

비행거리와 적재량 변화에 따른 항공기 온실가스 배출량 및 연료소모량 산정

Aircraft Emission and Fuel Burn Estimation Due to Changes of Payload and Range

주희진¹·황호연^{1*}·박병운¹·임동욱²

¹세종대학교 항공우주공학과

²Georgia Institute of Technology

Hee-jin Joo¹ · Ho-yon Hwang^{1*} · Byung-woon Park¹ · 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 항공기의 배기가스 배출을 줄이고 기후에 관한 항공기의 영향을 완화하는 수단 중 하나로 항공기 배기가스를 산정하고 예측하는 시스템 개발의 필요성이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 영국 Lissys사에서 개발한 Piano-X 소프트웨어를 사용하여 3가지 항공기 급에 대한 다양한 비행거리와 경로에 대해 유사하중의 변화에 따른 항공기 온실가스 배출량을 산정하였다. 다양한 항속거리와 고도에 따른 경제속도, 장거리 순항속도, 최대 운항거리 속도에 대해 연료소모량도 분석하였다.

[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 the development of an aircraft emission estimation and prediction system as one of the ways to reduce aircraft emissions and mitigate the impact of aviation on climate. Hence, in this research, using Piano-X software which was developed by Lissys Co., fuel consumption and emissions for 3 types of aircraft were estimated for different design payloads with various flight distances and flight paths. Fuel burns for economy speed, long range cruise speed, maximum range speed were also investigated with various flight distances and altitudes.

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

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.4.278>



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 31 July 2015; Revised 3 August 2015

Accepted (Publication) 19 August 2015 (30 August 2015)

*Corresponding Author; Ho-Yon Hwang

Tel: +82-2-3408-3773

E-mail: hyhwang@sejong.ac.kr

I. 서론

정부는 2015년 6월 30일 국무회의를 열어 2030년 우리나라 온실가스 감축 목표를 배출 전망치(BAU; business as usual) 대비 37%로 확정하고 이날 유엔에 이 계획안을 제출하였다. 정부는 제조업 위주인 국내 경제구조를 감안해 산업계의 감축량은 배출 전망치 대비 12% 이내로 결정하고 대신 온실가스 배출량이 많은 발전과 수송 부문의 절감을 통해 감축량의 상당 부분을 해결하기로 하였다. 따라서 항공 수송 분야도 감축량 중 상당 부분을 분담해야할 것으로 판단된다.

국제민간항공기구(ICAO; international civil aviation organization)에서는 항공분야에서 배출되는 온실가스의 저감을 위하여 국가별로 매 3년마다 중장기 감축을 위한 국가이행계획을 권고하고 있으나 국내 감축수단들이 계량적으로 분석이 이루어지지 않아 정확한 예상 감축량을 제시하는 프로그램 개발 및 온실가스 발생 예측 모델의 개발이 필요하여 국토교통부에서는 항공안전기술개발사업의 일환으로 항공 온실가스 산정 및 예측시스템을 2014년 10월부터 2017년 5월까지 70억원의 예산으로 개발하고 있다.

국제민간항공기구는 CAEP(committee on aviation environmental protection) 위원회를 통하여 현재 NOx를 비롯한 대기 오염물질을 항공기 엔진 인증을 통하여 규제하고 있으며, 2016년 도입을 목표로 2010년부터 항공기 이산화탄소 인증기준(Aircraft CO2 certification standard)을 개발하고 있다[1]. ICAO는 항공기 제조업체를 규제하는 항공기 이산화탄소 인증기준 이외에도 항공사의 연간 온실가스 배출량을 규제하기 위한 탄소배출권 거래제의 국제적인 기준을 2020년 도입을 목표로 개발 중에 있다. 탄소배출권 거래제는 상대적으로 급격히 성장하고 있는 아시아 태평양 노선을 운항하는 항공사들에게 더 큰 부담이 될 수 있으므로 선제적인 대비가 필요하다(그림 1).

IPCC (intergovernmental panel on climate change)의 “Specific report on aviation and the global atmosphere”에 따르면, 1992년에 항공운송부문이 전체 인위 이산화탄소 배출량 중 2%와 운송부분 중 13%를 차지하였다. 지난 10년 동안 여객수송이 60% 증가하였고 항공 여행은 앞으로 10년에서 15년 동안 매년 약 5%정도 증가될 전망이다[3].

전 세계적으로 본다면, 항공 산업은 온실가스 배출량이 가장 빠르게 증가하는 산업 중 하나이다. 유럽연합(EU) 집행위원회에 따르면, 전 세계의 항공기 온실가스 배출량은 1990년과 2002년 사이에 약 70% 증가했다. 온실가스 감축에 관한 많은 논란 속에서, 만약 온실가스 배출량이 2050년까지 50%에서 80%가 감축되어야만 한다면, 목표 감축량에 도달하기 위해서는 항공기로부터 발생하는 온실가스 배출량이 현저하게 감소되어야 함을 의미한다[4].



그림 1. 세계 항공 교통량 증가 전망치(에어버스사, "세계 시장 예측 2012-2031" [2])

Fig. 1. Global air transportation increase forecast. (Airbus, "Global market forecast 2012-2031" [2])

따라서 본 연구에서는 항공기 배기가스의 산정과 비행 시나리오 설정에 따른 저감효과 분석 시뮬레이션을 통한 항공기 온실가스 배출량을 최소화하여 미래 기후변화와 에너지고갈에 대비하는 것을 연구목표로 한다.

항공 온실가스 산정 관련 해외 연구 현황을 살펴보면 미 연방항공청(FAA; federal aviation administration)은 항공운항으로 소음, 대기오염, 기후변화 등의 환경영향을 종합적으로 평가하기 위한 FAA environmental tool suite를 개발 중에 있으며 [5], 미국 조지아공대(Georgia institute of technology)는 미래의 새 항공기에 의한 fleet level 온실가스 분석이 가능한 GREAT(global regional environmental aviation tradeoff)라는 프로그램을 개발하였다[6]. 해외 항공 온실가스 산정 프로그램 중 가장 진보한 것으로 평가받는 것은 미국 연방항공청(FAA)의 FAA environmental tool suite의 일부로 개발된 AEDT(aviation environmental design tool)와 영국의 Aero2k이다. AEDT는 국가 전체나 전 세계적인 온실가스의 산출량은 상대적으로 정확히 계산하지만 3000ft이하의 SAE 1845문서에 따른 알고리즘을 사용하고 3000ft이상에서는 Eurocontrol의 BADA (base of aircraft data)모델을 사용하여 단일 비행의 경우 그 정확성이 떨어진다는[7]. Aero2k는 지난 10년 동안의 항공기 관련 데이터들을 개선하여 항공기의 연료 소모량과 온실가스 배출량을 측정하도록 개발되었다[8]. Aero2k는 단일 임무형상의 비행에 대해 상대적으로 정확성이 높으나 판매를 하지 않아 본 연구에서는 그 내부에 포함하고 있는 Piano-X 소프트웨어를 구매하여 설계 유상하중과 항속거리, 비행경로에 따른 연료소모량과 온실가스 배출량을 분석하였으며, 속도변화와 고도변화에 따른 연료소모량 변화도 분석하였다.

