-권운을 포함한 경우의 복사강제력은 약 78 mW/m²로 추정되었으며, 이것은 전체 인위적 복사강제력의 4.9%를 차지하는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2010).

과거 오래전부터 지금까지 국내외적으로 항공기로부터 배출되는 온실가스와 대기오염물질의 배출량 산정 및 영향에 관한 연구는 많이 수행되어 왔다(Song and Shon, 2014a; Shon *et al.*, 2013; Fan *et al.*, 2012; Song and Shon, 2012a, b; Santoni *et al.*, 2011; Gauss *et al.*, 2006; Schumann, 1997; Johnson *et al.*, 1992). 그러나 기후변화의 측면에서 항공기 온실가스 배출은 매우 중요함에도 불구하고 이에 따른 복사강제력 산출 및 기온변화의 특성에 관한 연구는 상대적으로 다소 적은 편이며, 특히 국내에서는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 국내 소규모 공항에서 항공기의 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O) 배출자료를 이용하여 각 물질의 농도를 산정하였으며, 온실가스 배출량에 의한 복사강제력 추정식과 3차원 복사전달모델을 이용하여 소규모 공항의 항공기에서 배출되는 온실가스에 의한 복사강제력과 기온변화에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 이전 연구(Song *et al.*, 2014)에서 배출량에 의한 추정식을 이용하여 산출한 국내 대규모 국제공항에서의 복사강제력 변화와 비교하였다. 따라서 본 연구의 결과는 우리나라 전체 공항에서의 항공기 온실가스 배출에 따른 기후변화(예, 복사강제력) 영향을 파악하는 데 일조할 것으로 사료되며, 또한 본 연구는 온실가스 배출량에 의한 추정식과 복사전달모델의 결과를 상호 비교분석하는 데 큰 의의를 두고 있다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 항공기 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O 등) 배출에 따른 복사강제력 및 기온변화의 영향을

분석하기 위하여 연구대상지역으로 모든 국내 소규모 공항을 선정하였다. 각 공항별 ICAO (International Civil Aviation Organization) 코드는 다음과 같다. 광주공항은 RKJJ이며, 청주공항 RKTU, 대구공항 RKTN, 울산공항 RKPU, 여수공항 RKJY, 포항공항 RKTH, 사천공항 RKPS, 무안공항 RKJB, 군산공항 RKJK, 원주공항 RKNW, 양양공항 RKNY이다. 그림

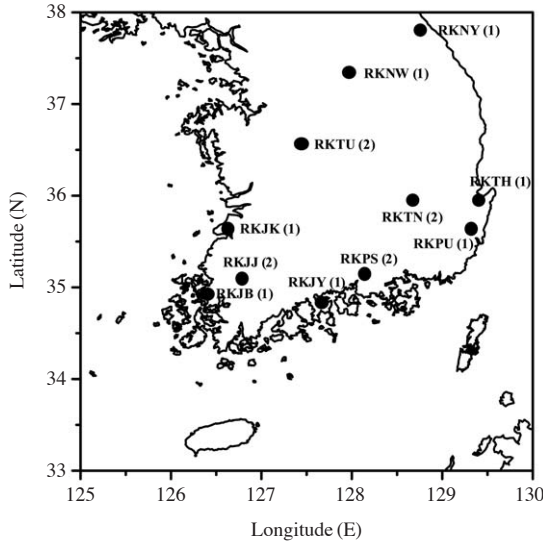


Fig. 1. Geographical locations of the 11 small-scale airports in Korea (Gwangju: RKJJ, Cheongju: RKTU, Daegu: RKTN, Ulsan: RKPU, Yeosu: RKJY, Pohang: RKTH, Sacheon: RKPS, Muan: RKJB, Gunsan: RKJK, Wonju: RKNW, and Yangyang: RKNY). The numbers in parenthesis are the number of a runway for each airport.

1에 대상지역인 국내 소규모 공항의 지리적 위치를 나타내었다. 한편, 항공기에 의한 온실가스 배출량 산정방법은 크게 세 가지, 즉 (1) 항공기의 연료사용량을 이용하는 방법 (Tier 1), (2) 항공기 이·착륙 (LTO) 횟수와 연료사용량을 혼용하는 방법 (Tier 2), (3) 항공기 LTO 횟수를 이용하는 방법 (Tier 3)으로 분류할 수 있다. 이 중에서 본 연구의 목적을 달성하기 위하여 선정된 배출량 산정방법은 실제 배출되는 지역을 잘 반영하여 보다 정확한 값을 산출하는 Tier 3 방법이다 (KOTI: Korea Transport Institute, 2009). 항공기에 의해 배출되는 온실가스의 배출량 산정방법과 각 공항별 온실가스 배출량에 관한 상세내용은 선행연구 (Song and Shon, 2014a; Shon *et al.*, 2013; KOTI, 2009)에 잘 나타나 있다. 공항에서의 온실가스 배출량 산정을 위한 항공기의 운항모드 (operational mode)는 taxi-in, taxi-out, startup (또는 idle), approach, take-off, climb-out인 6개 모드로 한정하였으며, 고도기준은 1 km로 제한하였다.

항공기로부터 직접 배출되는 온실가스 (CO_2 , CH_4 , N_2O 등)에 따라 복사강제력을 산출하기 위하여 Hansen *et al.* (1988)의 연구결과를 기초로 한 단순화된 방정식을 적용하였으며 (IPCC, 2007), 표 1에 자세히 나타내었다. 표 1에 제시된 CO_2 의 복사강제력 첫 번째 식의 상수 (α) 값은 3차원 기후/기상 입력장 자료 (Myhre *et al.*, 1998)를 이용한 복사전달 계산에 기초를 둔 새로운 상수 값 (5.35)으로 대체하였다. 이것은 항공기에서 직접 배출되는 온실가스 농도 변화에 따른 복사강제력의 변화량을 계산하기 위하여 단순화된 식을 의미한다. 두 번째 식의 상수 (α 및 β) 값

Table 1. Simplified expressions for calculating radiative forcing of greenhouse gases (GHGs) such as CO_2 , CH_4 , and N_2O (IPCC, 2007).

