

ORIGINAL ARTICLE

국내 일반공항에서 항공기에 의한 대기오염물질과 온실가스의 배출량 산정 및 특성 분석

손장호* · 송상근¹⁾ · 윤태경 · 이강춘²⁾

동의대학교 환경공학과, ¹⁾제주대학교 해양과학대학 지구해양학과, ²⁾동의대학교 화학공학과

Emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from Aircraft Activities at the Small Scale Airports

Zang-Ho Shon*, Sang-Keun Song¹⁾, Tae-Kyung Yoon, Gang-Choon Lee²⁾

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

¹⁾Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

²⁾Department of Chemical Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

Abstract

Emissions of air pollutants and greenhouse gases (GHGs) from aircraft activities at 11 small-scale airports were investigated using the emissions and dispersion modeling system (EDMS) version 5.1.3 during the two year period of 2009~2010. The number of landing and take-off (LTO) at these airports was dominant for the aircraft type B737, accounting for more than 60% of the total LTOs. Out of the 11 small-scale airports, Gwangju (GJ, RKJJ) airport was the largest emitter of air pollutants and GHGs, whereas Yangyang (YY, RKNY) airport was the smallest emitter. The emissions of NO_x and VOCs in 2010 at the 11 airports ranged from 1.9 to 83 ton/y and 0.1 to 17 ton/y, respectively. In 2010, the emissions of CO₂ ranged from 394 to 21,217 ton/y. The emissions of most air pollutants (except for NO_x and PM₁₀) and GHGs were estimated to be the highest in taxi-out mode. The highest emissions of NO_x and PM₁₀ were emitted from climb-out and approach modes, respectively. In addition, the total LTOs at the 11 small-scale airports accounted for the range of 9.3~9.9% of those at four major international airports in Korea. The total emissions of air pollutants and GHGs at the 11 airports ranged from 4.8 to 12% of those at the four major airports.

Key words : Aircraft, EDMS, Air pollutants, Greenhouse gas, Emission, Airport

1. 서론

대기오염물질과 온실가스(GHG)의 배출량 및 농도는 인위적 배출원의 급격한 증가에 의해 산업혁명 이후 크게 증가하고 있다(IPCC, 2007). 예를 들면, 인위적발생원에 의한 온실가스의 전지구적 연 배출량은

1970년 28.7 GtCO₂-e/y으로 보고되었고, 2004년 49.0 GtCO₂-e/y으로 증가하여 이 기간 동안 1.7배 증가하였다. 이러한 대기오염물질과 온실가스의 배출은 도로, 철도 등과 같은 육상교통의 수송에 의해 대기질과 기후변화에 상당한 영향을 미친다는 연구결과가 보고된 바 있다(Uherek 등, 2010; Shon 등, 2011). 최근 들

Received 10 November, 2012; Revised 29 January, 2013;

Accepted 18 March, 2013

*Corresponding author : Zang-Ho Shon, Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea
Phone: +82-51-890-2078
E-mail: zangho@deu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

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

어 항공도 수송부문에서 주요한 역할을 하고 있으며 대기환경에 미치는 영향 또한 크게 나타나고 있다. 예를 들면, 국제적으로 2000~2007년 사이 연평균 승객 수송량의 성장률은 5.3%/y이고 승객수송부문에서 38%의 증가를 보였다(Lee 등, 2009). 국내의 항공부문을 살펴보면, 국토해양부의 항공정보 포털시스템에서 제공하는 최근 10년 항공기 등록현황에서 2002년 292대에 불과하던 항공기가 2007년과 2012년으로 올수록 각각 419대와 568대로 급격히 증가한 것을 볼 수 있다(Korea Civil Aviation Development Association, 2012). 또한, 항공교통량(항공 교통센터에서 관제한 항공기 대수)을 살펴보면, 2002년 350,154대에서 2011년 513,922대로 46% 이상 증가한 것을 알 수 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime affairs, 2012).

대기환경의 관점에서 항공의 중요성에 대한 연구는 1970년대 초반부터 거슬러 올라가는데, 즉 민간초음속 여객기인 콩코드의 도입에 따른 NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$)의 광화학에 의한 잠재적 성층권오존의 파괴에 관한 내용이다. 1980년대 후반 이후, 일반항공기의 배출가스가 초래하는 대류권 오존의 변화와 비행운 및 이에 따른 기후변화에 관한 연구가 수행되었다(Carleton과 Lamb, 1986; Schumann, 1997; Stuber와 Forster, 2007). 그리고 CO_2 , CH_4 , N_2O , PM_{10} 등과 같은 항공 배출물질은 기후복사강제력에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lee 등, 2009). 2000년부터 2005년 사이 항공에 의한 복사강제력은 14% 증가하였고 2005년 항공복사강제력은 약 55 mW/m^2 로 전체 복사강제력의 3.5%를 차지한다고 보고하였다(Lee 등, 2009).

항공기 엔진에서 배출되는 오염물질은 항로 및 공항 주변지역의 대기질에 영향을 주는 휘발성 유기화합물(VOCs), 질소산화물(NO_x), 이산화황(SO_2), CO , PM_{10} 등과 온실가스인 CO_2 , H_2O 등을 함유한다. 항로에서의 대기질에 미치는 영향을 살펴보면, 항공기에서 배출되는 NO_x 의 60%가 고도 9~12 km 상공에 존재하고, 이들 배출량의 93%는 북반구에 치우쳐져 있다(Colville 등, 2001). 그리고 공항주변에서의 영향에 대한 연구에 따르면, 파리공항 주변지역에서 항공기에 의한 NO_x 의 배출이 VOCs의 배출보다 오존에 미치는 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다(Pison와 Menut, 2004). 이외에도, 미국 아틀란타 공항에서는

항공기에 의해 오존의 농도가 5 ppb 정도 상승하는 것으로 보고되었다(Unal 등, 2005).

최근, 국내에서도 항공 배출에 의한 대기질 및 온실가스의 영향을 알아보기 위해 주요 공항(인천, 김포, 김해, 제주 공항)에 대한 연구가 진행되었다(Song과 Shon, 2012a; Song과 Shon, 2012b). 그러나 4대 주요 공항을 제외한 국내에서의 일반공항에 대한 연구는 전혀 이루어지지 않고 있다. 또한 기존의 항공부문 배출량 조사는 대부분 온실가스(특히 CO_2)에 집중되어 있는 반면, 대기환경기준물질의 배출량에 관한 연구는 매우 드문 실정이다(Yoo, 2009; Kim과 Ahn, 2008). 따라서 본 연구는 국내 일반공항에서 항공기에 의한 대기오염물질과 온실가스의 배출량을 산정하여 시간적(연간, 계절별, 월별) 특성과 항공기 기종별, 운항모드별 특성을 살펴보았다. 그리고 각 공항 별로의 배출량도 상호 비교하였으며, 선행연구에서 이루어진 4대 주요 공항에서의 대기오염물질 및 온실가스의 배출량도 비교하였다. 이러한 항공배출량이 대기질에 미치는 영향이 점차 커져감에도 불구하고, 우리나라의 공항 및 주변 지역에서의 대기질 변화에 대한 수치모의 연구는 전무하다. 향후, 본 연구에서 얻어지는 주요 결과는 선행연구(4대 주요 공항)의 결과와 함께 우리나라 전체 항공배출량이 기후변화 및 주변 대기질에 미치는 영향을 평가하기 위한 주요 기초자료로 활용하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구영역

본 연구의 대상영역은 국내에 위치하고 있는 총 15개 공항 중 인천, 김포, 부산, 제주의 4대 주요 공항을 제외한 11개 국내 일반공항이다. 이들의 공항명과 ICAO의 코드는 다음과 같다. 대구공항은 RKTN, 청주공항 RKTU, 양양공항 RKNY, 무안공항 RKJB, 광주공항 RKJJ, 여수공항 RKJY, 울산공항 RKPU, 사천공항 RKPS, 포항공항 RKTH, 군산공항 RKJK, 원주공항 RKNW이다. 국내 일반공항의 지리적 위치와 일반적 특성은 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다.