II. 비행거리와 적재량 변화에 따른 항공기 온실가스 배출량 민감도 분석

2-1 배기가스 배출량 산정

본 연구는 항공기 성능분석 툴인 영국 Lissys사의 Piano-X를 사용하여 항공기 기종을 선정하고 지정된 항속거리에 대해 유상하중 변화에 따른 항공기 온실가스 배출량을 산정하여 민감도 분석을 수행하였다.

먼저, 그림 2에 제시된 SA(single aisle), STA(small twin aisle), LTA(large twin aisle)의 각 그룹을 대표하는 3개 기종을 선정하였다. 이 세 가지 항공기는 국내 항공사에서 운항하는 대표적인 기종이다. 유상하중은 설계유상하중(design payload)을 기준으로 100%, 50%, 그리고 0%로 변화시켰다. Piano-X에서 설계 유상하중은 기종의 표준 좌석수와 승객 당 평균무게(승객 및 화물)의 곱으로 정의된다. 각각의 유상하중에 대해서 항속거리를 변화시키면서 온실가스 배출량을 산출하여 비교분석하였다.

PIANO-X는 사용자가 항공기 임무해석(mission analysis)과 관련하여 조절할 수 있는 다양한 변수들을 제공하고 있다. 예를 들어, 해당 항공기 모델의 항력 및 추력연료소모율(TSFC; thrust specific fuel consumption) 값 등 공기 역학 및 엔진 효율 관련 변수들과 상승 및 순항 시의 속도, 고도 등을 쉽게 변경할 수 있다. 본 해석에 있어서는 Piano-X의 각 모델별 기본 설정값들을 사용하였다.

그림 3은 SA급 항공기의 유상하중-항속거리 도표(payload-range diagram)상에서 해석에 사용된 조건들을 표시하였다.

상승 시 속도는 FAA 규정에 따라 10,000 ft 까지 250 knot로 제한되고, 10,000 ft에서 일정한 보정대기속도 (calibrated airspeed)로 가속한 후, 속도를 유지하며 상승하고, 주어진 천이 마하수(transition mach number)에 도달 후에는 해당 마하수를 유지하며 순항고도까지 상승한다. 순항 속도는 LRC(long range cruise speed)를 유지한다. LRC는 MRC(maximum range cruise speed)에서 1%의 SAR(specific air range)를 감소시키는 만큼 증가시키는 속도이다. 순항고도는 2,000 ft 구간별로 미리 정해진 고도 값들에 따라 step cruise를 한다. 그림 4는 위에서 기술한 임무형상(mission profile)에 따른 SA급 항공기의 설계 임무 최대 운항거리에 따른 고도 변화를 나타낸다.



그림 2. SA, STA, LTA에 해당 하는 항공기 좌석 형태
 Fig. 2. Aircraft seat arrangements corresponding to an SA, an STA and an LTA class aircraft.

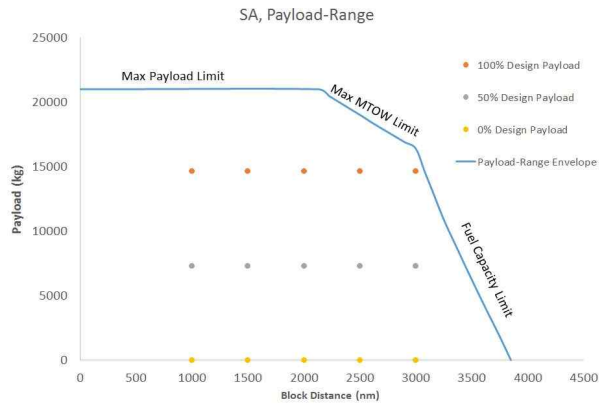


그림 3. SA급 항공기의 유상하중-항속거리 다이어그램
 Fig. 3. Payload-range diagram for the representative SA aircraft.

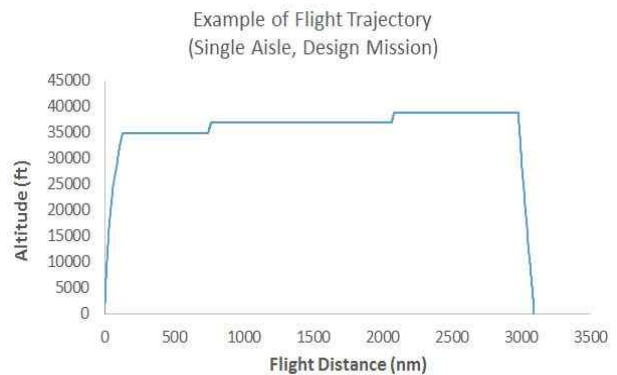


그림 4. SA 항공기의 설계임무 최대 운항거리에 따른 고도 변화
 Fig. 4. Altitude changes of the SA aircraft for the design mission range.

2-2 배기가스 배출량 산정 결과

Piano-X를 사용하여 세 가지 기종에 대한 세 가지 설계 유상하중 조건에 대한 항속거리 변화에 따른 항공기 온실가스 배출량을 산정하였다. 각 항공기 별로 상승(climb), 순항(cruise), 하강(descend)과 이 구간을 모두 포함하는 전 구간(block)의 연료소모량(fuel burn)과 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 등 온실가스 배출량을 산출하였다. Piano-X를 사용해 배출량을 산정할 때 따로 CO₂ 값을 산정하지 않는 것은 연료소모량을 이용하여 CO₂ 값을 계산할 수 있기 때문이다. 1 kg의 jet fuel은 3.16 kg의 CO₂를 발생시킨다. CO₂를 제외한 배기가스 배출량은 엔진 배기가스 배출량의 대표적인 자료인 EASA(european aviation safety agency)의 ICAO aircraft engine emissions databank에 의해 계산된다. 이 때 공전(idle), 접근(approach), 상승(climbout), 이륙(takeoff)으로 대표되는 4가지 해수면 조건을 사용하고 이외의 임의의 비행조건에서는 Boeing fuel flow 방법을 사용하여 값을 보정한다[9].