GHGs	Simplified expressions for calculating radiative forcing (ΔF) (W/m^2)	Constants
CO_2	$\Delta F = \alpha \ln (C/C_o)$	$\alpha = 5.35$
	$\Delta F = \alpha \ln (C/C_o) + \beta (\sqrt{C} - \sqrt{C_o})$	$\alpha = 4.841, \beta = 0.0906$
	$\Delta F = \alpha \{g(C) - g(C_o)\}$	$\alpha = 3.35$
CH_4	$\Delta F = \alpha (\sqrt{M} - \sqrt{M_o}) - \{f(M, N_o) - f(M_o, N_o)\}$	$\alpha = 0.036$
N_2O	$\Delta F = \alpha (\sqrt{N} - \sqrt{N_o}) - \{f(M_o, N) - f(M_o, N_o)\}$	$\alpha = 0.12$

C: ambient CO_2 concentration (in ppm).

M: ambient CH_4 concentration (in ppb).

N: ambient N_2O concentration (in ppb).

$C_o = 393.5$ ppm, $M_o = 1910$ ppb, and $N_o = 324$ ppb (<http://www.climate.go.kr>).

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

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

과 세 번째 식의 상수(α) 값은 각각 Shi (1992)와 Hansen *et al.* (1988)의 1차원 지구 평균 기상입력 자료를 바탕으로 산출되었다. 그리고 아래 첨자 “o”는 온실가스의 배경농도를 의미한다. 표 1에서 제시한 복사강제력 계산식의 신뢰도(5% 이내)는 복사모델을 이용한 복사강제력 추정값의 비교 연구를 통하여 증명되었다(IPCC, 2007). 온실가스 배출량에서 농도로의 환산은 정상상태 가정을 이용하였다(식 (1), Seinfeld and Pandis, 2006). 대기경제층 상부(하부 자유대류권)에서 경제층 내부로의 난류에 의한 유입(또는 유출)에 의한 흡인(entrainment 또는 detrainment)은 무시하였다.

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

여기서 $[X]_{ss}$ 는 정상상태의 온실가스 농도(단위부피당 질량), q 는 배출량(단위시간당 질량), A 는 배출면적(활주로의 가로×세로), H 는 경제층의 높이, τ 는 flushing time, $[X_0]$ 는 배경농도를 나타낸다. 즉, 11곳의 공항별 항공기 배출에 의한 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O 등)의 농도 변화는 각 공항에서의 물질별 월평균 배출량 추정값, 배출면적(공항면적), 경제층 고도(약 1 km), 기온, 배출구를 통해 물질이 빠져나가는 시간(flushing time) 등을 이용하여 산출하였다. “flushing”이 온실가스의 유일한 제거 메커니즘이라 가정하였다. 이때 각 공항별 flushing time은 공항 활주로 길이를 월평균 풍속으로 나누어 계산하였다. 온실가스(CO_2)의 농도변화 산정에 필요한 관련 자료를 표 2에 요약하였다. 연구기간(2009~2010년) 동안 11 공항에서의 월평균 풍속은 각 공항의 항공기상관측 자료를 이용하였다(Korea Meteorological Administration (KMA), 2010, 2009). 각 공항별 항공기 배출에 의한 복사강제력 계산을 위한 국내의 온실가스의 배경농도는 안면도 기후변화감시센터의 2009~2010년 측정 자료를 사용하였다(<http://www.climate.go.kr>). 즉 CO_2 , CH_4 , N_2O 의 배경농도는 각각 393.5 ppm, 1910 ppb, 324 ppb를 본 연구에 적용하였다. 그리고 공항관련 상세자료는 한국공항공사(<http://www.airport.co.kr/mbs/www/index.jsp>)와 인천국제공항공사의 웹사이트(<http://www.airport.kr/>) 정보를 이용하였다.

항공기 온실가스 물질별 복사강제력에 의한 평균 기온의 변화는 주요 변수인 복사강제력 ΔF 와의 선

형관계식을 이용하여 산출하였으며(Lim *et al.*, 2006; IPCC, 1990), 이에 대한 자세한 설명은 이전 연구(Song *et al.*, 2014)에 잘 나타나 있다. 요약하면, 항공기에서 배출되는 온실가스의 농도변화에 따른 평균 지표온도 변화(ΔT_s , $^{\circ}\text{K}/\text{year}$)는 다음의 방정식 $\Delta T_s \approx \lambda \cdot \Delta F$ 으로 나타낸다. 여기서 $\lambda(^{\circ}\text{K}/(\text{Wm}^{-2}))$ 는 기후민감도 변수, $\Delta F(\text{W}/\text{m}^2)$ 는 대류권계면에서의 복사강제력을 의미한다. 기후민감도 변수(λ)는 복사강제력 유형, 즉 항공기 배출가스에 의해 유발되는 오존 농도변화와 같이 비균질적으로 분포되는 기후변화 인자에 의해 일부 영향을 받는 것으로 밝혀졌다(Joshi *et al.*, 2003; Forster and Shine, 1997; Hansen *et al.*, 1997). Hansen *et al.* (2005)은 이러한 영향을 CO_2 기후민감도 변수(λ_{CO_2})에 대한 배출물질 i 기후민감도 변수(λ_i)의 비율로 나타내었으며(즉, $\lambda_i/\lambda_{\text{CO}_2}$), 이것을 “efficacy”, $r_i(=\lambda_i/\lambda_{\text{CO}_2})$ 으로 정의하였다. 여기서 구해지는 λ_i 를 위의 평균 지표온도(ΔT_s) 산출식에 대입하면, 항공기에서 배출되는 물질(i)의 복사강제력에 의한 평균 기온변화를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_s \approx r_i \cdot \lambda_{\text{CO}_2} \cdot \Delta F \quad (2)$$

여기서 λ_{CO_2} 는 $0.73^{\circ}\text{K}/(\text{Wm}^{-2})$ 값을 이용하였으며(Ponater *et al.*, 2006), CH_4 와 N_2O 의 r_i 값은 각각 1.18(Ponater *et al.*, 2006)과 1.02(Hansen *et al.*, 2005)를 이용하였다.