2.2. 항공기 배출량 산정법

일반적으로 항공기 배출량 산정방법은 세 가지로 분류할 수 있다. 즉, 항공기의 연료사용량을 이용한 방

Table 1. Characteristics of the 11 small scale airports

Airport	RKTN (DG)	RKJJ (GJ)	RKJB (MA)	RKTU (CJ)	RKJY (YS)	RKPU (US)	RKPS (SC)	RKTH (PH)	RKJK (GS)	RKNW (WJ)	RKNY (YY)
Location	N35°53'38" E128°39'32"	N35°07'35" E128°48'32"	N34°59'29" E126°22'58"	N36°42'59" E127°29'57"	N34°50'32" E127°37'02"	N35°35'36" E129°21'08"	N35°05'19" E128°04'13"	N35°59'16" E129°25'07"	N35°54'14" E126°36'57"	N37°26'17" E127°57'32"	N38°03'41" E128°40'09"
Airfield Area (m ²)	6.6×10 ⁶	5.9×10 ⁶	2.6×10 ⁶	6.7×10 ⁶	1.3×10 ⁶	9.2×10 ⁵	4.0×10 ⁶	4.0×10 ⁶	5.5×10 ⁶	5.7×10 ⁶	2.5×10 ⁶
Runway (m)	13R/31L (2,755×45) 13L/31R (2,743×45)	22R/04L (2,835×45) 22L/04R (2,835×45)	01/19 (2,800×45)	24R/06L (2,744×60) 24L/06R (2,744×45)	17/35 (2,100×45)	18/36 (2,000×45)	24R/06L (2,743×45) 24L/06R (2,743×45)	10/28 (2,133×45)	18/36 (2,743×45)	03/27 (2,743×45)	15/33 (2,500×45)

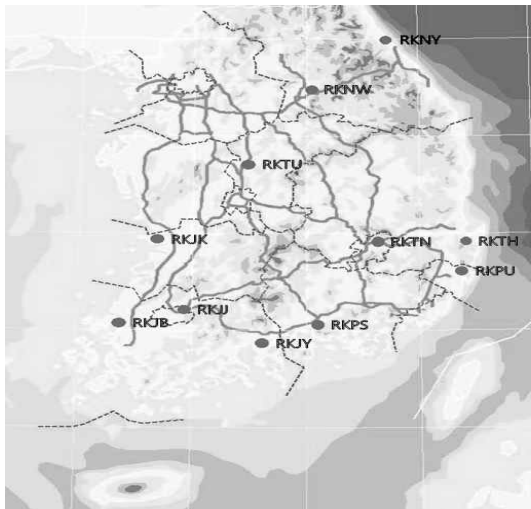


Fig. 1. Geographical location of 11 small scale airports (Daegu: RKTN, Gwangju: RKJJ, Muan: RKJB, Cheongju: RKTU, Yeosu: RKJY, Ulsan: RKPU, Sacheon: RKPS, Pohang: RKTH, Gunsan: RKJK, Wonju: RKNW, and Yangyang: RKNY).

법(Tier 1), LTO 횡수와 연료사용량의 혼용을 이용한 방법(Tier 2), LTO 횡수를 이용한 방법(Tier 3)으로 배출량을 산출한다. 한국교통연구원(Korea Transport Institute, 2009) 조사에 따르면, 대부분의 항공수송 배출량 연구는 연료사용량을 이용한 Tier 1 방법을 기초로 하여 산출되고 있다고 한다. 한편, Kim과 Ahn (2008)은 Tier 2를 이용하여 국내의 항공부문 온실가스 배출량을 산출하였으며, 이것을 Tier 1의 배출량과 비교한 결과 다소 낮게 산출된 것을 알 수 있었다. 즉,

연료사용량을 기초로 할 경우 연료가 사용되는 장소에서의 소비량을 바탕으로 배출량이 산출되기 때문에 실제 배출되는 지역을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있어 정확한 산출에 어려움이 있는 실정이다. 따라서 세 방법 중 Tier 3 산출방법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 LTO 횡수(Tier 3)를 이용한 항공기 배출량 산정법을 이용하였으며, 자세한 설명은 선행연구에 잘 나와 있다(Song과 Shon, 2012a). 요약하면, 항공기에 의한 배출은 크게 세 부분 - 항공기의 LTO, 항공기의 cruise, LTO 후의 지상부대 장비(GSE: Ground Support Equipment) 운행 - 으로 구분할 수 있다. 더욱 더 세분하면, 항공기의 운항모드는 taxi-in, taxi-out, startup(또는 idle), approach, take-off, climb-out, cruise으로 분류된다. LTO 모드 고도 기준은 1000 m로 분류하였으며, 운항모드 중 approach 모드는 하강과 착륙을 포함하는 것으로 이 세 모드를 하나의 범주 “approach”로 통합하여 배출량 산출에 적용하였다(European Monitoring and Evaluation Program, 2009).

항공기 LTO에 의한 오염물질 배출량은 기종별 운항모드에 따른 배출계수를 이용하여 산출할 수 있다. 경제층 아래에서의 항공기 LTO에 의한 항공기 배출량 산출을 위해 활동도를 기초로 한 산정식은 다음과 같다.

$$E_{ijk} = \sum LTO_i \times TIM \times FF \times EF_{ijk} \quad (1)$$

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

LTO_i = 기종별(i) LTO 횟수

TIM = 운항모드에 할당된 시간(min)

FF = 모드별 연료 흐름(kg-fuel/min)

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

한국공항공사에서 제공하는 항공기 기종별 LTO 횟수와 미국 연방항공국(Federal Aviation Administration, 2010)에서 개발한 항공기 오염물질 배출 및 확산모델(EDMS)로부터의 기종별, 운항모드별, 화학종별 배출계수를 이용하여 배출량을 산출하였다. 11개 공항에서 운항하는 항공기를 B737, B767, B777, A300, A330, IL62, 기타 기종으로 분류하였다. 기타 기종은 A321기종으로 대체하여 항공기 배출량을 계산하였다. 국내 일반공항의 기종별 LTO 횟수는 한국

공항공사에서 제공하는 자료를 활용하였으며(Korea Airports Corporation, 2012), 모드별 할당시간(TIM)과 연료흐름(FF)은 EDMS으로부터 얻었다. 예를 들면, 모델에서 내정된 taxi-in과 taxi-out 시간은 각각 7분과 19분이 사용되었으며, take-off, climb-out, approach, startup 모드의 시간은 각각 0.7, 2.2, 4.0, 1.0분이 적용되었다. 반면, 본 연구에서 운용기에 의한 배출량과 GSE 배출량 산출은 보안문제와 관련자료의 부족으로 인해 제외하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 항공 배출량의 시간적 특성

Table 2는 최근 2년(2009~2010) 동안 11개 일반공항에서 LTO 횟수의 연간 및 월변화를 나타낸다. 양양 공항은 낮은 탑승률로 인한 적자로 2007년 7월 운항

Table 2. Monthly variation of LTOs at 11 small scale airports during two-year period of 2009-2010

