

국내선 항공기 연료소모량 추정 및 정확도 향상

Estimation of Domestic Aircraft Fuel Consumption and Improved Accuracy

홍혜진¹ · 최지현² · 구성관^{3*}

¹한서대학교 일반대학원 항공운항관리학과 석사과정

²진에어 운항승무원 기장

³한서대학교 항공산업공학과 교수

HyeJin Hong¹ · JiHun Choi² · SungKwan Ku³

¹Department of Flight Operation and Management, Hanseo University Graduate School, ChungNam-do, 32158, Korea

²Jin Air, Flight Operations, Seoul, 07570. Korea

³Department of Aerospace Industrial and Systems Engineering, Hanseo University, ChungNam-do, 32158, Korea

[요 약]

ICAO는 2016년 39차 총회에서 국제항공 탄소 상쇄 감축제도(CORSIA; carbon offsetting and reduction scheme for international aviation)를 채택하였고, 2023년 1월 1일 기준 우리나라를 포함한 115개국이 CORSIA에 참여하겠다는 의사를 표명했다. 항공 산업에서 발생하는 탄소는 항공기 엔진에서 배출되는 온실가스가 주요인이므로 탄소 배출 감소를 위해서는 연료소모량을 절감해야 한다. 방안별 효과를 예측하고 시행에 대한 의사결정을 위해서는 시뮬레이션 수행 등 사전 연구가 필수적이다. 정확한 결과를 도출하려면 양질의 데이터가 필요한데 그 중 실제 연료소모량 자료는 항공사의 내부 자료로 공개가 되지 않아 확보가 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 실제 연료소모량 자료를 기반으로 연료소모량을 추정하는 모형을 구축한 후, 모형의 고도화를 수행하여 정확도를 향상시키고자 한다.

[Abstract]

ICAO adopted the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) at the 39th General Assembly in 2016, and 115 countries, including South Korea, expressed their intention to participate in CORSIA as of January 1, 2023. Since carbon generated in the aviation industry is mainly caused by greenhouse gases emitted from aircraft engines, fuel consumption must be reduced to reduce carbon emissions. Prior research, such as simulation, is essential to predict the effectiveness of each plan and to make decisions about its implementation. High-quality data is needed to derive accurate results, but it has been difficult to secure actual fuel consumption data, as they are considered to be classified airline data. Therefore, in this paper, after establishing a model that estimates fuel consumption based on actual fuel consumption data, the model is to be advanced to improve its accuracy.

Key word : Aircraft fuel consumption, Flight trajectory, Domestic, Estimation accuracy, Aviation environment design tool.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.649>



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 30 September 2023; Revised 12 October 2023
Accepted (Publication) 24 October 2023 (30 October 2023)

*Corresponding Author, SungKwan Ku

Tel: +82-41-671-6246

E-mail: skku@hanseo.ac.kr

I. 서론

국제민간항공기구 (ICAO; international civil aviation organization)는 2010년 제37차 총회에서 국제 항공 산업의 발전이 기후 변화에 미치는 영향을 최소화하기 위해 2050년까지 매년 연료 효율을 2% 개선하고 2020년 이후부터 탄소중립 성장을 달성하는 것을 목표로 하였다[1]. 이후 2016년 39차 총회에서 국제항공 탄소 상쇄 감축제도 (CORISA; carbon offsetting and reduction scheme for international aviation)를 채택하였고 ICAO는 계약국들로 하여금 개별적 상황과 능력을 고려하여 그림 1과 같이 기술적, 운영적 개선과 대체 연료 사용을 통한 탄소 배출 감소방안을 제안하였다.

표 1은 연도별 CORISA 시행 단계를 정리한 표이다. 2021년부터 2023년까지는 시범단계, 2024년부터 2026년까지는 1단계로 이 두 단계는 계약국의 자발적인 참여가 가능하다[2]. 2027년부터 2035년까지 진행되는 2단계는 2018년 기준으로 국제 항공 활동의 개별 점유율이 총 RTK (revenue tonne kilometers)의 0.5% 이상이거나 누적점유율이 총 RTK의 90%에 해당하는 모든 국가를 대상으로 한다[1]. RTK는 항공기의 유상탑재량에 운항거리를 곱한 값으로 항공 운송 활동량을 의미한다.