1) Block emission 민감도

전체 성능(block performance)부분에서 보면 block fuel과 block NOx는 예상대로 설계유상하중이 0%에서 50%, 100%로 증가함에 따라 증가하였고, 항속거리가 증가할수록 연료소모량이 많은 것을 그림 5~그림 7에서 확인할 수 있다. 온실가스 배출량은 유상하중보다 항속거리에 대해 더 큰 민감도를 보였다.

유상하중 변화에 따른 block fuel과 block NOx는 상대적으로 큰 민감도를 보이는 반면에 block CO는 차이가 작게 나타났다. 그림 5와 그림 6의 block CO 그래프를 살펴보면 설계유상하중이 0%일 때, CO를 가장 많이 배출하여 다른 배기가스 배출량 그래프와 반대의 경향을 나타내었다.

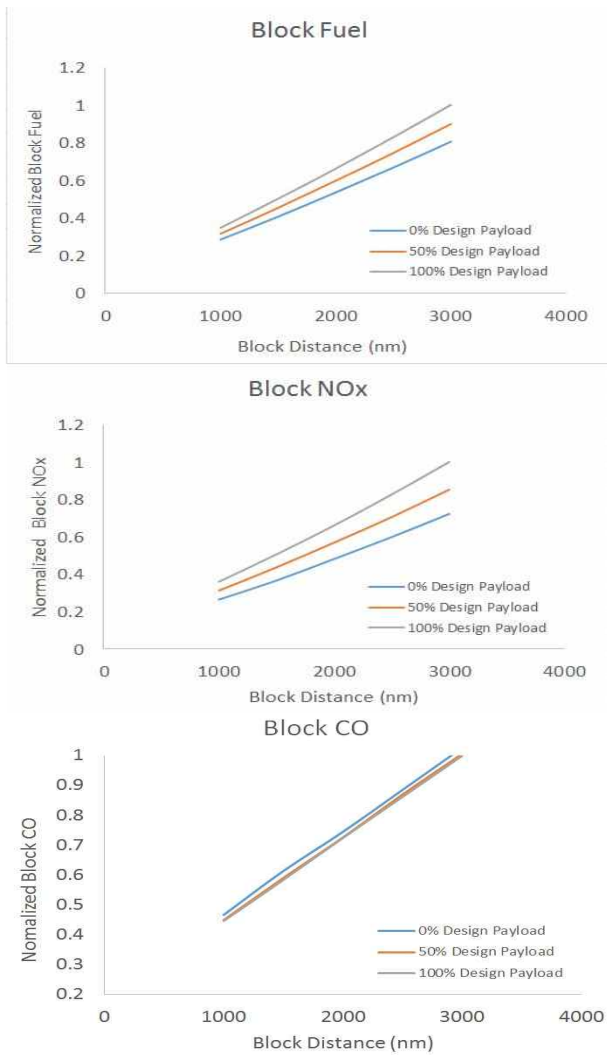


그림 5. SA급 항공기에 대한 연료소모량과 NOx, CO 배출량
Fig. 5. Fuel burn and NOx, CO emissions for the SA class aircraft.

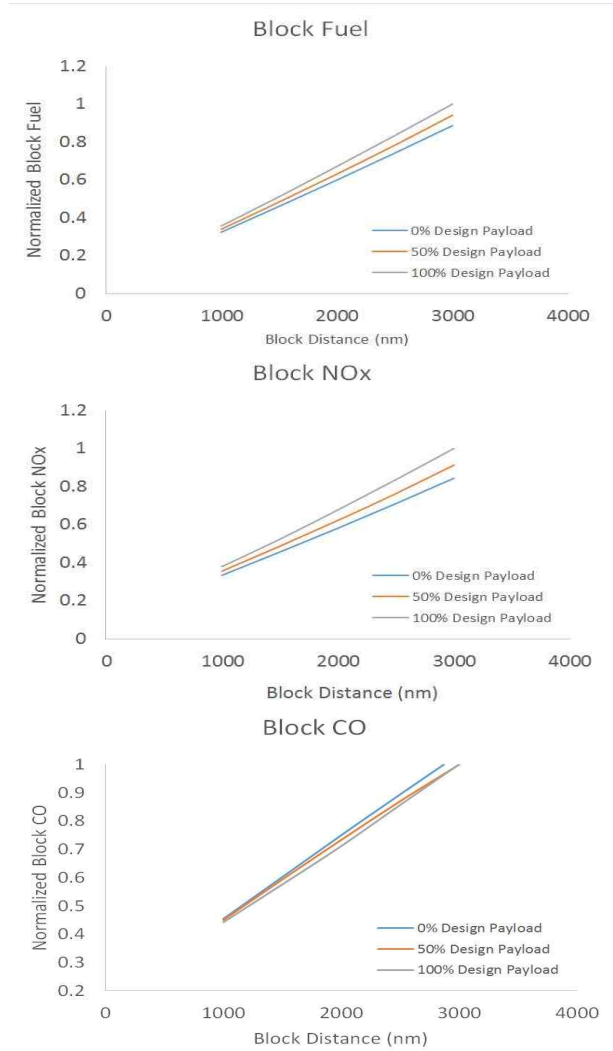


그림 6. STA급 항공기에 대한 연료소모량과 NOx, CO 배출량
Fig. 6. Fuel burn and NOx, CO emissions for the SA class aircraft.

이는 ICAO EI(emission index)로 배기가스 배출량을 예측할 시 엔진 추력의 변화에 따라 NOx와 CO 배출량 값이 달라지기 때문이다(그림 8). 즉 NOx의 경우에는 엔진 추력 줄면서 단위 연료소모당 NOx의 배출량이 준다. 따라서 엔진 추력이 줄면 연료소모량도 줄기 때문에 전체적인 NOx 배출량이 확실하게 줄어들게 된다.

반면에 CO의 EI 값은 엔진 추력이 연속적으로 최대한 take-off와 climbout 구간에서는 아주 작고, 그 이하일 때는 증가한다. 따라서 순항구간에서는 상승구간보다 적은 추력을 사용한다. 따라서 유상하중이 적은 경우에 적은 추력을 사용하게 되고, 이때 단위 연료소모당 CO의 증가가 늘어나는 효과와 연료소모가 줄어드는 효과가 서로 상쇄하게 되는데 어떤 효과가 더 크냐에 따라 전체 CO의 배출량이 증가할 수도 감소할 수도 있다.

