

## 김해공항에서 항공기에 의한 대기오염물질과 온실가스의 배출량 산정 및 특성 분석

### Emissions of Air Pollutants and Greenhouse Gases from Aircraft Activities at the Gimhae International Airport

송 상 근 · 손 장 호<sup>1)\*</sup>

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>동의대학교 환경공학과  
(2011년 10월 25일 접수, 2012년 1월 25일 수정, 2012년 3월 19일 채택)

Sang-Keun Song and Zang-Ho Shon<sup>1)\*</sup>

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

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

(Received 25 October 2011, revised 25 January 2012, accepted 19 March 2012)

#### Abstract

Emissions of air pollutants and greenhouse gases (GHGs) by aircraft at the Gimhae International Airport (GIA) were investigated using the Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) version 5.1.3. The number of Landing and Take-Off (LTO) at the GIA for aircraft B737 was dominant, accounting for more than 60% of the total LTOs. For air pollutant emissions, CO was the most dominant pollutant by aircraft, followed by NO<sub>x</sub>, VOCs, SO<sub>x</sub>, etc. The emissions of CO, NO<sub>x</sub>, and VOCs in 2009 (and 2010) at the GIA were 974 (968), 447 (433), 118 (122) ton/yr, respectively. The emissions of GHGs such as CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O in 2009 (and 2010) were 110,795 (111,114), -0.157 (-0.151), and 1,989 (1,998) ton/yr, respectively. The negative number in CH<sub>4</sub> emission represents the consumption of atmospheric CH<sub>4</sub> in the engine. In addition, the emissions of most air pollutants (except for PM<sub>10</sub>) and GHGs were estimated to be high in Taxi-Out and Climb-Out modes.

**Key words** : Aircraft, EDMS, Air pollutants and GHG, Emission, Gimhae

#### 1. 서 론

도시지역 대기오염물질의 고농도에 영향을 주는 여러 인자 중에서 1차 오염물질의 배출은 매우 중요

하다. 따라서 이러한 오염물질에 대해 보다 정확한 배출량 산정이 요구되고 있지만, 여전히 배출량 정량 분석에 있어 불확실도는 높은 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 대기오염물질의 배출은 지표 근처에 집중되고 있다. 그러나 인위적 배출원인 자동차 및 산업시설과 자연적 기원의 지표 배출만이 대도시 및 인접지역의 유일한 주요 발생원은 아니다. 플류수송 수단의 한 부문을 차지하는 항공기로부터 오염물질 배

\*Corresponding author.

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

출의 경우 지표뿐만 아니라 지상으로부터 다양한 고도에서, 즉 대기경계층에서의 이·착륙(LTO: Landing and Take-Off)과 대류권에서의 항공기의 상승(climb) 및 하강(Descent), 순항(Cruise)에 의해서 대기오염 물질 및 온실가스가 배출된다.

일반적으로 항공기 배출량 산정방법은 세 가지로 분류할 수 있다. 즉, 항공기의 연료사용량을 이용한 방법(Tier 1), LTO 횡수와 연료사용량의 혼용을 이용한 방법(Tier 2), LTO 횡수를 이용한 방법(Tier 3) 등으로 배출량을 산출한다. KTI (Korea Transport Institute, 2009) 조사에 따르면, 대부분의 항공수송 배출량 조사연구는 연료사용량을 이용한 Tier 1 방법을 기초로 하여 산출되고 있다고 한다. 한편, Kim and 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. 기존의 항공부문 배출량 조사는 대부분 온실가스(특히 CO<sub>2</sub>)에 집중되어 있는 반면, 대기환경기준물질의 배출량에 관한 연구는 매우 드문 실정이다(Yoo, 2009; Kim and Ahn, 2008).

물류수송의 여러 방법 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 추세를 보면 항공 수송이 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 것으로 나타났다(KTI, 2009). 물류수송에서 항공 수송을 담당하는 국적 항공기의 보유대수도 최근에 급속히 증가하고 있다. 최근 10년 국적 항공기 보유대

수 경향을 보면, 2007년도에 보유대수가 419대로 급격히 증가하여 2008년도에는 450대를 돌파하였다(<http://www.airtransport.or.kr/kor/index.html>). 또한 동아시아 지역의 항공운항 횡수도 극동지역 국제무역의 급진적 발달로 인해 증가하고 있는 실정이다. 이외에도, 국제선 및 국내선의 항공기 취항 횡수도 매년 지속적으로 증가하고 있어 이에 따른 배출량의 증가도 예상되고 있다.

항공기 엔진으로부터의 배기가스와 관련된 환경문제는 대체적으로 공항과 주요 항로와 관련있으며, 이러한 배기가스는 항로 및 공항 주변지역의 대기질에 영향을 주는 휘발성 유기화합물(VOCs), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>), CO, 미세먼지 등과 온실가스인 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 등을 함유한다. 항공기 배출량이 대기에 미치는 영향에 관한 연구는 대부분 대류권에서 이루어져 왔다. 특히, 배출되는 NO<sub>x</sub>의 60%가 고도 9~12 km 상공에서 나타났으며, 이들 배출량의 93%는 북반구에 치우쳐져 있다(Colville *et al.*, 2001; Meijer *et al.*, 2000; Brasseur *et al.*, 1998; Gardner *et al.*, 1997). Derwent (1982) 연구에 의하면, 항공기에 의한 전지구 오존 농도의 수 % 증가 또한 9~12 km 상공에서 이루어진다고 보고되었다. 반면, 공항 주변지역에 미치는 영향 연구는 다소 부족한 실정이다(Unal *et al.*, 2005; Pison and Menut, 2004). 파리공항의 주변지역에서는 항공기에 의한 NO<sub>x</sub>의 배출이 VOCs 배출보다 오존에 미치는 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다(Pison and Menut, 2004). 미국 아틀란타 공항의 항공기 배출이 대기질에 미치는 영향은 오존의 경우 최대 56 ppb (평균 5 ppb), 미세먼지의 경우 최대 25 µg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 지상 부대장비에 의한 영향은 항공기에 비해 다소 적은 것으로 나타났다(Unal *et al.*, 2005).

우리나라의 대부분 공항(인천, 김포, 김해 등)은 서울, 경기도, 부산(해안도시) 등의 대도시에 인접해 있다. 이들 지역의 대기질 특성을 보면, 오존의 전구물질이며 대기환경기준물질인 NO<sub>2</sub>는 대체적으로 환경기준을 달성하지 못하는 것으로 나타났다(KMOE; Korean Ministry of Environment, 2010). 특히 부산의 경우를 보면, 여름철 고농도오존 발생이 내륙지역보다 해안지역에서 더 빈번하게 나타난 것으로 밝혀졌다(Song and Shon, 2008). 또한 공항에서의 꾸준한 항공수송의 증가에 의한 배기가스의 증가는 해안지역을 포함한 대도시 및 인접 수도권 지역의 광화학오염물

질 농도 증가에 일조하리라 예상된다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 연안항구도시(활발한 선박 수송)인 부산시와 매우 인접해 있는 김해국제공항(GIA: Gimhae International Airport)에서 항공기에 의한 대기오염물질 및 온실가스의 배출량을 Tier 3 방법을 이용하여 산출하였다. 또한 이것을 활용하여 일별 및 월별 배출량 분포와 항공기 기종별 및 운항모드별 배출량 분포 등을 분석하였으며, 항공기 배출이 공항 주변지역의 대기질에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구영역 및 대기질 측정자료

본 연구의 대상영역은 김해국제공항 및 주변지역으로써 공항의 일반적 특성과 주변 지리적 특성 및 대기질 측정지점의 위치 등은 표 1과 그림 1에 각각 나타내었다. 김해국제공항은 부산광역시 강서구 대저 2동에 위치하고 있으며, 1958년 8월 부산 수영비행장을 최초로 개설한 후, 1963년 9월 부산국제공항으로 승격되었다. 공항시설 확장을 위하여 1976년 8월 현 위치로 이전하여 김해국제공항으로 개칭하였다. 공항면적은  $6.5 \times 10^6 \text{ m}^2$ 이고 2개의 비행 활주로(18R/36L, 18L/36R)로 구성되어 있다. 한편, 본 연구에 이용된 대기오염물질 농도 자료는 최근 2년(2009~2010년) 동안의 공항에 인접한 부산시 대저 2동(Daejae 2 site) 및 김해시 동상동(Dongsang site)에 위치한 측정소 자료를 이용하였다.