		RKTN	RKJJ	RKJB	RKTU	RKJY	RKPU	RKPS	RKTH	RKJK	RKNW	RKNY
2009	1	703	930	98	698	493	807	212	370	52	56	-
	2	661	791	70	620	394	698	160	316	82	54	-
	3	732	917	104	670	496	792	202	356	122	58	-
	4	678	875	110	644	465	746	192	302	112	58	-
	5	717	912	116	721	490	776	204	312	124	62	-
	6	670	895	74	715	480	750	186	300	118	60	-
	7	738	904	82	842	460	730	192	276	120	56	-
	8	738	930	106	859	490	773	204	292	122	62	-
	9	652	878	62	723	486	770	194	304	120	60	-
	10	668	937	78	804	487	787	215	308	124	62	-
	11	632	894	66	778	466	760	197	292	118	60	-
	12	668	884	66	805	500	800	200	318	110	58	-
	TOTAL	8257	10747	1032	8879	5707	9189	2358	3746	1324	706	0
2010	1	677	845	102	779	458	736	186	298	108	52	-
	2	633	835	104	785	442	706	180	276	106	52	-
	3	686	906	107	805	488	757	196	298	122	59	-
	4	679	882	104	774	461	759	182	300	108	58	-
	5	718	892	132	759	440	720	184	307	118	62	16
	6	672	834	88	683	480	706	180	300	114	58	20
	7	732	858	79	734	482	696	154	312	122	55	34
	8	744	851	81	832	490	708	148	310	125	54	36
	9	669	824	59	769	485	694	139	299	118	58	16
	10	716	850	87	779	498	736	144	330	124	56	12
	11	674	870	51	753	437	684	142	248	118	58	-
	12	687	868	64	733	497	730	148	320	104	51	-
	TOTAL	8287	10315	1058	9185	5658	8632	1983	3598	1387	673	134

이 중단되었다가 2010년부터 다시 운항을 재개하였으므로, LTO시간적 특성분석에서 2009년은 제외되었다. 연변화를 보면, 2009년에는 706(원주)~ 10,747(광주) LTO/y이고 2010년에는 134(양양)~10,315(광주) LTO/y로 나타났다. 또한 LTO의 연 변화율의 경우, 대구, 무안, 청주, 군산 공항은 증가(0.4%(대구)~4.5%(군산)) 추세를 보였고 나머지 공항은 감소(-0.9%(여수)~6.5%(울산)) 추세를 나타내었다(Table 2와 Fig. 2). 울산공항에서 LTO 횟수가 큰 폭으로 감소한 원인 중 하나로는 KTX 승객의 증가에 따른 것으로 판단된다(2010년 11월 개통).

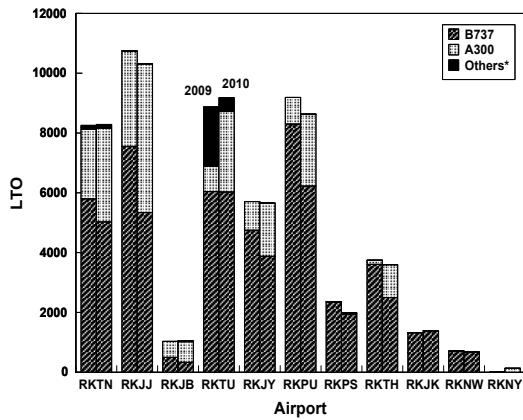


Fig. 2. The number of annual LTOs at 11 small scale airports during the period of 2009-2010. The aircraft type of "others" represents aircrafts excluding B737, B767, B777, A300, A330, and IL62.

연변화를 보면, 2년 동안의 월평균 LTO횟수는 광주 878회, 청주 753회, 울산 743회, 대구 689회, 여수 474회, 포항 306회, 사천 181회, 군산 113회, 무안 87회, 원주 57회, 양양 공항은 22회 순으로 나타났다. 최대값을 나타내는 월은 공항에 따라 매우 다르게 나타났으며, 모든 공항의 월변화 폭은 2009년에는 월평균 +11.9%~18.1% 범위, 2010년에는 +13%~13% 범위 내에서 변화하였다. 2009년도 월별 변화폭이 가장 큰 공항은 군산공항(+12.4%~52.9%)이고, 가장 작은 공항은 원주공항(+5.4%~8.2%)으로 나타났다. 2010년도의 경우, 월별 변화폭이 가장 큰 공항은 양양공항(+61%~46%)이고 가장 작은 공항은 광주공항(+5.4%~

-4.1%)으로 나타났다. 광주공항이 낮은 월 변화율을 보인 것은 꾸준한 항공승객의 이용률로 판단된다. 한편, 기종별 LTO 횟수의 경우, 모든 공항에서 B737이 주종을 이루었다(무안공항 제외). A300 기종 또한 각 공항에서 평균적으로 전체 LTO의 26%를 차지하였다. 2009년과 2010년에 B737과 A300 기종을 합한 LTO 횟수는 전체 기종의 LTO 횟수의 95% 이상을 차지한 것으로 나타났다.

항공기에 의한 대기오염물질의 연간 배출량의 크기 순서는 CO, NO_x, VOCs, PM₁₀ 순으로 나타났다(Tables 3~4과 Fig. 3). 2년(2009~2010년) 동안 개별 공항에서의 CO 연간 배출량 변화는 1.1~110 ton/y 이었으며, 2010년에 연평균 51 ton/y으로 2009년보다 2 ton/y 정도 감소하였다. 2년 동안 NO_x의 연변화는 2~83 ton/y 이었으며, 2010년에 연평균 34 ton/y으로 전년 대비 약 26% 증가하였다. VOCs의 연변화는 0.1~20 ton/y 이었으며, 2010년에 연평균 9 ton/y으로 전년 대비 1 ton/y 정도 감소하였다. 그리고 VOCs/NO_x 배출비율은 0.14~0.68의 범위를 나타내었고 평균값은 0.37(2010년)~0.46(2009년)으로 선박으로부터의 비율(0.035)에 비해 상대적으로 매우 높은 것을 알 수 있었다(Song 등, 2010). 이외에도, PM₁₀의 연간 배출량 변화는 9~620 kg/y, 2010년에 연평균 299 kg/y으로 전년 대비 거의 변화가 없었다. 요약하면 2010년도 대기오염물질의 연변화는 평균적으로 전년 대비 -5%(CO)~26%(NO_x)의 변화를 보여 매우 크지 않은 것으로 조사되었다.

대기오염물질 배출량 특성과 달리, 온실가스의 배출량은 대체적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 온실가스의 경우, 2009~2010년도 CO₂ 연간 배출량의 변화는 394~21,217 ton/y, 2010년도 연평균은 8,270 ton/y으로 전년 대비 약 13% 증가하였다. CH₄의 연변화는 -1~36 kg/y, 2010년도 연평균은 -13 kg/y로 전년 대비 약 48% 감소하였다. CH₄의 배출량은 유일하게 음수 값을 나타내었는데, 이것은 항공기 엔진 연소 시 공기중의 CH₄ 소비에 기인한 배출량의 감소를 의미한다(Santoni 등, 2011). N₂O의 연변화는 7~379 kg/y, 2010년도 연평균은 168 kg/y로 전년 대비 약 12% 증가하였다. 게다가, 수증기의 연변화는 153~8,279 ton/y, 2010년도 연평균은 3,640 ton/y로 전년 대비 약 13% 증가하였다.