본 연구에서는 단순화된 추정식에 근거하여 산정한 복사강제력을 3차원 복사전달모델 결과와 비교 분석하였다. 사용한 모델은 흡수대 모델인 Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer (SBDART)이며, 단파($0.25 \sim 4.0 \mu\text{m}$), 장파($4.0 \sim 100 \mu\text{m}$), 전 파장영역($0.25 \sim 100 \mu\text{m}$)에서 DISORT (Discrete-ordinate-method)에 기반하여 다중산란 및 방출 대기에 대한 대기와 지표면에서의 복사속을 계산한다(Ricchiazzi *et al.*, 1998). SBDART 모델은 기본적으로 20 cm^{-1} 의 solar spectral resolution이며, 지표면에서 100 km 고도까지 33개 층으로 구성되어 있고 대류권에서는 1 km 연직해상도를 가진다. 본 연구에서는 에어로졸 또는 구름에 의한 효과를 배제하기 위하여 순수 기체 대기(즉, 레일리 대기)의 경우에 대해 각 공항별 항공기 온실가스 배출에 따른 복사강제력을 계산하였다. 모델링을 위한 초기조건은 SBDART 모델에서 제공되는 기본 옵션과 US62 대기 프로파일, 지

Table 2. Information on several factors for the estimation of CO₂ concentrations at the airports during the study period (2009~2010).

Airports	CO ₂ emissions (kg/month)	Airport area (m ²)	Boundary layer height (m)	Flushing time (sec)	Runway (m)	Monthly mean wind speed (m/s)	Air temperature (° K)	Δ[CO ₂] ^b (ppm)
Small-scale airports								
Gwangju	1.43E+06 ~ 1.93E+06 ^a	1.44E+06	1000	1.26E-02 ~ 2.32E-02 ^a	3200	1.6 ~ 2.9 ^a	286.6	0.259 ~ 0.440 ^a
Cheongju	9.85E+05 ~ 1.56E+06	1.55E+06	1000	1.33E-02 ~ 2.75E-02	3300	1.4 ~ 2.9	285.5	0.161 ~ 0.357
Daegu	1.06E+06 ~ 1.45E+06	1.02E+06	1000	1.13E-02 ~ 2.01E-02	3300	1.9 ~ 3.4	286.6	0.227 ~ 0.459
Ulsan	9.43E+05 ~ 1.33E+06	3.97E+05	1000	6.04E-03 ~ 1.03E-02	2200	2.5 ~ 4.2	286.9	0.295 ~ 0.580
Yeosu	6.01E+05 ~ 9.84E+05	4.10E+05	1000	5.95E-03 ~ 1.04E-02	2300	2.6 ~ 4.5	287.1	0.180 ~ 0.400
Pohang	3.58E+05 ~ 5.92E+05	1.26E+06	1000	5.51E-03 ~ 1.04E-02	2300	2.6 ~ 4.8	286.9	0.036 ~ 0.075
Sacheon	1.81E+05 ~ 2.81E+05	2.24E+06	1000	1.39E-02 ~ 2.25E-02	3200	1.6 ~ 2.7	286.3	0.024 ~ 0.042
Muan	1.02E+05 ~ 3.05E+05	9.30E+05	1000	7.84E-03 ~ 1.32E-02	3100	2.7 ~ 4.6	286.7	0.017 ~ 0.068
Gunsan	6.86E+04 ~ 1.64E+05	7.60E+05	1000	1.19E-02 ~ 2.47E-02	3200	1.5 ~ 3.1	285.9	0.027 ~ 0.091
Wonju	6.73E+04 ~ 8.24E+04	6.40E+05	1000	2.18E-02 ~ 4.63E-02	3200	0.8 ~ 1.7	285.2	0.045 ~ 0.092
Yangyang	3.53E+04 ~ 1.06E+05	3.08E+05	1000	5.11E-03 ~ 1.45E-02	2700	2.2 ~ 6.1	284.6	0.017 ~ 0.085
International airports								
Incheon	4.79E+07 ~ 6.02E+07	5.54E+06	1000	9.72E-03 ~ 1.74E-02	4200	2.8 ~ 5.0	284.8	1.623 ~ 3.062
Gimpo	1.39E+07 ~ 1.82E+07	2.78E+06	1000	1.22E-02 ~ 2.14E-02	3700	2.0 ~ 3.5	284.6	1.253 ~ 2.225
Jeju	9.36E+06 ~ 1.55E+07	1.43E+06	1000	7.23E-03 ~ 1.31E-02	3500	3.1 ~ 5.6	288.6	1.088 ~ 2.213
Gimhae	7.09E+06 ~ 8.84E+06	1.40E+06	1000	7.11E-03 ~ 1.50E-02	3500	2.7 ~ 5.7	285.3	0.693 ~ 1.536

^aThe range from monthly minimum to monthly maximum values during 2009~2010

^bValues represent Δ[CO₂]=[X]_{ss}-[X]₀ in Eq. (1).

표 복사모델을 적용하였고, 추정식과의 비교를 위하여 대류권계면에서의 복사강제력과 Heating rate ($^{\circ}\text{K/day}$)을 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 추정식을 이용한 복사강제력 및 기온변화 산출

모든 국내 소규모 공항에서 항공기 온실가스 배출에 따른 복사강제력을 계산하기 위하여, 먼저 연구기간 (2009~2010년) 동안 선행연구 (Song and Shon, 2014a; Shon *et al.*, 2013)에서 산출한 각 공항별 항공기 온실가스 (CO_2 , CH_4 , N_2O) 배출량의 평균값을 표 3에 나타내었다. 전반적으로 총 11곳의 소규모 공항 중 광주공항에서 가장 많은 배출량이 추정되었으며, 양양공항에서 가장 적은 양이 배출되었다. 즉, 광주 > 청주 > 대구 > 울산 > 여수 > 포항 > 사천 > 무안 > 군산 > 원주 > 양양 순으로 나타났다. 가장 많은 배출량이 나타난 광주공항에서 CO_2 와 N_2O 배출량은 각각 $2.01 \times 10^4 \text{ ton/yr}$ 와 0.36 ton/yr 으로, 그리고 가장 적은 양양공항에서의 CO_2 와 N_2O 배출량은 각각 $3.94 \times 10^2 \text{ ton/yr}$ 와 0.01 ton/yr 이었다. 광주공항의 배출량이 다른 공항에 비해 상대적으로 많은 양이 배출되었으며, 특히 양양공항에 비해서는 무려 수십 배 정도 높게 배출된 것을 알 수 있다. 이것은 항공기 온실가스에 의한 복사강제력과 기온 변화에 있어서도 광주공항이 다른 공항과 비교하여 가장 뚜렷할 것으로 예상된다. CO_2 및 N_2O 와 달리, 항공기에 의한 CH_4 배출량은 음수 값을 나타낸다. 이것은 항공기 엔진 추진윌에 따라 배출농도가 달라지는데, 항공기 추진윌이 낮은 “공회전 (idle)”과 “지상이동 (taxi)” 모드를 제외한 엔진 추진윌이 높은 “접근”, “상승”, “이·착륙 (LTO)” 모드의 엔진 연소 시 공기 중 CH_4 소비에 기인한 것으로 사료된다 (Satoni *et al.*, 2011). 각 공항별 항공기 온실가스 배출량 특성과 관련된 자세한 내용은 선행연구 (Song and Shon, 2014a; Shon *et al.*, 2013)에 잘 나타나 있다.