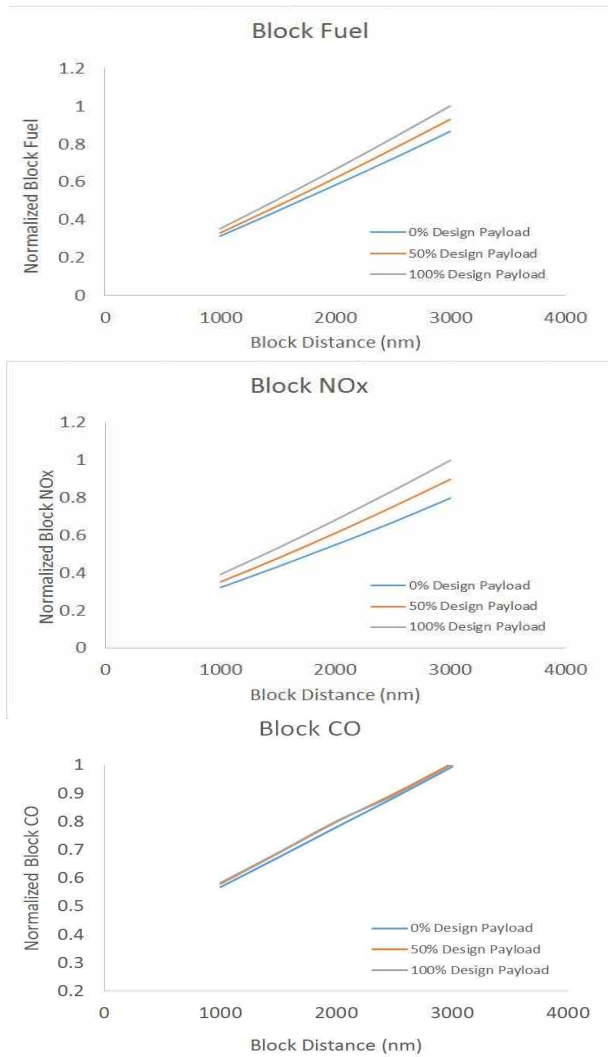


그림 7. LTA급 항공기에 대한 연료소모량과 NOx, CO 배출량
 Fig. 7. Fuel burn and NOx, CO emissions for the SA class aircraft.

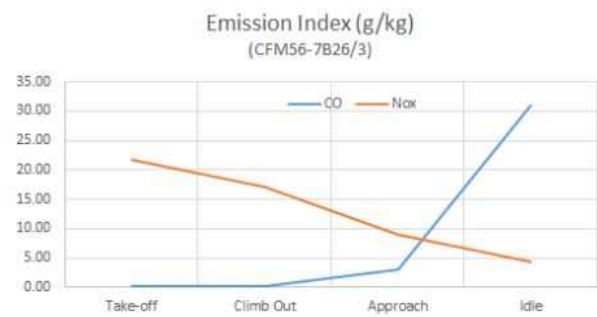


그림 8. 엔진 추력에 대한 CO와 NOx의 배출지수
 Fig. 8. Emission indices for the engine power of CO and NOx.

2) 비행구간별 배출량 산정

그림 9는 SA, STA, LTA급 항공기의 항속거리를 증가시키면서 비행구간별 세부 연료소모량을 산출한 결과를 나타낸 것이다. SA급 항공기 그래프를 보면, 1000 nm(nautical mile) 이상의 항속거리의 경우 순항 시 소모되는 연료가 가장 많고, 운항거리가 늘어남에 따라 그 비중 역시 증가한다. 이와 같은 경향은 STA, LTA급 항공기에서도 공통적으로 관찰되었다.

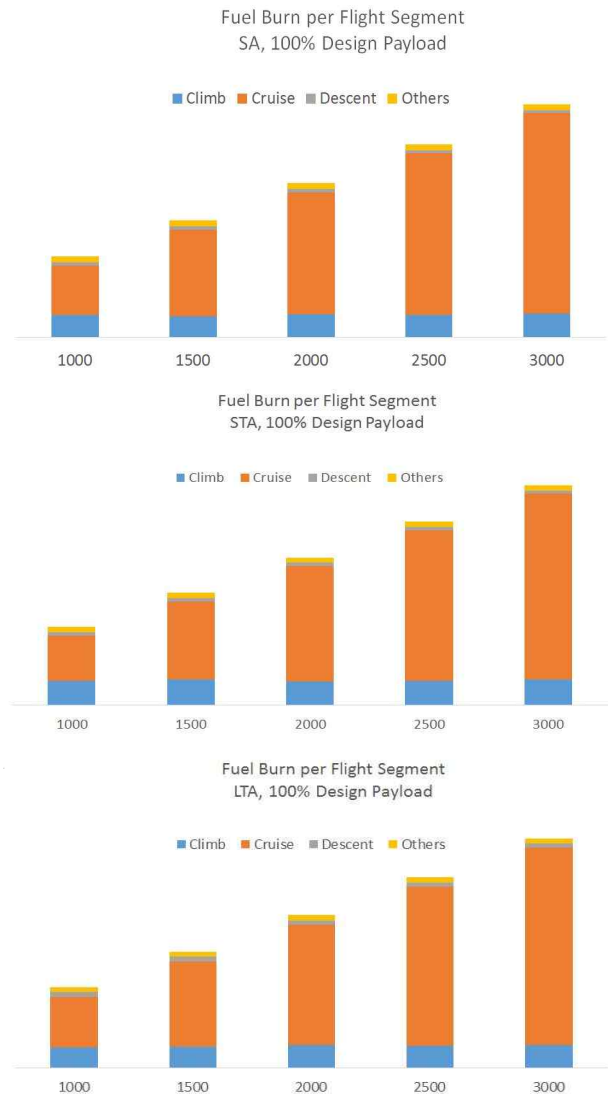


그림 9. SA, STA, LTA급 항공기의 항속거리 증가에 따른 상승, 순항, 하강 비행 구간의 연료소모량
 Fig. 9. Fuel burn segments of climb, cruise, descent due to the increase of range for the SA, STA, LTA class aircraft.