Table 3. Variation of seasonally averaged emissions of air pollutants and GHGs at all 11 small scale airport during two-year period of 2009-2010 (ton/season)

Year	Season	CO	NOx	VOCs	PM ₁₀	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
2009	Spring	134	69	24	0.75	0.38	-0.024	20,931	8,202
	Summer	135	71	23	0.77	0.39	-0.024	21,444	8,381
	Fall	135	65	25	0.75	0.37	-0.022	20,321	7,944
	Winter	131	64	24	0.73	0.36	-0.021	19,934	7,793
2010	Spring	131	87	23	0.77	0.43	-0.035	23,991	9,379
	Summer	128	87	20	0.75	0.43	-0.035	23,741	9,281
	Fall	125	88	22	0.74	0.43	-0.036	23,639	9,241
	Winter	126	79	23	0.74	0.40	-0.030	22,156	8,660

Table 4. Emissions of air pollutants such as CO, NOx, VOCs, and PM₁₀ for aircraft operational mode at small scale airport during study period (ton/y)

		CO		NOx		VOCs		PM ₁₀	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
RKTN	Approach	14.1	12.6	7.6	8.9	3.1	2.7	0.2	0.2
	Climb Out	3.1	2.9	23.7	27.9	0.1	0.1	0.1	0.1
	Startup	-	-	-	-	1.5	1.5	-	-
	Takeoff	1.2	1.1	11.6	13.8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	17.7	17.6	2.3	2.5	2.8	2.7	<0.1	<0.1
	Taxi Out	47.9	47.9	6.2	6.8	7.6	7.3	0.1	0.1
	Total	84.0	82.0	51.5	59.9	15.1	14.3	0.5	0.5
RKJJ	Approach	18.3	13.8	9.8	12.3	4.0	2.9	0.3	0.2
	Climb Out	4.1	3.2	30.5	38.8	0.1	0.1	0.1	0.1
	Startup	-	-	-	-	1.9	2.0	-	-
	Takeoff	1.6	1.2	15.0	19.2	0.1	0.1	<0.1	0.1
	Taxi In	23.2	22.0	2.9	3.3	3.7	3.2	0.1	0.1
	Taxi Out	62.9	59.5	8.0	9.1	10.0	8.6	0.2	0.2
	Total	110.1	99.8	66.2	82.7	19.8	16.8	0.6	0.6
RKJB	Approach	1.3	1.0	1.3	1.6	0.3	0.2	<0.1	<0.1
	Climb Out	0.3	0.3	4.1	5.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Startup	-	-	-	-	0.2	0.2	-	-
	Takeoff	0.1	0.1	2.0	2.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	2.2	2.2	0.3	0.4	0.3	0.3	<0.1	<0.1
	Taxi Out	5.9	6.0	0.9	1.1	0.8	0.8	<0.1	<0.1
	Total	9.9	9.6	8.7	10.7	1.6	1.5	0.1	0.1
RKTU	Approach	14.5	14.8	6.7	9.0	3.2	3.2	0.2	0.2
	Climb Out	3.2	3.3	22.4	28.5	0.1	0.1	0.1	0.1
	Startup	-	-	-	-	1.4	1.6	-	-
	Takeoff	1.2	1.3	10.9	14.0	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	16.5	19.2	2.3	2.7	2.6	3.0	0.1	0.1
	Taxi Out	44.7	52.1	6.2	7.3	7.2	8.1	0.1	0.1
	Total	80.2	90.7	48.6	61.5	14.6	16.1	0.6	0.6
RKJY	Approach	11.2	9.4	4.1	5.3	2.5	2.1	0.1	0.1
	Climb Out	2.5	2.1	12.4	16.4	0.1	0.1	<0.1	0.1
	Startup	-	-	-	-	0.9	1.0	-	-
	Takeoff	0.9	0.8	6.0	8.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	12.4	12.2	1.3	1.6	2.1	1.9	<0.1	<0.1
	Taxi Out	33.7	33.1	3.6	4.2	5.7	5.2	0.1	0.1
	Total	60.7	57.6	27.5	35.6	11.4	10.3	0.3	0.3

Table 4. Continue

		CO		NOx		VOCs		PM ₁₀	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
RKPU	Approach	19.3	15.0	5.7	7.8	4.3	3.3	0.2	0.2
	Climb Out	4.2	3.4	17.1	24.0	0.1	0.1	0.1	0.1
	Startup	-	-	-	-	1.5	1.5	-	-
	Takeoff	1.6	1.3	8.3	11.8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	20.1	18.6	2.0	2.3	3.5	3.0	<0.1	<0.1
	Taxi Out	54.6	50.6	5.5	6.4	9.6	8.2	0.1	0.1
	Total	99.7	88.9	38.6	52.2	19.1	16.1	0.5	0.5
RKPS	Approach	5.4	4.5	1.1	1.0	1.2	1.0	0.1	0.1
	Climb Out	1.2	1.0	3.2	2.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Startup	-	-	-	-	0.4	0.3	-	-
	Takeoff	0.4	0.4	1.5	1.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	5.2	4.4	0.5	0.4	1.0	0.8	<0.1	<0.1
	Taxi Out	14.1	11.8	1.2	1.1	2.6	2.2	<0.1	<0.1
	Total	26.3	22.0	7.6	6.7	5.2	4.3	0.1	0.1
RKTH	Approach	8.3	6.1	2.0	3.4	1.9	1.3	0.1	0.1
	Climb Out	1.8	1.4	5.8	10.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Startup	-	-	-	-	0.6	0.6	-	-
	Takeoff	0.7	0.5	2.8	5.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	8.2	7.8	0.8	1.0	1.5	1.2	<0.1	<0.1
	Taxi Out	22.3	21.0	2.0	2.7	4.0	3.3	<0.1	0.1
	Total	41.3	36.7	13.3	22.5	8.0	6.6	0.2	0.2
RKJK	Approach	3.0	3.2	0.6	0.7	0.7	0.7	<0.1	<0.1
	Climb Out	0.7	0.7	1.8	1.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Startup	-	-	-	-	0.2	0.2	-	-
	Takeoff	0.2	0.3	0.9	0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	2.9	3.1	0.3	0.3	0.5	0.6	<0.1	<0.1
	Taxi Out	7.9	8.3	0.7	0.7	1.5	1.5	<0.1	<0.1
	Total	14.8	15.5	4.3	4.5	2.9	3.0	0.1	0.1
RKNW	Approach	1.6	1.6	0.4	0.3	0.4	0.4	0.0	0.0
	Climb Out	0.3	0.3	1.0	1.0	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Startup	-	-	-	-	0.1	0.1	-	-
	Takeoff	0.1	0.1	0.5	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	Taxi In	1.6	1.5	0.1	0.1	0.3	0.3	<0.1	<0.1
	Taxi Out	4.2	4.0	0.4	0.4	0.8	0.7	<0.1	<0.1
	Total	7.9	7.5	2.4	2.2	1.6	1.5	<0.1	<0.1
RKNY	Approach	-	<0.1	-	0.3	-	<0.1	-	<0.1
	Climb Out	-	<0.1	-	0.9	-	<0.1	-	<0.1
	Startup	-	<0.1	-	<0.1	-	<0.1	-	<0.1
	Takeoff	-	<0.1	-	0.5	-	<0.1	-	<0.1
	Taxi In	-	0.3	-	0.1	-	<0.1	-	<0.1
	Taxi Out	-	0.7	-	0.2	-	0.1	-	<0.1
	Total	-	1.1	-	1.9	-	0.1	-	<0.1

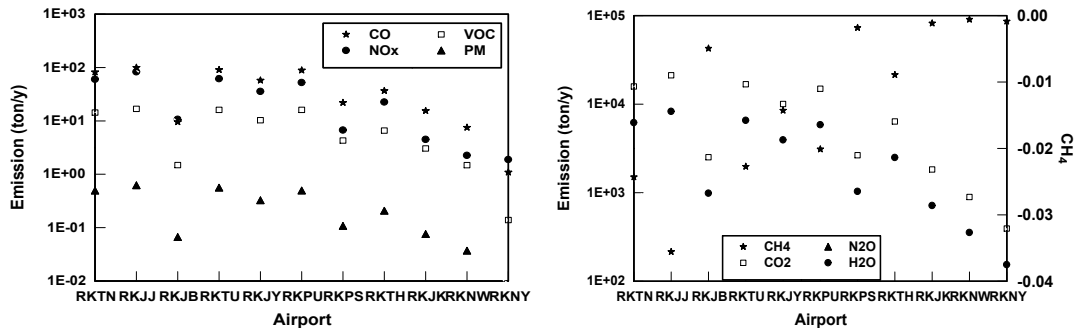


Fig. 3. Emissions of air pollutants and GHGs at 11 small scale airports in 2010.