### 2.2 항공기 배출량 산정법

본 연구에서는 LTO 횟수(Tier 3)를 이용한 항공기

배출량 산정법을 이용하였다. 항공기에 의한 대기오염물질 배출은 크게 세 부분 -항공기의 LTO, 항공기의 순항(cruise), LTO 후의 지상부대장비(GSE: Ground Support Equipment) 운행-으로 구분할 수 있다. 더욱더 세분하면, 항공기의 운항모드는 활주로 진입·출입(Taxi In and Out), 시동(Startup or Idle), 접근(Approach), 이륙(Take-off), 상승(Climb-out), 순항(Cruise)으로 구분할 수 있다. LTO 모드의 고도 기준은 1,000m로 분류하였다(EMEP: European Monitoring and Evaluation Program, 2009). 운항모드 중 접근 모드는 순항으로부터 경계층으로 하강하는 부분을 나타낸다(EMEP, 2009).

항공기 이·착륙에 의한 오염물질 배출량은 기종별 운항모드에 따른 모드별 배출계수를 이용하여 산출할 수 있다. 경계층 아래에서의 항공기 LTO에 의

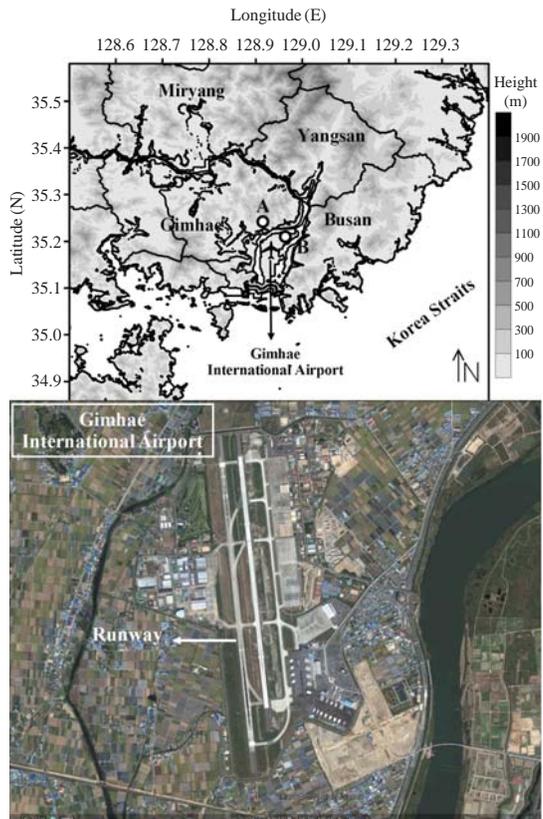


Fig. 1. Location of air quality monitoring sites around the GIA. A and B in the figure indicate Dongsang and Daejeo 2 sites close to the GIA, respectively.

Table 1. Characteristics of the GIA.

| Classification                                  | Remarks   |
|---|---|
| Airfield area (1,000 m <sup>2</sup> )           | 6518  |
| Runway (m)                                      | 18R/36L (3,200 × 60 m),<br>18L/36R (2,743 × 46 m) |
| Taxiway   | C1-C7, E1-E5, G7-G11, P,<br>W2-W3, P, S           |
| Apron (m <sup>2</sup> )                         | 389.4   |
| Passenger terminal area (1,000 m <sup>2</sup> ) | 37 (domestic), 51 (international)                 |
| Cargo terminal area (1,000 m <sup>2</sup> )     | 10 (domestic), 18 (international)                 |

한 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/yr)

$LTO_i$  = 기종별 (i) LTO 횟수

$TIM$  = 운항모드에 할당된 시간 (min)

$FF$  = 모드별 연료 흐름 (kg-fuel/min)

$EF_{ijk}$  = 기종별 (i), 운항모드별 (j), 화학종별 (k) 배출 계수 (kg/1,000 kg-fuel)

한국공항공사에서 제공하는 항공기 기종별 LTO 횟수와 미국 연방항공국 (FAA: Federal Aviation Administration, 2010)에서 개발한 항공기 오염물질 배출 및 확산모델 (EDMS: Emission and Dispersion Modeling System)로부터의 기종별, 운항모드별, 화학종별 배출계수를 이용하여 배출량을 산출하였다. 배출량 산정을 위한 김해국제공항의 기종별 LTO 횟수는 한국공항공사에서 제공하는 자료를 활용하였으며 (<http://www.airport.co.kr/>), 모드별 할당시간 (TIM)과 연료흐름 (FF)은 EDMS으로부터 얻었다. 예를 들면, 모델에서 내정된 (default) Taxi In과 Taxi Out 시간은 각각 7분과 19분이 사용되었으며, 이륙, 상승, 접근, 시동 모드의 default 시간은 각각 0.7, 2.2, 4.0, 1.0분이 적용되었다. GSE에 의한 배출량을 산출하기 위해 승무원 및

여객을 수송하는 차량, 화물을 이송하는 Belt Loader, 항공유 공급차량, 항공기 견인차량 등의 지상장비의 배출계수와 사용시간을 이용하여 배출량을 산출하였다. 이들 자료는 유형별 정보가 미흡하여 EDMS의 default 값을 적용하였다. 또한 공항의 고정오염원 (소각시설, 발전시설, 연료저장탱크 등)에 의한 배출량도 산출하였다. 반면, 본 연구에서 운용기에 의한 배출량 산출은 보안문제로 인해 제외하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 항공 배출량의 시간적 특성

최근 2년 (2009~2010년) 동안 김해공항에서의 항공기 기종별 LTO 횟수의 시간변화를 보면 (그림 2), 2009년과 2010년 모두 B737이 전체 LTO 횟수의 60% 이상을 차지하여 대표적인 항공기 기종으로 나타났다. 두 번째로는 A300 기종이 전체 LTO 횟수의 22%를 차지하였다. 한편, 한국공항공사에서 제공하는 A300 기종의 LTO 횟수는 실제 Airbus 항공사의 A300, A319, A320, A321, A340 기종을 모두 합한 값으로 나타내었는데, 5 기종의 LTO를 살펴보면 A320 기종이 전체 46%를 차지하여 대표적인 기종임을 알 수 있었다. 2009년의 경우 전체 LTO 횟수는 뚜렷한 증가 추세 (46대/월)이며, 2010년에는 2009년에 비해 증가 추세가 약간 둔화 (38대/월)되었다. 한편, A300 기