23년 1월 1일 기준 우리나라를 포함한 115개국이 CORISA에 참여하겠다는 의사를 표명했다. 우리나라는 항공 부문의 온실가스 감축 목표 달성을 위해 연속강하기법 (CDO; continuous descent operations), 항로 단축화, 연료소모량 감소를 위한 이착륙 비행 절차 개선 등의 방안 적용을 제안하였다. 각 방안별 효과를 예측하고 시행에 대한 의사결정을 위해서는 다양한 변수를 고려할 수 있는 시뮬레이션 방법이 현실적이다. 시뮬레이션 모델이 정확한 결과를 예측하는지 확인하기 위해 실제 값과 시뮬레이션을 통해 추정된 값이 유사한지 검증하는 과정이 선행되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 실제 연료소모량 자료를 기반으로 연료소모량을 추정하는 모형을 구축한 후, 모형의 고도화를 수행하여 정확도를 향상시키는 방법을 적용하였다. 실제 연료소모량 자료는 모 항공사의 운항승무원들이 운항 중 기록한 자료를 활용하였다.

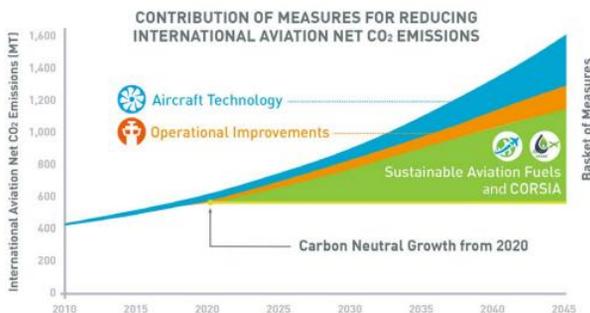


그림 1. 탄소 배출량 감소 방안
Fig. 1. Carbon emissions reduction plan

표 1. 연도별 CORISA 시행 단계

Table 1. CORSIA implementation steps by year

Participation states	of Phase	Period
Voluntary	Pilot phase	2021 - 2023
	First phase	2024 - 2026
Mandatory	Second phase	2027 - 2035

II. 이론적 배경 및 선행연구 검토

2-1 연료소모량 추정치의 중요성

연료소모량은 공역 운영효율성과 항공기 운항효율성 등을 설명할 수 있는 하나의 지표로써 활용되며 비행시간, 비행속도, 비행거리 등의 지표들보다 상세한 편익 산정이 가능하다 [3]. 항공운송사업자는 연료소모량을 절감할 수 있는 최적의 방안을 고려하여 연료비에 의한 운영비용을 줄일 수 있다.

항공 산업에서 발생하는 탄소는 항공기 엔진에서 배출되는 온실가스가 주요인이며, 항공유 연소로 발생하는 배출가스에는 70%의 이산화탄소(CO₂)와 30% 이하의 물(H₂O), 1% 미만의 공기오염물질이 포함되어 있다[4]. 따라서 항공산업에서 발생하는 온실가스를 감축하기 위해서는 항공기 운항 중 소모되는 연료량을 절감해야 한다.

이처럼 연료소모량은 경제적, 환경적 측면과 밀접한 관련이 있으므로 정확한 연료소모량 추정은 정책 도입 효과분석, 사전 예측 및 타당성 검토 등에 활용될 수 있다.

2-2 연료소모량 추정 방법

박장훈(2014)은 항적 데이터와 Eurocontrol의 BADA (base of aircraft data) 데이터를 이용하여 연료소모량을 추정하고 이를 실제 연료소모량과 비교하였다. BADA에서 제시하는 항공기 성능 모델인 Total energy 모델과 TSFC (thrust specific fuel consumption) 모델을 사용하여 연료소모량을 추정하고, 유상하중에 따른 연료소모량을 비교하여 실제 유상하중을 적용할 경우 3~11%의 오차 범위, 최대 유상하중의 80%를 적용할 경우 5~11%의 오차 범위 내에서 연료소모량 추정이 가능한 것을 확인하였다[3].