계절별 특성을 보면, 대기오염물질과 온실가스의 배출량 변화(-5~5%)는 미미한 것으로 나타났다. 2년 동안 모든 공항에서 CO, NO_x, VOCs, PM₁₀의 계절 평균 배출량은 각각 131, 76, 23, 0.75 ton/season로 나타났으며, 온실가스 CO₂, N₂O, CH₄, H₂O의 계절 평균 배출량은 각각 22,020, 0.40, -0.03, 8.6 ton/season로 나타났다. 2010년도 대기오염물질과 온실가스의 계절별 배출량은 전년대비 CO, VOCs, PM₁₀를 제외한 모든 물질에서 증가하였다. 증가량은 13(CO₂)~49%(CH₄)를 나타내었고, NO_x와 VOCs의 경우는 각각 27%와 -8%의 변화를 나타내었다.

항공기에 의한 대기오염물질 및 온실가스 배출량의 월변화는 대체적으로 LTO의 월변화 패턴과 유사함을 알 수 있다. 대기오염물질의 경우, 2009~2010년 동안 CO 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~9.6 ton/month의 범위를 나타냈으며, 11개 공항 개별로 보면 0.045(양양)~8.7 ton/month(광주)으로 나타났고 평균값은 4.0 ton/month 이었다. NO_x 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~7.7 ton/month의 범위를 나타내었고, 공항 개별로 보면 0.078~6.2 ton/month, 평균값은 2.3 ton/month 이었다. VOCs 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~1.5 ton/month의 범위를 나타내었고, 공항 개별로 보면 0.005~1.5 ton/month, 평균값은 0.70 ton/month 이었다. PM₁₀ 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~0.055 ton/month의 범위를 나타내었고, 공항 개별로 보면 <0.001~0.052 ton/month, 평균값은 0.023 ton/month 이었다. 한편, 2010년의 대기오염물질 CO, NO_x, VOCs, PM₁₀ 배출량의 월변화는 2009년과 비교하여 각각 -4, 27, -9, <1% 변화를 보였다.

온실가스의 경우, CO₂ 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~1,929 ton/month의 범위를 나타내었고, 공항 개별로 보면 16~1,675 ton/month, 평균값은 667 ton/month 이었다. CH₄ 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~3 kg/month의 범위를 나타내었고, 공항 개별로 보면 0~3 kg/month, 평균값은 -1 kg/month 이었다. N₂O 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~34 kg/month의 범위를 나타내었고, 공항 개별로 보면 <1~30 kg/month, 평균값은 12 kg/month 이었다. 수증기 배출량의 월변화는 전체공항에서 0~752 ton/month의 범위를 나타내었고, 공항 개별로 보면 6~654 ton/month, 평균값은 261 ton/month 이었다. 2010년의 온실가스 CO₂, CH₄, N₂O, H₂O 배출량의 월변화는 각각 전년대비 13, 49, 12, 49% 변화를 보였다.

3.2. 항공기 기종과 운항모드에 따른 배출량 특성

항공 배출량은 항공기의 기종에 따라서도 변화한다. 기종별 배출량 특성을 보면, 사천, 군산, 원주 공항에서는 B737 기종에 의한 배출량이 전체 기종에 의한 배출량의 96% 이상이었으며, 울산과 포항 공항은 2009년에는 B737에 의한 배출량이 81% 이상이었지만 2010년에는 51% 이상으로 감소하였고, 무안과 양양 공항은 A300 기종에 의한 배출량이 69.9% 이상이었다. 청주(75.4% 이상)를 제외한 10개 공항에서 B737과 A300에 의한 배출량이 전체 기종의 배출량 합 98.5% 이상을 차지하였다. 즉 기종에 의한 배출량도 LTO 횡수에 대체적으로 비례함을 알 수 있었다(Table 2와 Fig. 2). 항공기 기종 중 가장 대표 기종인 B737에 대한 대기오염물질과 온실가스의 배출량 변

Table 5. Emissions of GHGs such as N₂O, CH₄, CO₂, and H₂O for aircraft operational mode at small scale airport (^aN₂O, CH₄: kg/y; ^bCO₂, H₂O: ton/y)

		^a N ₂ O		^a CH ₄		^b CO ₂		^b H ₂ O	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
RKTN	Approach	47.3	51.8	-43.1	-47.1	2,662	2,913	1,037	1,135
	Climb Out	30.2	33.3	-76.1	-83.9	4,129	4,553	1,612	1,777
	Startup	0.6	0.6	1.0	1.0	-	-	4	4
	Takeoff	10.2	11.2	-30.0	-33.2	1,599	1,768	624	690
	Taxi In	46.7	50.4	34.6	37.4	1,655	1,785	645	696
	Taxi Out	126.8	136.9	94.0	101.5	4,482	4,840	1,750	1,889
	Total	261.8	284.2	-19.6	-24.3	14,527	15,858	5,672	6,190
RKJJ	Approach	61.8	69.4	-56.3	-63.2	3,479	3,904	1,356	1,521
	Climb Out	39.5	44.8	-99.6	-113.1	5,408	6,136	2,110	2,394
	Startup	0.7	0.8	1.3	1.3	-	-	5	5
	Takeoff	13.3	15.2	-39.3	-44.8	2,095	2,390	817	932
	Taxi In	60.9	66.9	45.2	49.6	2,156	2,368	840	923
	Taxi Out	165.3	181.5	122.6	134.6	5,848	6,418	2,281	2,504
	Total	341.6	378.5	-26.2	-35.6	18,987	21,217	7,409	8,280
RKJB	Approach	7.2	8.3	-6.5	-7.6	402	466	157	182
	Climb Out	4.6	5.4	-11.7	-13.7	634	737	248	289
	Startup	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	1	1
	Takeoff	1.6	1.8	-4.6	-5.4	247	288	97	113
	Taxi In	6.9	7.8	5.1	5.8	243	277	95	108
	Taxi Out	18.7	21.3	13.9	15.8	659	748	258	293
	Total	39.1	44.7	-3.8	-4.9	2,185	2,516	856	986
RKTU	Approach	44.9	54.6	-40.9	-49.7	2,526	3,073	985	1,198
	Climb Out	28.4	34.9	-71.6	-88.1	3,885	4,780	1,516	1,865
	Startup	0.5	0.6	1.0	1.1	-	-	4	4
	Takeoff	9.5	11.8	-28.1	-34.7	1,502	1,854	586	723
	Taxi In	46.4	54.0	34.4	40.1	1,642	1,912	640	745
	Taxi Out	126.0	146.6	93.4	108.7	4,456	5,184	1,738	2,023
	Total	255.8	302.6	-11.8	-22.7	14,011	16,803	5,469	6,558
RKJY	Approach	28.9	33.0	-26.3	-30.0	1,613	1,842	633	723
	Climb Out	18.2	21.1	-46.0	-53.2	2,483	2,871	974	1,126
	Startup	0.4	0.4	0.6	0.7	-	-	2	2
	Takeoff	6.1	7.1	-18.0	-21.0	957	1,113	376	437
	Taxi In	29.0	32.4	21.5	24.0	1,020	1,139	400	447
	Taxi Out	78.7	88.0	58.4	65.2	2,769	3,093	1,086	1,214
	Total	161.3	181.9	-9.8	-14.3	8,842	10,059	3,471	3,949
RKPU	Approach	43.2	48.8	-39.3	-44.4	2,422	2,737	947	1,070
	Climb Out	27.1	31.1	-68.3	-78.5	3,700	4,252	1,446	1,662
	Startup	0.6	0.6	1.0	1.0	-	-	4	4
	Takeoff	9.0	10.5	-26.7	-30.9	1,422	1,646	556	643
	Taxi In	43.9	48.2	32.6	35.7	1,551	1,701	606	665
	Taxi Out	119.3	130.8	88.4	97.0	4,211	4,617	1,645	1,804
	Total	243.0	269.9	-12.3	-20.1	13,306	14,954	5,203	5,848
RKPS	Approach	10.0	8.6	-9.1	-7.8	560	481	218	188
	Climb Out	6.2	5.3	-15.6	-13.4	844	727	329	284
	Startup	0.1	0.1	0.2	0.2	-	-	1	1
	Takeoff	2.0	1.8	-6.0	-5.2	322	278	126	109
	Taxi In	10.3	8.9	7.7	6.6	366	313	143	122
	Taxi Out	28.1	24.0	20.8	17.8	992	849	387	332
	Total	56.7	48.6	-1.9	-1.8	3,085	2,648	1,205	1,034