단순 추정식을 이용한 국내 11곳의 소규모 공항에서 항공기 온실가스 배출에 의한 복사강제력 산출값과 평균 기온변화를 표 4와 그림 2~4에 나타내었다. 여기서 각 공항별 CO_2 복사강제력은 표 1의 첫

Table 3. Annual mean emissions of greenhouse gases such as CO_2 , CH_4 , and N_2O at airports in Korea during 2009~2010 (in ton/yr).

Airports	CO_2	CH_4	N_2O
Small-scale airports			
Gwangju	2.01E+04	-0.0309	0.360
Cheongju	1.54E+04	-0.0173	0.279
Daegu	1.52E+04	-0.0219	0.273
Ulsan	1.41E+04	-0.0162	0.256
Yeosu	9.45E+03	-0.0121	0.172
Pohang	5.73E+03	-0.0064	0.104
Sacheon	2.87E+03	-0.0019	0.053
Muan	2.35E+03	-0.0044	0.042
Gunsan	1.79E+03	-0.0011	0.033
Wonju	9.16E+02	-0.0006	0.017
Yangyang	3.94E+02	-0.0009	0.007
International airports ^a			
Incheon	6.52E+05	-1.353	6.65
Gimpo	2.02E+05	-0.232	2.42
Jeju	1.60E+05	-0.171	1.75
Gimhae	9.68E+04	-0.096	1.25

^aSong *et al.* (2014)

번째 공식을 이용하여 산출하였다. 두 번째 공식에 의해 계산된 CO_2 의 복사강제력은 첫 번째 공식에서 산출된 값에 비해 약 7% 정도 높게 나타났다. 또한 두 번째와 세 번째 공식에서 계산된 CO_2 복사강제력은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 온실가스 중 CO_2 배출에 따른 복사강제력을 살펴보면 항공기에 의한 배출량이 많은 공항에서 대체로 높은 양의 복사강제력 (지구온난화에 기여)이 산출되었다 (표 4). 그러나 일부 공항에서 배출량은 다소 적었지만 복사강제력은 상대적으로 높게 추정되기도 하였다. 예를 들어, 항공기에 의한 CO_2 배출량이 가장 많은 광주공항에서는 4.7 mW/m^2 의 양의 복사강제력이 추정된 반면, 광주공항보다 다소 적게 배출된 울산공항에서 5.6 mW/m^2 로 가장 높은 복사강제력이 추정되었다. 그리고 CO_2 배출이 매우 적은 원주공항에서의 복사강제력 (0.9 mW/m^2)은 오히려 CO_2 배출이 좀 더 많았던 다른 공항 (포항공항, 사천공항, 무안공항 등)에 비해 높게 산출되기도 하였다. 이것은 복사강제력을 계산하기 위해 항공기 온실가스 배출량을 농도로 변환할 때 필요한 입력자료 중 배출면적 (공항면적)과 flushing time 등의 차이에 의한 것으로 사료된다.

그림 2~4는 연구기간 (2009~2010년) 동안 울산, 여수, 사천공항에서 항공기 온실가스 배출에 의한 복

Table 4. Mean radiative forcing and mean temperature change from aircraft emissions of greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) at airports in Korea during 2009~2010.

Airports	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K/year)	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K/year)	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K/year)
Small-scale airports						
Gwangju	4.7	0.0034	-5.12×10^{-4}	$\ll -0.0001$	8.08×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Cheongju	3.8	0.0027	-2.95×10^{-4}	$\ll -0.0001$	6.57×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Daegu	4.6	0.0033	-4.70×10^{-4}	$\ll -0.0001$	7.92×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Ulsan	5.6	0.0041	-4.59×10^{-4}	$\ll -0.0001$	9.80×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Yeosu	3.6	0.0026	-3.24×10^{-4}	$\ll -0.0001$	6.24×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Pohang	0.7	0.0005	-5.45×10^{-5}	$\ll -0.0001$	1.20×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Sacheon	0.4	0.0003	-2.05×10^{-5}	$\ll -0.0001$	7.72×10^{-4}	$\ll 0.0001$
Muan	0.5	0.0004	-6.69×10^{-5}	$\ll -0.0001$	8.71×10^{-4}	$\ll 0.0001$
Gunsan	0.8	0.0006	-3.42×10^{-4}	$\ll -0.0001$	1.36×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Wonju	0.9	0.0007	-4.09×10^{-4}	$\ll -0.0001$	1.62×10^{-3}	$\ll 0.0001$
Yangyang	0.2	0.0002	-3.58×10^{-4}	$\ll -0.0001$	6.14×10^{-3}	$\ll 0.0001$
International airports ^a						
Incheon	30.0	0.022	-4.45×10^{-3}	$\ll -0.001$	2.96×10^{-2}	$\ll 0.001$
Gimpo	22.9	0.017	-1.87×10^{-3}	$\ll -0.001$	2.65×10^{-2}	$\ll 0.001$
Jeju	22.7	0.017	-1.73×10^{-3}	$\ll -0.001$	2.40×10^{-2}	$\ll 0.001$
Gimhae	17.3	0.013	-1.22×10^{-3}	$\ll -0.001$	2.16×10^{-2}	$\ll 0.001$

^aSong *et al.* (2014)

사강제력 및 평균 기온변화의 월별 특성을 나타낸다. 여기서 울산공항은 소규모 공항 중에서 가장 높은 복사강제력을, 그리고 여수공항은 중간 정도, 마지막으로 사천공항은 낮은 복사강제력 그룹에 속하기 때문에 대표적으로 3곳의 공항을 선정하였다. 2009년 3곳의 공항에서 월별 복사강제력은 울산공항이 4.0 (1월)~6.3 mW/m² (9월), 여수공항이 2.5 (11월)~4.7 mW/m² (8월), 사천공항이 0.4 (7월)~0.6 mW/m² (1월)으로 추정되었으며, 2010년은 각각 4.4 (1월)~7.9 mW/m² (6월), 2.8 (1월)~5.4 mW/m² (7월), 0.3 (8월)~0.6 mW/m² (1월)으로 나타나 월별 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 이 외에도, 각 공항별 항공기의 CO₂ 배출에 따른 평균 기온변화 및 기온변화의 월별 특성은 각 공항별 복사강제력의 변화 특성과 유사한 경향을 보였다(표 4와 그림 2~4). 예를 들어, 항공기의 CO₂ 배출에 따른 복사강제력이 가장 높게 추정된 울산공항에서 가장 기온변화가 크게 증가(4.1 × 10⁻³°K)한 것으로 나타났다.