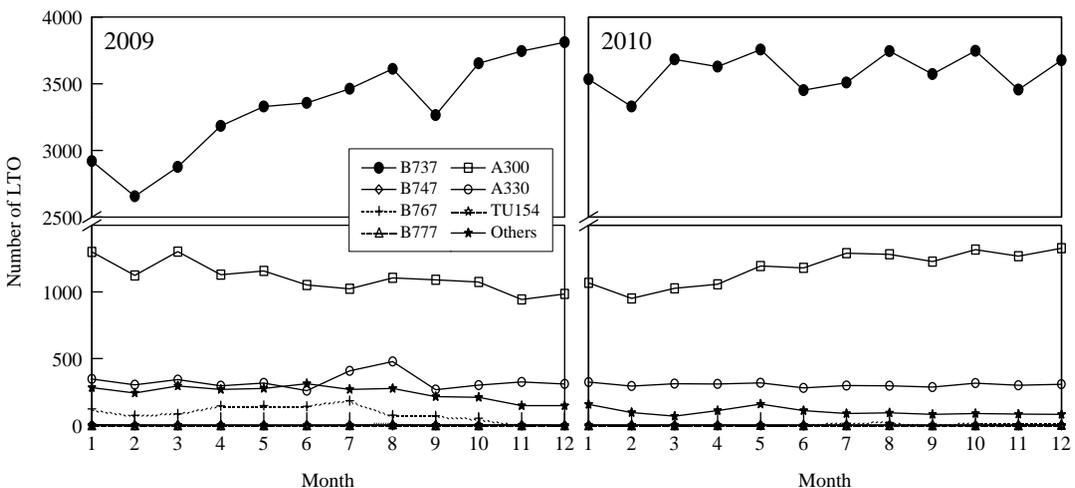


Fig. 2. Temporal variation of LTO cycles by aircraft at the GIA in 2009 and 2010.

중은 2009년에는 감소추세를 보였으나 2010년에는 증가추세를 보였다.

2009년과 2010년 항공기에 의한 대기오염물질의 일별 배출량은 CO, NO<sub>x</sub>, VOCs, SO<sub>x</sub> 크기 순으로 나타났다. 2009~2010의 경우, CO 배출량의 일변화는 542~1,899 kg/day (2009년 일평균 1,630 kg/day, 2010년 일평균 1,705 kg/day)의 범위로 나타났다(그림 3). 2년 동안의 일평균을 비교하면 2010년이 2009년 보다 약간(1.05배) 증가한 것을 알 수 있다. NO<sub>x</sub> 배출량의 일변화는 381~1,364 kg/day (2009년 일평균 1,107 kg/day, 2010년 일평균 1,083 kg/day)이었으며(그림 3), CO와 달리 2010년 NO<sub>x</sub> 배출량은 2009년에 비해 약간(2.2%) 감소하였다. VOCs 배출량의 일변화는 108~407 kg/day (2009년 일평균 319 kg/day, 2010년 일평균 333 kg/day)로 산정되었으며, 2010년 일평균은 전년에 비해 1.04배 증가하였다. SO<sub>x</sub>와 PM<sub>10</sub>의 일변화는 각각 38~133과 3.5~11.3 kg/day의 범위이며, 2009년과 2010년 모두 일평균은 각각 113(SO<sub>x</sub>)과 9.8 kg/day (PM<sub>10</sub>)로 산출되어 2년 동안 배출량 변화는 없는 것으로 사료된다.

온실가스의 경우, 2009~2010년도 CO<sub>2</sub> 배출량의 일변화는  $1.0 \times 10^5 \sim 3.6 \times 10^5$  kg/day (2009년과 2010년 모두 일평균  $3.0 \times 10^5$  kg/day), CH<sub>4</sub>은  $-0.56 \sim -0.14$

kg/day (2009년 일평균  $-0.43$  kg/day, 2010년 일평균  $-0.42$  kg/day), N<sub>2</sub>O는 1.8~6.4 kg/day (2009년 일평균 5.4 kg/day, 2010년 일평균 5.5 kg/day)를 나타내었다. 즉, 2009년과 2010년에서 온실가스의 배출량 변화는 대기환경기준물질과는 달리 뚜렷한 차이가 없음을 알 수 있었다. 한편, CH<sub>4</sub> 배출량은 유일하게 음수 값을 나타내었는데, 이것은 항공기 엔진연소시 공기중의 CH<sub>4</sub> 소비에 기인한 배출량의 감소를 의미한다(Santoni *et al.*, 2011).

그림 4는 김해국제공항에서의 항공기 LTO에 의한 대기오염물질 및 온실가스의 2009년과 2010년 월별 배출량의 분포 변화를 나타낸 것이다. 2년 동안 대기오염물질인 CO, NO<sub>x</sub>, VOCs, SO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>의 배출량 월변화는 각각 42.0~54.8, 28.7~37.1, 8.18~10.67, 3.05~3.77, 0.26~0.32 ton/month이었으며, 2년간 일평균은 각각 50.7, 33.3, 9.91, 3.44, 0.30 ton/month로 나타났다. 온실가스인 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O의 배출량 월변화는 각각 8,198~10,146,  $-0.014 \sim -0.011$ , 0.15~0.18 ton/month이었으며, 이들의 일평균은 각각 9,246,  $-0.013$ , 0.17 ton/month으로 산출되었다. 전반적으로, CO의 배출량은 뚜렷한 증가 경향(0.53 ton/month)을 보였으나, 나머지 대기오염물질과 온실가스의 배출량에 있어서는 뚜렷한 시간 변화가 나타나지 않았다. 이외에, 항

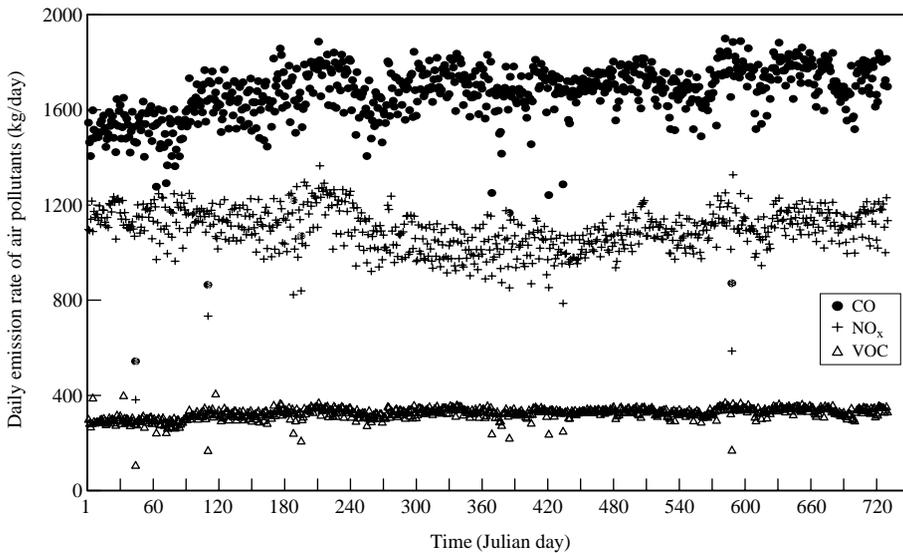


Fig. 3. Daily variation of air pollutant emissions from aircraft at the GIA during 2009~2010.