III. 연료소모량 감축 효과

3-1 속도변화에 따른 연료소모량 감축 효과

1) 순항속도 선정 (Cruise speed selection)

Piano-X에서는 각 기종에 대한 비행 시나리오를 설정할 때 원하는 순항속도 값을 임의로 선정할 수 있을 뿐 아니라 각 기종에 대한 경제속도(economy speed), 장거리를 비행할 수 있는 순항속도(LRC; long range cruise speed), 최대거리 순항속도, 연료 소모율, 온실가스 배출량 등을 구할 수 있다.

항공기 순항구간에서는 여러 가지 이론적인 속도가 있다. 첫째로 최대거리 순항속도(MRC; maximum range cruise speed)는 단위연료소모당 운항거리(fuel mileage)가 최대인 속도이다. 즉, 연료소모량이 가장 적은 속도이다. Piano-X 프로그램에서 MRC를 별도로 구해주지는 않지만 프로그램 해석을 통해 단위 연료소모당 운항거리가 최대인 MRC를 구할 수 있다.

다음으로 LRC는 MRC로 비행하는 최대 순항거리의 99% 거리를 날아갈 수 있는 속도이다. 실제로는 MRC 속도는 잘 사용하지 않으며 MRC보다 단위연료소모당 최대 운항거리의 1% 감소, 속도는 2~4% 증가하는 LRC 속도를 주로 사용하고 있다.

그림 10은 순항 시의 정의되는 비행속도를 나타낸 것이다. 경제속도(economy speed)는 시간비용과 연료비용의 합이 최소가 되는 즉, 최소 운용비용이 드는 속도이다. 비행시간이 길어질수록 증가하는 비용, 예를 들어, 객실 운영 비용, 운항승무원의 비행수당, 정비관련 비용, 항공기 임차 비용도 고려한 것으로 단순히 연료소모량이 최소가 되는 MRC와는 다른 개념이다. 항공기의 경제속도는 비용지수(cost index)에 따라 계산된다[10]. 비용지수 C_1 는 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{C_{Time}}{C_{Fuel}} \quad (1)$$

여기서 C_{Time} 은 시간관련 비용(비행시간 당 달러), C_{Fuel} 은 연료비용(파운드 당 센트)이다.

C_1 가 0에 가까우면 시간관련 비용 대비 연료비용이 상대적으로 크다는 것으로 MRC 속도로 비행하여 연료비용이 최소가 된다. 반면에 C_1 값이 커지면 연료비용 대비 시간관련 비용이 상대적으로 큰 것으로 최대 비행속도를 내서 시간관련 비용은 줄이고 연료비용을 증가시킨다.

2) 순항속도 변화에 따른 배출량 산정

순항속도 변화에 따른 연료소모량 변화를 분석하기 위해 SA, LTA에 해당하는 항공기 기종을 선정하였다. 각각의 항공기 기종에 대하여 고도 35,000 ft로 고정한 후, SA 기종은 항속거리 1000 nm과 2000 nm에 대해, LTA 기종은 2,000 nm과 4,000 nm 각각에 대해 순항 마하수 변화에 따른 연료소모량을 산출하였다(표 1, 그림 11-12).

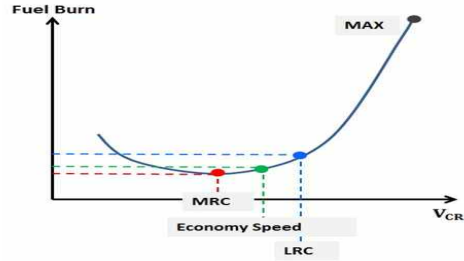


그림 10. 순항 시 여러 가지 비행 속도
Fig. 10. Various aircraft speed during cruise.

그림 11을 보면 SA에 해당하는 항공기 기종에 항속거리 1,000 nm, 2,000 nm에 대하여 순항 마하수 변화에 대한 연료소모량을 나타내고 있다. 먼저, 1,000 nm 일 때 MRC 속도는 0.72, 2,000 nm 일 때 MRC 속도는 0.73으로 속도 차이는 크게 나지 않았다. 경제속도는 항속거리 1,000 nm의 경우 MRC 속도와의 값의 차이가 0.005인데 반해 2,000 nm의 경우 값의 차이가 0.02로 항속거리가 늘어남에 따라 경제속도와 MRC 속도의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 장거리일수록 속도를 낮춰서 연료소모를 줄이는 것보다 속도를 더 높여 시간을 줄이는 것이 비용절감에 유리한 것으로 판단된다. 또한 장거리 운항일수록 MRC 속도와 max 속도의 연료소모량 차이도 더 커진다.

LTA에 해당하는 항공기 기종에 대한 그림 12도 같은 결과를 나타내었다.

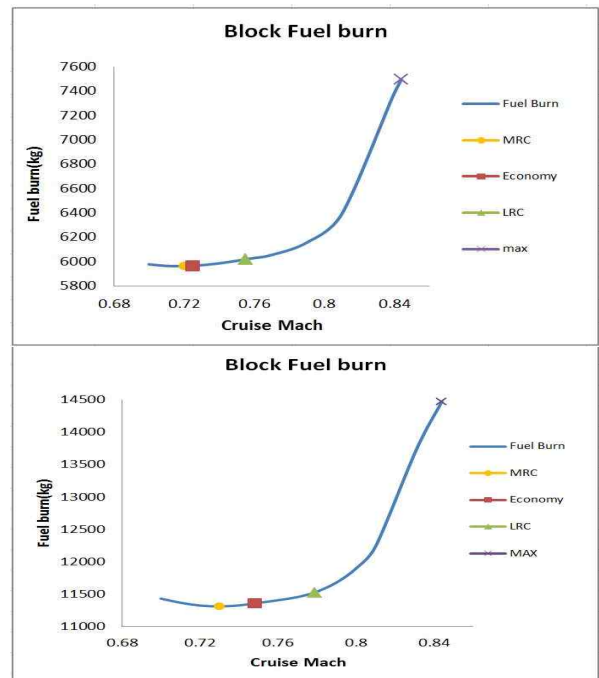


그림 11. SA급 항공기의 순항속도 변화에 따른 연료소모량(1,000 nm·2,000 nm, 35,000 ft 고정)
Fig. 11. Fuel burn of the SA class aircraft due to the changes in cruise speeds. (1,000 nm·2,000 nm, 35,000 ft)

