

AEIC 프로그램을 사용한 국내 공항 항공 온실가스 배출량 산정

Emission Estimation for Airports in Korea Using AEIC Program

주희진¹ · 황호연^{1*} · 임동욱²

¹세종대학교 항공우주공학과

²Georgia Institute of Technology

Hee-jin Joo¹ · Ho-yon Hwang^{1*} · Dongwook Lim²

¹Department of Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

²Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332, USA

[요 약]

항공기 배기가스가 지구의 현재와 미래의 기후에 미치는 잠재적 영향력은 항공산업계가 당면하고 있는 매우 중요한 환경 이슈 중 하나이다. 온실가스 배출의 잠재적 악영향에 대한 우려가 증가함에 따라 기후에 관한 항공기의 영향을 완화하는 수단 중 하나로 항공기 배기가스를 산정하고 예측할 필요성이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 항공기 배기가스의 산출과 저감효과 분석을 통한 항공기 온실가스 배출량을 최소화하여 미래 기후변화와 에너지 고갈에 대비하는 것을 연구목표로 한다. 우선 민간 항공 교통 스케줄을 보유한 OAG 데이터를 사용하여 우리나라 공항에 대한 항공 비행 일정을 확보하였다. 이후 미국 MIT 대학 항공 환경 실험실에서 개발한 AEIC 소프트웨어를 사용하여 2005년 한해 동안 우리나라 모든 공항에서의 3,000 ft 이하의 고도에서 이륙, 상승, 접근, 착륙단계를 포함하는 LTO 운항 시와 3,000 ft 이상의 고도에서 상승, 순항, 하강단계를 포함하는 non-LTO 운항 시의 연료소모량과 온실가스 배출량을 계산하여 결과 데이터를 각 조건별로 비교분석하였다.

[Abstract]

The potential impact of aircraft emissions on the current and projected climate of our planet is one of the more important environmental issues facing the aviation industry. Increasing concern over the potential negative effects of greenhouse gas emissions has motivated aircraft emission estimation and prediction as one of the ways to reduce aircraft emissions and mitigate the impact of aviation on climate. We obtained airline flight schedules for all the airports in Korea that are included in OAG data. Fuel burn and emission index of LTO flight which contains take off, climb and approach under 3000ft and Non LTO flight which contains climb, cruise and descent over 3000ft for all the airports in Korea in 2005 were estimated and analysed for each condition using AEIC software which has been developed by MIT Lab for Aviation and Environment.

Key word : Aircraft emission, Global warming, Green house gas, Fuel burn, Landing and take off.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.4.275>



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.

Received 28 July 2016; Revised 29 July 2016

Accepted (Publication) 26 August 2016 (30 August 2016)

*Corresponding Author; Ho-yon Hwang

Tel: +82-2-3408-3773

E-mail: hyhwang@sejong.edu

1. 서론

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 5차 기후변화 보고서에 따르면 1850년대 이래로 온실가스가 증가하는 비율이 지난 30년간이 가장 심화된 것으로 나타난다. 이러한 현상은 경제 및 인구의 급속한 성장에 기인하여 인위적 온실가스 배출량은 계속 증가해왔고 그림 1과 같이 현재 가장 높은 수준을 보이고 있다[1].

이와 같은 기후 변화가 지속되고 지구의 온난화가 심화되면, 빙하가 녹음으로 인해 해수면 상승에 따른 침수 지역이 증가할 것이고 고온화에 따른 질병, 수자원·농업 및 식량 안보의 문제가 발생할 것이다. 뿐만 아니라 지구 온난화는 항공 산업에도 악영향을 끼친다. 영국 레딩대학 (University of Reading)의 폴 윌리엄스 박사는 기후변화로 인해 항공기 비행시간과 연료소모량이 증가할 것이라는 연구 결과를 발표하였다. 제트기류는 비행시간과 연료비 증가를 초래하는데, 이러한 제트기류는 상층권에서 극지방과 적도 사이 온도 차에 의해 발생하며 기후변화는 이런 온도 차를 높이고 있음을 보여준다 [2],[3]. 결국 증가한 연료소모량으로 인해 배출하는 온실가스는 더 증가하는 악순환이 반복될 것이다. 따라서 이러한 기후변화의 악영향을 해소하기 위한 노력이 필요하다.

현재 전체 온실가스 비중에서 항공 온실가스가 차지하는 비율은 미미하다. 하지만 전 세계적으로 항공 산업은 가장 빠르게 증가하는 산업 중 하나이다. 유럽연합(EU) 집행위원회에 따르면, 전 세계의 항공기 온실가스 배출량은 1990년과 2002년 사이에 약 70% 증가하였고 IPCC의 1999년 연구자료에서는 항공기에서 배출되는 온실가스가 기후변화에 미치는 영향 정도는 1992년 배출량을 기준으로 할 때, 2050년에 이르러 적게는 2.6배에서 많게는 11배로 늘어날 것으로 예상하였다[4].

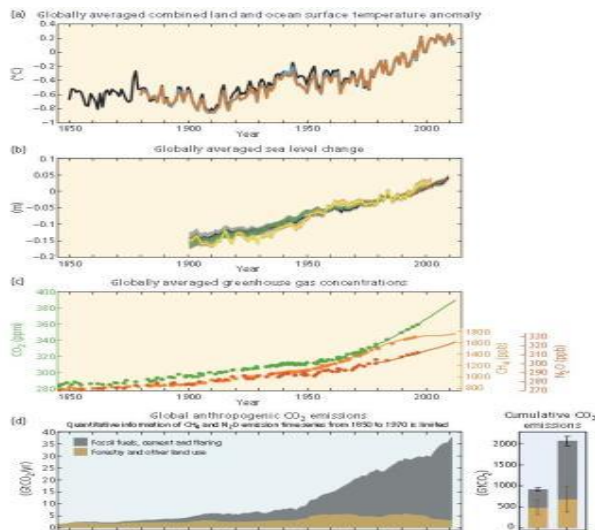


그림 1. 전지구 평균 육지, 해수면변화, 온실가스 농도와 전지구 인위적 이산화탄소 배출량[1]

Fig. 1. Globally averaged combined and ocean surface temperature anomaly, sea level change, greenhouse gas concentrations and global anthropogenic CO₂ emissions[1].

이러한 연유로, 잠재적 기후 변화에 관한 항공부문에서의 환경적 영향을 완화시키기 위해 국제사회에서는 지난 십여년 동안 기술적 조치와 다양한 정책결정을 위해 노력해왔고 2016년 2월 세계 항공 전문가들은 4년 만에 새로운 모델을 시행할 수 있는 첫 번째 항공 배출가스-저감 기준안을 협의하였다[5].