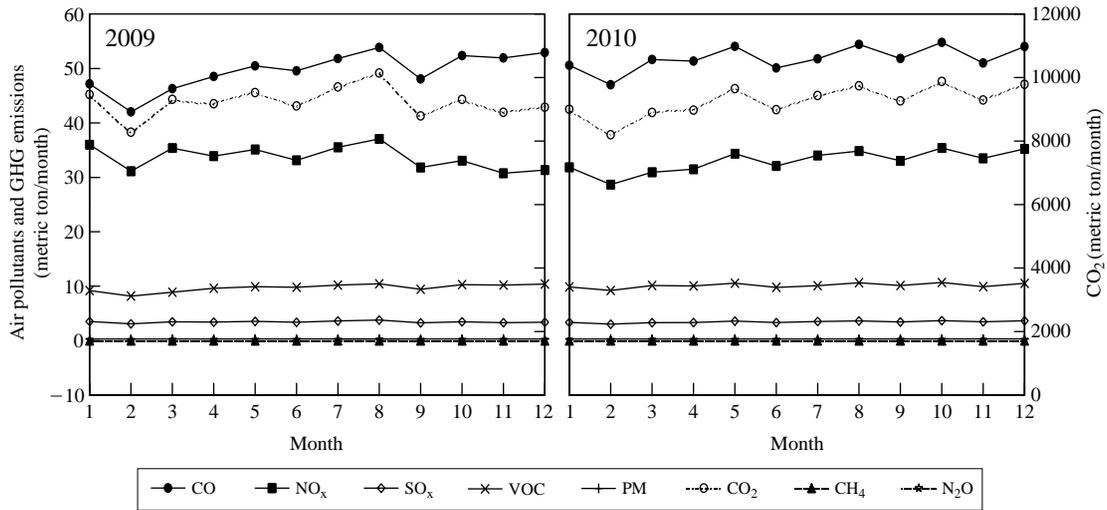


Fig. 4. Monthly variation of the emissions of air pollutants (CO, NO<sub>x</sub> and total VOCs) and GHGs (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O) from aircraft at the GIA in 2009 and 2010.

Table 2. Seasonal average of the emissions of air pollutants and GHGs from aircraft at the GIA in 2009 and 2010. (in ton/yr)

|      |        | CO    | NO <sub>x</sub> | VOCs  | SO <sub>x</sub> | PM <sub>10</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O |
|------|--------|-------|-----------------|-------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 2009 | Spring | 48.43 | 34.80           | 9.465 | 3.471           | 0.300            | 9,339           | -0.014          | 0.167            |
|      | Summer | 51.75 | 35.24           | 10.14 | 3.588           | 0.314            | 9,653           | -0.014          | 0.173            |
|      | Fall   | 50.79 | 31.88           | 9.966 | 3.346           | 0.296            | 9,003           | -0.012          | 0.162            |
|      | Winter | 47.36 | 32.82           | 9.254 | 3.322           | 0.287            | 8,937           | -0.013          | 0.160            |
| 2010 | Spring | 52.34 | 32.26           | 10.24 | 3.410           | 0.298            | 9,175           | -0.012          | 0.165            |
|      | Summer | 52.11 | 33.65           | 10.16 | 3.489           | 0.300            | 9,388           | -0.013          | 0.169            |
|      | Fall   | 52.54 | 33.98           | 10.23 | 3.523           | 0.302            | 9,479           | -0.013          | 0.170            |
|      | Winter | 50.53 | 31.93           | 9.856 | 3.344           | 0.290            | 8,996           | -0.012          | 0.162            |

공기 LTO에 의한 대기오염물질 및 온실가스의 계절별 배출량 변화를 살펴보니 2009년과 2010년의 변화 특성에서 다소 차이를 보였다(표 2). 즉, 2009년과 2010년 모두 겨울철에 가장 낮게 배출량이 산출된 반면, 가장 높게 산출된 계절은 각각 여름(2009년)과 가을(2010년)로 다르게 나타났다. 또한 2009년의 여름철과 겨울철 배출량 비는 1.07~1.10으로, 2010년 가을철과 겨울철 배출량 비는 1.04~1.08으로 나타났다.

### 3.2 항공기 기종과 운항모드에 따른 배출량 특성

항공기 기종별 배출량을 보면 B737 기종의 배출량이 가장 많았고, 그 다음으로 A300, A330 기종 순으로 나타났다(표 3). 위의 세 기종을 제외한 나머지 기

종에 의해 산출된 배출량은 전체 배출량의 10% 미만을 차지하였다. 대기오염물질의 경우, 2009~2010년도 B737 기종에 의한 CO 배출량은 444~480, NO<sub>x</sub>는 127~138, VOCs는 93~101, SO<sub>x</sub>는 19~21, PM<sub>10</sub>은 2.1~2.3 ton/yr으로 나타났다. 이 기종의 CO와 SO<sub>x</sub>의 배출량은 각각 전체 배출량의 75% 이상을 차지하여 기여도가 가장 높은 것으로 나타났다. 이 기종의 나머지 오염물질의 배출량은 전체 기종 배출량의 약 32% (NO<sub>x</sub>)~65% (PM<sub>10</sub>)를 차지하였다. A300 기종의 CO, NO<sub>x</sub>, VOCs, SO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>의 배출량은 각각 105~112, 181~193, 17~18, 14~15, 0.89~0.95 ton/yr이었으며, 2010년도 배출량은 2009년도에 비해 약간 증가한 경향을 볼 수 있었다. 또한 2009~2010년도 B737 기종에 의한 온실가스의 배출량은 CO<sub>2</sub>가 51,739

**Table 3. Emissions of air pollutants and GHGs for aircraft type at the GIA in 2009 and 2010.** (in kg/yr)

|       | Type    | CO      | NO <sub>x</sub> | VOCs    | SO <sub>x</sub> | PM <sub>10</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O |
|-------|---------|---------|-----------------|---------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 2009  | B737    | 444,334 | 127,473         | 93,181  | 19,223          | 2,140            | 51,739,284      | -32             | 950              |
|       | B747    | 1       | 69              | 6       | 5               | 0.4              | 13,486          | -0.04           | 0.2              |
|       | B767    | 8,676   | 13,700          | 2,709   | 990             | 88               | 2,663,750       | -12             | 44               |
|       | B777    | 95      | 331             | 19      | 15              | 0.4              | 39,891          | -0.14           | 0.7              |
|       | A300    | 104,929 | 180,602         | 16,659  | 14,136          | 887              | 38,019,053      | -83             | 668              |
|       | A330    | 28,425  | 58,075          | 2,485   | 4,968           | 207              | 13,361,822      | -28             | 235              |
|       | TU154   | 305     | 30              | 296     | 6               | 3                | 14,932          | 0.04            | 0.3              |
|       | Others  | 8,208   | 23,953          | 1,117   | 1,838           | 262              | 4,942,676       | -2              | 91               |
|       | All     | 594,974 | 404,233         | 116,472 | 41,181          | 3,588            | 110,794,894     | -157            | 1,989            |
|       | GSE*    | 379,151 | 42,367          | 1,299   | 13,183          | 1,496            | N/A**           | -               | -                |
| Total | 974,130 | 446,600 | 117,771         | 54,364  | 5,084           | 110,794,894      | -157            | 1,989           |                  |
| 2010  | B737    | 480,233 | 137,772         | 100,709 | 20,776          | 2,313            | 55,919,384      | -35             | 1,027            |
|       | B747    | 0.5     | 27              | 3       | 2               | 0.2              | 5,394           | -0.02           | 0.1              |
|       | B767    | 567     | 895             | 177     | 65              | 6                | 174,038         | -1              | 3                |
|       | B777    | 123     | 430             | 24      | 19              | 1                | 51,859          | -0.19           | 0.9              |
|       | A300    | 112,077 | 192,906         | 17,794  | 15,099          | 948              | 40,609,180      | -89             | 713              |
|       | A330    | 26,182  | 53,492          | 2,289   | 4,576           | 191              | 12,307,475      | -26             | 217              |
|       | TU154   | 0       | 0               | 0       | 0               | 0                | 0               | 0               | 0                |
|       | Others  | 3,398   | 9,917           | 462     | 761             | 108              | 2,046,288       | -1              | 38               |
|       | All     | 622,581 | 395,439         | 121,458 | 41,298          | 3,566            | 111,113,617     | -151            | 1,998            |
|       | GSE*    | 345,077 | 37,867          | 931     | 11,927          | 1,320            | N/A**           | -               | -                |
| Total | 967,658 | 433,306 | 122,389         | 53,225  | 4,886           | 111,113,617      | -151            | 1,998           |                  |

\*Ground Support Equipment. \*\*N/A=Not available.

