

論文

항적자료를 활용한 항공기 연료 소모량 추정 및 정확도 분석*

박장훈**, 구성관***, 백호중****

Estimation of Flight Fuel Consumption Based on Flight Track Data and Its Accuracy Analysis*

Jang-Hoon Park**, Sung-Kwan Ku***, Ho-Jong Baik****

ABSTRACT

As global warming becoming an environmentally serious issue, more attention is drawn to fuel consumption which is the direct source of green house gas emission. The fuel consumption by aircraft operation is not an exception. Motivated by the societal and environmental context, this paper explains a method for estimation of aircraft fuel consumed during their flights as well as the computational process using real flight track data. Applying so-called 'Total Energy Model' along with aircraft specific parameters provided in EUROCONTROL's Base of Aircraft Data (BADA) to aircraft radar track data, we estimate fuel consumption of individual aircraft flown between Gimpo and Jeju airports. We then assess the estimation accuracy by comparing the estimated fuel consumption with the actual one collected from an airline. The computational results are quite encouraging in that the method is able to estimate the actual fuel consumption within $\pm 6\sim 11\%$ of error margin. The limitations and possible enhancements of the method are also discussed.

Key Words : Estimation of flight fuel consumption(비행중 연료소모량 추정), Estimation Accuracy(추정 정확도), EUROCONTROL BADA, GHG emission(탄소 배출), IPCC Emission Tier(IPCC 배출물질 산정 수준)

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 꾸준한 증가세를 보여 온 우리나라 항공교통수요는 작년 2013년 한 해 동안 총 7334만 명의 국내외 승객을 수송함으로써, 항공교통은 우리나라를 세계로 연결하는 21세기 국제화시대의 주도

적인 교통수단으로 자리매김하고 있다. 하지만, 북한과 대치하고 있는 국가안보적 상황과 군 작전 공역으로 인한 공간적 제약으로 민간항공기가 실제로 운항할 수 있는 항로는 매우 제한된 공역에서 설정되어 운영되고 있다. 제한된 공역에서 항공교통수요의 증가는 항공기 지연을 증가시키는 주요 원인이 되고 있다. 이러한 항공기 지연은 항공사 운영비용 상승, 여객의 시간비용 증가로 이어져 궁극적으로는 국가적 손실을 초래하고 있으며, 적절한 대응방안이 마련되지 않는다면 이러한 현상은 더욱 가중될 전망이다.

정부기관에서는 이 같은 현실적 문제점을 파악하고, 이에 대한 대비책을 시행 중에 있다. 예컨대, 최근에 실시하고 있는 대표적인 대비책에는, 항공기의 첨단화된 운항장비 기능을 적극적으로 활용할 수 있는 성능기반항행(Performance Based Navigation, PBN) 개념에 기초해서 항로 재설계,

2014년 10월 14일 접수 ~ 2014년 12월 20일 심사완료
논문심사일 (2014.12.17, 1차)

* 본 연구는 박장훈 석사학위논문(2014) 일부를 수정·보완하여 수행하였음.

** 한국항공대학교 대학원 항공교통물류학과

*** 한서대학교 항공학부 항공레저산업학과

**** 한국항공대학교 항공교통물류우주법학부

연락처, E-mail : hbaik@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

새로운 운항절차의 도입 등이 있으며, 항공기 운항 효율성 향상에 많은 노력을 기울이고 있음을 알 수 있다. 이러한 노력에 따른 개선효과를 객관적으로 평가하는 작업은 여러 모로 의미 있는 과제이다.

일반적으로 새로운 절차 및 첨단 항법 등의 도입에 따른 항공기 운항 효율성의 개선효과 산정에는 비행시간 (또는 비행 속도)과 비행 거리가 주요 평가지표(Performance Metric)로써 사용되고 있다. 하지만 이러한 지표들은 간단하면서도 정량적으로 편익을 산정할 수 있다는 장점이 있는 반면, 항공기 연료 소모량과 같이 항공기 기종에 따른 운영효율성의 차이를 정확하게 반영하지 못한다는 단점을 지닌다.

항공기 연료 소모량은 항공기 내부 장비의 구동 및 기체 이동을 위한 추력(Thrust) 발생을 위해 소모되는 연료량으로, 일반적으로 비행고도, 비행속도, 비행거리(또는 비행시간)와 상관관계가 있다. 즉, 연료 소모량은 각 항공편별로 항공기 고유의 운항효율성(Aircraft Performance), 출·도착 공항간 비행거리, 비행속도에 비례하며, 비행고도와 밀접한 관계가 있다. 또한 연료 소모량은 공역운영의 효율성(Airspace Performance)에 따른 항공기 지연상황을 동시에 반영할 수 있는, 보다 포괄적인 항공기 운항 효율성 평가지표로 받아들여지고 있다. 아울러, 항공기의 연료 소모량의 산정은 순수 경제적인 편익과 더불어 환경적인 요인까지 편익 대상으로 포함시킬 수 있다는 장점이 있다.

세계적인 기후변화에 대처하기 위해 ICAO Committee on Aviation Environmental Protection(CAEP)[1,2], UN 산하의 United Nations Framework Convention on Climate Change(UNFCCC), Intergovernmental Panel of Climate Change(IPCC) 등 환경관련 국제기구는 기후변화의 주요 원인인 탄소 배출에 대한 각국의 산업별 규제 및 저감 방법을 권고 하고 있다. 항공 산업 역시 규제대상 산업으로, 항공기 엔진으로부터 발생하는 탄소가스량의 산정 및 향후 감소를 위한 대책마련이 요구되고 있다. 일반적으로 비행 중에 항공기로부터 발생하는 탄소가스 배출량은 비행을 위해 소모된 항공기 연료량과 직접적인 연관이 있기 때문에 정확한 항공기 연료 소모량 산정은 그 중요성이 더욱 부각되고 있다.