우리나라 또한 2030년까지 온실가스 감축목표를 배출 전량치 (BAU; business as usual) 대비 37%로 확정하고 유엔에 계획안을 제출하였다. 정부는 제조업 위주인 국내 경제구조를 감안하여 산업계의 감축량은 배출 전량치 대비 12% 이내로 결정하고 대신 온실가스 배출량이 많은 발전과 수송 부문의 절감을 통해 감축량의 상당 부분을 해결하기로 하였다. 따라서 항공 수송 부문도 많은 양의 감축량을 분담할 것으로 판단된다[6].

따라서 본 논문에서는 국내 항공 산업 부문의 온실가스 배출량 최소화를 위한 선행 연구로 국내 공항에서 배출된 항공기 기종별, 노선별, 한 해 동안 배출한 온실가스 배출량과 연료 소모량을 분석하였다. 이때, OAG (official airline guide) 운항 데이터와 AEIC (aviation emissions inventory code) 프로그램을 사용하여 이착륙 운항별 배출가스를 Tier 3기준(기종-엔진)으로 산정하였다.

II. AEIC 프로그램

AEIC는 MIT 항공 및 환경 실험실에서 항공 배기가스 배출 및 이·착륙 운항에 관한 불확실성 정량화를 목적으로 개발한 프로그램이다. 이 프로그램의 초기버전은 LTO (landing and take off) (3,000 ft)이하만 계산하도록 만들어졌고 후에 추가적으로 non-LTO (3,000 ft)이상 운항을 계산하도록 그림2와 같이 설계되었다. 따라서 본 프로그램에서는 2005년 한 해 동안의 전 세계 민간 항공기가 배출한 온실가스 양과 연료 소모량을 계산할 수 있고 운항고도에 따라 LTO, non-LTO 모델로 나누어져 배출량이 산정된다.

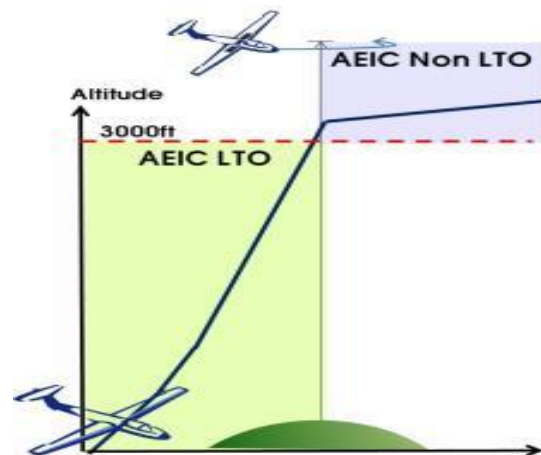


그림 2. AEIC LTO와 non-LTO의 운항 구간

Fig. 2. Flight segment of LTO and non-LTO in the AEIC.

2-1 AEIC 모듈 구성 및 배출량 산정 방법

AEIC 프로그램을 이용하여 배출량을 산정할 때 그림 3과 같은 절차로 계산이 진행된다. 계산은 LTO 모듈과 non-LTO 모듈 각각 개별적으로 진행하게 되는데, 두 모듈에서 공통적으로 필요한 데이터가 항공운송정보 제공회사 OAG (official airline guide)에서 제공하는 운항 데이터이다. 이 OAG 데이터는 총 2,587개의 세계 각 지역의 공항정보가 탑재되어있다. 해당 공항에서 운항한 항공기 기종, 노선, 운항횟수에 관한 데이터를 가지고 있어서 이를 이용하여 배출량을 산정할 수 있다. 그러나 AEIC에서는 OAG에 있는 모든 공항에 대하여 계산하는 것이 아닌 운항 회수 상위 99 % 공항까지만 계산하도록 코딩되어있다.

먼저 LTO 모듈에서는 OAG 데이터에 포함된 각 공항에 이착륙한 항공기 정보를 입력값으로 사용한다. 이러한 입력값은 별도의 항공기 동력학 모델이 아닌 이론적인 계산식을 사용하여 LTO 운항 배출량을 산정하도록 구성되어있다. 이때 LTO 주기는 times-in-mode(TIMs)로 정의되고 이륙, 상승, 접근 단계의 비행구간으로 나뉘어져있다. 이 모듈에서는 시간별 온실가스 배출량, 비행단계별 온실가스 배출량, 1년치 총 온실가스 배출량을 산정할 수 있다.

다음으로 non-LTO 모듈은 eurocontrol의 BADA (base of aircraft data)를 별도로 사용하여 항공기의 성능을 계산한다. BADA에는 운항되는 항공기에 대한 성능 및 운영 특성이 세부적으로 모델링되어 있어서 항공기 운항에 따른 온실가스 배출량을 산정하는데 좀 더 정확한 데이터를 제공받을 수 있다 [7]. 본 모듈에서는 BADA 3.9 버전을 사용하고 OAG 데이터의 2005년 운항 정보를 사용하여 한 공항에서 다른 공항으로 가는 노선에 따른 3000 ft 이상의 항공기 운항에 대한 배기가스 배출량을 산정한다.

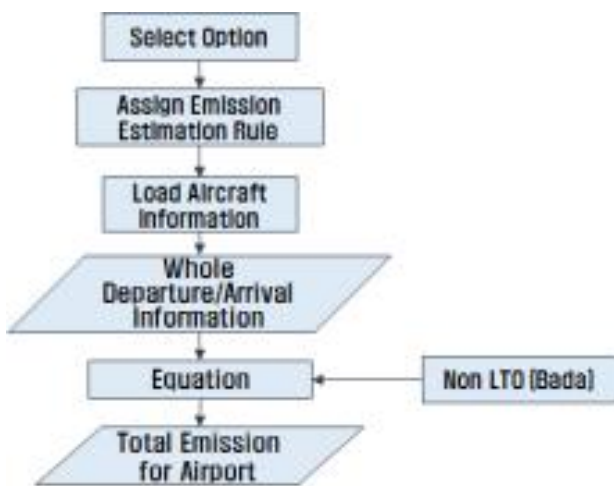


그림 3. AEIC 배출량 산정 절차
Fig. 3. AEIC emission estimation process.

표 1. 설치 효과에 대한 보정 요소

Table 1. Adjustment factors for installation effects.

Mode	Power Setting	Adjustment Factor
Takeoff	100	1.010
Climb-out	85	1.013
Approach	30	1.020
Idle	7	1.100

또한 이 모듈에서는 특정 항공기와 공항의 한 쌍의 시뮬레이션을 수행하여 해당구간의 연료소모량을 계산한다. 그리고 해당 비행 구간의 연료소모량과 해당 비행 구간의 운항 횟수를 곱하여 해당구간에서 2005년 1년간 총 배출량을 산정한다. 같은 방법으로 연간 27,000,000 이상의 비행에 대한 배출량을 추정할 수 있다. AEIC에서는 boeing fuel flow method 2 [BFFM2, Baughcum, 1996]의 방법으로 배출량을 계산하는데 질소 산화물, 탄화수소, 일산화탄소의 경우에는 ICAO engine emissions databank [CAA.2009]에서의 EIs(emission indices)를 활용한다. 또한 ICAO databank는 표 1과 같이 배기가스 배출과 연료 흐름을 7%, 30%, 85%, 100%의 4가지 추력 수준으로 구분한다[8].