**Table 4. Emissions of air pollutants and GHGs for aircraft operational mode at the GIA in 2009 and 2010.** (in kg/yr)

|      | Operational mode | CO      | NO <sub>x</sub> | VOCs    | SO <sub>x</sub> | PM <sub>10</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O |
|------|------------------|---------|-----------------|---------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 2009 | Approach         | 98,222  | 60,282          | 21,085  | 7,552           | 1,403            | 20,311,345      | -329            | 361              |
|      | Climb-out        | 21,864  | 186,584         | 757     | 11,763          | 754              | 31,636,968      | -583            | 231              |
|      | Start-up         | -       | -               | 21,941  | 12              | -                | 69,477          | 7               | 4                |
|      | Take-off         | 8,373   | 91,607          | 291     | 4,551           | 297              | 12,239,825      | -229            | 78               |
|      | Taxi-in          | 125,600 | 17,704          | 19,492  | 4,659           | 305              | 12,529,268      | 263             | 354              |
|      | Taxi-out         | 340,915 | 48,055          | 52,906  | 12,645          | 828              | 34,008,012      | 713             | 961              |
|      | All              | 594,974 | 404,233         | 116,472 | 41,181          | 3,588            | 110,794,894     | -157            | 1,989            |
| 2010 | Approach         | 104,993 | 59,428          | 22,679  | 7,560           | 1,456            | 20,333,105      | -329            | 361              |
|      | Climb-out        | 23,152  | 180,855         | 695     | 11,758          | 701              | 31,624,254      | -582            | 231              |
|      | Start-up         | -       | -               | 22,146  | 11              | -                | 70,124          | 7               | 4                |
|      | Take-off         | 8,866   | 89,231          | 268     | 4,549           | 282              | 12,235,769      | -229            | 78               |
|      | Taxi-in          | 130,730 | 17,749          | 20,373  | 4,690           | 303              | 12,613,560      | 264             | 356              |
|      | Taxi-out         | 354,840 | 48,176          | 55,298  | 12,730          | 823              | 34,236,805      | 717             | 967              |
|      | All              | 622,581 | 395,439         | 121,458 | 41,298          | 3,566            | 111,113,617     | -151            | 1,998            |

~55,919, CH<sub>4</sub>이 -0.032 ~ -0.035, N<sub>2</sub>O는 0.95 ~ 1.03 ton/yr으로 산출되었다. 이 기종의 온실가스 배출량은 전체 기종 배출량의 약 20% (CH<sub>4</sub>) ~ 51% (N<sub>2</sub>O)를 차지하였다. GSE에 의한 대기오염물질 및 온실가스 배출량은 CO를 제외하고 전체 배출량에서 10% 미만으로 나타나 크게 영향을 미치지 않았다.

항공기에서 배출되는 대기오염물질은 항공기 운항 모드에 따라 서로 다르다. 따라서 2009 ~ 2010년에 대해 항공기 운항 모드별 배출량의 변화를 분석하였다 (표 4). CO 배출량은 Taxi-Out 모드에서 가장 크고(341 ~ 355 ton/yr, 전체 모드의 약 57% 차지) Take-Off 모드에서 가장 낮았다(8.4 ~ 8.9 ton/yr, 약 1.4% 차지).

한편, Startup 모드에서는 배출계수의 부재로 산출이 불가능하였다. NO<sub>x</sub>의 경우는 Climb-Out 모드(181~187 ton/yr, 전체 모드의 약 46% 차지)에서 다른 모드(<92 ton/yr)보다 배출량이 2배 이상 크게 나타났다. VOCs와 SO<sub>x</sub> 배출량은 CO와 유사하게 Taxi-Out 모드에서 가장 크게 나타났다. 예를 들어, VOCs 배출량은 Taxi-Out 모드에서 53~55 ton/yr로 가장 많이 산출되어 전체 모드의 약 45%를 차지하였다. SO<sub>x</sub> 배출량은 Taxi-Out 모드에서 12.6~12.7 ton/yr로 산출되어 전체 모드의 약 31%를 차지하였으며, 그 다음으로 Climb-Out 모드(11.8 ton/yr, 약 29% 차지)에서 크게 나타났다. PM<sub>10</sub>은 다른 오염물질과 달리 Approach 모드에서 가장 크게(1.4~1.5 ton/yr) 나타났으며 전체 모드의 약 40%를 차지하였다. 이외에, 온실가스인 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O의 배출량은 Taxi-Out 모드에서 가장 크며, 배출량은 각각 34,008~34,236(전체 모드의 약 31% 차지)와 0.96~0.97 ton/yr(약 48% 차지)이었다. CH<sub>4</sub>의 경우는 다른 온실가스와 달리 Taxi-In 및 Taxi-Out 모드를 제외한 다른 모드에서는 음의 값을 나타내었다. 이것은 엔진 출력 퍼센트에 따라 공기중의 CH<sub>4</sub> 연소가 다르다는 것을 의미한다(Santoni *et al.*, 2011). 개별모드에서 CH<sub>4</sub>의 절대 배출량을 살펴보면 Taxi-Out 모드에서 가장 크게 나타났다(0.71~0.72 ton/yr).

3.3 항공 배출량 비교

본 연구에서 항공기에 의한 CO의 연간 총 배출량은 2009년에 974 ton과 2010년에 968 ton 정도였으며, NO<sub>x</sub>는 각각 447 ton과 433 ton, VOCs는 118 ton과 122 ton, SO<sub>x</sub>는 54 ton과 53 ton, PM<sub>10</sub>은 5.1 ton과 4.9 ton로 산출되었다(표 3). 2년 동안 CO 배출량이 NO<sub>x</sub>와 VOCs에 비해 각각 2.2배와 18배 정도 많이 산출된 것을 의미한다. 한편, 온실가스인 CO<sub>2</sub>의 연간 총 배출량은 2009년과 2010년에 각각 110,795 ton과 111,114 ton이었고 CH<sub>4</sub>은 각각 -0.157 ton과 -0.151 ton이며 N<sub>2</sub>O는 2년 모두 2 ton 정도 산출되었다(표 3).

항공 배출량과 관련된 여러 국내·외의 선행 연구와 비교해 보면 다음과 같다. Yoo and Kim (2008)은 2008년 1주간 동안 국내에서 가장 붐비는 인천국제공항의 항공기 배출량(Tier 3)을 조사하였다. 김해국제공항과 달리(B737 기종에서 가장 많은 배출) 인천공항은 A330 기종에 의한 배출량이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 인천공항에서의 CO, NO<sub>x</sub>, VOCs

의 배출량은 각각 2,860, 5,928, 260 ton/yr로 나타나 김해공항보다 약 3배(CO)에서 무려 열 배 이상(NO<sub>x</sub>) 높게 산출되었다. 같은 방법(Tier 3)을 적용한 2008년도 김포공항에서의 CO, NO<sub>x</sub>, VOCs, PM<sub>10</sub>의 배출량은 각각 831, 726, 60, 7.5 ton/yr으로 보고되었다(Choi *et al.*, 2010). 김포공항과 김해공항 사이의 연간 총 배출량을 비교해 보면 CO와 VOCs의 경우는 김해공항보다 다소 작게 산출되었지만, NO<sub>x</sub>와 PM<sub>10</sub>은 GIA보다 많이 산출되었음을 알 수 있었다. 또한 김포공항에서의 NO<sub>x</sub> 배출량은 김해공항과 달리(Climb-Out에서 181~187 ton/yr으로 가장 많이 배출) Take-Off 모드에서 390 ton/yr로 가장 많았다. 국외의 경우, 프랑스 파리 인근 공항의 CO, NO<sub>x</sub>, VOCs, SO<sub>x</sub> 배출량은 각각 6,935, 15,330, 5,840, 730 ton/yr이었으며(Pison and Menut, 2004), 특히 NO<sub>x</sub>와 VOCs의 항공기 배출량은 인접지역 전체 배출량의 각각 15%와 2%를 차