장성우·이영재·유광의(2020)는 실제 항공기 운항의 세부적 기동마다 측정된 연료소모 자료를 기반으로 지상 활주 단계에서의 항공기 연료소모량을 예측하는 모델을 제시하였다. 그 결과 지상 활주 시간과 추력 변화량을 독립변수로 하는 예측모델이 통계적으로 유의함을 확인하여 모델이 적합함을 증명하였다[5].

K.Seymour et al.(2020)는 항공기 연료소모를 추정하는 모델인 FEAT (fuel estimation in air transportation)를 제안하였다. BADA의 항공기 성능 데이터를 기반으로 모델을 구성하였으

며, 출도착 공항과 항공기 기종 입력만으로도 분석이 가능하도록 분석에 필요한 요소를 간소화하였다. 모델을 통해 추정된 연료 소모량과 실제 연료소모량의 오차는 5% 이하로, 해당 모델을 사용하여 짧은 시간 내에 비교적 정확한 연료소모량을 도출할 수 있음을 밝혀냈다[6].

본 논문은 선행 연구에서 핵심적으로 활용한 Eurocontrol의 BADA 모델뿐만 아니라 다양한 운영 조건 등을 모델에 고려할 수 있는 시뮬레이션 방법을 통해 연료소모량을 추정하였다. 정밀한 연료소모량 추정을 위해 비행구간과 지상이동구간으로 나누어 구간별 연료소모량을 추정하고, 이를 검증하기 위해 실제 연료소모량 자료를 활용하였다. 본 논문은 FDR (flight data recorder) 데이터 없이도 연료소모량을 실제와 유사하게 추정할 수 있는 방안에 대하여 중점을 두고자 한다.

III. 국내선 항공기 연료소모량 추정 방법

3-1 자료 수집

연료소모량을 추정하고 이를 실제 연료소모량과 비교하기 위해 모 항공사의 운항승무원들이 직접 운항한 국내선 항공편을 분석 대상으로 하였다. 분석 대상 항공편은 2021년 7월 부

표 2. 노선별 분석 대상 항공편수

Table 2. Number of flights to be analyzed by route

	CJJ	CJU	GMP	KUV	KWJ	PUS	TAE	WJU
CJJ		11						
CJU	8		16	3	4	3	6	1
GMP		19			5	9		
KUV		3						
KWJ		7	2					
PUS		2	10					
TAE		5						
WJU		1						

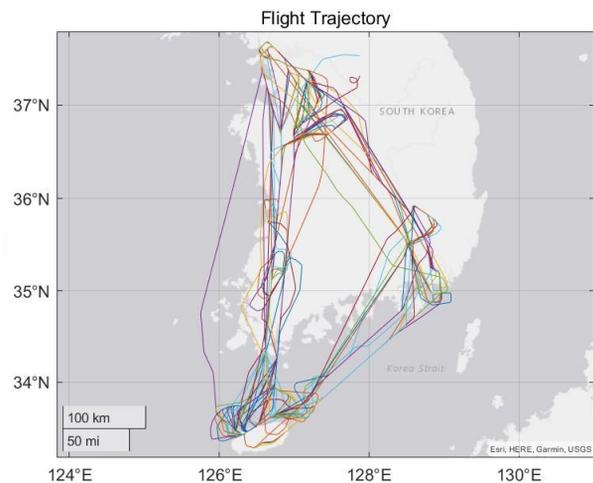


그림 2. 분석 대상 항공편의 항적
Fig. 2. Trajectories of flights to be analyzed

터 2022년 3월까지 8개의 공항(김포공항, 제주공항, 청주공항, 김해공항, 광주공항, 군산공항, 대구공항, 원주공항)을 대상으로 운항한 총 115편의 항공편이며, 노선별 분석 대상 항공편은 표 2에 정리하였다.

항적데이터를 기반으로 연료소모량을 분석하는 경우에는 ADS-B 데이터 수신기로 수집한 항적데이터를 사용하는 것이 가장 정확도가 높은 방법이지만, 수신기 설치 한계 등의 이유로 직접적인 데이터 확보에 어려움이 있다.

이에 본 연구에서는 비교적 쉽게 접근할 수 있는 온라인 ADS-B 데이터 제공 사이트 중 하나인 Flight Radar24를 통해 항적 데이터를 수집하였다. Matlab R2023a 버전을 이용하여 분석 대상 항공편의 항적 데이터를 표출한 결과는 그림 2와 같다.