AEIC non-LTO에서는 해당 노선에서 사용한 항공기 기종과 엔진에 따라 온실가스 배출량을 산정하는데 OAG 데이터에서는 IATA CODE를 사용하여 항공기 기종을 표시하는 반면, BADA에서는 ICAO 표기법을 사용한다. 따라서 이 OAG 데이터에서 사용하는 이름과 BADA 항공기 모델에서 사용하는 이름을 매핑(mapping)하여 AEIC에서 사용할 수 있도록 하였다. 또한, IATA Code로 되어있는 엔진 DB도 ICAO 엔진 DB로 그림 4와 같이 매핑하였다.

2-2 연료소모량 및 배출량 계산식

대기 데이터는 해수면(sea-level)의 표준대기 표준치를 기준으로 고도가 높아짐에 따라 달라지는 값을 적용하였다.

1) 연료 흐름량과 연료소모량 계산

fuel flow는 추력당 연료 소모량(TSFC; thrust specific fuel consumption) η [kg/(min·)]을 사용하여 계산한다. 다음 식은 제트엔진에 대한 추력 연료 소모 모델을 실제 대기속도(V_{TAS} ; true airspeed) 함수로 표현하였다.

$$\eta = C_{f1} \times \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) \quad (1)$$

여기서 C_{f1} 은 aircraft-specific 첫 번째 추력 연료 소모 계수 [kg/min/kN for jet]이고 C_{f2} 은 두 번째 추력 연료 소모 계수 [kg/min/kN for jet]이다.

이때, 연료 흐름, f 은 추력을 사용하여 계산할 수 있는데, 비행단계(이륙/접근 단계, 순항 단계)에 따라 다르게 계산된다.

Aircraft in OAG Schedule to BADA Aircraft Mapping					
Source: AEC v.11\AircraftCodes.txt	IATA Code	ICAO/BADA CODE	Manufacturer	Aircraft Type / Model	
	31X	316	A310	Airbus	A310-200
	31Y	317	A310	Airbus	A310-300
	320	318	A320	Airbus	A320-100/200
	321	319	A321	Airbus	A321-100/200
	325	320	A320	Airbus	A318/319/320/321
	330	321	A332	Airbus	A330
	332	322	A332	Airbus	A330-200
	333	323	A333	Airbus	A330-300
	340	324	A340	Airbus	A340
	342	325	A342	Airbus	A340-200
	343	326	A340	Airbus	A340-300
	345	327	A345	Airbus	A340-500
	346	328	A346	Airbus	A340-600
	380	329	A380	Airbus	A380
	383	3210	A380	Airbus	A380
	703	31	B703	Boeing	707-300
	707	32	B720	Boeing	707/720
	709	33	B700	Boeing	707

그림 4. IATA CODE와 ICAO engine emission data bank의 엔진 데이터 매핑

Fig. 4. Engine data mapping of IATA CODE to ICAO engine emission data bank.

• 이륙/접근 단계 $f = \eta \times Thr = C_{f1} \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) Thr$ (2)

• 순항 단계 $f = \eta \times Thr \times C_{fcr} = C_{f1} \left(1 + \frac{V_{TAS}}{C_{f2}} \right) Thr \cdot C_{fcr}$ (3)

여기서 Thr 은 추력이고 C_{fcr} 은 순항 연료 흐름 보정 계수[무차원]이다.

식 (2)에서 알 수 있듯이 연료흐름률 식은 속도와 추력에 의존한다. BADA에서 하강과 공회전 모드에서는 low 추력 연료 흐름식을 사용해야 함에도 불구하고 식 (2)은 ICAO 데이터뱅크의 연료흐름률 값과 비교하였을 때 합리적인 결과를 나타냈기 때문에 접근(approach)단계에서 사용한다. 왜냐하면 동력은 7% 추력에서 일정하다고 가정하기 때문에 동력단계에 대한 ICAO ED (emission databank)로부터 표준 연료흐름률 식이 BADA식을 대신해서 사용된다. 이러한 ICAO 연료흐름률 값은 BFFM2의 식에 따라 온도, 압력, 마하수를 조정한다.

일단 연료흐름률을 계산하면, 연료소모량은 비행코드 (flight chord: taxi/delay 기간)에 대해 시간에 따라 변하는 연료흐름률의 곱으로 결정된다. 비행 코드에 의한 연료소모량은 다음 코드로 가기 전에 항공기 중량 차변을 위해 사용한다. 그러므로 항공기는 비행경로를 움직이며 중량감소를 경험한다.

2) 배기가스 모델링

BFFM2는 CO, HC, NOx 배출가스를 모델링하기 위해 ICAO 데이터뱅크의 연료 흐름률에 상응하는 EI (emission indices)를 이용한다. BFFM2에서의 주요 요소들은 연료 흐름률과 EI의 관계와 고도에 따른 대기환경에 따라 조정된다. BFFM2는 BADA로부터 예측된 연료 흐름이 배출을 예측하는데 사용될 수 있다. 좀 더 명확하게 말하면, 고도조건에 따라 예측된 연료 흐름률과

온실가스 배출량은 비보정 값을 가지는 반면 ICAO 데이터뱅크에서의 연료 흐름률과 온실가스 배출량은 보정된 값으로 언급된다. 왜냐하면 국제표준대기조건에 참고치를 사용했기 때문이다.

배출가스를 모델링하기 위해서는 몇 개의 단계가 필요하다. 먼저, 정정한 연료 흐름률은 엔진의 설치효과 (installation factor)를 고려하여 적용한다. 즉, 연료흐름률에 조정 인자를 곱해준다. 특정 항공기와 엔진에 해당하는 연료 흐름률 값이 없을 경우, 일반적으로 보잉에서 제공하는 값을 사용한다. 이러한 인자는 아래식과 같이 표현된다.

$$RW_{ff} = RW_{ffu} r \quad (4)$$

여기서, RW_{ff} 는 참고치에 상응하게 보정된 연료 흐름률이고 RW_{ffu} 는 참고치에 상응하는 ICAO 데이터뱅크로부터 조정된 연료 흐름률, r 은 보잉 조정 인자이다. 여기서 r 은 비행 상태에 따라 다른 값이 적용된다(이륙: 1.010, 상승: 1.013, 접근: 1.020, idle: 1.100).