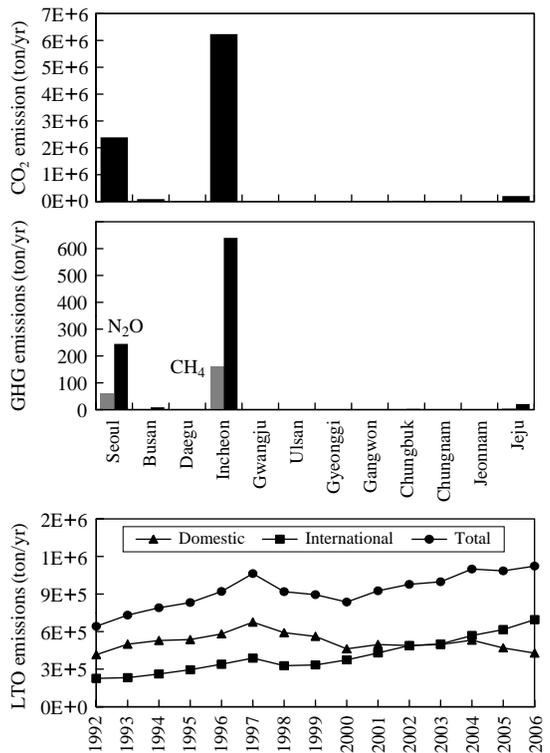


Fig. 5. Geological and temporal distribution of the emissions by aviation. Source: Geological emission data from KTI (2009) and temporal emission data from Kim and Ahn (2008).

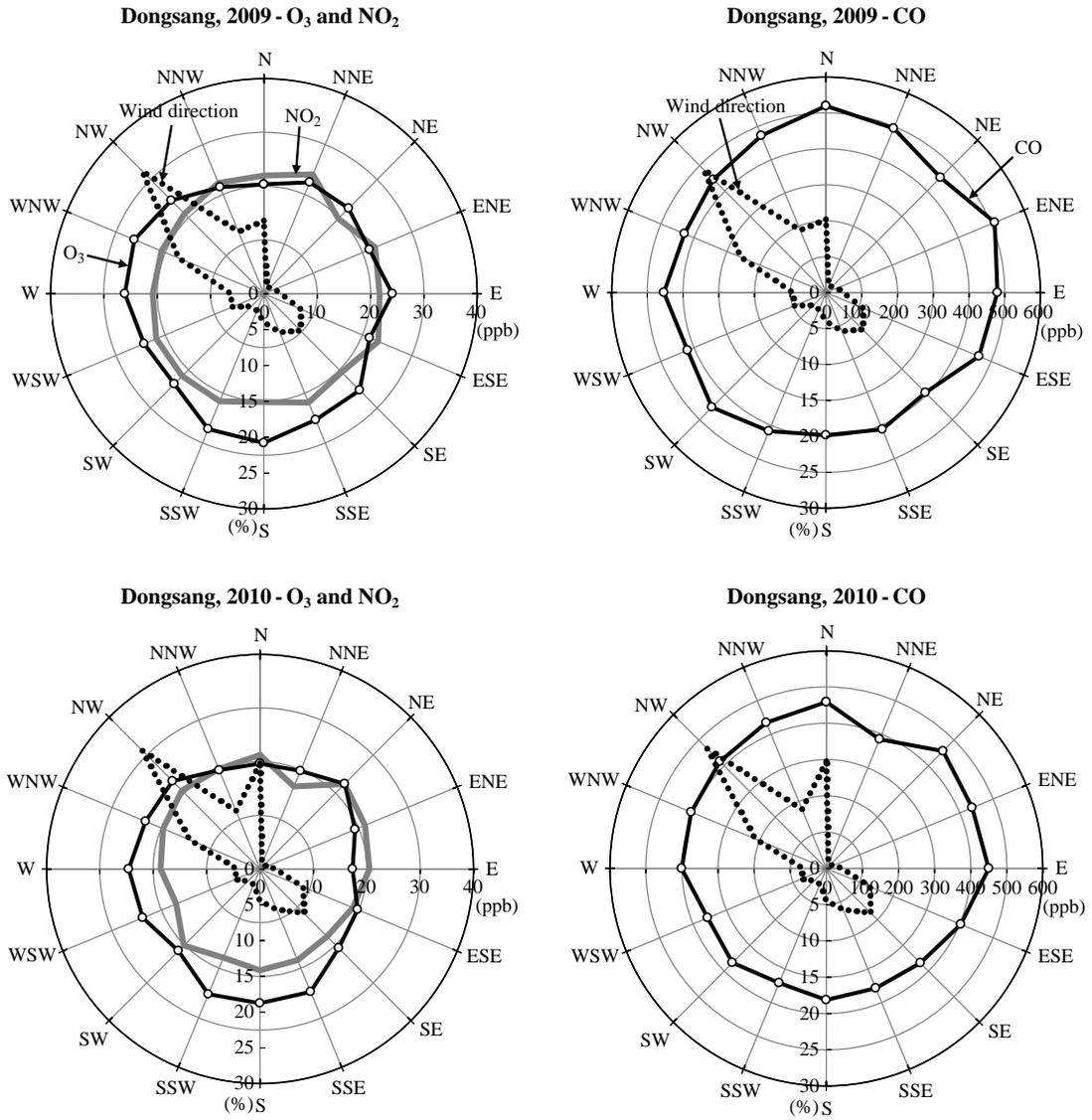


Fig. 6. Comparison of pollutant (O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and CO) concentrations for each wind rose pattern at Dongsang and Daejeo 2 sites close to the GIA in 2009 and 2010.

지하는 것으로 보고되었다. 본 연구에서의 항공기 배출량은 프랑스의 경우와 비교하여 항공수송량의 차이로 인해 전반적으로 수십 배 이상 낮게 산출되었음을 알 수 있었다.

같은 기간 국내 다른 공항과의 온실가스 배출량을 비교해 보면, 본 연구지역인 김해공항에서의 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 배출량(표 3과 4)은 인천공항 배출량의

1.3~1.4%밖에 차지하지 못하였다(KTI, 2009, 그림 5). 이외에, 다른 공항에서의 LTO 배출량의 시간 변화를 보면 2002년까지는 국내운항에 의한 배출량이 국제운항 배출량보다 높았으나, 2002년 이후에는 국제운항에 의한 배출량이 국내운항 배출량을 앞섰고 있으며 또한 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다(Kim and Ahn, 2008, 그림 5). 국외의 항공배출과 비교해 보