실무적으로 가장 정확한 항공기 연료 소모량 측정 방법은 각 항공기로부터 수집되는 각 항공사의 실제 연료 소모량 정보를 조사하는 방법이라 할 수 있다. 그러나 일반적으로 연료 소모량은 항공사의 수익과 직접적인 연관이 있는 내부 자료로서

조사에 한계가 있으며, 또한 이와 같은 방법으로 모든 항공사 대상의 전수조사가 이루어지지 않는 한 우리나라 국가 전체 항공기의 연료 소모량을 추정하는 것은 어려움이 있다.

항적 자료는 레이더 상에 나타난 항공기의 움직임 추적, 기록한 자료로써 보통 레이더가 항공기를 포착하는 주기마다 항공기의 위치(위도, 경도, 고도)와 시간, 속도 정보를 기록하고 있다. 아울러, 2차 감시레이더(Secondary Surveillance Radar, SSR) 장비를 복합적으로 활용함으로써 항공기 기종, 호출부호와 같은 부수적인 정보들을 포함한 항공기 관련 정보를 함께 제공하고 있기 때문에, 이를 활용한다면, 항공기의 연료 소모량 추정이 가능하다. 비록 우리나라에서 항적 자료가 보안자료로 취급되어 일반적으로 사용하기 어려운 것은 사실이나, 국가 항공정책 입안 및 공역 운영효율성 평가를 위한 항적 자료의 제한적 사용은 가능한 상황이다. 이 같은 상황에서 항적 자료는 앞서 설명된(항공사 연료 소모량 자료의 취득이 어려운) 현실적 한계를 극복하고 항공기의 연료 소모량을 추정할 수 있는 가장 효과적인 자료로 활용될 수 있다.

이러한 현실적 배경에서 출발한 본 연구의 주요 목적은 1)항적 자료 기반의 개별 항공기 연료 소모량 추정과, 2)추정 연료 소모량과 실제 연료 소모량 자료의 비교를 통한 추정치의 정확성 분석, 두 가지로 요약된다.

1.2 기존 문헌 고찰

1.2.1. 연료 소모량

항공기의 연료 소모량 추정과 관련된 기존 연구는 비교적 다양한 사례를 찾아 볼 수 있다. Patterson(2009)은 공항에서 항공기의 연료 소모량과 배출물질 산정이 국제적으로 ICAO의 Landing and Take-Off(LTO) Cycle을 기준으로 하는 time in mode방법으로 이루어지지만, 실제로는 ICAO time in mode 방법에 의해 추정한 연료 소모량과 배출 물질의 양이 실제로 소모된 연료 소모량 및 배출물질의 양보다 과다 추정되는 경향이 있음을 언급한 바 있다[3]. Chatterji(2011)는 유럽의 항공연구기관인 EUROCONTROL이 제공하는 Base of Aircraft Data (BADA) 모델과 실제 항적 자료, 최초 항공기의 이륙중량, 그리고 바람 자료를 사용한 연구에서, 최초 항공기의 이륙중량을 알 수 있는 경우 실제 수치 대비 1% 이내의 오차로 연료 소모량을 추정할 수 있음을 보였다[4]. Kageyama와 Miyatsu(2012)는 일본 공역의 효율성을 분석하

는 기초연구를 수행하기 위해, 효율성의 평가 지표로 연료 소모량을 선정하고, 실제 항적 자료와 BADA Fuel Flow table을 이용하여 연료 소모량을 추정하였다[5]. Alam et al.(2009)은 BADA Fuel Flow table과 BADA Thrust Specific Fuel Consumption(TSFC) 모델의 두 가지 방법으로 연료 소모량을 추정하고 Flight Data Recorder(FDR)에 기록된 실제 연료 소모량과 비교하였으며, 두 방법 중 보다 나은 정확한 추정 결과를 보인 BADA TSFC 모델을 사용하여 In-Trail Procedure(ITP)의 연료 절감 효과를 분석하였다[6]. Senzig et al.(2009)는 Federal Aviation Administration(FAA)의 Aviation Environmental Design Tool(AEDT)을 사용한 연료 소모량 추정 방법이 터미널 공역에서 소모된 연료량을 충분히 측정할 수 있음을 증명하고, 터미널 공역 내에서 항공기를 운영하는 방식의 변경, 도입이 연료 소모량에 미치는 영향을 파악하는 방법으로 AEDT를 제안하였다[7-9].

1.2.2 탄소 배출

전 세계적으로 기후변화에 대한 관심이 높아짐에 따라 기후변화의 주된 원인인 탄소 배출 감축을 위한 움직임 역시 활발해지고 있다. 이러한 상황에서, 항공기의 연료 소모량과 탄소배출량의 정비례 관계는 IPCC의 이동 수단별 배출물질 산정 가이드라인(2006)에서 잘 설명하고 있으며, 배출물질 산정 수준의 정확도와 난이도별로 다음과 같은 세 가지 단계의 Tier를 제시하고 있다[10].

- Tier1 : 총 연료 소모량에 평균화된 배출계수를 곱하여 총 배출 물질량을 산정(算定)한다.