두 번째 단계로는 ICAO EIs와 연료흐름률의 관계는 로그 그래프로 표현된다. NOx는 선형 그래프가 그려지는 반면 CO와 HC는 쌍선형 그래프로 그림 5와 같이 표현된다.

쌍선형 그래프에서 첫 번째 직선은 두 개의 낮은 동력 점에 의해 만들어지고 두 번째 직선은 높은 동력의 두 개점 가운데로 수평하게 위치해있다.

세 번째 단계는 정정하지 않은 BADA 연료흐름률 식이 규정한 BFFM2 식을 사용하여 참고 조건으로 정정된 식이 아래와 같이 표현된다.

$$W_{ff} = (W_f / \delta_{amb}) [\theta_{amb}^{0.8} \exp(0.2M^2)] \quad (5)$$

$$\delta_{amb} = P_{amb} / 14.696 \quad (6)$$

$$\theta_{amb} = (T_{amb} + 273.15) / 273.15 \quad (7)$$

W_{ff} 는 보정된 BADA 연료흐름률 [kg/s], W_f 는 비보정 BADA 연료흐름률 [kg/s], P_{amb} 는 해당고도 주위 압력 [psia],

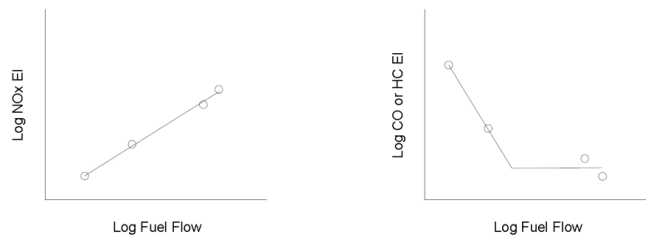


그림 5. NOx, CO와 HC에 대한 EI와 연료흐름률의 로그-로그 그래프

Fig. 5. Log-Log Plots of EI versus fuel flow for NOx, CO and HC[18].

T_{amb} 는 해당 고도 주위 온도[°C], M 은 마하수이다.

네 번째 단계는 배출지수(EI) 값을 결정하기 위해 로그 그래프와 보정된 연료 흐름량을 사용한다. 로그 그래프를 사용함으로써 그래프 값을 완만하게 만들어준다.

다섯 번째 단계는 계산된 배출지수 값을 비행 고도 조건에 맞추기 위해 정해진 BFFM2 식을 이용한다.

$$EI_{HC} = REI_{HC}(\theta_{amb}^{3.3} / \delta_{amb}^{1.02}) \quad (8)$$

$$EI_{CO} = REI_{CO}(\theta_{amb}^{3.3} / \delta_{amb}^{1.02}) \quad (9)$$

$$EI_{NOx} = REI_{NOx} [\exp(H)] (\delta_{amb}^{1.02} / \theta_{amb}^{3.3})^{1/2} \quad (10)$$

$$H = -19.0(\omega - 0.0063) \quad (11)$$

여기서, EI_{HC} 는 HC의 불확정 배출지수[g/kg], EI_{CO} 는 CO의 불확정 배출지수[g/kg], EI_{NOx} 는 NOx의 불확정 배출지수[g/kg], REI_{HC} 는 HC의 보정 배출지수[g/kg], REI_{CO} 는 CO의 보정 배출지수[g/kg], REI_{NOx} 는 NOx의 보정 배출지수[g/kg], H 는 습도 보정 인자이고 ω 는 비습도(specific humidity)이다.

여섯 번째 단계로는 비행단계에 따른 지속시간이 결정되고 그때 다음식을 사용하여 연료 소모량 FB 를 계산한다.

$$FB = f_{ua} \Delta t \quad (12)$$

여기서, f_{ua} 는 보정된 연료 흐름량, Δt 는 비행단계에 따른 지속시간이다.

불확정 배출지수와 연료 소모량은 CO, HC 그리고 NOx 계산을 위해 사용된다.

$$EC = FB \times EI_{CO} \quad (13)$$

$$EH = FB \times EI_{HC} \quad (14)$$

$$EN = FB \times EI_{NOx} \quad (15)$$

여기서, EC 는 CO 배출량[g], EH 는 HC 배출량[g], EN 은 NOx의 배출량[g]이다.

III. 국내공항 배출량 산정 시나리오

3-1 프로그램 검증

MIT에서 AEIC를 개발 후, 결과 데이터를 검증할 때 LTO를 단독으로 다른 tool과 비교한 데이터는 없고, LTO와 non-LTO를 합친 결과 값을 그림 6과 같이 다른 여러 가지 툴들과 비교 검증하였다.

그림 7, 8은 위도와 경도에 따른 연간 항공기 운항에 대한 연료소모량 산정결과를 AEIC와 AEDT (aviation environmental design tool)를 사용하여 계산하고 비교한 그래프이며 가장 정확한 산정 툴로 평가되는 AEDT와 비교해서 AEIC 결과도 거의

유사한 것으로 판단된다. AEIC는 따로 국가정책 의사 결정에 필요한 수준의 검증과정은 거치지 않았지만, AEDT의 검증과정을 참고하면 AEIC의 신뢰도를 입증할 수 있다.

AEDT의 개발팀으로는 Volpe, FAA와 같은 정부기관, MIT와 같은 학교 등이 참여하여 개발과 동시에 검증을 수행하였다. 또한 AEDT는 궁극적으로 CAEP(committee on aviation environmental protection) 정책결정에 사용하기 위해서 만든 프로그램이므로 CAEP 레벨에서의 검증을 수행하였다. 최근 유럽국가에서도 AEDT와 유사한 툴인 IMPACT(EASA)와 FAST(UK) 툴의 검증을 AEDT와 비교분석을 통해 수행하였다.

3-2 배출량 산정 시나리오

본 논문에서 배출량 산정 시, AEIC프로그램과 2005년 운항 정보를 이용해 국내선 공항 7곳, 국제선 공항 7곳, 총 14개 공항에 대하여 그림 9와 같이 산정하였다. 본 공항정보는 2005년을 기준으로 하여 무안 국제공항은 포함하지 않았다.

- i. 2005년 1년 동안 14개 공항에서 이착륙(LTO)한 비행기에 대한 총 온실가스 배출량
- ii. 2005년 1년 동안 국내공역에 해당되는 부분의 non-LTO 운항 총 온실가스 배출량
- iii. 2005년 1년 동안 국내공역에 해당되는 부분의 노선별 non-LTO 운항 온실가스 배출량
- iv. 항공기 기종별/엔진별 연료 효율 분석
- v. 2005년 1년 동안 14개 공항에 이착륙한 모든 노선에 대한 non-LTO 운항 총 온실가스 배출량

Emission	NASA/Boeing Year 1999	QUANTIFY Year 2000	AERO2k Year 2002	AEDT Year 2004	AEIC Year 2005 (This Thesis)	AEDT Year 2006
Fuel Burn (Tg)	136	152	156	174.0	180.6	188.2
NO _x as NO ₂ (Tg)	1.38	1.98	2.06	2.456	2.689	2.656
CO (Tg)	0.667	----	0.507	0.628	0.749	0.679
HC as CH ₄ (Tg)	0.226	----	0.063	0.090	0.201	0.098

그림 6. 프로그램 별 전세계 항공 온실가스 배출량 산정 값

Fig. 6. Comparison of global aviation emission inventories by programs.