3-2 연료소모량 추정 방법

AEDT (aviation environment design tool) 3e는 FAA (federal aviation administration)에서 개발한 소프트웨어로 모델링을 통해 항공기 운항 시 발생하는 소음과 연료, 배출가스를 계산할 수 있다[7]. AEDT는 소음 분석 프로그램인 INM (integrated noise model)과 연료소모, 배출가스 분석이 가능한 프로그램인 EDMS (emissions and dispersion modeling system)와는 달리 소음, 연료소모, 배출가스를 하나의 시스템에서 산출할 수 있다는 장점이 있다[8]. AEDT에는 30,000개 이상 공항의 활주로 정보와 3,000개 이상의 항공기-엔진 조합이 포함되어 있으므로, 이를 적절히 활용함으로써 신속하게 분석 환경을 구축할 수 있고 더욱 구체적인 결과를 도출할 수 있다.

본 연구에서는 원활한 분석을 위해 지상이동구간과 출발공항 활주로에서 도착공항 활주로까지의 비행구간 (Rwy to Rwy)으로 구분하였다. AEDT에서 지상이동구간의 연료소모량을 산출하는 공식은 수식 1과 같다. 해당하는 항공기 기종의 Fuel flow와 지상이동시간(t), 엔진 개수(N)를 이용하여 계산하는데, Fuel flow와 엔진 개수는 항공기 기종을 선택하면 프로그램 내에서 자체적으로 로드되므로 사용자가 직접 입력해야 하는 값은 지상이동시간이다.

$$Taxi\ fuel\ burn = Fuel\ flow \times t \times N \quad (1)$$

지상이동시간을 구하기 위해 지상이동구간을 출발 지상이동구간(Taxi-out)과 도착 지상이동구간(Taxi-in)으로 구분하고, 수식 2와 3을 통해 출발 지상이동시간(Taxi-out time)과 도착 지상이동 시간(Taxi-in time)을 산출하였다. 출발 지상이동시간은 이륙시간(Departure time)에서 주기장 진출시간(Off-block time)을 뺀 시간을 의미하며, 도착 지상이동시간(Taxi-in time)은 주기장 진입시간(In-block time)에서 착륙시간(Arrival time)을 뺀 시간이다. 이와 같이 산출된 시간을 입력하여 지상이동구간의 연료소모량을 추정할 수 있다.

$$Taxi\ out\ time = Departure\ time - Off\ block\ time \quad (2)$$

$$Taxi\ in\ time = In\ block\ time - Arrival\ time \quad (3)$$

비행구간의 항공기 연료소모량 추정 순서는 그림 3과 같다. 온라인 항적 데이터 제공 사이트를 통해 수집한 항적 데이터를 AEDT에 입력하여 연료소모량 추정 값을 도출한다. 지상 이동구간과는 달리 Rwy to Rwy 구간은 소프트웨어 설계상 그림 4와 같은 AEDT GUI로는 데이터 입력이 불가하다.

Rwy to Rwy 데이터를 이용하여 연료소모량을 분석하기 위해서는 항적데이터를 AEDT가 인식할 수 있는 형태인 XML (extensible markup language) 코드 기반의 ASIF (aedt standard input file) 형태로 변환하여야 한다. ASIF 내 포함되어야 하는 필수 요소에는 출도착 공항, 사용 활주로, 항공기 기종, 위경도 좌표, 속도, 고도, 시간 등의 정보가 있다.

