

국내 대규모 공항의 항공기 온실가스 배출에 따른 복사강제력 및 기온변화 영향 연구

Influence of Greenhouse Gas Emissions from Commercial Aircraft at Korean International Airports on Radiative Forcing and Temperature Change

송 상 근 · 손 장 호^{1),*} · 정 주 희²⁾

제주대학교 지구해양과학과, ¹⁾동의대학교 환경공학과,

²⁾부산대학교 지구환경시스템학부

(2014년 4월 9일 접수, 2014년 5월 25일 수정, 2014년 5월 27일 채택)

Sang-Keun Song, Zang-Ho Shon^{1),*} and Ju-Hee Jeong²⁾

*Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University,
Jeju 690-756, Korea*

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University,
Busan 614-714, Korea*

²⁾*Division of Earth and Environmental System, Pusan National University,
Busan 609-735, Korea*

(Received 9 April 2014, revised 25 May 2014, accepted 27 May 2014)

Abstract

Monthly variations of radiative forcing (RF) and mean temperature changes by greenhouse gases emitted from commercial aircraft were estimated based on the simplified expression at four international airports (Incheon, Gimpo, Jeju, and Gimhae Airports) during the years of 2009~2010. The highest RF and mean temperature change in the study area occurred at Incheon Airport, whereas the lowest RF and mean temperature change at Gimhae Airport. During 2009~2010, the mean RF and mean temperature change estimated from aircraft CO₂ emissions at Incheon Airport were approximately 30.0 mW/m² and 0.022°K, respectively. The mean RF and mean temperature changes caused by other greenhouse gas N₂O was significantly small ($\ll 0.1$ mW/m² and $\ll 1 \times 10^{-3}$ °K). Meanwhile, CH₄ emissions caused negative mean RF (-4.45×10^{-3} mW/m² at Incheon Airport) and the decrease of mean temperature (-3.83×10^{-6} °K) due to consumption of atmospheric CH₄ in the aircraft engine.

Key words : Airports, Greenhouse gases, Radiative forcing, Mean temperature change, Aircraft

*Corresponding author.

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

1. 서 론

온실가스(GHG)의 배출량 및 농도는 인위적 배출원의 급격한 증가에 의해 산업혁명 이후 크게 증가하고 있다(IPCC, 2013). 인위적발생원에 의한 온실가스의 전 지구적 연 배출량은 1970년 28.7 GtCO₂-eq/yr로 보고되었고, 2004년에는 49.0 GtCO₂-eq/yr로 증가하여 이 기간 동안 1.7배 정도 증가하였다. 이러한 온실가스의 배출은 도로, 철도 등과 같은 육상교통의 수송에 의해 기후변화에 상당한 영향을 미친다는 연구결과가 보고된 바 있다(Uherek *et al.*, 2010). 국내 물류수송 중 도로 수송(약 79%)이 대부분을 차지하고 있고, 그 다음으로 해운(약 15%), 철도(약 5%), 항공(약 1%) 등 순으로 나타났다(MLTMA: Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010). 최근 추세에서 항공 수송은 급격히 증가하여 철도 및 해운 수송에 근접하고 있는 실정이다. 즉, 철도 및 해운 수송은 감소 추세를 보이고 도로 수송은 담보 상태에 있는 것으로 나타난 반면, 수송수단 중 유일하게 항공 수송이 성장 추세를 보였다. 게다가, 1990~2006년 동안 교통수단별 최종 에너지 소비 경향에서 항공수단(JA-1유)의 연평균 증가율은 14.6%이었으며, 기타 교통수단은 3.5~10.4% 증가율을 보여 전체 교통수단 부문에서 항공이 가장 높은 증가율을 보였다(한국교통연구원: The Korea Transport Institute (KOTI), 2009).

국제적으로는 2000~2007년 사이 연평균 항공승객 수송량의 성장률은 5.3%/yr이고 항공승객 수송부문에서 38%의 증가를 보였다(Lee *et al.*, 2009). 동아시아 지역의 항공 운항 횟수도 극동지역 국제무역의 활성화로 인해 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 국내의 항공부문을 살펴보면, 국토해양부의 항공정보포털시스템에서 제공하는 최근 12년간 항공기 등록 현황에서 2002년 292대에 불과하던 항공기가 2007년과 2013년으로 올수록 각각 419대와 621대로 급격히 증가한 것을 볼 수 있다(Korea Civil Aviation Development Association, 2014). 일반적으로 육상 및 수상/해상 교통 수송에 의한 온실가스의 배출은 지표 근처에 집중되고 있다. 그러나 물류수송 수단의 한 부분을 차지하는 항공기로부터 온실가스 배출은 지표뿐만 아니라 지상으로부터 다양한 고도에서, 즉 대기 경계층에서의 이·착륙(LTO: Landing/Take-Off)과

대류권에서의 항공기의 상승(climb) 및 하강(descend), 순항(cruise)에 의해서 온실가스뿐만 아니라 대기오염물질을 배출한다.