각 공항별 CH₄ 배출에 따른 복사강제력은 CO₂의 복사강제력과 비교 시 수천 배 정도 낮게 추정되었으며, 이는 음의 복사강제력을 나타내어 지구냉각하

에 기여하는 것으로 볼 수 있다(표 4). CH₄ 배출이 가장 많았던 광주공항에서 가장 높은 음의 복사강제력(-5.12×10^{-4} mW/m²)이 추정되었으며, 그 다음으로 대구공항(-4.70×10^{-4} mW/m²), 울산공항(-4.59×10^{-4} mW/m²) 순으로 나타났다. CH₄ 배출이 매우 적었던 원주공항과 양양공항에서 오히려 다소 높은 음의 복사강제력(원주공항 -4.09×10^{-4} mW/m², 양양공항 -3.58×10^{-4} mW/m²)이 나타났다. 원주공항과 양양공항의 배출량과 광주공항의 배출량 차이는 수십 배에 달하지만, 서로 간의 복사강제력의 차이는 상대적으로 매우 적은 편이었다. 한편, N₂O 배출에 의한 복사강제력도 CO₂의 복사강제력과 비교 시 수천 배 정도 낮은 것으로 나타났으며, 각 공항별 CO₂의 복사강제력의 비교분석과 전반적으로 유사한 특징을 보였다(표 4).

울산, 여수, 사천공항에서 CH₄ 배출에 의한 월별 복사강제력을 보면(그림 2~4), 2009년의 경우는 울산공항이 -2.1×10^{-4} (1월)~ -4.5×10^{-4} mW/m² (11월), 여수공항이 -1.4×10^{-4} (11월)~ -5.0×10^{-4} mW/m² (8월), 사천공항이 -1.6×10^{-5} (7월)~ -2.5×10^{-5} mW/m² (1월)으로 추정되었으며, 2010년은 각각

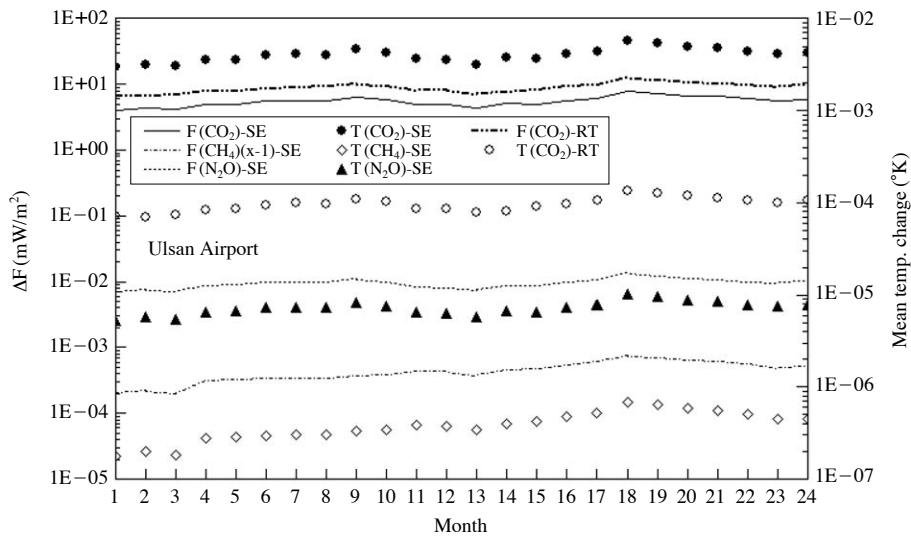


Fig. 2. Comparison of radiative forcing (F) and mean temperature change (T) of aircraft emission of greenhouse gases between the simplified expression (SE) and the 3D radiative transfer (RT) model at Ulsan airport (RKPU) during 2009~2010. The values of radiative forcing and temperature changes for CH₄ indicate the negative.

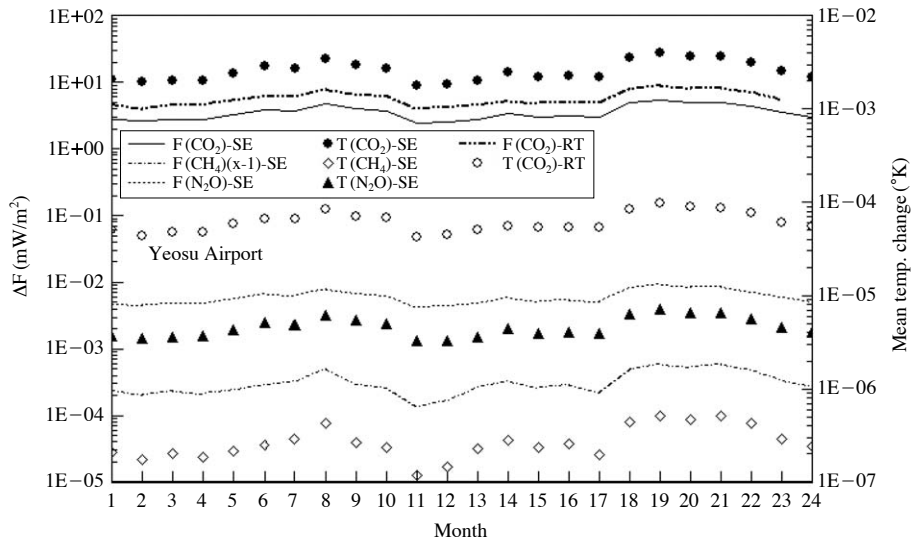


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for the radiative forcing and mean temperature change at Yeosu airport (RKJY).