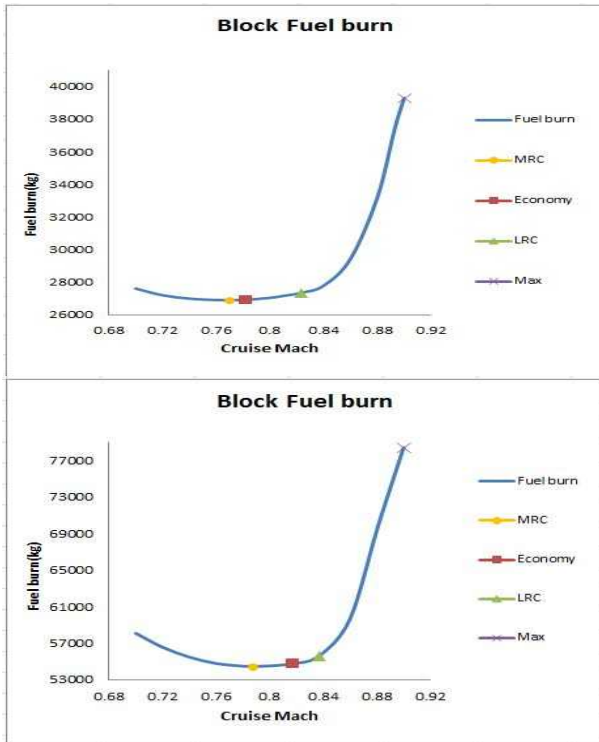


그림 12. LTA급 항공기 순항속도 변화에 따른 연료소모량 (2,000 nm-4,000 nm, 35,000 ft 고정)
 Fig. 12. Fuel burn of the LTA class aircraft due to the changes in cruise speeds. (2,000 nm-4,000 nm, 35,000 ft)

표 1. 항공기 종류에 대한 항속거리 변화에 따른 여러 가지 속도
 Table 1. Various cruise speeds for different aircraft classes due to changes in mission distances.

항공기 종류	SA		LTA	
	1,000nm	2,000nm	2,000nm	4,000nm
항속거리	1,000nm	2,000nm	2,000nm	4,000nm
MRC 속도	0.72	0.73	0.77	0.79
경제 속도	0.725	0.75	0.78	0.82
LRC 속도	0.755	0.78	0.82	0.84
최대 속도	0.84	0.84	0.90	0.90

3-2 순항고도 변화에 따른 연료소모량 감축 효과

1) SA급 항공기의 고도 변화에 따른 연료소모량 산정

앞 절에서 순항속도 변화에 따른 연료소모량을 분석하였고 여기서는 속도와 항속거리를 고정하고 순항고도를 변화시켰을 때 연료소모량이 어떻게 변화하는지를 분석하였다.

먼저 SA와 LTA급 항공기 기종에 대해 항속거리 1,000 nm, 2,000 nm 두 경우에 대해 속도를 MRC와 LRC로 고정하고 고도를 31,000 ft, 33,000 ft, 35,000 ft로 변화시키면서 연료소모량 변화를 분석하였다(표 2, 표 3).

그림 13은 SA 급 항공기에 1,000 nm, 2,000 nm 항속거리에

따른 고도를 나타내는 그래프이다. 순항고도까지 지속적으로 상승하고 순항 중 고도를 높이는 step cruise 기능은 사용하지 않았다. 항공 교통 관제사가 날씨나 다른 항공기와의 간섭 등의 이유로 고도를 계단식으로 높이면서 날지 못하게 하는 상황을 가정한 것이다.

그림 14는 항속거리 1,000 nm, MRC 속도와 LRC 속도로 고정했을 때 고도별 연료소모량 변화를 나타낸 그래프이다. MRC 속도, LRC 속도 모두에 대해 순항 고도가 31,000 ft일 때 가장 많은 연료를 소모했고 순항 고도가 35,000 ft일 때 가장 적은 연료를 소모하는 것을 확인할 수 있다. 이를 연료 소모량이 가장 큰 31,000 ft를 기준(0)으로 구체적인 수치로 표 2에 나타내었다. MRC 속도로 비행할 때 보다 LRC 속도로 비행할 때 각 고도별 연료 소모량의 차이가 더 적게 감소한 것을 확인할 수 있다. 항속거리만 2,000 nm로 변화시켜 그 결과를 그림 15에 나타내었고 1,000 nm일 경우와 같은 경향을 확인할 수 있다.

표 2. SA급 항공기의 각 고도별 연료소모량 차이(31,000 ft를 기준)

Table 2. Fuel burn difference for each altitude of the SA class aircraft.

		연료소모량 차이(kg)			
		1000 nm		2000 nm	
순항고도	순항속도	MRC	LRC	MRC	LRC
31,000 ft		0	0	0	0
33,000 ft		-189.8	-130.5	-419.3	-333.1
35,000 ft		-328.5	-243.7	-712.1	-541

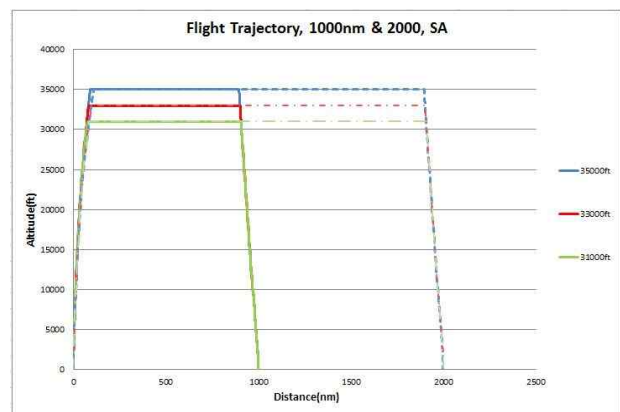


그림 13. SA 급 항공기의 비행 궤적(1000, 2000 nm 거리)
 Fig. 13. Flight trajectory of the SA class aircraft. (1000, 2000 nm range)

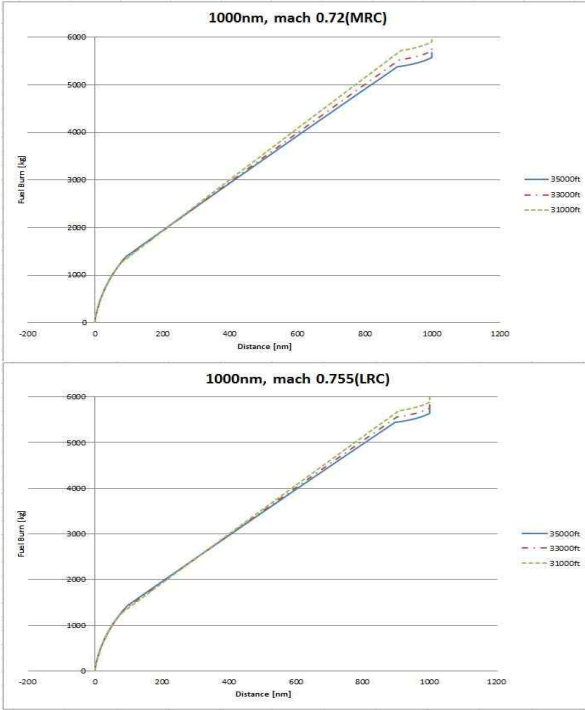


그림 14. SA급 항공기의 고도 변화에 따른 연료소모량(1,000 nm, MRC·LRC 속도로 고정)
 Fig. 14. Fuel burn due to the changes in altitude for the SA class aircraft. (1,000 nm, MRC·LRC Speed)