항공기에 의한 대기환경 및 기후변화에 대한 우려로 1980년대 후반 이후, 항공기 배출가스에 의한 대류권 오존의 농도변화와 비행운 생성 및 이에 따른 기후변화에 관한 연구가 수행되었다(Stuber and Forster, 2007; Schumann, 1997; Carleton and Lamb, 1986). 온실가스인 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)와 입자상물질인 PM₁₀ 등과 같은 항공 배출물질은 기후복사강제력에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2009). 전지구의 평균 복사강제력(radiative forcing)의 관점에서 항공기 온실가스 배출은 물질에 따라 온난화(CO₂, soot, H₂O, NO_x 배출에 의한 O₃ 생성) 또는 냉각화(비행운, 황산염 에어로졸, NO_x에 의한 CH₄ 감소) 효과를 나타내고, 지역에 따라 서로 다른 복사강제력 패턴을 가진다(Lee *et al.*, 2009). 관련 연구에 따르면, 2000년부터 2005년 사이 항공에 의한 전 지구적 복사강제력은 14% 정도 증가하였고, 2005년 항공에 의한 복사강제력은 약 55 mW/m²로 전체 복사강제력의 3.5%를 차지하는 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2009).

최근 국내에서 항공기 운항에 따른 대기오염물질 및 온실가스의 배출량 산정에 관한 연구가 진행되었지만(Song and Shon, 2014a; Shon *et al.*, 2013; Song and Shon, 2012a, b), 항공기 온실가스 배출에 따른 복사강제력 및 기온변화에 대한 연구는 전혀 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 국내 4곳의 국제공항(인천, 김포, 김해, 제주)에서 항공기 온실가스 배출에 따른 복사강제력의 시간(연간, 계절별, 월별) 변화를 분석하고, 이를 이용한 기온변화를 산출하여 그 특성을 살펴보았다. 또한 각 공항(지역)별 복사강제력 및 기온의 변화를 상호 비교하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구의 대상영역은 국내에 위치하고 있는 총 4곳의 국제공항인 인천, 김포, 부산, 제주공항을 대상으로 하였다. 이들 공항에서 항공기에 의해 배출되는 온실가스의 배출량은 선행연구(Song and Shon, 2012b)에 의해 산출되었으며, 온실가스 배출량 산정법 및

이들에 대한 상세한 고찰은 위 선행연구에 제시되어 있다. 항공기 온실가스 배출량 산출법에 대해 간략히 요약하면 다음과 같다. 일반적으로 항공기 배출량 산정방법은 크게 세 가지로 분류할 수 있다: (1) 항공기의 연료사용량을 이용하는 방법 (Tier 1), (2) 항공기 LTO 횟수와 연료사용량의 혼용을 적용하는 방법 (Tier 2), (3) 항공기 LTO 횟수를 이용하는 방법 (Tier 3)이다. 한국교통연구원 (KOTI, 2009) 조사에 따르면, Tier 3의 방법이 실제 배출되는 지역을 잘 반영하여 보다 정확한 배출량 산출이 된다고 한다. 따라서 본 연구에서는 LTO 횟수 (Tier 3)를 이용한 온실가스 배출량 산정법을 이용하였다. 이러한 항공기 LTO에 의한 오염물질 배출량은 기종별 운항모드에 따른 배출계수를 이용하여 산출할 수 있다. 경계층 아래에서의 항공기 LTO에 의한 항공기 배출량 산출을 위해 활동도를 기초로 한 산정식은 다음과 같다.

$$E_{ijk} = \sum (LTO_i \times TIM_j \times FF_j \times EF_{ijk}) \quad (1)$$

E_{ijk} = 항공기 기종별 (i), 운항모드별 (j), 화학종별 (k) 배출량 (ton/yr)

LTO_i = 기종별 (i) LTO 횟수

TIM_j = 운항모드별 (j) 할당된 시간 (min)

FF_j = 운항모드별 (j) 연료 흐름 (kg-fuel/min)

EF_{ijk} = 엔진모델의 총 수를 고려한 기종별 (i), 운항 모드별 (j), 화학종별 (k) 배출계수 (kg/1,000 kg-fuel)

항공기가 직접 배출하는 온실가스 (예, CO_2 , CH_4 , N_2O)에 의한 복사강제력 산출은 Hansen *et al.* (1988)의 연구결과를 기초로 한 단순화된 방정식을 나타낸