-3.9×10^{-4} (1월) $\sim -7.8 \times 10^{-4}$ mW/m² (6월), -2.3×10^{-4} (5월) ~ 6.0 mW/m² (7월), -1.5×10^{-5} (8월) $\sim -3.3 \times 10^{-5}$ mW/m² (11월)으로 나타났다. N₂O의 경우, 2009년 월별 복사강제력은 울산공항이 7.1×10^{-3} (1월) $\sim 1.1 \times 10^{-2}$ mW/m² (11월), 여수공항이 4.4×10^{-3} (11월)

$\sim 8.2 \times 10^{-3}$ mW/m² (8월), 사천공항이 6.5×10^{-4} (7월) $\sim 9.8 \times 10^{-4}$ mW/m² (1월)으로 추정되었으며, 2010년은 7.7×10^{-3} (1월) $\sim 1.4 \times 10^{-2}$ mW/m² (6월), 4.9×10^{-3} (1월) $\sim 9.5 \times 10^{-3}$ mW/m² (7월), 5.8×10^{-4} (8월) $\sim 1.0 \times 10^{-3}$ mW/m² (1월)으로 나타났다. 한편, 항공기의

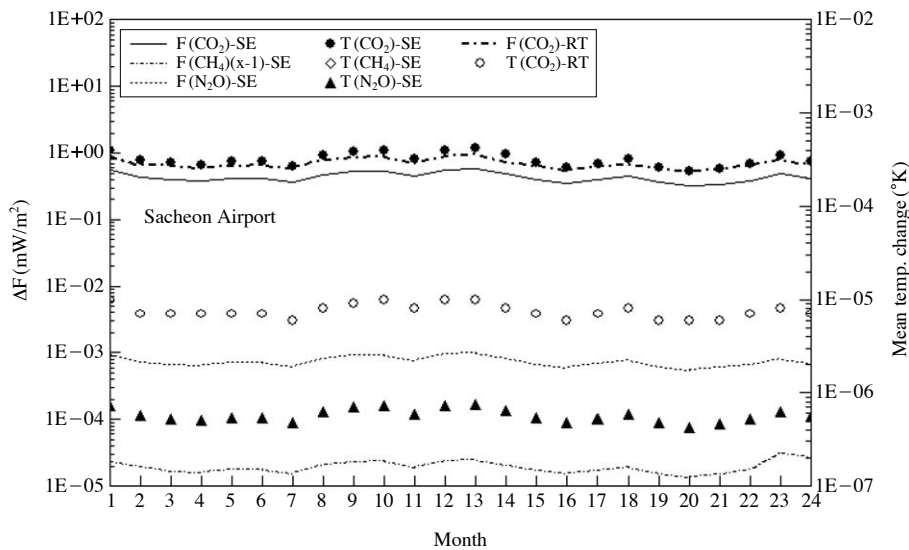


Fig. 4. Same as Fig. 2 except for the radiative forcing and mean temperature change at Sacheon airport (RKPS).

CH₄ 배출에 따른 평균 기온변화와 기온변화의 월별 특성은 전체적으로 기온감소를 나타내고 있으며, 그 값은 너무 작게 ($\ll -0.0001$ °K) 추정되었다. N₂O의 경우, 평균 기온변화와 기온변화의 월별 특성 또한 너무 작아 ($\ll 0.0001$ °K) 뚜렷한 특징이 없는 것으로 사료된다(표 4와 그림 2~4).

3.2 복사전달모델을 이용한 복사강제력 및 기온변화 산출

항공기에서 배출되는 온실가스 중에서 상대적으로 높은 복사강제력을 나타내는 CO₂에 대해 SBDART 복사전달모델을 수행하여 단순 추정식 결과(복사강제력과 기온 변화)와 비교하였다(표 5). 여기서 추정식에 의한 기온 변화의 단위를 모델값과 직접 비교하기 위하여 °K/day로 환산하였다. 전반적으로 SBDART 모델에서 모의된 복사강제력이 추정식으로부터 계산된 값보다 약 50~150% 높게 나타났다. 이는 단순화된 추정식은 전 지구규모를 중심으로 많은 가정들이 포함되어 있고 각 지점별 위치와 시간 변화에 따른 영향을 고려하지 못하는 데 비해 3차원 복사전달모델인 SBDART는 대상지역의 지표면 알베도와 연직 대기 프로파일 등을 고려하여 지표면과 대기에 대한 CO₂ 복사강제력 영향을 복합적으로 고려하기 때문에 사료된다. 추정식과 모델결과 간에 가장 큰 차이

를 보이는 공항은 양양으로 모델값(0.5 mW/m²)이 산출값(0.2 mW/m²)에 비해 약 150% 높게 모의하였고, 가장 작은 차이를 보이는 공항은 청주와 군산으로 모델값(5.7과 1.2)이 산출값(3.8과 0.8)에 비해 약 50% 높게 모의하였다. 항공기 CO₂ 배출에 의한 지표기온 변화는 5.0×10^{-6} °K/day (양양)~ 5.2×10^{-4} °K/day (인천)의 분포를 보였으며, 이것은 추정식에 의한 기온 변화에 비해 조금 낮았지만 큰 차이는 아니었다. 이외에도, 울산, 여수, 사천공항에서 SBDART 모델에 의해 산출된 CO₂ 복사강제력의 월별 특성의 경향성은 추정식 결과와 유사하였으나 값은 전반적으로 높게 나타났다(그림 2~4). SBDART 모델에서 모의된 월별 복사강제력은 추정식에 의해 산정된 값보다 울산공항이 51.4~67.9%, 여수공항이 51.3~68.2%, 사천공항이 52.2~71.3% 높은 값을 보였다. 한편, SBDART 모의결과에서도 월별 뚜렷한 경향은 나타나지 않았다.

전 지구적으로 볼 때, 항공기로부터 배출된 온실가스 중 CO₂에 의한 복사강제력은 18~28 mW/m²로 보고되었다(Lee *et al.*, 2009; Sausen *et al.*, 2005; IPCC, 1999). 국내 11곳의 소규모 공항 중 울산공항에서 가장 큰 복사강제력(9.0 mW/m²)이 나타났는데, 이는 전 지구 복사강제력에 비해 2~3배 정도 차이가 나는 것으로 추정되었다. 본 연구에서는 항공기에서 배출되는 입자상 물질 중 지구온난화에 영향을 주는 불

Table 5. Intercomparison of mean radiative forcing and mean temperature change by aircraft emissions of greenhouse gas CO₂ between simplified expressions and SBDART model at airports in Korea during 2009~2010.