Table 5. Continue

		^a N ₂ O		^a CH ₄		^b CO ₂		^b H ₂ O	
		2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
RKTH	Approach	16.4	20.8	-14.9	-19.0	922	1,171	360	456
	Climb Out	10.2	13.3	-25.8	-33.6	1,397	1,819	545	710
	Startup	0.2	0.2	0.4	0.4	-	-	1	2
	Takeoff	3.4	4.5	-10.0	-13.2	535	705	209	275
	Taxi In	16.9	20.5	12.5	15.2	598	725	233	283
	Taxi Out	45.9	55.6	34.0	41.2	1,622	1,964	633	767
	Total	93.0	114.9	-3.8	-8.9	5,074	6,384	1,981	2,493
RKJK	Approach	5.6	5.9	-5.1	-5.4	317	333	124	130
	Climb Out	3.5	3.7	-8.8	-9.2	478	500	187	196
	Startup	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	<1	1
	Takeoff	1.2	1.2	-3.4	-3.6	183	191	71	75
	Taxi In	5.9	6.1	4.3	4.6	207	218	81	85
	Taxi Out	15.9	16.7	11.8	12.4	562	588	220	230
	Total	32.2	33.7	-1.1	-1.1	1,747	1,829	683	715
RKNW	Approach	3.1	2.9	-2.8	-2.7	170	163	67	64
	Climb Out	1.9	1.8	-4.8	-4.6	257	244	102	97
	Startup	<0.1	<0.1	0.1	0.1	-	-	<1	0
	Takeoff	0.6	0.6	-1.9	-1.8	98	93	39	37
	Taxi In	3.2	3.0	2.4	2.3	111	106	44	42
	Taxi Out	8.7	8.3	6.4	6.1	302	288	120	114
	Total	17.5	16.7	-0.6	-0.6	939	894	372	355
RKNY	Approach	-	1.3	-	-1.2	-	73	-	28
	Climb Out	-	0.9	-	-2.2	-	117	-	46
	Startup	-	<0.1	-	<0.1	-	<1	-	<1
	Takeoff	-	0.3	-	-0.9	-	46	-	18
	Taxi In	-	1.2	-	0.9	-	43	-	17
	Taxi Out	-	3.3	-	2.4	-	116	-	45
	Total	-	6.9	-	-0.9	-	394	-	154

Table 6. Intercomparison of emissions of air pollutants and GHGs between small scale airports and 4 major airports (ton/y)

	Small scale airports	RKSI	RKPK	RKSS	RKPC	Sum of 4 major airports	All airports
	2009/2010	2009/2010	2009/2010	2009/2010	2009/2010	2009/2010	2009/2010
CO	535/512	1606/1754	547/570	1022/1041	813/884	3988/4249	4523/4760
NOx	269/340	3407/3648	335/332	750/786	532/600	5026/5366	5294/5707
VOCs	99/91	298/314	101/104	184/186	148/156	731/761	831/851
PM ₁₀	3/3	17/31	3/4	7/7	5/6	33/35	83/85
CO ₂	82703/93558	628465/674762	96433/97147	198921/205242	152209/168535	1076028/1145686	1158731/1239244
CH ₄	-0.1/-0.1	-0.1/-0.1	-0.1/-0.1	-0.2/-0.2	-0.2/-0.2	-1.8/-1.9	-1.9/-2.0
N ₂ O	2/2	9/10	2/2	3/4	3/3	17/18	19/20
H ₂ O	32320/36562	201786/219737	35744/37568	71572/77411	57209/65794	366311/400512	398631/437074

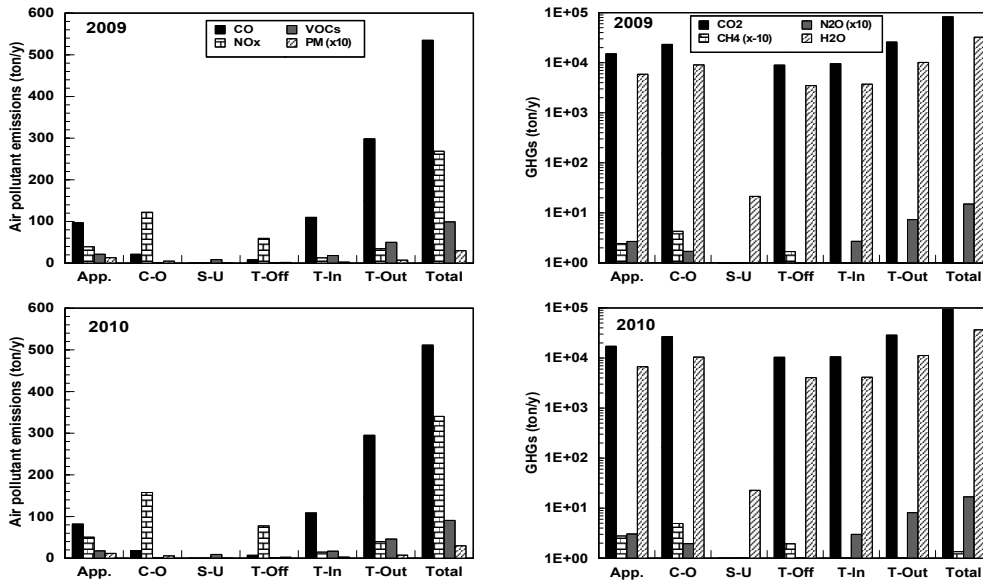


Fig. 4. Total emission of air pollutants and GHGs emitted by aircraft operational mode from all 11 small scale airports. Emissions of PM_{10} , N_2O , and CH_4 were original values by multiplied by 10, 10, and -10, respectively.