IPCC (2007)의 식을 적용하였다 (표 1). 표 1의 첫 번째 CO_2 에 의한 복사강제력 식의 상수 값은 3차원 기후/기상 입력장 자료 (Myhre *et al.*, 1998)를 이용한 복사전달 계산에 기초를 두었으며, IPCC (1990) 식과 유사하고 새로운 상수 값 (5.35)으로 대체되었다. 이는 항공기에서 배출되는 온실가스 농도변화에 의한 복사강제력 변화량을 산출하기 위하여 단순화된 식을 의미한다. 두 번째 및 세 번째 식의 상수 값은 각각 Shi (1992)와 Hansen *et al.* (1988)의 1차원 전구 평균 기상입력 자료를 바탕으로 산출되었다. 그리고 아래 첨자 0은 온실가스의 배경농도를 나타낸다. 표 1에서 복사강제력 계산식의 신뢰도 (5% 이내)는 복사모델을 이용한 복사강제력 추정값의 비교 연구를 통하여 증명되었다 (IPCC, 2007). 복사강제력 산출식에서, 각 공항별 항공기 배출에 의한 온실가스의 농도 변화는 배출량 추정값, 배출면적 (공항면적), 경계층 높이 (1 km), 월평균 풍속 자료를 이용하여 산출하였다. 공항관련 상세자료는 한국공항공사 (KAC, <http://www.airport.co.kr/mbs/www/index.jsp>)와 인천국제공항공사의 웹사이트 (<http://www.airport.kr/>) 정보를 참조하였다. 온실가스 농도는 정상상태에서의 농도를 산출하여 복사강제력 계산에 적용하였으며, 2009~2010년 동안 4 공항에서의 월평균 풍속은 각 공항의 항공기상관측 자료를 이용하였다 (Korea Meteorological Administration (KMA), 2009, 2010). 국내공항에서 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 사용하였다.

Table 1. Simplified expressions for the calculation of radiative forcing due to CO_2 , CH_4 , and N_2O (IPCC, 2007).

Trace gas	Simplified expression radiative forcing (ΔF) (W/m^2)	Constant
CO_2	$\Delta F = \alpha \ln (C/C_0)$	$\alpha = 5.35$
	$\Delta F = \alpha \ln (C/C_0) + \beta (\sqrt{C} - \sqrt{C_0})$	$\alpha = 4.841, \beta = 0.0906$
	$\Delta F = \alpha \{g(C) - g(C_0)\}$	$\alpha = 3.35$
	where $g(C) = \ln(1 + 1.2C + 0.0005C^2 + 1.4 \times 10^{-6}C^3)$	
CH_4	$\Delta F = \alpha \{ \sqrt{M} - \sqrt{M_0} \} - \{ f(M, N_0) - f(M_0, N_0) \}$	$\alpha = 0.036$
	where $f(M, N) = 0.47 \ln[1 + 2.01 \times 10^{-5} (MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15} M (MN)^{1.52}]$	
N_2O	$\Delta F = \alpha \{ \sqrt{N} - \sqrt{N_0} \} - \{ f(M_0, N) - f(M_0, N_0) \}$	$\alpha = 0.12$
	where $f(M, N) = 0.47 \ln[1 + 2.01 \times 10^{-5} (MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15} M (MN)^{1.52}]$	

C: ambient CO_2 concentration (in ppm), M: ambient CH_4 concentration (in ppb), and N: ambient N_2O concentration (in ppb). $C_0 = 393.5$ ppm, $M_0 = 1910$ ppb, and $N_0 = 324$ ppb (<http://www.climate.go.kr>).

복사강제력에 의한 평균기온의 변화는 핵심 변수인 복사강제력 ΔF 와의 선형관계식을 이용하여 산출하였다(Lim *et al.*, 2006; IPCC, 1990).

$$\Delta T_s \approx \lambda \cdot \Delta F \quad (2)$$

여기서 λ ($^{\circ}\text{K}(\text{W}/\text{m}^2)^{-1}$)는 기후민감도 변수, ΔT_s ($^{\circ}\text{K}$)는 평균 지표온도 변화, ΔF (W/m^2)는 복사강제력을 나타낸다.

선행 연구(Joshi *et al.*, 2003; Forster and Shine, 1997; Hansen *et al.*, 1997)에 의하면, 기후민감도 변수(λ)는 복사강제력 유형, 예를 들면 항공기 배출가스에 의해 유발되는 오존 농도변화와 같은 비균질적으로 분포되는 기후변화 인자에 의해 일부 영향을 받는 것으로 나타났다. 이 영향을 Hansen *et al.* (2005)에서는 “efficacy (r_i)”라 정의하였으며 다음과 같이 나타낸다.

$$r_i = \lambda_i / \lambda_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

위 식을 적용하면, 항공기 복사강제력에 의한 최종 기온변화식은 다음과 같다.

$$\Delta T_s \approx r_i \cdot \lambda_{\text{CO}_2} \cdot \Delta F \quad (4)$$

λ_{CO_2} 는 Ponater *et al.* (2006)의 $0.73^{\circ}\text{K}(\text{W}/\text{m}^2)^{-1}$ 값을 사용하였다. CH_4 와 N_2O 의 r_i 값은 각각 1.18 (Ponater *et al.*, 2006)과 1.02 (Hansen *et al.*, 2005)를 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 항공기 온실가스 배출에 의한 복사강제력