- Tier2 : 항공기의 운항을 국내선과 국제선, Landing and Take-off(LTO) 단계와 순항단계로 구분한다. 순항단계의 연료소비량은 총 연료 소모량에서 기종별 통계자료로부터 나온 LTO 단계의 연료 소모량을 제(除)하는 것으로 구하고, 각 단계에 따른 배출계수를 적용하여 이후에 합산함으로써 배출물질의 총량을 산정(算定)한다.

- Tier3a : LTO 단계의 통계자료, 출·도착 공항의 정보와 실제 비행 거리 정보를 사용해서 순항단계의 연료 소모량 및 배출물질량을 Tier2 수준보다 정밀하게 산정(算定)한다.

- Tier3b : 온전한 항공기의 항적 자료(위도, 경도, 고도, 시간 등)와 항공기 기종과 엔진에 따른 특성을 모두 반영하여 모든 비행 단계별로 가장 자세한 항공기의 연료 소모량 및 배출물질량을 산정(算定)한다.

박진서 et al.(2010)은 기존 연구에서 도출된 온실가스배출 산정량이 서로 상이하다는 문제점을 제기하고, 보다 정확하고 일관된 기준에서 배출가스를 산정하기 위해 온실가스 관리 경계 설정, 활동데이터 통계관리 방안의 마련, 항공부문 온실가스 인벤토리 구축, Tier 3 수준 산정방법론의 개발과 같은 4가지 정책적 제언을 하였다[11].

이주형 et al.(2014)은 Tier3a 단계의 배출 물질을 산정하기 위하여 비행 단계별 연료 소모량 정보를 특정 항공사의 비행품질관리시스템(Flight Operation Quality Assurance, FOQA) 데이터로부터 수집하여 Tier3a 수준의 온실가스 산정량과 Tier2 수준의 온실가스 산정량을 비교하였다[12].

1.2.3. EUROCONTROL BADA

연료 소모량 추정과 관련된 기존 연구에서 주로 사용되는 EUROCONTROL의 BADA는 총 399종의 항공기 기종별 항공기 운항성능 특성변수(즉, 파라미터) 정보를 제공하고 있으며, 대부분의 연료 소모량 분석에 공통적으로 적용되는 자료라 할 수 있다. BADA User Manual(Revision 3.10, 2012)은 항공기의 성능 및 항적 시뮬레이션 예측 알고리즘 고안을 위해 해당 정보를 사용할 수 있는 두 가지 방법을 제공하고 있으며, BADA를 사용한 기존 연구에는 다음과 같은 사례들이 있다[13].

Serbezov와 Geshev(2008)은 항공기 시스템이 전체적인 항공기의 연료 효율성에 미치는 영향을 알아보기 위해 BADA 모델로부터 발전한 비행 모델을 개발하였으며, 모델로부터 도출된 결과와 실제 비행 데이터를 비교함으로써 검증하였다[14].

오은미 et al.(2012)은 BADA 모델과 비행 계획을 활용하여 항공기별 성능이 고려된 비행경로의 예측 및 4차원 모델링을 구현하였으며, 생성된 경로로부터 속력, 추력, 연료 소모율과 같은 성능 지표들을 계산할 수 있음을 확인하였다[15].

2. 본 론

2.1 연구 내용 및 범위

본 연구는 3단계를 거쳐 수행되었으며 각 단계별 연구내용은 다음과 같다. 1)운송용 정기 항공편을 대상으로 항적 자료를 수집, 정리하여 이에 대한 기초분석을 수행하고, 2)이를 바탕으로 BADA 모델을 활용하여 개별 항공기의 연료 소모량을 추정하였으며, 3)마지막으로 실제 연료 소모량 자료

를 이용해 추정된 연료 소모량의 정확성을 확인하였다.

실질적인 연구수행의 시간적, 공간적 범위는 자료의 가용성 정도에 고려하여 다음과 같이 결정하였다. 수집된 항적 자료는 2012년 10월 1일부터 10월 31일까지 1개월간 기록된 항공기의 운항내력으로, 우리나라 비행정보구역(Flight Information Region, FIR)에서 출·도착 및 통과한 모든 운송용 정기 항공기의 항적을 포함하고 있다. 이 항적 자료의 가용성을 고려하여 본 연구의 시간적 범위는 2012년 10월 1일부터 2012년 10월 31일까지 한 달로 설정하였으며, 공간적 범위 역시 수집된 항적자료의 범위와 동일한 국내 비행정보구역(Flight Information Region, FIR)으로 설정하였다.

추정된 연료 소모량의 정확성 분석은 항공사로부터 제공받은 개별 항공기의 실제 연료 소모량을, 추정 연료 소모량과 비교, 분석함으로써 이루어졌다. 이때, 항공사로부터 제공받은 항공기 연료 소모량 자료는 별도의 비행 영역을 구분 짓지 않은 총 연료 소모량을 자료인 반면, 항적 자료의 경우 FIR 영역을 벗어나는 시점부터는 항적의 기록이 온전히 이루어지지 않기 때문에, 국제선 항공기에 대해서는 항적 자료를 이용해 개별 항공기가 소비한 총 연료 소모량을 추정할 수 없으며, 항공사의 총 연료 소모량과도 비교할 수 없는 문제점이 존재한다. 이 같은 자료의 제약을 고려하여, 본 연구에서는 출발에서 도착까지 비행 전 범위의 분석이 가능한 국내선 항공기를 분석대상으로 선정하여 분석을 수행하였다.