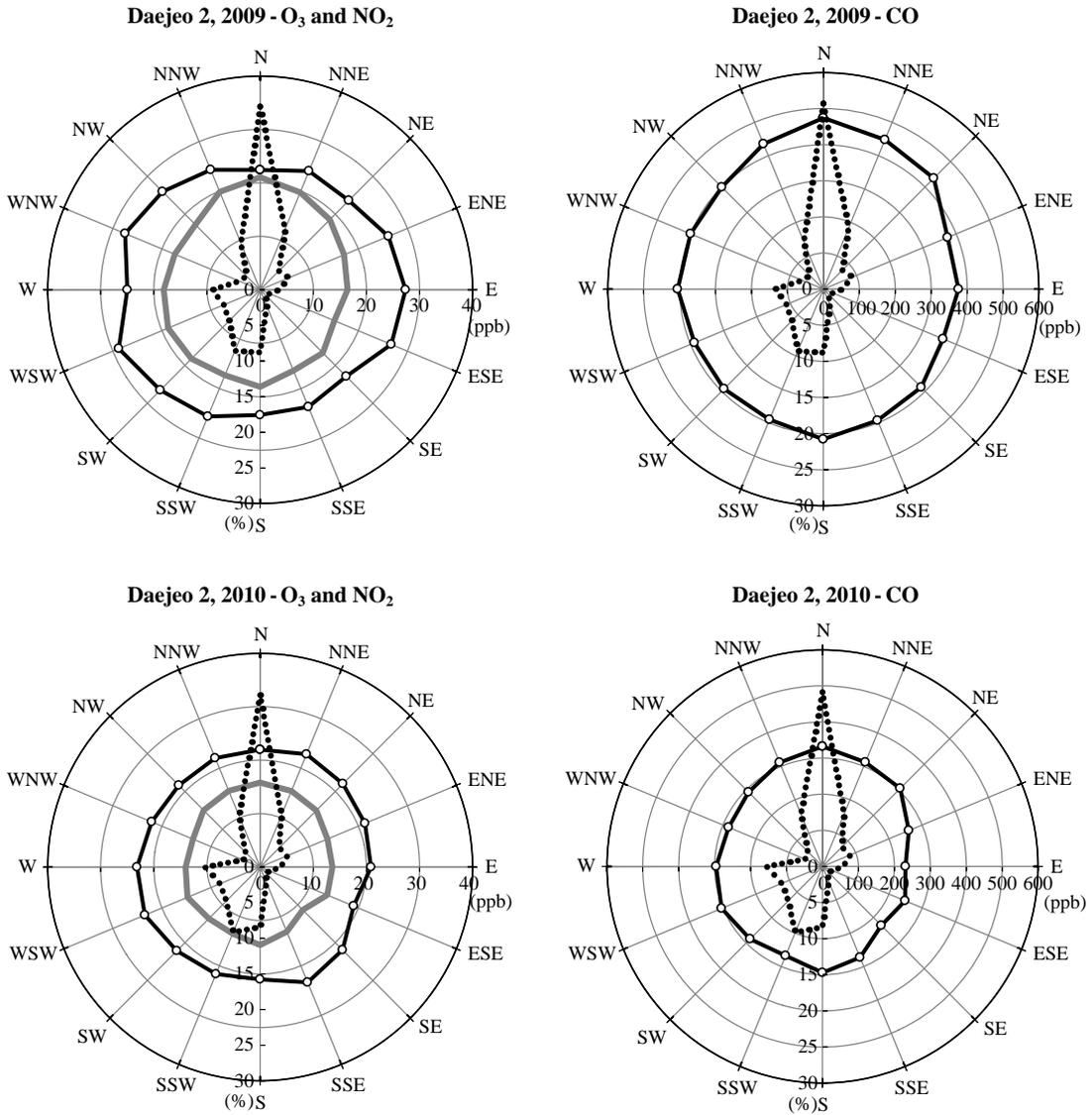


Fig. 6. Continued.

면, 2007년 뉴질랜드의 수출입 항공 화물에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 530,000~670,000 ton/yr으로 나타나 국내 김해공항에서의 CO<sub>2</sub> 배출량보다 5~6배 정도 크게 나타났다(Howitt *et al.*, 2011). 또한 김해공항에서 Taxi-Out 모드의 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 배출량은 2009년 1~2월 동안 AAFEX (Alternative Aviation Fuel Experiment)에서의 배출량(각각 12,000, 0.46 ton/yr)보다 높은 경향인 반면, Take-Off 모드의 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O 배출량은

AAFEX 배출량(각각 91,000, 0.66 ton/yr)보다 낮은 편이었다(Santoni *et al.*, 2011). 한편, 2007년도 김해공항에서 연료소비량(Tier 1)을 이용하여 산출한 온실가스 중 CO<sub>2</sub> 배출량은 약 90,100 ton으로 부산지역 전체 교통부문 배출량의 1%를 차지하는 것으로 보고되었다(KTI, 2009). CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O는 각각 2 ton/yr와 9 ton/yr으로 산출되었으며, 이것은 CO<sub>2</sub>와 비교해 볼 때 큰 차이(<0.01%)가 있음을 알 수 있다(KTI,

2009). 본 연구에서의 Tier 3을 적용한 결과와 간접적으로 비교해 보면 CO<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub>O보다는 CH<sub>4</sub>의 경우 상당히 큰 차이를 보였다. 그러나 Tier 1과 Tier 3 사이에는 운항모드별 배출계수 특성 차이로 인해 산출법이 서로 다르기 때문에 직접적인 비교는 할 수 없었다.

김해국제공항의 항공기 LTO에 의한 대기오염물질 배출량을 부산지역 선박배출량과 비교해 보면 CO의 경우는 선박배출량(약 694 ton/yr)보다 약 1.4배 많았고, NO<sub>x</sub>의 경우는 선박배출량(약 9,563 ton/yr)의 약 1/21배 해당하여 매우 적게 나타났다(Song *et al.*, 2010). 이외에, 2009년 부산지역 도로 수송 배출량과 비교해 보면 CO의 경우는 약 1/41배 정도이며 NO<sub>x</sub>의 경우는 약 1/39배 정도로 적게 나타났다. 한편, 김해공항의 항공기 LTO에 의해 배출되는 주요 온실가스인 CO<sub>2</sub>의 경우 부산지역의 선박배출량과 비교해 보면, 선박으로부터의 CO<sub>2</sub> 배출량(486,280 ton/yr)보다 약 1/4배 정도 적은 경향을 보였다(Park *et al.*, 2011).

### 3.4 항공 배출과 대기질과의 관계

항공기 LTO에 의한 배출량이 공항 주변지역의 대기질에 미치는 영향을 살펴보기 위해 2년간(2009~2010년) 공항 인접 두 지점(동상동 및 대저 2동)에서의 풍계 패턴에 따른 대기오염물질(오존, NO<sub>2</sub>, CO) 농도의 공간 분포를 분석하였다(그림 6). 먼저 공항의 북쪽방향에 위치한 동상동 지점은 2년간 모두 북서풍계열이 주풍이지만, 일부 남풍계열(10% 미만 빈도)의 바람이 공항지점에서 불어 올 때 상대적으로 높은 오존농도(2년 동안 평균 25~28 ppb)와 중간 정도의 NO<sub>2</sub> 농도(평균 19~21 ppb)가 관측된 반면, CO 농도는 다소 낮은(평균 360~400 ppb) 편이었다. 한편, 공항의 북동방향에 위치한 대저 2동 지점은 연도와 상관없이 모두 북풍 계열이 주풍으로 나타났다. 그러나 적은 빈도이지만 남서풍 계열(약 10% 정도)의 바람이 공항지점에서 불어 올 때 상대적으로 높은 오존농도(2009년에 평균 27~29 ppb, 2010년에 평균 22~24 ppb)와 다소 낮은 NO<sub>2</sub>(각각 평균 18~19 ppb와 13~14 ppb) 및 CO 농도(각각 평균 388~390 ppb와 284~304 ppb)가 관측되었다.