국내 4곳의 국제공항인 인천, 김포, 김해, 제주공항의 2009~2010년도 온실가스 CO_2 , CH_4 , N_2O 의 평균 배출량은 표 2에 나타내었다. 인천공항에서 가장 높은 배출특성을 보이고 CO_2 의 배출량은 $6.52 \times 10^5 \text{ ton/yr}$ 으로 김포공항보다 약 3.2배 높으며, CH_4 은 -1.353 ton/yr , N_2O 는 6.65 ton/yr 를 나타내었다. 항공기 온실가스에 대한 자세한 내용은 Song and Shon (2012a, b)과 Song and Shon (2014a)에 서술되어 있다. CO_2 및 N_2O 와는 달리 CH_4 의 항공기에 의한 배출량은 음수 값을 나타낸다. 이는 항공기 엔진 추진율에 따라 배출농도가 달라지는데, 항공기 추진율이 낮은 “공회전(idle)”과 “지상이동(taxi)” 모드를 제외한 엔진 추진

Table 2. Annual mean emissions of greenhouse gases such as CO_2 , CH_4 , and N_2O from commercial aircraft at four international airports during 2009~2010 (in ton/yr).

Airports	CO_2	CH_4	N_2O
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

율이 높은 “접근”, “상승”, “이·착륙(LTO)” 모드시 대기 중 CH_4 의 농도가 엔진에서 소비되기 때문에 감소한다(Satoni *et al.*, 2011).

전체 온실효과 측면에서 볼 때, CH_4 배출에 대한 지구온난화 효과(100년간의 지구온난화지수 $\text{GWP}_{100}=34$)는 CO_2 ($\text{GWP}_{100}=1$)배출에 대한 효과에 비해 낮으나, 분자 한 개당 온난화 효과에서 볼 때 34배 정도 더 크다(IPCC, 2013). N_2O ($\text{GWP}_{100}=298$)의 경우는 CH_4 분자 한 개당의 효과보다 더 크다(CO_2 의 약 300배 정도)(IPCC, 2013). 이러한 차이의 근본적 원인 중 하나는 N_2O 의 대기 중 체류시간(약 120년)이 CH_4 의 체류시간(약 9년)보다 더 길기 때문이다(Denman *et al.*, 2007; Lelieveld *et al.*, 1998). 그리고 CH_4 의 대기 중 농도는 지표에서의 배출과 대기 중 화학반응에 의한 파괴에 의해서 결정되는데, 이러한 화학반응은 OH 라디칼과의 산화반응을 통해 파괴되는 것이다. 한편, N_2O 의 파괴는 대류권에서는 일어나지 않고 성층권에서의 광해리에 의해 파괴되어진다. 이산화탄소에 비해 메탄과 아산화질소의 긴 대기 중 체류시간과 분자 한 개당 온난화 효과가 클지라도 배출량의 측면에서 아주 낮기 때문에 복사강제력 효과에서는 낮은 편이다.

4곳의 국제공항에서 항공기 온실가스 배출에 의한 복사강제력 추정 값을 표 3과 그림 1~4에 나타내었다. 표 3과 그림 1~4의 CO_2 복사강제력 추정값은 표 1의 첫 번째 공식을 이용하여 산출한 값을 나타낸다. 첫 번째 공식을 사용한 CO_2 복사강제력 추정값은 두 번째 공식에 의한 복사강제력과는 약 7% 정도 낮은 값을 보인다. 두 번째 공식과 세 번째 공식에 의한 CO_2 의 복사강제력은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 온실가스 중 CO_2 배출에 따른 복사강제력을 살펴보면, 항공기 이·착륙 빈도가 가장 높은 인천공항의 2009년도 월별 복사강제력은 22.0(3월)~37.2 mW/m^2 (9월)으로 추정되었으며(연평균 값은 29.2

Table 3. Mean radiative forcing and mean temperature change from aircraft emissions of greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) at four international airports during 2009~2010.

Airports	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K)	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K)	ΔF (mW/m ²)	Temp. change (°K)
Incheon	30.0	0.022	-4.45 × 10 ⁻³	<< -0.001	2.96 × 10 ⁻²	<< 0.001
Gimpo	22.9	0.017	-1.87 × 10 ⁻³	<< -0.001	2.65 × 10 ⁻²	<< 0.001
Jeju	22.7	0.017	-1.73 × 10 ⁻³	<< -0.001	2.40 × 10 ⁻²	<< 0.001
Gimhae	17.3	0.013	-1.22 × 10 ⁻³	<< -0.001	2.16 × 10 ⁻²	<< 0.001