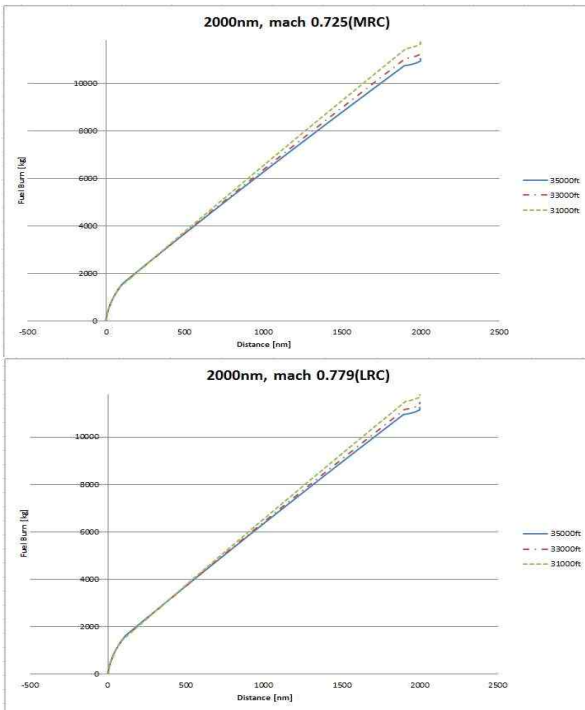


그림 15. SA급 항공기의 고도 변화에 따른 연료소모량(2,000 nm, MRC·LRC 속도로 고정)
 Fig. 15. Fuel burn due to the changes in altitude for the SA class aircraft. (2,000 nm, MRC·LRC Speed)

2) LTA에 해당하는 항공기 고도 변화에 따른 배출량 산정

그림 16은 LTA급 항공기의 2,000 nm, 4,000 nm 항속거리에 따른 고도를 나타내는 그래프이다. SA급 항공기와 마찬가지로 step cruise는 고려하지 않고 계산하였다.

그림 17은 항속거리 2,000 nm 일 때, LTA급 항공기가 MRC 속도와 LRC 속도로 비행 시 고도별 연료소모량 변화를 나타낸 그래프이다. SA급 항공기와 마찬가지로 MRC 속도, LRC 속도 모두에 대해 순항 고도가 31,000 ft일 때 가장 많은 연료를 소모했고 순항 고도가 35,000 ft일 때 가장 적은 연료를 소모하는 것을 확인할 수 있다.

반면에 표 3에 나타낸 것과 같이 SA급 항공기와는 다르게 LRC 속도로 비행 시 보다 MRC 속도로 비행 시 각 고도별 연료 소모량의 차이가 적게 감소하였다. 항속거리만 4,000 nm로 변화시켜 그 결과를 그림 18에 나타내었고 2,000 nm일 경우와 같은 경향을 확인할 수 있다.

표 3. LTA급 항공기의 고도별 연료소모량 차이(31,000 ft를 기준)
 Table 3. Fuel burn difference for each altitude for the LTA class aircraft. (31,000 ft reference)

항속거리		연료소모량 차이(kg)			
		2000 nm		4000 nm	
순항고도	순항속도	MRC	LRC	MRC	LRC
31,000 ft		0	0	0	0
33,000 ft		-1,168.5	-1,338.8	-2,354.7	-2,825.6
35,000 ft		-2,031.3	-2,488.7	-3,980.3	-5,094.9

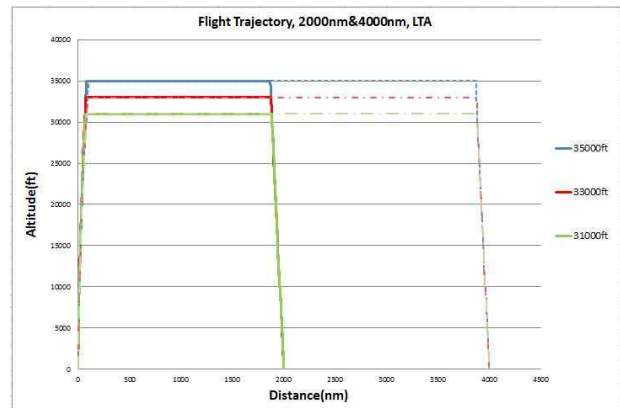


그림 16. LTA급 항공기의 비행 궤적 (2000, 4000nm 거리)
 Fig. 16. Flight trajectory of the LTA class aircraft. (2,000, 4,000 nm range)

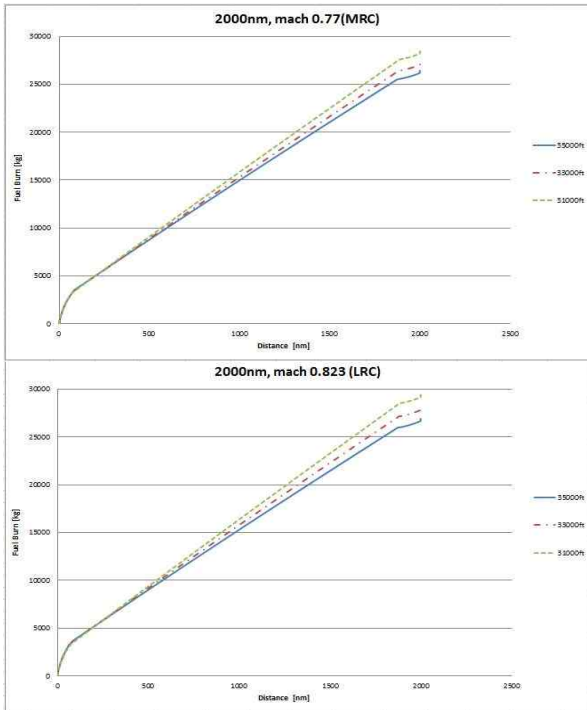


그림 17. LTA급 항공기의 고도 변화에 따른 연료소모량(2,000 nm, MRC·LRC 속도로 고정)
 Fig. 17. Fuel burn due to the changes in altitude for the LTA class aircraft. (2,000 nm, MRC·LRC Speed)