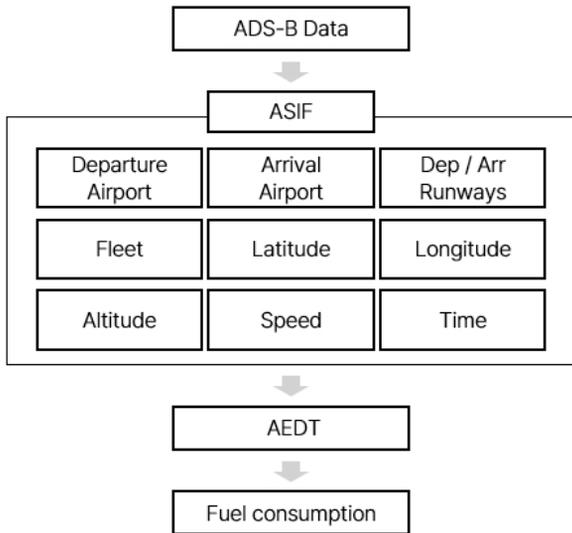


그림 3. 비행구간 연료소모량 추정 순서
Fig. 3. Steps for estimation of fuel consumption in flight phase

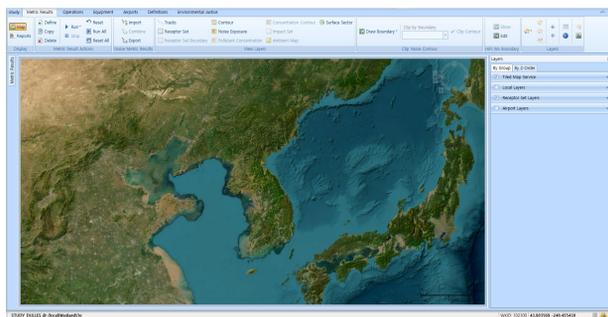


그림 4. AEDT 실행 GUI
Fig. 4. AEDT GUI

표 3. 추정한 연료소모량의 산출 예시

Table 3. Example of estimated fuel consumption

Mode	Fuel (kg)
Taxi Out	80
Climb Below 1,000ft AFE	114
Climb Below Mixing Height	260
Climb Below 10,000ft AFE	536
Above 10,000ft AFE	1,450
Descend Below 10,000ft AFE	498
Descend Below Mixing Height	430
Descend Below 1,000ft AFE	80
Taxi In	22
Full Flight	2,480

노선 조합별로 ASIF를 작성한 후 이를 AEDT에 입력하면 해당 노선을 운항한 항공편별 연료소모량 추정 값을 도출할 수 있으며, 표 3과 같이 비행 구간별 소모된 연료량도 확인이 가능하다. 표3의 내용을 상세하게 살펴보면, Taxi Out·In은 출발지상 이동 및 도착지상 이동구간의 연료소모량이며, Climb·Descend Below 1000ft AFE는 이륙 후 1,000ft까지 및 착륙 전 1,000ft AFE 미만인 비행 구간에서의 연료소모량을 의미한다. Climb·Descend Below Mixing Height는 Climb·Descend Below 1000ft AFE와 3,000ft AFE 미만의 상승 및 하강 비행 구간의 연료소모량이고, Climb·Descend Below 10,000ft AFE는 Climb·Descend Below Mixing Height 구간과 10,000ft AFE 이하의 비행 구간에서 발생하는 연료소모량을 의미한다. Above 10,000ft AFE는 10,000ft AFE 이상 비행 구간으로 구분하여 연료소모량을 산출하고, 마지막의 Full Flight는 앞에서 설명한 구간별 연료소모량을 합계한 최종 연료소모량을 의미한다.

IV. 항공기 연료소모량 추정 방법의 적용 및 산출 결과의 고도화

4-1 비행구간 실제 연료소모량과 추정 연료소모량 비교

III에서 제시한 추정 방법에 따라 연료소모량을 추정한 후, 해당 방법의 정확도를 확인하기 위해서는 연료소모량 추정 값과 실제 값을 비교해야 한다. 이를 위해 전체 데이터 개수 중 70%의 데이터를 이용하여 모형을 구축한 후, 표 4를 기반으로 그림 5와 같이 AEDT를 통해 추정한 연료소모량과 실제 연료소모량을 비교하였다. X축은 실제 연료소모량, Y축은 AEDT를 통해 추정한 연료소모량이다. 실제 값과 추정 값이 동일한 경우 데이터는 45도의 각도에 위치한 선상에 놓이게 된다. 모형의 성능을 평가하기 위해 RMSE와 R²를 확인하였다. RMSE는 평균제곱근오차로 실제 값과 추정 값의 차이를 의미한다. R²는 결정계수로 모형이 얼마나 의미가 있는지, 얼마나 선형에 가까운지를 확인할 수 있는 지표로 0과 1 사이에서 표현되며 1에 가까울수록 적합도가 높다고 해석할 수 있다[9]. 해당 모형의 RMSE와 R² 확인 결과 표 5와 같이 RMSE = 129, R² = 0.886의 값이 산출되어 적합도가 높은 편임을 확인하였다.