mW/m²), 월별 편차는 아주 작은 것으로 나타났다. 2010년도 월별 복사강제력은 2009년도 보다 약간 높은 수치인 23.6(12월)~41.5 mW/m²(6월)의 범위로 나타났다(연평균 값은 30.8 mW/m²). 두 번째로 이·착륙 빈도가 높은 김포공항의 경우, 2009년도 월별 복사강제력은 17.0(3월)~30.2 mW/m²(9월)으로 추정되었으며(연평균 값은 22.6 mW/m²), 2010년도는 2009년도와 거의 유사한 17.4(3월)~29.6 mW/m²(10월)의 범위를 나타내었다(연평균 값은 23.1 mW/m²). 2010년도 월별 복사강제력의 경우 인천경우와는 달리 10월이 가장 높고 3월이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이러한 차이는 국내 항공 여행객과 국제항공 여행객의 계절별 차이에 기인하였다. 세 번째로 이·착륙 빈도가 높은 제주공항의 2009년도 월별 복사강제력은 14.8(1월)~25.8 mW/m²(5월)의 범위로 나타난 반면(연평균 값은 21.1 mW/m²), 2010년도는 2009년도보다 약간 높은 수치인 16.9(12월)~30.0 mW/m²(8월)으로 나타났다(연평균 값은 24.3 mW/m²). 4곳의 공항 중 이·착륙 빈도가 가장 낮은 김해공항의 2009년도 월별 복사강제력은 9.4(9월)~19.7 mW/m²(10월)의 범위로 나타난 반면(연평균 값은 16.7 mW/m²), 2010년도는 2009년보다 다소 높은(최고 1.5배까지) 수치인 14.4(3월)~20.8 mW/m²(11월)으로 추정되었다(연평균 값은 17.8 mW/m²). 월별 복사강제력의 변화의 경우 국내 승객이 다수인 김포공항, 제주공항, 김해공항에서의 뚜렷한 계절적 특성은 나타나지 않았다. 이는 국내 항공승객의 계절적 이동 패턴이 공항별로 서로 다른 것을 알 수 있다.

CH₄ 배출에 의한 복사강제력은 CO₂ 배출의 복사강제력과 비교 시 매우 낮은 배출량으로 인해 수만 배 정도 낮게 추정되었으며, 이는 음의 값으로 지구냉각화를 초래한다. 인천공항의 2년간(2009~2010년) 월별 복사강제력은 -3.27 × 10⁻³(3월)~-6.11 × 10⁻³

mW/m²(6월)의 범위로 나타났다(연평균 값은 -4.45 × 10⁻³ mW/m²). 김포공항의 월별 복사강제력은 제주공항과 유사하게 나타났는데, 각각 -1.31 × 10⁻³(3월)~-2.50 × 10⁻³ mW/m²(9월)와 -1.18 × 10⁻³(3월)~-2.31 × 10⁻³ mW/m²(5월)으로 추정되었다. 또한 김포공항과 제주공항에서의 연평균 복사강제력은 각각 -1.87 × 10⁻³와 -1.73 × 10⁻³ mW/m²으로 추정되었다. 반면 김해공항에서의 복사강제력이 가장 낮게 나타났는데, 그 범위는 -6.99 × 10⁻⁴(9월)~-1.45 × 10⁻³ mW/m²(1월)으로 나타났다(연평균 값은 -1.22 × 10⁻³ mW/m²).

N₂O 배출에 의한 복사강제력은 CO₂의 복사강제력과 비교 시 수천배 정도 낮은 것으로 나타났다. 인천공항의 2년간(2009~2010년) 월별 복사강제력은 1.16 × 10⁻²(3월)~4.86 × 10⁻² mW/m²(9월)의 범위로 추정되었다(연평균 값은 2.96 × 10⁻² mW/m²). 김포공항의 월별 복사강제력은 9.60 × 10⁻³(3월)~4.32 × 10⁻² mW/m²(9월)으로 나타났는데(연평균 값은 2.65 × 10⁻² mW/m²), 이는 제주공항의 월별 복사강제력과 유사하게 나타났다. 즉 1.03 × 10⁻²(11월)~4.01 × 10⁻² mW/m²(5월)의 범위로 추정되었다(연평균 값은 2.40 × 10⁻² mW/m²). 또한 김해공항에서의 월별 복사강제력은 8.41 × 10⁻²(7월)~3.07 × 10⁻² mW/m²(1월)으로 나타났다(연평균 값은 2.16 × 10⁻² mW/m²).

항공기로부터 배출된 온실가스 중 CO₂에 의한 전 지구적 복사강제력은 18~28 mW/m²으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2009; Sausen *et al.*, 2005; IPCC, 1999). 국내에서 온실가스 항공기 배출량이 가장 큰 인천공항에서의 CO₂ 배출에 따른 복사강제력(30 mW/m²)은 전지구 복사강제력과 유사한 것으로 추정되었다. 본 연구에서는 항공기에서 배출되는 입자상 물질 중은 난화에 영향을 주는 블랙카본(BC)에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 최근 국내 대기 중의 BC에 의한 직