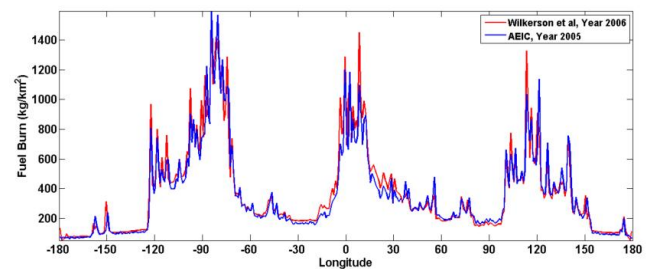


그림 7. AEIC와 AEDT를 사용한 2005년 경도 변화에 따른 연료소모량 비교

Fig. 7. Comparison of Longitudinal distribution of global emissions inventories using AEIC for the year 2005 and published AEDT results by Wilkerson et al.

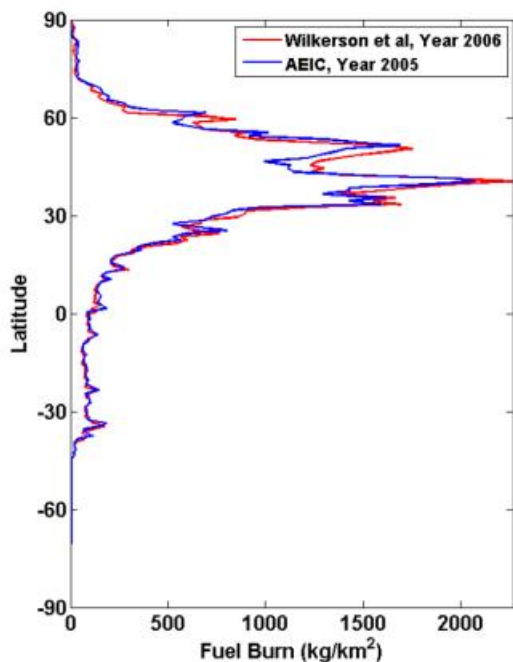


그림 8. AEIC와 AEDT를 사용한 2005년 위도 변화에 따른 연료소모량 비교

Fig. 8. Comparison of Latitudinal distribution of global emissions inventories using AEIC for the year 2005 and published AEDT results by Wilkerson et al.

IV. AEIC를 사용한 배출량 산정 결과

4-1 국내공항 LTO 배출량 산정 결과

시나리오에서 정의한 것과 같이 국내선 공항 7곳, 국제선 공항 7곳, 총 14개 공항에 대하여 3,000ft 미만의 운항인 LTO 운항에 대해 배출량을 산정하였다. 먼저 2005년 LTO 운항의 총 연료소모량은 249,409,620 kg이고 나머지 배출량은 NO_x가 4,122,551.3 kg, NO는 3,536,230.8 kg, CO는 2,922,398.4 kg, NO₂는 524,082.29 kg이고 HC는 488,548.89 kg 그리고 HONO 62,184.09 kg 순으로 배출량이 많았다. 이는 그림 10 및 표 2에 표현했다.

4-2 국내공역 non LTO 배출량 산정 결과

현재 국내 온실가스 배출량 산정은 국제선 운항에 따라 발생하는 온실가스 배출량이 항공부문 통계에 포함되어있지 않고 국내 공역에서 배출되는 부분만 해당된다[4]. AEIC에서 이륙 공항과 착륙 공항을 입력하면 해당 노선에 대해 2005년 동안 운

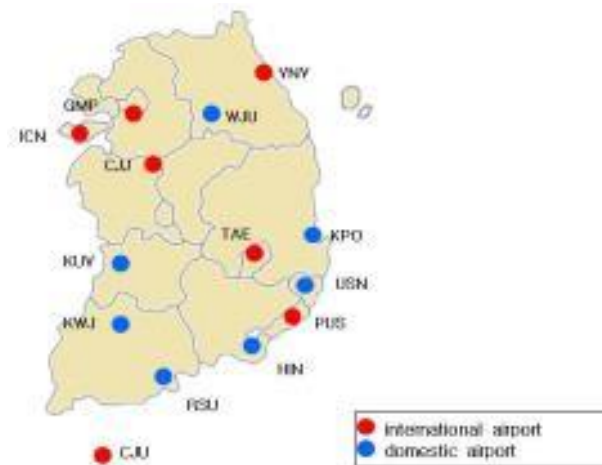


그림 9. 배출량 산정을 수행한 14개 공항

Fig. 9. Emission estimation of Airports in Korea.

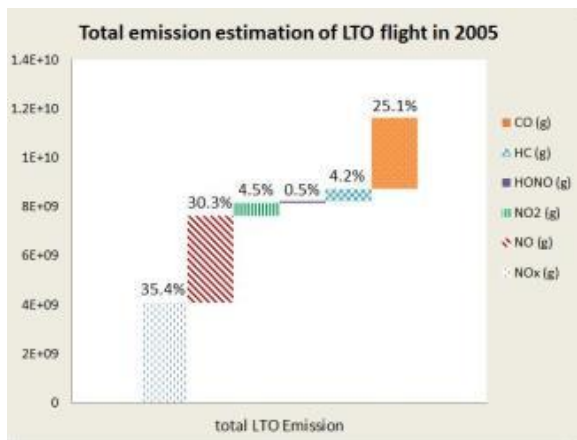


그림 10. 국내 14개 공항의 2005년 총 LTO 운항 온실가스 배출량

Fig. 10. Emission estimation of total LTO flight for 14 domestic airports.

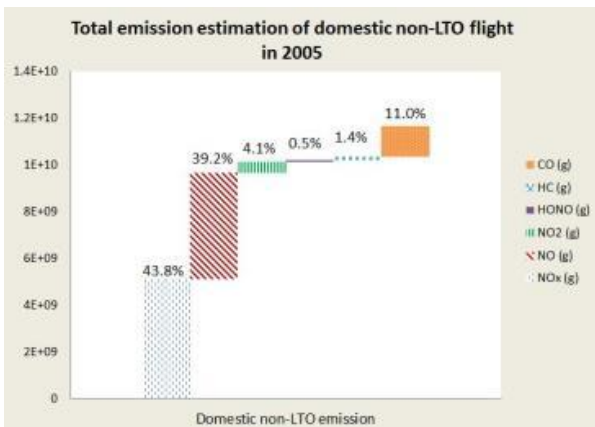


그림 11. 국내공역에서의 2005년 non-LTO 운항 총 온실가스 배출량

Fig. 11. Total emission estimation of domestic non-LTO flight in 2005.