2.2 연구 방법

2.2.1 항적 자료 수집 및 기초분석

항적 자료는 최초 추출 시, 개별 항공기의 구분 없이 모든 항공기의 정보들이 시간 순서대로 나열되어 있는 구조이기 때문에 이를 동일한 항공기별로 다시 그룹화 해주는 과정이 필요하다. 그룹화 작업은 1)날짜와 호출부호를 기준으로 항공기별로 분류하고, 2)세계협정시(UTC)로 기록된 시간 정보를 한국 표준시(KST)를 전환하는 작업을 거쳐, 3)분류된 항적을 시간순서에 따라 재배열하는 것으로 마무리된다.

항적 자료 가공의 마지막 단계는 평활화(smoothing, 平滑化) 단계로, 기존 항적 자료 자체의 잡음이나, 이상치를 수정하는 과정에서 비롯된 일종의 불연속성이 존재하는 경우, 이러한 변동을 보다 부드럽게 하는 과정을 말한다. 본 연구에서는 항공기의 수평적 위치(위, 경도), 수직적 위치

(고도), 속도 정보에 대해서 매(每) 3개의 데이터마다 그 평균치를 사용하는 단순이동평균법(Simple Moving Average, N=3)을 적용하여 자료의 평활화를 수행하였다.

2.2.2 연료 소모량 추정

기본적으로 EUROCONTROL의 BADA자료를 활용하여 연료 소모량을 추정하는 방법은 크게 다음 두 가지 방법으로 구분된다.

그 첫 번째 방법은 BADA가 제공하는 고도별 항공기 성능표준 값을 기록한 표, 즉 Performance Table File(PTF)에 항적자료를 대응시킴으로써, 표에 나타나 있는 연료 소모량을 찾는 방법이다. 이 방법은 항적자료로부터 고도 이외에 별도의 대응 값을 사용하지 않으므로 비교적 간편하게 연료 소모량을 추정할 수 있다.

두 번째 방법은 BADA에서 제시하는 항공 역학적 계산식을 이용하여 항공기의 성능(Performance)을 계산하고 이에 따른 단위시간당 연료 소모량을 추정하는 방법이다. BADA 성능 계산식의 핵심은 Total-Energy 모델과 Thrust Specific Fuel Consumption(TSFC) 모델로 각 모델로부터 항공기의 추력과 단위시간당 연료 소모량을 유기적으로 구할 수 있다.

$$(Thr - D) V_{TAS} = m g_0 \frac{dh}{dt} + m V_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (1)$$

Thr : thrust acting parallel to the aircraft velocity vector [newtons]

D : aerodynamic drag [newtons]

m : aircraft mass [kilograms]

h : geodetic altitude [m]

g_0 : gravitational acceleration [9.80665 m/s²]

V_{TAS} : true airspeed [m/s]

$\frac{d}{dt}$: time derivative [s⁻¹]

위 식(1)은 BADA에서 인용한 Total-Energy 모델을 나타낸다. Total-Energy 모델 파라미터는, 항적 및 BADA자료의 항공기의 속도, 고도, 시간 정보와 상수인 중력가속도 값, 제공해주는 계수 값들을 활용하면 aerodynamic drag-polar 식에서 구할 수 있는 항력(D) 값을 비롯하여 필요한 변수 값들을 얻을 수 있고, 최종적으로 통상적인 항공기의 추력(Thr)을 구할 수 있다. 더불어,

BADA에서는 상승, 하강, 순항 등 비행단계별 항공기의 성능과 추력을 세부적으로 구분하여, Total-Energy 모델 및 Maximum climb thrust 등, 각 단계별 연료 소모량 계산식과 계산에 필요한 계수 값을 제공함으로써 항공기의 운항성능을 보다 정밀하게 모사할 수 있도록 하고 있다¹⁾.

본 연구에서는 수집, 정리된 항적 자료를 토대로 BADA의 Total-Energy 모델과 TSFC 모델²⁾을 이용하여 항공기 연료 소모량을 추정하는 두 번째 방법을 시도했으며, 이 과정에서 BADA가 제공하는 항공기 성능 및 추력과 관련된 별도의 세부식과 이에 따른 계수 값을 적용하였다.

2.3 자료수집 및 분석결과

2.3.1 자료 수집

앞서 설명된 바와 같이 항공기 연료 소모량 추정을 위해 2012년 10월 1일부터 2012년 10월 31일까지 1개월분의 항적자료가 수집, 분석되었으며, EUROCONTROL의 BADA Version 3.9 자료가 사용되었다. 추정된 연료 소모량의 정확성을 분석하기 위해 항적 자료와 동일한 기간 동안(2012년 10월 1일부터 2012년 10월 31일까지 1개월분) 인천-제주, 김포-제주 노선을 운항한 국내선 항공기의 실제 연료 소모량 자료를 국내 항공사의 도움으로 수집, 활용하였다.

2.3.2 분석 결과

수집, 정리된 항적자료의 각 항공기별 비행 경로와 각 항적자료 데이터 포인트에서의 속도, 상승 및 하강률, 연료 소모량 등에 대한 상세분석을 수행하였다.