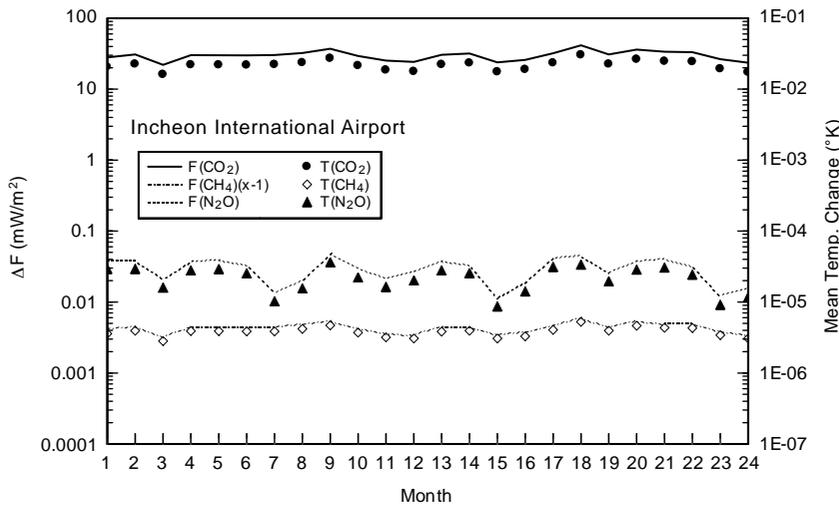


Fig. 1. Monthly variations of radiative forcing and mean temperature changes from aircraft emission of greenhouse gases at Incheon international airport during 2009~2010. Mean temperature changes for CH₄ represent negative values (multiplied by -1).

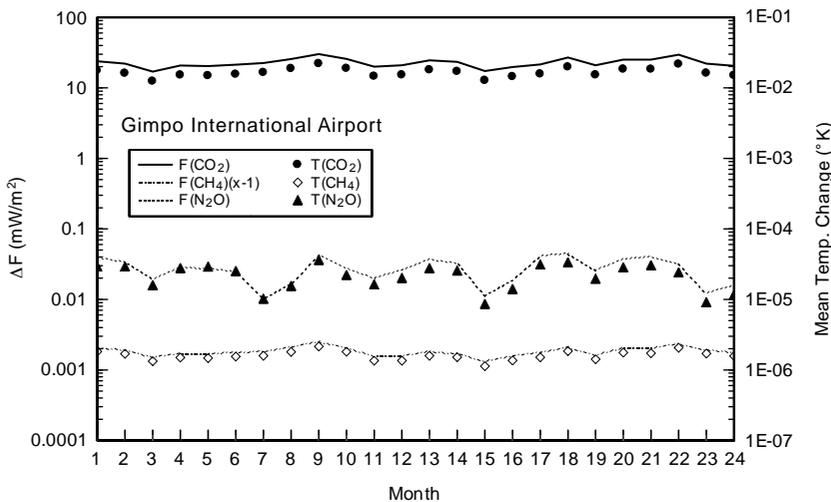


Fig. 2. Same as Fig. 1 except for Gimpo international airport.

접적인 복사강제력은 0.1~1.8 W/m²인 것으로 추정된 바 있으며 (Kim *et al.*, 2012), 아울러 서울지역에서 BC에 의한 직접적인 복사강제력은 1.3~6.5 W/m²로 보고되었다 (Song and Shon, 2014b). 본 연구결과로부터 항공기에서 배출되는 CO₂에 의한 복사강제력은 도시지역 BC의 복사강제력에 비해 매우 작은 것으로 사료된다.

3.2 항공기 온실가스 배출에 의한 평균 기온 변화

국내 4곳의 국제공항에서 항공기 온실가스 배출에 의한 기온변화 추정 값을 보면 (표 3과 그림 1~4), CO₂에 의한 평균기온의 변화는 인천공항에서 가장 높았고 나머지 세 공항에서는 유사한 경향이 나타났다. 예를 들어, 인천공항의 2009년도 월별 평균 기온

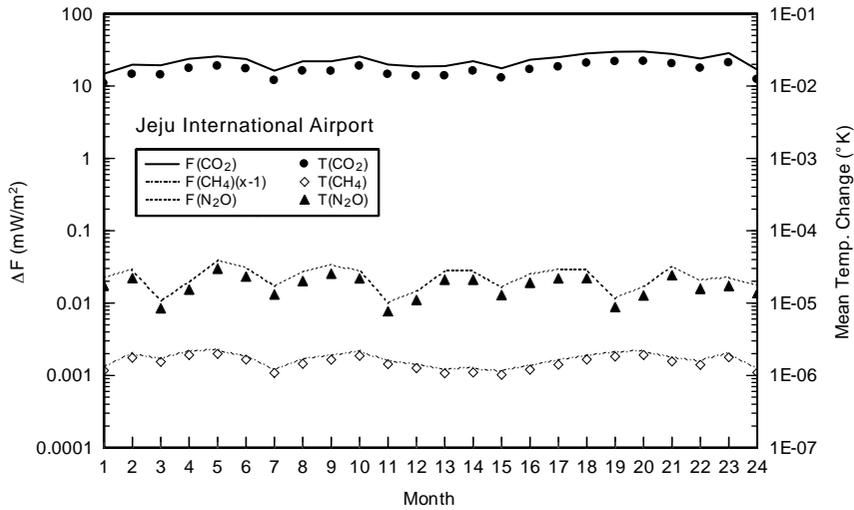


Fig. 3. Same as Fig. 1 except for Jeju international airport.