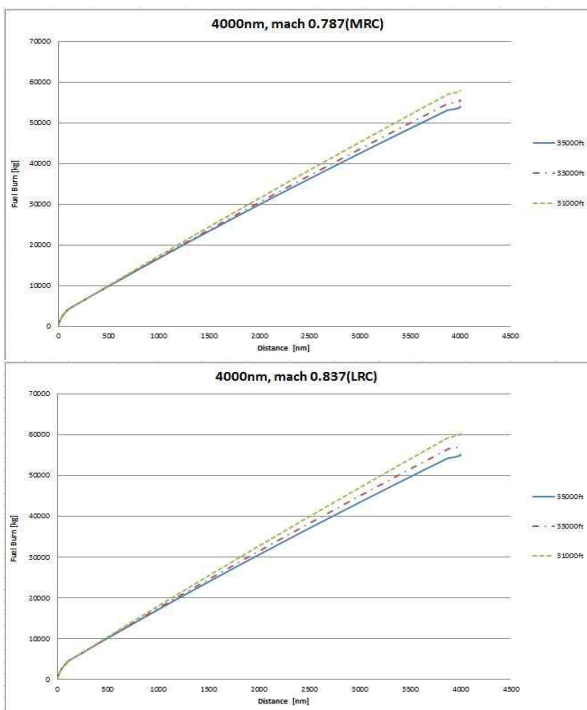


그림 18. LTA급 항공기의 고도 변화에 따른 연료소모량(4,000 nm, MRC·LRC 속도로 고정)
 Fig. 18. Fuel burn due to the changes in altitude for the LTA class aircraft. (4,000 nm, MRC·LRC Speed)

IV. 결 론

본 연구에서는 항공 온실가스 산정 및 예측 시스템의 효율적인 개발을 위해 해외 항공기 온실가스 산정 및 성능해석 프로그램인 Piano-X를 사용하여 여러 항공기 급에 대해 비행거리와 적재량에 따른 항공기 온실가스 배출량 민감도와 순항속도와 고도변화에 따른 연료소모량 변화를 분석하였다.

비행거리와 적재량에 따른 배출가스 민감도에서 항속거리가 1,000 nm일 때, 이륙무게 대비 연료 소모량이 가장 적은 항공기 기종은 LTA급의 대표 기종이었고, 가장 큰 항공기 기종은 SA급의 대표 기종이었다. 연료소모량에 대해 상승, 순항, 하강 구간으로 세부 구분했을 때 순항구간의 항속거리와 시간이 가장 크기 때문에 연료 소모량이 가장 컸다. 본 연구 결과를 통해 유상하중에 대한 민감도보다 항속거리에 대한 배기가스 민감도가 훨씬 크다는 것을 확인할 수 있었다.

또한 속도변화에 따른 연료소모량 변화는 항속거리가 짧을 수록 순항 속도가 최소 연료소모량을 내는 속도인 MRC 속도에 가까울 때 비용절감이 최대인 반면 항속거리가 길어질수록 경제속도는 MRC 속도와 멀어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 장거리일수록 시간을 절약하는 것이 비용절감에는 더 효과적인 것을 알 수 있었다. 또한, 속도와 항속거리를 고정시키고 고도 변화시켰을 때 SA급 항공기의 경우에는 MRC 속도일 때의 각 고도별 연료 소모량의 차이보다 LRC 속도일 때의 각 고도별 연료 소모량 변화의 차이가 작은 것으로 나타났다. 반면에 LTA급 항공기의 경우 SA급 항공기와는 반대의 경향을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 국가 R&D 사업인 “항공 온실가스 산정 및 예측시스템 개발” 과제의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

[1] ICAO, ICAO Environmental Meeting Commits To A CO2 Standard (2010, February). *International Civil Aviation Organization* [Online]. Available: <http://icaopressroom.wordpress.com/2010/02/19/icao-environmental-meeting-commits-to-a-co2-standard>

[2] Airbus: Global Market Forecast 2012-2031, AIRBUS S.A.S. 31707 Blagnac Cedex, France, PEFC 10-31-1270, 2012.

[3] J. E. Penner, D. H. Lister, D. J. Griggs, D. J. Dokken, and M. McFarland: Special Report Aviation and the Global Atmosphere, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate

- Change), ISBN: 92-9169-, 1999.
- [4] J. E. McCarthy, “Aviation and Climate Change”, *Specialist in Environmental Policy, Congressional Research Service*, 7-5700, Jan. 2010.
- [5] R. Cointin, “Aviation Environmental Tools Suite Overview and Integration”, Federal Aviation Administration, *Aviation Environmental Tools Colloquium*, Dec 2010.
- [6] M. Kirby, K. Becker, S. Isley, G. Burdette, and D. Mavris, “Development of an Interactive Capability to Tradeoff New Technologies and Future Aircraft to Reduce Aviation Environmental Impacts”, in *Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. Vol.4, Nice: France, September 2010
- [7] K. Jonathan, A. Meghan, B. Eric, H. Andrew, S.J. Hwang, M. Andrew, S. David, S. G. Barberio, D. Eric, Y. Michael, H. Clifford and M. Jim, *Aviation Environmental Design Tool(AEDT) Technical Manual Version 2a*, U.S. Department of Transportation and FAA(Federal Aviation Administration), DOT-VNTSC-FAA-12-09, Jan. 2014
- [8] C.J. Eysers, P. Norman, J. Middle, M. Plohr, S. Michot, K. Atkinson, and R. A. Christou, “AERO2k Global Aviation Emissions Inventories for 2002 and 2025”, QinetiQ, Cody Technology Park, Farnborough, Hampshire, GU140LX, QinetiQ/04/001113, December 2004
- [9] Lissys : PIANOX User’s Guide, PP. 4, 2008
- [10] Airbus: Getting to grips with Cost Index, 2002.



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



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, Vibration Control



박 병 운 (Byungwoon Park)

2008년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학박사)
 2012년 9월 ~ 현재 : 세종대학교 항공우주공학과 조교수
 ※관심분야 : DGPS, WADGPS, RTK, Network RTK, GPS 응용



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