항한 각 비행기 기종별로 연료소모량과 각종 온실가스 배출량이 산정된다. 각 기종별로 분리되어있는 데이터를 직접 합계를 계산하여 국내 공역에 해당하는 non-LTO 부문 총 연료소모량과 온실가스 배출량을 계산하였고 계산결과는 그림 11 및 표 2와 같다.

4-3 국제공역 non-LTO 배출량 산정 결과

1997년 교토의정서를 채택할 당시 국제노선을 운항하는 항공기의 배출권 배정에 어려움이 있어서 항공 분야는 그 적용에서 제외하였다[9]. 하지만 EU-ETS (emission trading scheme), ICAO의 국가 감축이행계획 수립 등으로도 알 수 있듯이 이러한 국제노선에 대한 온실가스 배출량의 대한 책임이 여전히 논점이며 논의 되어야하는 부분이다. 따라서 이 절에서는 국내 공역에서 이착륙하는 모든 국제 노선(국내노선 제외)에 대한 non-LTO 운항 부문에 대한 총 연료소모량과 온실가스 배출량을 산정하였다. 연료소모량은 47,514,661,637 kg이고, 나머지 배출량은 NOx가 78,601,786 kg, NO는 66,897,066 kg, NO₂는 9,373,333 kg, CO는 8,352,173 kg이고 HONO 2,210,647 kg 그리고, HC는 1,342,552 kg 순으로 배출량이 많았다. 이 결과는 그림 12 및 표 2에 나타냈다.

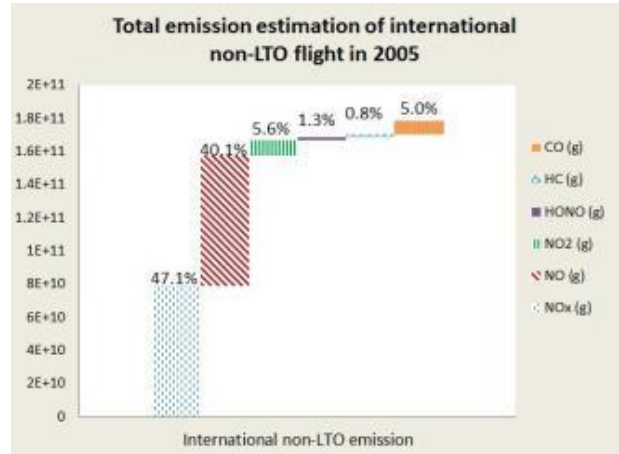


그림 12. 국제공역에서의 2005년 non-LTO 운항 총 온실가스 배출량

Fig. 12. Total emission estimation of international non-LTO flight in 2005.

각 운항부문에 따라 연료소모량을 분류하였을 때 2005년 국내 14개 공항에서의 총 운항에 대한 연료소모량은 표 3과 같이 국제 non-LTO 운항이 95%, 국내 non-LTO, LTO 운항이 각각 5%를 차지하였다.

표 2. 각 운항구간별 총 연료소모량과 배기가스 배출량

Table 2. Total fuel burn and emission for each operational section.

	Fuel burn (kg)	Nox (gram)	NO (gram)	NO ₂ (gram)	HONO (gram)	HC (gram)	CO (gram)
LTO	2.49E+08	2.49E+11	4.12E+09	3.54E+09	5.24E+08	6.22E+07	4.89E+08
Domestic non-LTO	2.60E+08	5.10E+09	4.57E+09	4.75E+08	5.44E+07	1.67E+08	1.28E+09
International non-LTO	4.75E+09	7.86E+10	6.69E+10	9.37E+09	2.21E+09	1.34E+09	8.35E+09

표 3. 국내공항의 구간별 연료소모량

Table 3. Fuel burn of each operational section for domestic airport.

	Fuel Burn (kg)	Contribution To Total
Domestic non-LTO	259,892,528	5 %
International non-LTO	4,751,461,637	90 %
LTO	249,409,620	5 %

4-4 국내공항 노선별 LTO/non-LTO 배출량 산정 결과

노선별 LTO와 non-LTO 운항은 그림 13의 다이어그램과 같이 산정된다. 먼저, AEIC 모듈의 ‘Sequence_World_Func.m’에서 출발공항과 도착공항 ID를 지정해주고 코드를 구동하면, 해당노선에 대한 LTO/non-LTO 출력 값을 얻을 수 있다. 먼저 LTO 단계에서의 배출량은 이착륙 비행단계인 Ground, Climb, Approach별로 2005년 전체에 해당하는 배출량이 산정된다. 이 값을 통합하면 해당노선에서의 출발공항과 도착공항 각각에 해당하는 연간 LTO 배출량이 산정된다. 다음으로 non-LTO 배출량 또한, 해당노선을 돌리면 값으로 출력된다.

2005년 한해동안 해당노선을 운항한 항공기 기종별로 단일 non-LTO 배출량이 엑셀에 출력되도록 코딩되어있다. 이때 각 기종별로 연료소모량, 이륙최대중량, 운항거리, 운항고도, 운항시간, 연료흐름량, 항공기 속도, 온실가스 배출량 값이 출력된다. 이렇게 출력된 값을 각 기종별 운항횟수에 따라 곱하면 해당노선의 2005년 한해동안 non-LTO 운항 배출량과 연료소모량을 산정할 수 있다.

운항횟수는 AEIC 모듈 공항별 정보가 들어있는 ‘Schedule_Files’의 ‘AC_AIRPORT_PAIRS_2005’에서 확인할 수 있다. 이 Table에는 노선에 따른 항공기 기종별 운항횟수가 정리되어있다. 이때 항공기 기종은 AC Number Aircraft Code로 표현된다.

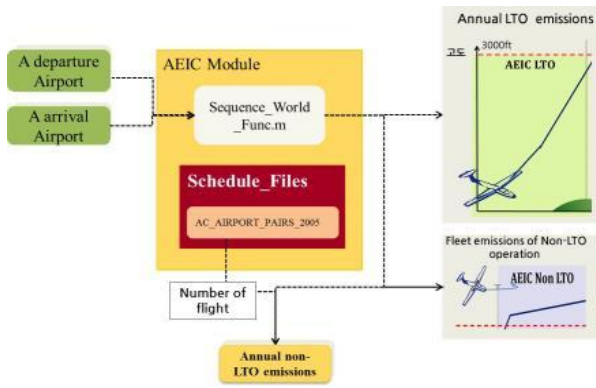


그림 13. 해당노선별 연간 배출량 산정 과정

Fig. 13. Emission estimation process of each flight section.