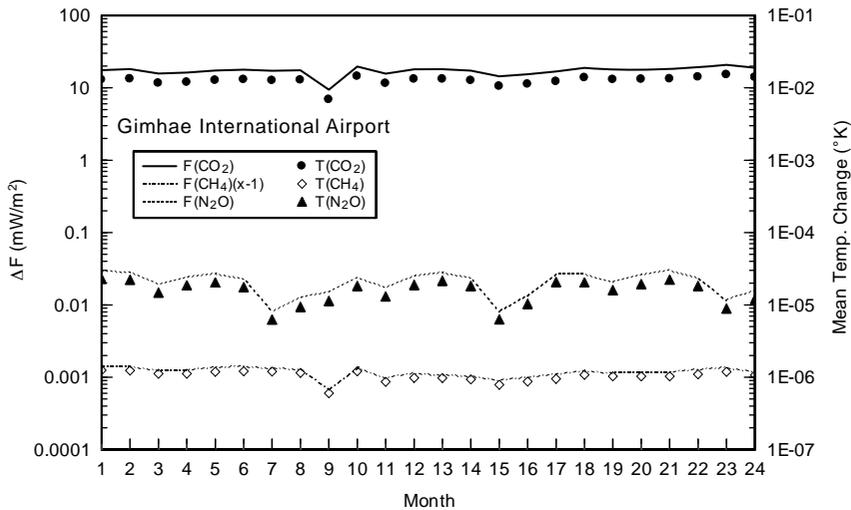


Fig. 4. Same as Fig. 1 except for Gimhae international airport.

변화는 1.61×10^{-2} (3월)~ 2.71×10^{-2} °K (9월)의 범위로 나타났으며, 월별 편차는 아주 작은 것으로 나타났다(연평균 값은 2.13×10^{-2} °K). 2010년도 월별 평균 기온변화는 2009년도 보다 약간 높은 수치인 1.72×10^{-2} (12월)~ 3.03×10^{-2} °K (6월)으로 추정되었다(연평균 값은 2.25×10^{-2} °K). 평균 기온변화의 경우 복사강제력과 동일한 패턴으로 나타났다. 김포공항의

경우, 2009년도 월별 평균 기온변화는 1.24×10^{-2} (3월)~ 2.20×10^{-2} °K (9월)으로 나타났으며(연평균 값은 1.65×10^{-2} °K), 2010년도는 2009년에 비해 약간 높은 수치인 1.27×10^{-2} (3월)~ 2.16×10^{-2} °K (10월)으로 나타났다(연평균 값은 1.69×10^{-2} °K). 제주공항의 2009년도 월별 평균 기온변화는 1.08×10^{-2} (1월)~ 1.88×10^{-2} °K (10월)으로 나타났으며(연평균 값은

$1.54 \times 10^{-2} \text{K}$), 2010년도는 2009년도보다 약간 높은 수치인 1.23×10^{-2} (12월)~ $2.19 \times 10^{-2} \text{K}$ (8월)으로 추정되었다(연평균 값은 $1.78 \times 10^{-2} \text{K}$). 김해공항의 경우, 2009년도 월별 평균 기온변화는 6.87×10^{-3} (9월)~ $1.44 \times 10^{-2} \text{K}$ (10월)의 범위로 나타났으며(연평균 값은 $1.22 \times 10^{-2} \text{K}$), 2010년도는 2009년도에 비해 약간 높은 수치인 1.05×10^{-2} (3월)~ $1.52 \times 10^{-2} \text{K}$ (11월)으로 나타났다(연평균 값은 $1.30 \times 10^{-2} \text{K}$). 한편 CH_4 와 N_2O 배출에 의한 평균 기온변화는 이들의 매우 낮은 복사강제력으로 인해서 CO_2 의 평균 기온변화와 비교하여 무시할 정도로 작게 나타났다.