연료 소모량 추정방법의 신뢰성 검토를 위해 항적자료의 각 데이터 포인트에서 비행 고도 및 비행 속도의 변화가 단위 시간당 연료 소모량에 미치는 영향을 세부적으로 분석하였다. Fig. 1은 제주를 출발하여 김포공항에 도착하는 B737기종 항공기표본 하나에 관한 누적 거리별(X-축) 고도, 속도, 단위 시간당 연료 소모량 및 누적 연료 소모량의 변화(Y-축의 상단부터 차례로)를 나타낸 그래프이다.

여기서 유의해야 할 사항은 단위시간당 연료 소모량(fuel flow, 단위 kg/분)의 변화이다.

첫 번째는 상승 단계에서 관측되는 fuel flow의 감소현상이다. BADA 모델의 상승 단계에서 fuel flow를 구하는 식은 TSFC term(n)과 상승 단계의 추력으로 이루어진 함수이다. 여기서 TSFC는 속도에 비례하여 증가하는 데 반해, 상승 단계의 추력은 Maximum climb thrust를 사용하며, 이 Maximum climb thrust는 고도가 올라갈수록 감소하는 양상을 보인다. 다시 말하여, 고도가 높아질수록 항공기가 상승에 사용할 수 있는 추력은 감소하고 그 감소분이 TSFC의 증가분보다 크기 때문에 단위시간당 연료 소모량이 완만하게 줄어드는 모습을 보이게 된다.

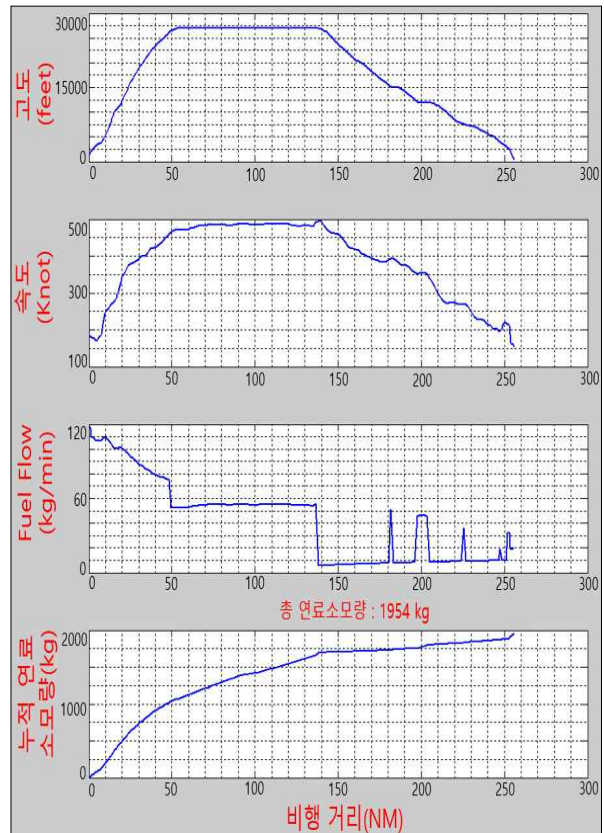


Fig. 1 Aircraft Performance Data over Flight Distance

두 번째는 비행 거리가 50 nautical mile(nm)과 140nm이 되는 지점에서 나타나는 단위시간당 연료 소모량의 불연속적인 감소현상이다. 50nm 지점의 단위시간당 연료 소모량 급감현상은 항공기가 50nm 지점에서 순항고도에 다다르고, 상승 단계에서 순항 단계로 넘어가면서 추력 감소와 함께 발생하는 것이고, 140nm의 단위시간당 연료 소모

1) 자세한 내용은 참고 문헌의 EUROCONTROL User Manual for Base of Aircraft Data(BADA) Revision 3.10, 2012. 참조
 2) 구해진 추력에 BADA에서 제공하는 TSFC 계수값(η)을 곱하는 것으로 통상적인 단위시간당 연료 소모량을 계산할 수 있는 식을 말한다.

량 급감 현상도 마찬가지로 순항 단계에서 하강 단계로 넘어가면서 발생하는 현상이다.

세 번째는 하강 끝 부분에서 단위시간당 연료 소모량이 전체적으로 상승하는 현상이다. 해당 부분에서는 항공기가 착륙 단계에 들어서는 지점으로, 항공기가 flap 각도를 변경하고, landing gear를 전개하게 된다. BADA에서는 그러한 사항을 고려하여 착륙 시의 항력을 계산할 수 있도록 해놓았고 그 때문에 하강의 마지막 부분에서 단위시간당 연료 소모량이 일정 부분 상승하는 현상이 나타난다.

네 번째는 하강 구간에서 간헐적으로 발생하는 단위시간당 연료 소모량의 급증현상이다. Fig. 2는 이러한 현상을 보다 자세히 알아보기 위해 연료 소모량의 순간적인 변화가 일어나는 지점에서의 비행속도, 비행고도 및 연료 소모량을 확대하여 나타낸 것이다. Fig. 2를 자세히 관찰하면, 단위시간당 연료 소모량이 급증하는 부분에서 항공기의 고도가 일정하게 유지되는 Level Flight 현상을 관측할 수 있다. 이러한 Level Flight 여부를 수식화하기 위해 항공기의 현 위치이후 5개 항적 포인트에 최소자승추정방법(Least Square Method)를 적용하여 고도변화의 추세선을 계산하였으며, 추세선의 기울기가 ±1도 사이에 있는 경우 순항으로 판단하였다. 항공기가 하강단계에서 일정고도를 유지하는 Level Flight를 수행하는 경우, 고도유지를 위한 순간적인 추력발생이 요구되며, 이때 추가연료가 소비되는 현상이 나타난다.