표 4. 국내공항 노선별 2005년 운항횟수

Table 4. The number of flight times for each flight routes of domestic airport in 2005.

flight routes	number of flight times	flight routes	number of flight times
ICN_CJU	404	CJU_CJJ	5,780
ICN_KWJ	9	CJU_HIN	576
ICN_TAE	729	CJU_KPO	148
ICN_PUS	2,426	CJU_KUV	1,448
GMP_CJU	35,708	CJU_KWJ	5,783
GMP_HIN	2,980	CJU_PUS	11,563
GMP_KPO	5,563	CJU_RSU	634
GMP_KWJ	7,469	CJU_TAE	5,989
GMP_PUS	23,168	CJU_USN	576
GMP_RSU	6,745	CJU_WJU	728
GMP_TAE	2,442	PUS_YNY	724
GMP_USN	11,131		

위의 과정과 같이 국내공역에 해당하는 국내 공항 노선(총 23개 노선)에 대해 LTO와 non-LTO 운항 시의 연료소모량을 산정하였다.

연료소모량 그래프를 살펴보면(그림 14) 김포에서 제주 노선이 가장 연료소모량이 많은 것으로 나타났다. 이는 표 4에 나와 있는 노선별 운항횟수를 살펴보면 이유를 알 수 있다. 김포-제주노선의 2005년 동안의 총 운항횟수는 35,708으로 가장 많다. 따라서 김포-제주는 137,507,818 kg, 김포-부산은 78,259,816 kg, 제주-부산 58,534,936 kg, 김포-울산 51,008,767 kg, 김포-광주 46,419,535 kg, 김포-여수 44,570,035 kg 순으로 연료소모량이 많다. 즉, 연료소모량이 많은 상위 6개의 노선은 운항횟수가 많은 순서와 같다.

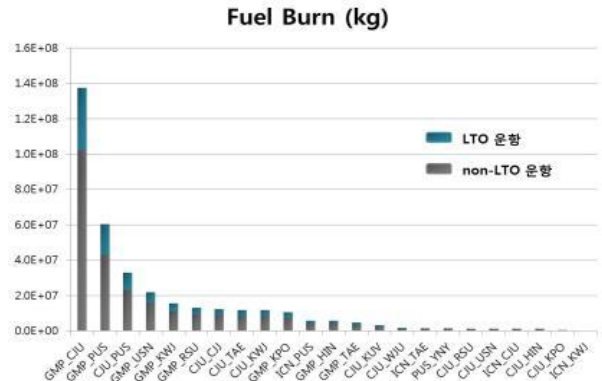


그림 14. 국내공역 노선별 2005년 총 LTO/non-LTO 운항 연료소모량 산정

Fig. 14. Fuel burn of LTO and non-LTO flight for each flight routes of domestic airports in 2005.

4-5 국내공항 기종별 non-LTO 배출량 산정 결과

단일항로에 따른 항공기 기종과 엔진에 대한 연료소모량과 배출량 분석을 통해 기종별 효율을 분석하였다. 분석을 수행함에 있어서 단순히 연료 소모량을 비교하는 것이 아닌 해당 항공기의 좌석 수에 따른 연료소모량과 배출가스 분석을 통해 항공기 좌석당 연료효율 및 온실가스 배출 효율을 분석하였다. 본 연구를 수행하기 위해 김포-제주노선의 non-LTO 배출량 데이터를 이용하였다. 김포-제주노선에서는 2005년에 총 12개의 항공기 기종이 35,708회 왕복 운항하였고 각 기종별 운항횟수는 표 5에 정리했다. 여기서 기종 A320-100/200, A321-100/200, A330-200, A330-300, B737-400, B737-500, B737-800, B737-900, B747-400에 대해서 분석을 수행하였다.

항공기 연료효율은 보통 PMPG (passenger miles per gallon)을 사용하나 본 연구에서는 각 해당 항공기 기종별 최대 좌석수와 운항거리[nautical mile]로 나눠서 연료 소모량 및 온실가스 배출량을 비교분석하였고 이는 표 6 및 그림 15에 표현하였다.

표 5. 김포-제주노선 운항 항공기 기종 및 운항횟수

Table 5. Type of aircraft and the numbers of flight for GMP-CJU route.

	Type of aircraft	The numbers of flight
GMP_CJU	A320-100,200	476
	A321-100/200	8,396
	A330-200	4
	A330-300	11,498
	B737-400	7,314
	B737-500	755
	B737-800	1,879
	B737-900	1,846
	B747-400	31
	B767-300	1
	B767	446
	A306	3,062

표 6. 항공기 기종별 최대좌석수와 최대이륙중량
Table 6. Max seats and maximum takeoff weight for each type of aircraft.

type of aircraft	A320-100/200	A321-100/200	A330-200	A330-300	B737-400	B737-500	B737-800	B737-900	B747-400
Maximum seats	180 (1-class)	220 (1-class)	293 (2-class)	335 (2-class)	188	140	189	189	524 (2-class)
MTO W (lb)	169,000	206,100	510,000	510,000	150,000	138,801	174,170	187,699	875,000

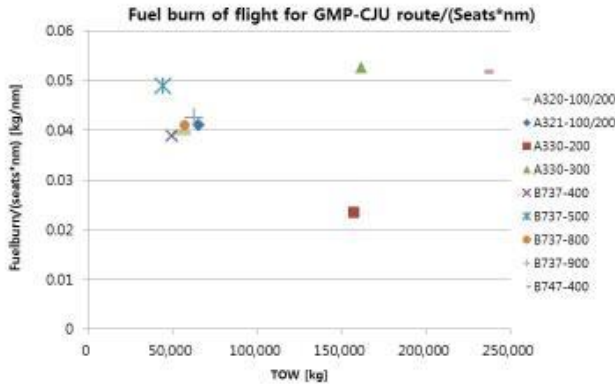


그림 15. 기종별 최대좌석수와 운항거리당 연료소모량
Fig. 15. Unit fuel burn for each type of aircraft.

$$\text{단위 연료소모량} = \frac{\text{연료소모량}}{\text{최대좌석수} \times \text{운항거리}} \quad (16)$$

그림 15의 그래프는 x축은 이륙 총중량, y축은 단위연료소모량으로 기종별 단위연료소모량을 나타냄으로써 보다 정확하게 결과를 분석할 수 있게 하였다. 결과를 살펴보면 A330-300과 B747-400의 단위연료소모량이 가장 높고 다음으로 B737-500, B737-900, B737-800 = A321-100/200, A320-100/200, B737-400 그리고 A330-200 순이다. 따라서 비교 항공기 기종 중, 연료 효율이 가장 좋은 기종은 A330-200이라 할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 AEIC 항공 온실가스 배출량 산정 프로그램을 이용하여 국내 14개 공항에 대해 2005년 LTO/non-LTO 운항, 노선별 운항, 기종별 운항에 대한 항공 온실가스 배출량을 산정하였다. 먼저, LTO 총 운항에 대해 산정한 배출량 결

과는 연료소모량은 249,409,620 kg이고 나머지 배출량은 NOx, NO, CO, NO₂, HC, HONO 순으로 배출량이 많았다. 또한 각 공항별로 배출된 배출량을 살펴보면 인천공항이 가장 높았고, 다음으로는 김포공항, 제주공항, 부산공항 순이었다. 배기가스가 많이 배출된 공항의 특성을 살펴보면 모두 국제공항이었다. 즉 인천국제공항은 세계적인 국제공항으로 항공기 이착륙이 빈번하기 때문에 배출량이 가장 컸다.