Airports	Simplified expression		SBDART	
	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K/day)	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K/day)
Small-scale airports				
Gwangju	4.7	0.000112	7.6	0.000081
Cheongju	3.8	0.000090	5.7	0.000061
Daegu	4.6	0.000109	7.4	0.000079
Ulsan	5.6	0.000133	9.0	0.000097
Yeosu	3.6	0.000086	5.8	0.000062
Pohang	0.7	0.000016	1.1	0.000012
Sacheon	0.4	0.000010	0.7	0.000008
Muan	0.5	0.000012	0.8	0.000009
Gunsan	0.8	0.000018	1.2	0.000013
Wonju	0.9	0.000022	1.5	0.000016
Yangyang	0.2	0.000007	0.5	0.000005
International airports				
Incheon	30.0	0.000720	48.8	0.000521
Gimpo	22.9	0.000548	37.2	0.000397
Jeju	22.7	0.000545	37.1	0.000395
Gimhae	17.3	0.000415	28.2	0.000301

랙카본(BC: Black Carbon)에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 최근 국내 대기 중의 BC에 의한 직접적인 복사강제력은 0.1~1.8 W/m² 인 것으로 추정된 바 있다(Kim *et al.*, 2012). 대도시인 서울지역에서 BC에 의한 직접적인 복사강제력은 1.3~6.5 W/m²로 나타났으며, BC에 의한 직접적인 평균 기온변화는 0.4~1.6°K로 보고된 바 있다(Song and Shon, 2014b). 따라서 본 연구의 주요결과인 국내 소규모 공항에서 항공기로부터 배출되는 CO₂에 의한 복사강제력(울산공항에서 최고 9.0 mW/m²)과 평균 기온변화(울산공항에서 최고 9.7×10^{-5} °K/day)는 도시지역의 BC에 의한 복사강제력과 평균 기온변화와 비교하여 상당히 작은 것으로 사료된다. 또한 이러한 항공기 온실가스 배출에 따른 기온변화는 도시열섬 효과에 따른 기온변화(대기지역 약 4.2°K의 기온변화, Kim *et al.*, 2013)와 비교해 볼 때 상당히 낮은 수치임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 2009~2010년 동안 국내 소규모

공항에서 항공기 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O) 배출에 의한 복사강제력 및 평균기온 변화의 특성을 배출량에 의한 단순 추정식과 3차원 복사전달모델과의 비교 분석을 통해 살펴보았다. 특히 각 공항에서의 온실가스 배출에 따른 평균 기온변화의 특성은 복사강제력과 기온변화의 선형관계식을 이용하여 분석하고 복사전달모델의 결과와 비교하였다.

전반적으로 연구기간(2009~2010년) 동안 11곳의 공항 중 항공기에 의한 온실가스 배출이 가장 많은 광주공항보다 오히려 상대적으로 적게 배출된 울산공항에서 CO₂, N₂O에 의한 복사강제력이 가장 높게 추정되었다. 또한 CO₂와 N₂O 배출이 매우 적은 원주공항에서의 복사강제력은 오히려 상대적으로 많이 배출된 다른 공항(포항공항, 사천공항, 무안공항 등)에 비해 높게 산출되었다. 이는 각 공항별 배출면적(공항면적)과 flushing time 등이 서로 다르다는 점이 주요 요인인 것으로 사료된다. 온실가스 중 CH₄ 배출은 연구기간 동안 평균적으로 음의 복사강제력과 기온변화의 감소(매우 낮은 기온변화)로 추정되었는데, 이는 항공기 엔진추진율이 높은 운행모드(“접근”, “상승”, “LTO” 모드)의 엔진 연소 시 공기 중 CH₄ 소비로 인해 배출량이 음의 값으로 추정되어 나타난 것으로 사료된다. 따라서 대상지역의 정확한 복사강제력을 산정하기 위해서는 정확한 온실가스 배출량 및 농도 자료는 물론 추가적으로 여러 환경적 요인(배출면적, 엔진 운행모드 등)을 적절히 잘 고려하는 것이 중요하다고 판단된다.

연구대상지역의 각 공항별 항공기 온실가스 배출에 따른 평균 기온변화를 살펴보면, 온실가스 중 CO₂ 배출에 따른 평균 기온변화 및 기온변화의 월별 특성은 각 공항별 복사강제력의 변화 특성과 유사하게 나타났다. 반면, N₂O 배출에 따른 기온변화와 기온변화의 월별 특성은 무시할 정도로 매우 작게 추정되었다. 한편 3차원 복사전달모델을 이용하여 상대적으로 높은 복사강제력을 보이는 CO₂에 대해 모의한 결과, 전반적으로 추정식에서 계산된 값보다 약 50~150% 높게 나타났다. 이것은 복사전달모델이 지표면 알베도와 연직 대기 프로파일 등 대상지역 고유의 기상조건을 잘 반영하여 지표면과 대기에 대한 CO₂ 복사강제력 영향을 복합적으로 고려해서 보다 현실적인 값을 추정한 것으로 사료된다.

본 연구의 결과에서 추정된 항공기 온실가스 배출

에 의한 복사강제력과 평균 기온의 변화는 도시 대기의 BC에 의한 복사강제력 및 기온변화에 비해 매우 작은 값을 나타내었으며, 또한 항공기 온실가스 배출에 의한 기온변화는 도시의 열섬효과와 비교해서도 상당히 낮게 추정되었다. 이것은 대상지역에서 산출된 온실가스의 배출량 차이가 주요 원인인 것으로 사료된다. 아울러 본 연구는 단순화된 복사강제력 추정식에 근거하여 각 공항별 항공기 온실가스 배출에 의한 복사강제력의 변화를 분석하고 이를 3차원 복사전달모델과 비교한 것에 큰 의의를 두고 있다. 항공기뿐만 아니라 다양한 분야에서의 온실가스 배출량 산정은 여러 가지 불확실성을 가지고 있으므로 이를 정확하게 산출하는 것은 상당히 어렵다. 게다가 항공기 온실가스 배출에 의한 농도변화 산정에 있어 공항인근의 측정자료 부재로 인한 불확실성도 다소 영향을 미칠 것으로 사료된다. 향후 이러한 한계점을 해결하고 또한 경제층 고도 외에 순항(cruise)과정을 통해 배출되는 양을 포함하여 보다 정확한 온실가스 배출량을 산정한다면, 이에 따른 복사강제력 산출 및 영향평가 연구는 향상될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 동의대학교 교내연구비와 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다(NRF-2013R1A1A4A01012837).