Fig. 2 Speed, Altitude, and Fuel Flow over Distance

연료 소모량 추정에 필요한 항공기의 무게는 고가인 항공기 자중과 유동값인 유상하중 및 연료 무게로 나눌 수 있다. 항공기 자중에 관한 값은

BADA에 기종 별로 기재하고 있으나, 유상하중 (Pay Load) 및 연료의 무게는 항적 자료에는 나타나지 않는 항공기 운항 당시의 날씨, 탑승 승객 상황, 항공기 기종 등에 영향을 받게 된다. 유상하중의 경우, 본 연구에서는 기종 별 최대 유상하중의 80% 값을 사용한 경우와 항공사로부터 제공 받은 실제 유상하중을 적용한 경우로 나누어 분석을 수행하였다. 연료의 경우 유상하중을 기준으로 BADA의 PTF을 이용해 최적 비행을 가정한 경우에 소모되는 연료량을 구하고 실제 비행 상황과의 차이 및 예비연료를 감안하여 PTF를 이용해 구한 연료량의 1.1배를 사용하였다.

Table 1과 Table 2는 유상하중을 최대적재하중의 80%를 적용한 경우와 실제 유상하중을 적용한 경우에 김포-제주를 운항한 국내선 항공기의 연료 소모량 추정 결과에 대한 통계값을 정리한 것이다. (표에서 기종 뒤에 '그룹' 단어가 표기된 것은 B737-300, B737-400, B737-500처럼 특정 기종이 여러 종류의 확장 모델들로 나뉘어 분석 대상에 포함된 경우에 하나의 그룹으로써 통일하여 표기된 것이다. 또한 상행은 제주출발-김포도착, 하행은 김포출발-제주도착 운항편을 의미한다.)

Table 1. Estimated Fuel Burn (based on 80% of Max. Payload)

		평균 (kg)	표준편차 (kg)	유상하중	관측 항공기 수
B737 그룹	상행	2157	126	80%	409
	하행	2172	110	80%	393
B747 그룹	상행	8401	486	80%	63
	하행	8631	467	80%	62
A330 그룹	상행	4447	486	80%	119
	하행	4411	374	80%	125

Table 2. Estimated Fuel Burn (based on Actual Payload)

		평균 (kg)	표준편차 (kg)	유상하중	관측 항공기 수
B737 그룹	상행	2156	129	62.3%	409
	하행	2162	121	55.7%	393
B747 그룹	상행	8244	481	64.0%	63
	하행	8384	463	55.9%	62
A330 그룹	상행	4422	495	46.5%	119
	하행	4326	405	51.9%	125

자료 분석결과 실제로 탑재된 유상하중은 최대 적재하중의 약 45~65%수준³⁾인 것으로 분석되었으며, 이는 일반적으로 알려진 서울-제주간 항공기의 평균 탑승률 약 80%와는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. Table 1과 Table 2에서 보는 바와 같이, 전체적으로 최대유상하중의 80%를 적용한 경우의 연료소모량 추정치는 실제 유상하중을 적용한 경우의 추정치보다 다소 많은 연료를 소모한 것으로 보이고 있으나, 두 추정치의 차이가 최대 3% 이내인 것으로 분석되었다.

2.4 정확성 분석

추정된 연료 소모량의 정확성을 분석하기 위해, 국내 한 항공사의 협조를 통해 수집된 항공기의 실제 연료 소모량 및 각 항공기의 운항 관련 자료를 분석하였다. 제공받은 자료는 2012년 10월 1일부터 10월 31일까지 1개월간 운항한 총 1506편의 해당항공사 항공기 운항자료를 포함하고 있으며, 이 가운데 비정기 운항편, 분석 시간범위 등 선정 기준을 만족하는 총 1171대의 항공기 운항자료가 실제 검증에 사용되었다.

Table 3과 Table 4는 각 항공기의 연료소모량 추정 오차(=각 항공기의 실제 연료소모량 - 각 항공기의 추정 연료소모량)의 평균 및 표준편차를 앞서 설명된 두 가지 경우의 유상하중(즉, 최대유상하중의 80%와 실제 유상하중)에 대해 정리한 것이다.

Table 3. Statistics for Estimation Error (based on 80% of Max. Payload)

		오차 평균 (kg)	오차 수준	오차 표준편차 (kg)	관측 항공기 수
B737 그룹	상행	228.4	10%	126.0	409
	하행	263.2	11%	144.6	393
B747 그룹	상행	-398.0	5%	330.0	63
	하행	-572.1	7%	339.4	62
A330 그룹	상행	279.0	6%	275.3	119
	하행	279.2	6%	275.8	125

3) 구체적인 기종별 실제유상하중의 통계값(평균/표준편차, 단위:kg)은 다음과 같다. B747(상행 37,535.2/10329.8, 하행 31258.0/10722.2), B737(상행 13507.7/2986.7, 하행 12350.4/3525.3), A330(상행 30484.8/8031.2, 하행 24721.0/9141.0)

Table 4. Statistics for Estimation Error (based on Actual Payload)

		오차 평균 (kg)	오차 수준	오차 표준편차 (kg)	관측 항공기 수
B737 그룹	상행	229.2	10%	118.7	409
	하행	273.2	11%	135.8	393
B747 그룹	상행	-241.3	3%	314.5	63
	하행	-324.8	4%	291.2	62
A330 그룹	상행	304.3	6%	265.3	119
	하행	364.4	8%	228.3	125

표에서 알 수 있는 바와 같이, B747그룹 항공기의 경우 (최대 유상하중의 80% 및 실제유상하중을 적용하는 두 가지 경우 모두) 추정 연료소모량은 실제 연료 소모량에 비해 과다 추정(약 3~7%)되며, B737 및 A330그룹 항공기의 추정 연료소모량은 실제 연료소모량에 비해 과소 추정(약 6~11%)되었다.