서울지역의 BC에 의한 직접적인 평균 기온변화는 $0.4 \sim 1.6^\circ \text{K}$ 로 보고되었다(Song and Shon, 2014b). 본 연구결과로부터 항공기에서 배출되는 CO_2 에 의한 평균 기온변화는 도시지역의 BC에 의한 평균 기온변화와 비교하여 매우 작은 것으로 판단된다. 또한 이는 도시지역의 열섬효과(대구 4.2°K , Kim *et al.*, 2013)에 비해서도 매우 낮은 기온변화를 나타냈다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2009~2010년 동안 국내 대규모 공항(인천, 김포, 제주, 김해 공항)에서 항공기 온실가스(CO_2 , CH_4 , N_2O) 배출자료를 이용하여 각 온실가스의 농도를 산정하였으며, 단순화된 복사강제력 계산식을 통해 4공항의 온실가스 배출이 복사강제력에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 복사강제력과 기온변화의 선형관계식을 이용하여 각 공항에서의 온실가스 배출에 따른 평균기온 변화를 분석하였다. 전반적으로 2년간(2009~2010년) 4공항 중 인천공항에서의 CO_2 농도가 가장 크게 산출되었으며, 이를 통한 복사강제력(평균 30.0mW/m^2) 및 평균 기온변화(평균 0.022°K)도 가장 크게 나타났다. 반면 가장 작은 복사강제력 및 평균 기온변화는 김해공항에서 나타났다(평균 17.3mW/m^2 과 평균 0.013°K). 또한 김포공항을 제외한 대부분 공항에서는 2009년도에 비해 2010년도에 산출된 복사강제력 및 평균기온의 변화가 약간 더 크게 나타났다(김포공항은 2009년과 2010년에 서로 유사하게 산출). 온실가스 중 CH_4 의 배출은 2년 동안 평균 음의 복사강제력(특히 인천공항에서 $-4.45 \times 10^{-3} \text{mW/m}^2$)과 기온변화의 감소($-3.84 \times 10^{-6} \text{K}$)를

야기시켰는데, 이것은 항공기 엔진연소시 대기 중의 CH_4 소비에 기인하여 배출량이 감소(음수 값)되었기 때문인 것으로 사료된다. N_2O 의 경우, 모든 공항에서 항공기 배출에 따른 복사강제력과 평균기온의 변화는 전체에 비해 무시할 정도의 매우 낮은 수치로 추정되었다($\ll 0.1 \text{mW/m}^2$ 와 $\ll 1 \times 10^{-3} \text{K}$).

본 연구의 결과에서 추정된 항공기 온실가스 배출에 의한 복사강제력은 CO_2 의 경우 전지구 복사강제력과 유사하였지만, 도시 대기의 BC에 의한 복사강제력에 비해서는 매우 작은 값을 나타내었다. 한편 IPCC 5차 보고서에 따르면, 1750년 대비 2011년 총 복사강제력은 $2.3 (1.1 \sim 3.3) \text{W/m}^2$ 상승과 RCP8.5 시나리오에 의하면 2081~2100년 기온은 1986~2005 기간 대비 $3.7^\circ \text{C} (2.6 \sim 4.8^\circ \text{C})$ 도 증가하는 것으로 제시되었다(IPCC, 2013). 따라서 본 연구결과인 30mW/m^2 의 항공부문 복사강제력 크기는 국내의 기후변화 관점에서 관심을 가져야 하는 부분으로 판단된다. 또한 항공기로부터 CO_2 배출에 의한 평균기온의 변화는 도시 대기의 BC에 의한 평균기온 변화 그리고 도시의 열섬효과와 비교해서도 상당히 작게 나타났다. 이것은 대상지역에서 산출된 온실가스의 배출량 차이에 기인한 것으로 사료되며, 향후 풍부하고 다양한 측정·분석자료의 확보와 3차원 복사전달모델을 통한 수치모의 연구가 병행된다면 보다 정확한 온실가스에 따른 복사효과를 산출할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 후속 연구에서 복사강제력 산출 경험식에 이용되는 계수(상수 값)의 국내 적용 타당성에 대한 불확실성을 3차원 복사전달모델의 수치모의를 통해 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 동의대학교 교내연구비와 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2011-0014533)을 받아 연구되었다.

References

- Carleton, A.M. and P.J. Lamb (1986) Jet contrails and cirrus cloud: A feasibility study employing high-resolution satellite imagery, *Bul. Amer. Meteor. Soc.*, 67, 301-

- 309.
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, and others (2007) Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds) *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Forster, P.M. and K.P. Shine (1997) Radiative forcing and temperature trends from stratospheric ozone change, *J. Geophys. Res.*, 102, 10841-10857.
- 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 Fifth Assessment Report - Climate Change (2013) *The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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 Civil Aviation Development Association (2014) <http://www.airtransport.or.kr/kor/index.html>.
- Korea Meteorological Administration (2009) *Annual Aerodrome Weather Report 2009*, Seoul, Korea.
- Korea Meteorological Administration (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.
- Lelieveld, J., P.J. Crutzen, and F.J. Dentener (1998) Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane, *Tellus*, 50B, 128-150.
- 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.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2010) http://www.mltn.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=5069542.
- 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.
- 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), *Meteorologische Zeitschrift*, 14, 555-561.
- Schumann, U. (1997) The impact of nitrogen oxides emissions from aircraft upon the atmosphere at flight altitudes

- 8-15km-result from the AERONOX Project, *Atmos. Environ.*, 31, 1723-1733.
- 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. Korean. Soc. Atmos. Environ.*, 28(2), 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), 1-17. (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.
- Uherek, E., T. Halenka, J. Borken-Kleefeld, Y. Balkanski, T. Berntsen, 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.