References

- Fan, W., Y. Sun, T. Zhu, and Y. Wen (2012) Emissions of HC, CO, NO_x, CO₂, and SO₂ from civil aviation in China in 2010, *Atmos. Environ.*, 56, 52-57.
- Forster, P.M. and K.P. Shine (1997) Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone change, *J. Geophys. Res.*, 102, 10841-10857.
- Gauss, M., I.S.A. Isaksen, D.S. Lee, and O.A. Søvde (2006) Impact of aircraft NO_x emissions on the atmosphere-tradeoffs to reduce the impact, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1529-1548.
- Hansen, J., I. Fung, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy, G. Russell, and P. Stone (1988) Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model, *J. Geophys. Res.*, 93, 9341-9364.
- Hansen, J., M. Sato, and R. Ruedy (1997) Radiative forcing and climate response, *J. Geophys. Res.*, 102, D6, 6831-6864.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, G.A. Schmidt, and G. Russell (2005) Efficacy of climate forcings, *J. Geophys. Res.*, 110, D18104.
- IPCC (1990) *Climate Change 1990: the Intergovernmental Panel on Climate Change Scientific Assessment* [Houghton, J.T., B.A. Callander, and S.K. Varney (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (1999) *Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Aviation and the Global Atmosphere* [Penner, J.E., D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, and M. McFarland (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 373 pp.
- IPCC (2007) *Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report - Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policy-makers*.
- 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.
- Johnson, C., J. Henshaw, and G. McInnes (1992) Impact of aircraft and surface emissions of nitrogen oxides on tropospheric ozone and global warming, *Nature*, 355, 69-71.
- Joshi, M., K. Shine, M. Ponater, N. Stuber, R. Sausen, and L. Li (2003) A comparison of climate response to different radiative forcings in three general circulation models towards an improved metric of climate change, *Clim. Dynam.*, 20, 843-854. doi:10.1007/s00382-003-0305-9.
- Kim, K.-Y., J.-Y. Byon, and H.-D. Kim (2013) Heat island intensity in Seongseo, Daegu, South Korea - a rural suburb containing large areas of water, *J. Environ. Sci. Int.*, 22, 1337-1344.
- Kim, M.Y., S.-B. Lee, G.-N. Bae, S.S. Park, K.M. Han, R.S. Park, C.H. Song, and S.H. Park (2012) Distribution and direct radiative forcing of black carbon aerosols over Korean Peninsula, *Atmos. Environ.*, 58, 45-55.

- Korea Meteorological Administration (KMA) (2009) Annual Aerodrome Weather Report 2009, Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2010) Annual Aerodrome Weather Report 2009, Seoul, Korea.
- Korea Transport Institute (KOTI) (2009) Investigation of the emission of greenhouse gases from transport.
- Lee, D.S., D.W. Fahey, P.M. Forster, P.J. Newton, R.C.N. Wit, L.L. Lim, B. Owen, and R. Sausen (2009) Aviation and global climate change in the 21st century, *Atmos. Environ.*, 43, 3520-3537.
- Lee, D.S., G. Pitari, V. Grewe, K. Gierens, J.E. Penner, A. Petzold, M.J. Prather, U. Schumann, A. Bais, T. Bernsten, D. Iachetti, L.L. Lim, and R. Sausen (2010) Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation, *Atmos. Environ.*, 44, 4678-4734.
- 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, *Proceedings of the TAC-Conference*, Oxford, UK.
- Myhre, G., E.J. Highwood, K.P. Shine, and F. Stordal (1998) New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2715-2718.
- 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.
- Santoni, G.W., B.H. Lee, E.C. Wood, S.C. Herndon, R.C. Miake-Lye, S.C. Wofsy, J.B. McMauts, D.D. Nelson, and M.S. Zahniser (2011) Aircraft emissions of methane and nitrous oxide during the alternative aviation fuel experiment, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 7075-7082.
- Sausen, R., I. Isaksen, V. Grewe, D. Hauglustaine, D.S. Lee, G. Myhre, M.O. Köhler, G. Pitari, U. Schumann, F. Stordal, and C. Zerefos (2005) Aviation radiative forcing in 2000. An update on IPCC (1999), *Meteorol. Z.*, 14, 555-561.
- Schumann, U. (1997) The impact of nitrogen oxides emissions from aircraft upon the atmosphere at flight altitudes-results from the AERONOX Project, *Atmos. Environ.*, 31, 1723-1733.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, second ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Shi, G. (1992) Radiative forcing and greenhouse effect due to the atmospheric trace gases, *Science in China (Series B)*, 25, 217-229.
- Shon, Z.-H., S.-K. Song, T.-K. Yoon, and G.-C. Lee (2013) Emissions of air pollutants and greenhouse gases from aircraft activities at the small scale airports, *J. Environ. Sci. Int.*, 22, 823-836. (in Korean with English abstract)
- Song, S.-K. and Z.-H. Shon (2012a) Emissions of air pollutants and greenhouse gases from aircraft activities at the Gimhae international airport, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 28, 190-202. (in Korean with English abstract)
- Song, S.-K. and Z.-H. Shon (2012b) Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea, *Atmos. Environ.*, 61, 148-158.
- Song, S.-K. and Z.-H. Shon (2014a) National emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft in the troposphere over South Korea, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 25, 61-76. doi: 10.3319/TAO.2013.09.04.01 (A).
- Song, S.-K. and Z.-H. Shon (2014b) Temporal variations in optical properties and direct radiative forcing of different aerosol chemical components in Seoul using hourly aerosol sampling, *J. Korean. Soc. Atmos. Environ.*, 30, 1-17. (in Korean with English abstract)
- Song, S.-K., Z.-H. Shon, and J.-H. Jeong (2014) Influence of greenhouse gas emissions from commercial aircraft at Korean international airports on radiative forcing and temperature change, *J. Korean. Soc. Atmos. Environ.*, 30(3), 223-232. (in Korean with English abstract)
- Stuber, N. and P. Forster (2007) The impact of diurnal variations of air traffic on contrail radiative forcing, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3153-3162.
- Travis, D.J., A.M. Carleton, and R.G. Lauritsen (2002) Contrails reduce daily temperature range, *Nature*, 418, 601-602.
- Uherek, E., T. Halenka, J. Borken-Kleefeld, Y. Balkanski, T. Bernsten, C. Borrego, M. Gauss, P. Hoor, K. Juda-Rezler, J. Lelieveld, D. Melas, K. Rypdal, and S. Schmid (2010) Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport, *Atmos. Environ.*, 44, 4772-4816.