또한, B747그룹 항공기의 경우 실제 유상하중을 적용할 때 (최대유상하중의 80%적용하는 경우에 비해) 추정값의 정확도가 향상되는 반면, A330그룹 항공기의 경우 실제 유상하중을 적용할 때 오히려 추정값의 정확도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이처럼, 실제 유상하중을 적용하였음에도 불구하고 추정값의 정확도가 항상 향상되지 않는 이유는 단거리 항로(예, 김포-제주간 약 250nm)에 대한 BADA자료의 구조적인 한계에서 기인하는 것으로 판단되며, 보다 면밀한 연구를 통해 명확한 원인이 규명되어야 할 필요가 있다.

Fig. 3은 실제 연료소모량을 X-축으로, 추정 연료소모량을 Y-축으로 설정하여, 실제 연료소모량과 추정 연료소모량이 일치하는 경우 45도 직선상에 자료값이 표시되도록 하여, 실측값 대비 추정값의 편차의 정도를 보다 쉽게 확인할 수 있도록 도식화한 것이다. 또한 계량적 분석을 위해 RMSE(Root Mean Square Error) 및 피어슨 상관계수(Correlation Coefficient)를 계산하여 함께 표시하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이, 각 기종별로 연료소비량이 확연한 차이를 보이고 있으며, 동일 기종이라 하더라도 연료소모량이 상당한 폭으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 동일 기종간 연료소모량의 차이는 순항고도, 풍속 등 각 항공기의 운항조건에 따라 차이를 보이는 것으로 추정된다. 전체적으로 볼 때 실제 유상하중을 적용하여 연료소모량을 추정하는 경우(RMSE=330.21, 상관계수=0.9935) 최대유상하중의 80%를 적용하는

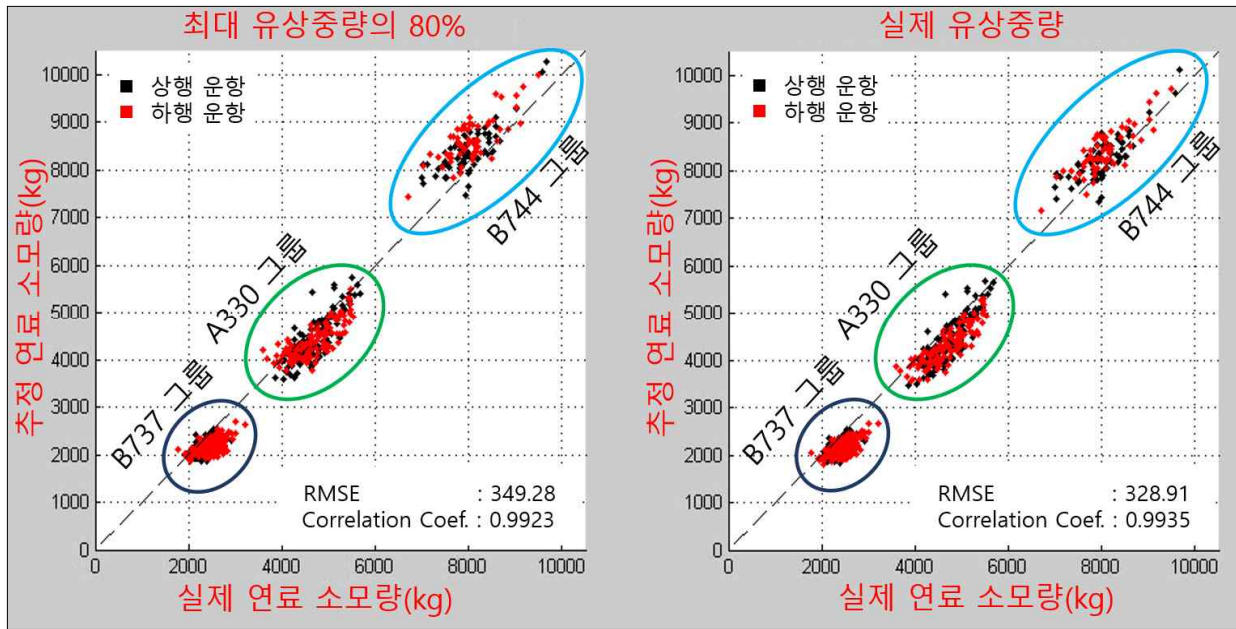


Fig. 3 Comparison of Estimation Error (80% of Max. Payload(Left) vs. Actual Payload(Right))

경우(RMSE=351.50, 상관계수=0.9923)에 비해 상대적으로 더 정확한 추정값을 산정하는 것으로 나타났다지만, 그 차이는 미미한 수준인 것으로 분석되었다.