일반적으로 대기오염물질의 농도에 미치는 영향은 대상지역 고유의 지리·지형적 특성, 배출량, 기상조건 등이 있다. 따라서 두 지점에서의 풍계에 따른 오

염물질 농도 분포가 항공기 배출의 영향이라고 설명하기에는 다소 어려움이 있으나 일부 영향을 준 것으로 추정할 수 있다. 그러나 연구영역의 부족한 관측지점 및 자료 등으로 인해 항공기 배출이 주변 지역에 미치는 영향을 정확하게 평가하기에는 여전히 많은 한계점이 있다. 향후 지리·지형적 특성과 기상 및 화학작용이 모두 고려된 항공기 배출 영향을 보다 면밀하게 평가하기 위해 3차원 광화학 수송모델을 이용한 수치모의 연구가 필요하다고 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 최근 2년(2009~2010년) 동안 김해국제공항(GIA)에서의 항공기 LTO(Tier 3 방법 적용)에 의한 대기오염물질 및 온실가스의 배출량을 EDMS(항공기 오염물질 배출 및 확산모델)를 이용하여 산출하였다. 이렇게 산출된 항공기 배출량의 시간 변화를 면밀히 살펴보기 위하여 일별, 월별, 계절별, 연간별로 구분하였으며, 또한 항공기 기종별 및 운항모드별 배출량 특성도 분석하였다. 마지막으로, 항공기 배출이 공항 주변지역의 대기질에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다.

김해공항에서의 항공기 LTO 횟수를 살펴보면, 2009년과 2010년 모두 B737 기종이 전체 LTO 횟수의 60% 이상을 차지하여 대표적인 항공기 기종으로 나타났으며, 그 다음은 A300 기종으로 전체 LTO 횟수의 22%를 차지하였다. 항공기 LTO에 의한 대기오염물질 배출량의 시간(일별, 월별, 계절별, 연간별) 변화에서 CO의 배출량이 가장 많았고, 그 다음으로 NO<sub>x</sub>, VOCs 등의 순서였다. 즉, 2009년과 2010년 CO의 연간 총 배출량은 각각 974 ton과 968 ton, NO<sub>x</sub>는 447 ton과 433 ton, VOCs는 118 ton과 122 ton으로 산출되었다. 온실가스의 경우, 2009년과 2010년 CO<sub>2</sub>의 배출량은 각각 110,795과 111,114 ton이었고 CH<sub>4</sub>은 -0.157과 -0.151 ton이며 N<sub>2</sub>O는 2년 모두 약 2 ton 정도로 나타났다. CH<sub>4</sub>의 배출량은 유일하게 음의 값이 산출되었는데, 이는 항공기 엔진연소시 공기중의 CH<sub>4</sub> 소비에 기인한 것으로 사료된다. 또한 항공기 운항모드 중 Taxi-Out와 Climb-Out 모드에서 대부분의 대기오염물질(PM<sub>10</sub>은 Approach 모드)과 온실가스가 주로 많이 배출된 것으로 나타났다.

김해공항에서의 항공기 배출이 인근 대기질에 미치는 영향을 분석한 결과, 공항 주변 두 지점에서의 특정 풍계인 남풍 및 남서풍 계열의 바람이 공항에서 불어 올 때 주변의 오존 및 다른 오염물질의 농도 분포에 일부 영향을 준 것으로 추정할 수 있었다. 그러나 여전히 대상지역의 부족한 관측 자료로 인해 항공기 배출이 주변 대기질에 미치는 영향을 해석하기에는 여러 가지 문제점이 있으므로, 향후 이러한 항공기 배출의 영향을 시·공간적으로 보다 면밀하게 분석하기 위해 다양한 관측망의 확충은 물론 지리·지형적 특성과 기상 및 화학작용이 고려된 모델링 연구가 필요하다고 사료된다. 또한 본 연구의 주요 결과를 바탕으로 인천, 김포, 제주공항 등 여러 공항에서의 항공기 배출에 관한 상세 연구가 수행된다면, 그 지역의 공항 및 주변도시의 대기환경개선에 크게 일조할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2011-0014533) 및 2011학년도 동의대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행하였습니다.

### 참 고 문 헌

Brasseur, G.P., R.A. Cox, I.D. Hauglustanine, L.J. Isaksen, D.H. Lister, R. Sauen, U. Schumann, A. Wahner, and P. Wiesen (1998) European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions, *Atmos. Environ.*, 32, 2327-2422.

Choi, M.A., Y.K. Jang, J. Kim, and H.J. Lee (2010) A study on assessment of air pollution and estimation of emission from Gimpo airport by EDMS, Korean Society for Atmospheric Environment, Proceeding of the 50th meeting of KOSAE, 346-347.

Colville, R.N., E.J. Hutchinson, J.S. Mindell, and F. Warren (2001) The transport sector as a source of air pollution, *Atmos. Environ.*, 35, 1537-1565.

Derwent, R.G. (1982) Two-dimensional model studies of the impact of aircraft exhaust emissions on tropospheric ozone, *Atmos. Environ.*, 16, 1997-2007.

European Monitoring and Evaluation Program (EMEP) (2009)

EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009, European Environment Agency.

Federal Aviation Administration (FAA) (2010) Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) User's Manual, Federal Aviation Administration, Washington DC.

Gardner, R.M., K. Adams, T. Cook, F. Deidewig, S. Ernedal, R. Falk, E. Fleuti, E. Herms, C.E. Johnson, M. Lecht, D.S. Lee, M. Leech, D. Lister, B. Masse, M. Metcalfe, P. Newton, A. Schmitt, C. Vandenberg, and R. Van Drimmelen (1997) The ANCAT/EC global inventory of NO<sub>x</sub> emissions from aircraft, *Atmos. Environ.*, 31(12), 1751-1766.

Howitt, O.J.A., M.A. Carruthers, I.J. Smith, and C.J. Rodger (2011) Carbon dioxide emissions from international air freight, *Atmos. Environ.*, 39, 7036-7045.

Kim, M.J. and M.J. Ahn (2008) Estimates and management measures on greenhouse gases in aviation, 160pp, Korea Transport Institute.

Korea Transport Institute (KTI) (2009) Investigation of the emission of greenhouse gases from transport.

Korean Ministry of Environment (KMOE) (2010) Environmental Statistics Yearbook.

Meijer, E.W., P.F.J. van Velthoven, A.M. Thompson, L. Pfister, H. Schlager, P. Schulte, and H. Kelder (2000) Model calculations of the impact of NO<sub>x</sub> from air traffic, lightning, and surface emissions, compared with measurements, *J. Geophys. Res.*, 105(D3), 3833-3850.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010) Statistical Yearbook of MLTM 2009.

Park, D.-Y., C.-W. Hwang, C.-H. Jeong, and Z.-H. Shon (2011) Estimate of ships emission in Busan port during 2009 based on activity, *J. Kor. Environ. Sci.*, 20(5), 599-610.

Pison, I. and L. Menut (2004) Quantification of the impact of aircraft traffic emissions on tropospheric ozone over Paris area, *Atmos. Environ.*, 38, 971-983.

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.*, In press.

Song, S.-K. and Z.-H. Shon (2008) Analysis of chemical and meteorological effects on the concentration difference of photochemical air pollutants between coastal and inland regions in Busan, *J. Kor. Environ. Sci.*, 10, 1169-1182.

- Song, S.-K., Z.-H. Shon, Y.-K. Kim, Y.-H. Kang, I.-B. Oh, and C.-H. Jung (2010) Influence of ship emissions on ozone concentrations around coastal areas during summer season, *Atmos. Environ.*, 44, 713-723.
- Unal, A., Y. Hu, M.E. Chang, M.T. Odman, and A.G. Russell (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, 67pp.
- Yoo, K.Y. and M.K. Kim (2008) The measurement of aircraft emission at the airport, *Aviation Management Society of Korea*, 471-478.