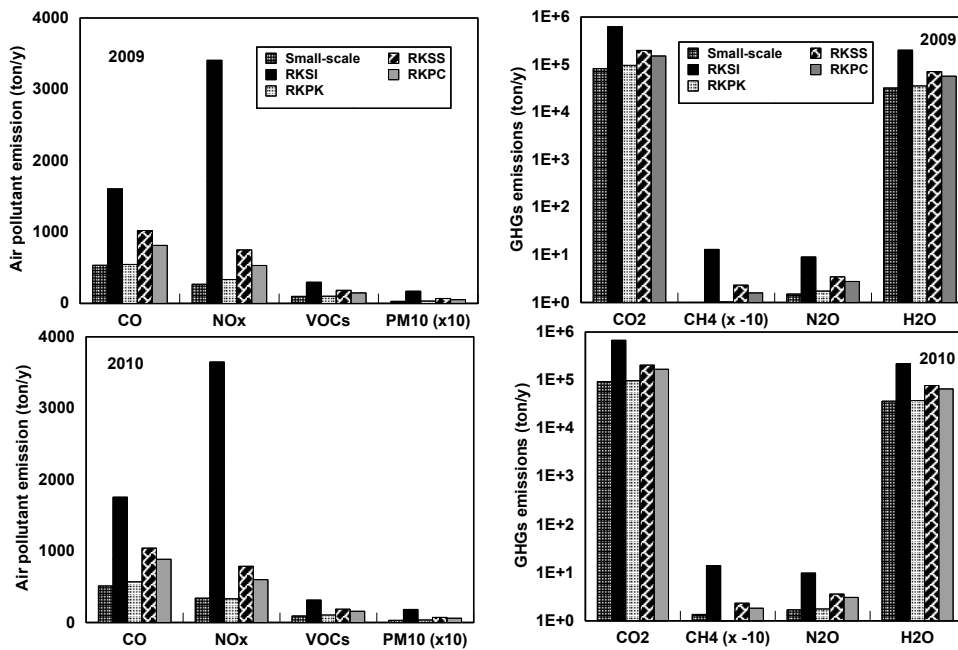


Fig. 5. Comparison of emissions of air pollutants and GHGs between 4 major international airports and all small scale airports. Emissions of PM_{10} and CH_4 were original values by multiplied by 10 and -10, respectively. (RKSI: Incheon international airport, RKP: Gimhae international airport, RKSS: Gimpo international airport, and RKPC: Jeju international airport).

화를 살펴보면 다음과 같다. 대기오염물질의 경우, 2009~2010년 동안 10개 공항에서(양양 제외) CO 배출량은 3.7(무안)~93(울산) ton/y 이었으며, 2010년의 평균값이 37 ton/y로 전년대비 약 19% 감소하였다. NO_x의 배출량은 2년 동안 1.1~27 ton/y 이었으며, 2010년의 평균값이 11 ton/y으로 전년대비 약 18% 감소하였다. VOCs의 배출량은 0.7~18 ton/y, 2010년의 평균값이 7.3 ton/y로 전년대비 19% 감소하였다. PM₁₀의 배출량은 0.018~0.45 ton/y, 2010년의 평균값이 0.18 ton/y로 전년대비 18% 감소하였다. 온실가스를 살펴보면, CO₂의 배출량은 433~10,771 ton/y, 2010년의 평균값이 37 ton/y로 전년대비 약 19% 감소하였다. CH₄의 배출량은 -5~-0.3 kg/y, 2010년의 평균값이 -3 kg/y로 전년대비 18% 감소하였다. N₂O의 배출량은 0.08~0.2 ton/y, 2010년의 평균값이 0.8 ton/y로 전년대비 19% 감소하였다. 수증기의 배출량은 169~4,212 ton/y, 2010년의 평균값이 1,705 ton/y로 전년대비 18% 감소하였다. 요약하면 2010년의 대기오염물질 및 온실가스의 B737 배출량은 전년대비 약 20%의 감소를 보였다.

항공기에서 배출되는 대기오염물질 및 온실가스의 배출량을 Tables 4~5와 Fig. 4에 나타내었다. 이들은 운항모드에 따라 서로 다를 수 있다. 11개 공항에서 CO의 배출량은 항공기 운항모드 중 모드할당시간이 가장 긴 taxi-out(19분) 모드에서 가장 많이 배출되었고(전체배출량의 54~69% 차지), 2009~2010년 동안 최대 110 ton/y, 2010년도 평균 배출량이 30 ton/y로 전년대비 약 10% 감소하였다. NO_x의 배출량은 climb-out 모드에서 가장 많이 배출되었고(43~48%), 최대 28 ton/y, 2010년의 평균값이 3.6 ton/y로 전년대비 4% 증가하였다. VOCs의 경우는 CO의 경우처럼 taxi-out 모드에서 가장 많이 배출되었고(49~53%), 최대 10 ton/y, 2010년의 평균 배출량이 4.2 ton/y로 전년대비 16% 감소하였다. PM₁₀의 경우는 approach 모드에서 가장 많이 배출되었고(26~54%), 최대 0.3 ton/y, 2010년의 평균배출량이 0.067 ton/y로 전년대비 6% 정도 감소하였다. 온실가스인 CO₂의 경우는 배출량은 taxi-out 모드에서 가장 많이 배출되었고(29~32%), 최대 5,848 ton/y, 2010년의 평균 배출량이 2,610 ton/y로 전년대비 별 차이가 없었다. CH₄의 경

우도 taxi-out 모드에서 가장 많이 배출되었고, 최대 0.14 ton/y로 나타났다. N₂O와 수증기의 경우도 taxi-out 모드에서 가장 많이 배출되었고(각각 47~50%, 29~32%), 최대 182, 6,418 ton/y, 2010년의 평균배출량이 각각 74, 1,019 ton/y로 전년대비 별 차이가 없었다. 따라서 운항모드에서는 NO_x와 PM₁₀를 제외한 대기오염물질 및 온실가스의 경우 taxi-out 모드가 주 배출모드인 것으로 나타났다.