3. 결론

3.1 결론 및 향후 연구과제

3.1.1 결론

항공기 연료 소모량은 순수 경제적인 편익을 측정할 수 있는 지표임과 동시에 항공기 운항에 따른 환경적인 영향을 정량화 할 수 있는 지표이다. 항공기 연료 소모량을 가장 정확하게 측정 방법은 항공사에서 실제 소모된 연료량을 확인하는 방법이라 할 수 있다. 그러나 일반적으로 연료 소모량은 항공사의 수익과 직접적인 연관이 있는 내부 자료일 뿐만 아니라, 단일 항공사의 자료만을 가지고 국가 및 공역 단위의 편익을 분석하는 것에는 실질적인 어려움이 있다.

본 연구에서는 EUROCONTROL의 BADA 자료와 실제 항적 자료를 결합하여 개별 항공기의 비행 중 연료 소모량을 추정하고, 항공사의 실제 연료 소모량 자료와 비교하여 추정값의 정확성을 분석하였다. 분석결과, 실제 유상하중을 적용할 경우 3~11%의 오차 범위, 최대 유상하중의 80%를 적용할 경우 5~11%의 오차범위 내에서 비행 중 연료

소모량 추정이 가능한 것으로 나타났다.

본 연구는 항공관제 시스템에 의해 상시 수집되는 항적자료를 활용하여 개별 항공기의 연료 소모량을 추정한 연구로서, 이러한 분석방법은 IPCC에서 정의한 Tier 3b 수준의 탄소 배출량 산정을 위한 기초연구로서의 의미가 있을 것으로 생각된다. 아울러, 추정된 연료 소모량의 오차 범위를 제시함으로써 BADA자료를 활용하여 운항효율성을 분석하는 유사연구의 선행적 결과를 제시하고 있다는 점에서 의미가 있다고 판단된다.

3.1.2 향후 과제

본 연구에서는 항적 자료와 EUROCONTROL의 BADA자료를 이용하여 연료 소모량을 추정하고, 항공사의 실제 연료 소모량과 비교하여 추정 결과의 정확도를 살펴보았다. 그러나 자료 수집의 한계로 인해 국제선 항공기에 대해서는 연료 소모량 추정이 이루어지지 못했으며, 국내선 항공기 분석에 사용된 항공기 기종 역시 일부 제한적이었다. 또한, Total-Energy 모델의 필요 parameter인 항공기 무게의 설정을 비롯하여, 바람의 영향이 없는 것으로 가정하고 진대기 속도(True Air Speed, Vtas) 대신 항적 자료상의 속도, 즉, 대지 속도를 사용한 점, 바람과 마찬가지로 고도나 온도 등 기상 관련 parameter는 수집의 어려움으로 국제표준대기(International Standard Atmosphere, ISA)를 가정한 점과 같은 한계가 있었다. 이러한

부분을 보완하기 위해서는 국제선 항공기를 포함한 다양한 기종의 연료 소모량 추정 및 정확도 분석이 수행될 필요가 있으며, 기상 자료를 수집·분석함으로써 실제 연료 소모량과 추정 연료 소모량 사이에 발생하는 오차의 원인에 대한 보다 면밀한 연구가 수행될 필요가 있다.

후 기

연구를 위해 자료를 제공해주신 국토교통부 관제과 및 대한항공 종합통제본부 관계자분들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 1) ICAO Annex16 - Environmental Protection (Volume 2 : aircraft Engine Emissions), 2008.
- 2) ICAO Carbon Emissions Calculator Version 3, 2010.
- 3) Judith Patterson, "Analysis of Departure and Arrival Profiles Using Real-Time Aircraft Data", Journal of Aircraft Vol.46, No.4, 2009, pp. 1094-1103
- 4) Gano B. Chatterji, "Fuel Burn Estimation Using Real Track Data", 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, including the AIA, 2011.
- 5) Kota Kageyama, and Yoshihiro Miyatsu, "A Basic Study on Efficiency in Japanese Airspace", 28th International Congress of The Aeronautical Sciences, 2012.
- 6) S. Alam, J. Tang, C.J. Lokan, and H.A. Abbass, "An Assessment of BADA Fuel Flow Methodologies for In-Trail Procedure Evaluation", EUROCONTROL.int. 2009.
- 7) David A. Senzig, Gregg G. Fleming, and Ralph J. Iovinelli, "modeling of Terminal-Area Airplane Fuel Consumption", Journal of Aircraft Vol.46, No.4, 2009, pp. 1089-1093
- 8) David A. Senzig, Gregg G. Fleming, and Ralph J. Iovinelli, "Fuel consumption modeling in support of ATM environmental decision-making", Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2009), 2009.
- 9) FAA Aviation Environmental Design Tool (AEDT)2a Technical Manual, 2012.
- 10) IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Volume 2 : Energy), 2006.
- 11) 박진서, 김제철, 최성원, "항공분야 온실가스 배출량 산정방법 정립을 위한 정책적 제언", 교통연구 제17권 제3호, 2010, pp. 13-25
- 12) 이주형, 김용석, 신흥철, "항공기 비행단계별 연료소비 분석 및 Tier 3 배출량 산정", 한국기후변화학회지, 2014, pp. 61-70
- 13) EUROCONTROL User Manual for Base of Aircraft Data(BADA) Revision 3.10, 2012.
- 14) V. Serbezov, and D. Geshev, "Transport Aircraft Flight modeling for the Purposes of the Aircraft Systems Effectiveness Studies", MTM virtual journal (<http://mech-ing.com/journal/8-9-2008.html>), 2008, pp. 28-30
- 15) 오은미, 은연주, 전대근, "비행 계획을 적용한 4-D 경로 모델링 및 성능 평가", 한국항공우주학회 춘계학술대회, 2012.