국내공역에 해당하는 노선에 대한 non-LTO를 산정하였을 때 연료소모량은 259,892,528 kg이고 나머지 배출량은 LTO 운항과 같은순서로 배출량이 많았다. 국제공역에 해당하는 노선에 대한 non-LTO를 산정하였을 때는 연료소모량은 47,514,661,637 kg이고 나머지 배출량은 NOx, NO, NO₂, CO, HONO, HC 순으로 배출량이 많았다. 위에 3개 부분의 운항을 합치면 2005년 국내 공항 14곳에서 운항한 항공기의 총 연료소모량 및 온실가스 배출량을 구할 수 있고 각 부문 당 차지하는 연료소모량 비율은 국내 LTO 부문이 5%, 국내공역 non-LTO 부문이 5%, 국제공역 non-LTO 부문이 90%로 상당히 많은 부분을 차지하였다.

또한 국내 노선별 배출량을 비교했을 때에 연료소모량과 온실가스 배출량은 김포-제주노선, 김포-부산, 제주-부산, 김포-울산, 김포-광주, 김포-여수 순으로 많았다. 이는 운항횟수와 운항거리에 따라 산정된 결과이고 HC에 경우, 다른 배출량의 경향과 다르게 가장 배출량이 많은 노선은 김포-부산노선으로 나타났고 이는 HC 배출효율이 낮은 특정기종에서의 운항횟수가 많아 생긴 현상으로 판명되었다.

본 논문에서는 항공부문에서의 온실가스 배출 감축을 위한 정책도입에 대비하여 해외 소프트웨어 AEIC를 사용하여 국내 시나리오에 맞는 배기가스 산출을 수행하였다.

AEIC를 이용하여 2005년 국내 14개 공항에 대해 LTO, 국내공역 non-LTO, 국제공역 non-LTO, 노선별, 기종별에 대한 배출량을 산정하여 기초 데이터를 구축하였다. 그리고 해당 공항, 노선, 기종별로 비교분석을 수행하였다. 이때 국내공항 LTO 부문, 국내공역 non-LTO, 국제공역 non-LTO에서 각각 차지하는 연료소모량 비율이 5%, 5%, 90%로 상대적으로 국제공역에서 소모하는 연료소모량과 온실가스 배출량이 매우 큰 것으로 나타났다. 현재 항공 온실가스 통계가 국제공역에서 배출되는 온실가스는 고려되지 않고 국내공역에서 배출하는 온실가스에 대해서만 고려되지만, 실제로 국제 상공에서 배출되는 배출량이 상대적으로 매우 크므로 곧 이에 대한 각 국가별 책임 비율, 정책들이 발현될 것으로 판단되며 이에 대한 대비가 필요할 것이다. 비록 본 연구에서는 배출량 산정에 있어서 타 연구결과와의 비교를 위하여 상대적으로 오래된 2005년 데이터에만 국한되어있는 한계점이 있다. 하지만 아직까지 tier3급 배출량산정 프로그램으로 국내에서 연구 분석한 사례가 없고 해외에서도 국내 시나리오에 맞춰서 프로그램을 분석한 사례가 아직 없으므로 향후, 본 연구 결과는 다양한 비교자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(16CTAP-C114866-01)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Climate change 2014 synthesis report summary for policymakers, ipcc: 11-1360000-01137-14, 2015.
- [2] Seoul Air Quality Information [Internet]. Available: <http://cleanair.seoul.go.kr/inform.htm?method=climateEffect02>.
- [3] J. W. Hwang (2016, February). Yonhapnews. [Internet]. Available:<http://www.yonhapnews.co.kr/bulletin/2016/02/10/0200000000AKR20160210102000085.HTML>
- [4] J. E. McCarthy, *Aviation and Climate Change*,

Congressional Research Service, pp. 1-11, 2010.

- [5] Allison Lampert, Valerie Volcovici (2016, February). Reuters. U.N. group agrees to aircraft standards to cut CO2 emissions. [Internet]. Available: <http://mobile.reuters.com/article/idUSKCN0VH1XA>
- [6] H. J. Joo, H. Y. Hwang, B. W. Park, and D. W. Lim, "Aircraft Emission and Fuel Burn Estimation Due to Changes of Payload and Range," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 278-287, Aug. 2015.
- [7] Eurocontrol, Research & SESAR, Base of Aircraft Data [Internet]. Available: <http://www.eurocontrol.int/services/bada>.
- [8] N. Simone : Development of a Rapid Global Aircraft Emissions Estimation Tool with Uncertainty Quantification, Massachusetts Institute of Technology: MA, LAE-2013-002-T, Jan. 2013.
- [9] M. J. Kim, and M. J. Ahn : Estimates and Management measures on Greenhouse gases in Aviation , The Korea Transport Institute, sejong city, ISBN 978-89-5503-290-1, pp. 3-4, 2008.



주 희 진 (Heejin Joo)

2014년 2월 : 세종대학교 항공우주공학과 (공학사)

2014년 9월 ~ 현재 : 세종대학교 항공우주공학과 석사과정

※ 관심분야 : Assessment of Environmental Impacts from Aviation, Solar Aircraft Design, PAV Design



황 호 연 (Hoyon Hwang)

1993년 5월 : 미국 Georgia Institute of Technology 항공우주공학과 (공학박사)

2000년~ 현재 : 세종대학교 항공우주공학과 교수

2012년~현재 : 세종대 부설 항공산업연구소 연구소장

※ 관심분야 : Assessment of Environmental Impacts from Aviation, Solar Aircraft Design, PAV Design



임 동 욱 (Dongwook Lim)

2009년 5월 : 미국 Georgia Institute of Technology 항공우주공학과 (공학박사)

2009년~ 현재 : 미국 Georgia Institute of Technology, Research Engineer II, ASDL(Aerospace Systems Design Lab),
Chief of Air transportation Economics Branch

※ 관심분야 : Assessment of Environmental Impacts from Aviation, Aerospace Systems Design Methodology,
Aircraft Conceptual Design