3.3. 국내 일반공항과 4대 주요 공항과의 비교

2009~2010년 동안 우리나라 4대 주요 공항(인천, 김포, 김해, 제주)과 일반공항의 총 LTO 횟수를 비교하여 보면, 일반공항의 총 LTO 횟수는 우리나라 4대 공항 총 LTO 횟수의 10~11%를 차지하였다. 4대 주요 공항의 LTO와 배출량 자료는 선행연구(Song과 Shon, 2012b)의 결과를 이용하였다. 국내 일반공항 중 가장 많은 LTO 횟수를 보인 광주공항은 인천공항의 4.8~5.4%를 나타내었다. 한편, 연구기간(2009~2010년) 동안 일반공항과 4대 공항의 대기오염물질 및 온실가스의 총 배출량 비교를 Fig. 5와 Table 6에 나타내었다. CO의 총 배출량(512~535 ton/y)은 4대 공항의 총 배출량(3,988~4,249 ton/y)의 12~13%를 나타내었다. NO_x의 경우, 일반공항에서의 총 배출량(269~340 ton/y)은 4대 공항의 총 배출량(5,026~5,366 ton/y)의 5~6%를 차지하였다. VOCs 총 배출량(91~99 ton/y)은 4대 공항의 총 배출량(731~761 ton/y)의 12~14%를 나타내었다. 이외에도, PM₁₀ 총 배출량(3 ton/y)은 4대 공항의 총 배출량(33~35 ton/y)의 9%를 나타내었다. 온실가스의 경우, 국내 일반공항에서의 CO₂ 총 배출량($8.2 \times 10^4 \sim 9.4 \times 10^4$ ton/y)은 4대 주요 공항의 총 배출량(1.1×10^6 ton/y)의 8%를 나타내었다. CH₄ 총 배출량(0.1 ton/y)은 4대 공항의 총 배출량(5,026~5,366 ton/y)의 5~6%를 차지하였으며, VOCs 총 배출량(91~99 ton/y)은 4대 공항의 총 배출량(0.5~0.7 ton/y)의 5~7%를 보였다. N₂O 총 배출량(0.2 ton/y)은 4대 공항의 총 배출량(0.9 ton/y)의 9%를 나타내었다. 이외에도, 수증기 총 배출량($3.2 \times 10^4 \sim 3.7 \times 10^4$ ton/y)은 4대 공항의 총 배출량($3.7 \times 10^5 \sim 4.0 \times 10^5$ ton/y)의 9%를 차지하였다.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라 11개 일반공항에서 2009~2010년 동안 항공기의 이·착륙(LTO)에 의해 배출되는 대기오염물질 및 온실기체의 배출량을 EDMS(오염물질 배출 및 확산모델)를 이용하여 산출하여 항공기 기종별, 운항모드별 배출량 특성을 살펴보았다. 국내 일반공항에서 가장 많은 LTO 횟수를 보인 공항은 광주공항이었으며, 항공기 대표기종은 B737로 전체의 60% 이상을 차지하였다. 또한 11개 일반공항 중 가장 많은 대기오염물질 및 온실가스를 배출한 공항은 광주공항이며, 가장 적은 배출량은 양양공항으로 나타났다. 항공기 운항모드별 배출량 비교시, taxi-out 모드에서 NO_x와 PM₁₀을 제외한 대기오염물질과 온실가스의 가장 많은 배출량이 산출되었고, NO_x의 경우는 climb-out 모드에서 PM₁₀의 경우는 approach 모드에서 가장 많은 배출량이 산출되었다. 또한 국내 일반공항과 4대 주요 공항과 비교시, 일반공항에서의 LTO 횟수는 4대 공항의 10~11%를 차지하였으며, 대기오염물질 및 온실가스 배출량은 4대 공항의 5~14%를 차지하였다. 2009~2010년 동안, 국내 모든 공항(11개 일반공항과 4대 공항 모두 포함)에서 대기오염물질인 CO, NO_x, VOCs, PM₁₀의 총 배출량은 각각 4,523~4,760, 5,294~5,707, 831~851, 36~38 ton/yr로 산출되었으며, 온실가스인 CO₂, CH₄, N₂O, H₂O의 총 배출량은 각각 $1.1 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^6$, -1.9~-2.0, 19~20, $4.0 \times 10^5 \sim 4.4 \times 10^5$ ton/yr로 산출되었다.

항공기에서의 VOCs/NO_x 배출비율은 0.37~0.46로 선박의 배출비율(0.035)에 비해 매우 높은 것으로 나타났다. 즉 VOCs의 배출량이 상대적으로 높은 것으로 알 수 있다. 공항에서 이러한 상대적으로 많은 VOCs의 배출량은 대도시의 대기질 특히 오존 생성에 매우 민감한 요소로 판단된다. 왜냐하면 일반적으로 대부분의 대도시에서는 오존생성이 NO_x보다 VOCs에 상대적으로 민감한 것으로 알려져 있기 때문이다. 따라서 이러한 많은 VOCs 배출로 인해 공항으로부터 풍하측에 위치한 대도시의 오존농도는 증가할 것으로 예상할 수 있다. 현재 국내 영공에서의 항공기에 의한 대기오염물질과 온실가스 배출량 산정에 관한 연구를 진행하고 있으며, 향후 항공기에 의한 오염물질 배출

이 주변지역 대기질에 미치는 영향을 보다 정확하게 평가하기 위하여 3차원 화학수송모델을 이용한 수치모의 연구를 계획하고 있다.

감사의 글

본 연구는 2012학년도 동의대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고 문헌

- Korea Airports Corporation (KAC), 2012, <http://www.airport.co.kr/>.
- Korea Civil Aviation Development Association (KADA), 2012, <http://www.airportal.co.kr/knowledge/atis/aa/AaDeu05.jsp>, Airportal System.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2012, http://www.mltm.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95069542.
- Carleton, A. M., Lamb, P. J., 1986, Jet contrails and cirrus cloud: A feasibility study employing high-resolution satellite imagery, *Bul. Amer. Meteor. Soc.*, 67, 301-309.
- Colville, R. N., Hutchinson, E. J., Mindell, J. S., Warren, D. F., 2001, The transport sector as a source of air pollution, *Atmos. Environ.*, 35, 1537-1565.
- European Monitoring and Evaluation Program (EMEP), 2009, *Air pollutant emission inventory guidebook 2009*.
- Federal Aviation Administration (FAA), 2010, *Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) User's Manual*, Federal Aviation Administration, Washington D.C.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, *IPCC Fourth Assessment Report - Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers*.
- Kim, M. J., Ahn, M. J., 2008, Estimates and management measures on greenhouse gases in aviation, Korea Transport Institute.
- Korea Transport Institute (KTI), 2009, *Investigation of the emission of greenhouse gases from transport*.
- Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., Owen, B., Sausen, R.,

- 2009, Aviation and global climate change in the 21st century, *Atmos. Environ.*, 43, 3520-3537.
- Pison, I., Menut, L., 2004, Quantification of the impact of aircraft traffic emissions on tropospheric ozone over Paris area, *Atmos. Environ.*, 38, 971-983.
- Santoni, G. W., Lee, B. H., Wood, E. C. Herndon, S. C., Miake-Lye, R. C., Wofsy, S. C., McMaunts, J. B., Nelson, D. D., Zahniser, M. S., 2011, Aircraft emissions of methane and nitrous oxide during the alternative aviation fuel experiment, *Environ. Sci. Technol.*, 45, 7075-7082.
- Schumann, U., 1997, The impact of nitrogen oxides emissions from aircraft upon the atmosphere at flight altitudes 8-15 km-results from the AERONOX Project, *Atmos. Environ.*, 31, 1723-1733.
- Shon, Z. H., Kim, K. H., Song, S. K., 2011, Long-term trend in NO₂ and NO_x levels and their emission ratio in relation to road traffic activities in East Asia, *Atmos. Environ.*, 45, 3120-3131.
- Song, S. K., Shon, Z. H., Kim, Y. K., Kang, Y. H., Oh, I. B., Jung, C. H., 2010, Influence of ship emissions on ozone concentrations around coastal areas during summer season, *Atmos. Environ.*, 44, 713-723.
- Song, S. K., Shon, Z. H., 2012a, Emissions of air pollutants and greenhouse gases from aircraft activities at the Gimhae international airport, *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, 28, 190-202.
- Song, S. K., Shon, Z. H., 2012b, Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea, *Atmos. Environ.*, 61, 148-158.
- Stuber, N., Forster, P., 2007, The impact of diurnal variations of air traffic on contrail radiative forcing, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3153-3162.
- Uherek, E., Halenka, T., Borcken-Kleefeld, J., Balkanski, Y., Berntsen, T., Borrego, C., Gauss, M., Hoor, P., Juda-Rezler, K., Lelieveld, J., Melas, D., Rypdal, K., Schmid, S., 2010, Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport, *Atmos. Environ.*, 44, 4772-4816.
- Unal, A., Hu, Y., Chang, M. E., Odman, M. T., Russell, A. G., 2005, Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport, *Atmos. Environ.*, 39, 5787-5798.
- Yoo, H. M., 2009, Study on estimation of greenhouse gas emission from aviation and method for its reduction, Master Thesis, Inha University, Incheon, Korea.