표 4. 항공편별 연료소모량 실제값과 추정값 예시
Table 4. Example of actual and estimated fuel consumption by flight

Flight Number	Actual	Estimated
1	2218	2360
2	2490	2480
3	2313	2340
:	:	:
77	1497	1250
78	1655	1550

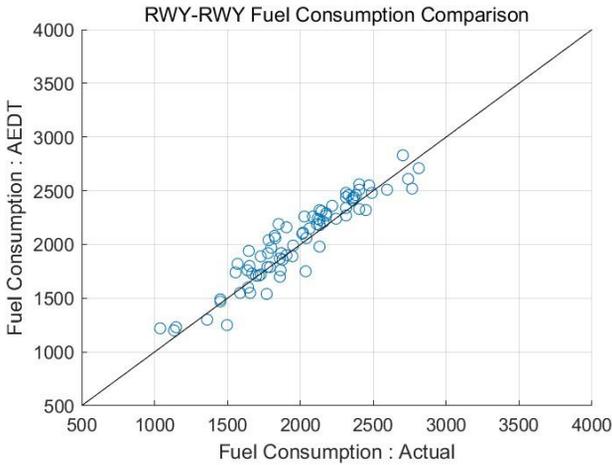


그림 5. Rwy to Rwy 구간의 연료소모량 실제 값과 추정 값 비교
Fig. 5. Comparison the actual and estimated fuel consumption(rwy to rwy)

표 5. 비행구간 연료소모량 추정 모형의 정확도
Table 5. Accuracy of the fuel consumption estimation model(flight phase)

	RMSE	R ²
RWY-RWY	129	0.886

4-2 지상이동구간 실제 연료소모량과 추정한 연료소모량 비교

그림 6과 그림 7은 출발 지상이동구간과 도착 지상이동구간의 실제 연료소모량과 AEDT를 통해 추정한 연료소모량을 비교한 그림이다. 출발 지상이동구간에 대해서 AEDT는 실제 값에 비해 많이 추정하고, 도착 지상이동구간은 실제 값 대비 적게 추정하는 것을 확인하였다.

표 6은 구간별 RMSE와 R²를 정리한 내용으로 비행구간에 비해 지상이동구간의 연료소모량 추정 모형은 정확도가 낮은 것으로 확인되었다. 이는 모형 성능에 개선이 필요한 부분이므로 모형의 정확도를 향상시키기 위해 선형 변환을 통한 고도화를 진행하였다.

표 6. 지상이동구간 연료소모량 추정 모형의 정확도
Table 6. Accuracy of the fuel consumption estimation model(taxi phase)

	RMSE	R ²
Taxi-Out	42.8	0.481
Taxi-In	57.3	0.0311

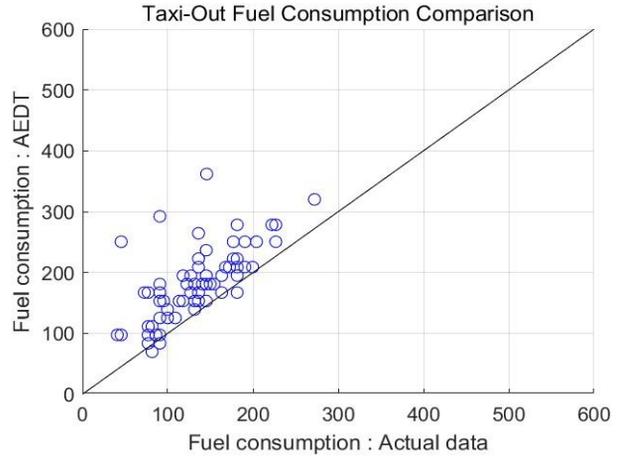


그림 6. 출발 지상이동구간의 연료소모량 실제 값과 추정 값 비교
Fig. 6. Comparison the actual and estimated fuel consumption(taxi-out)

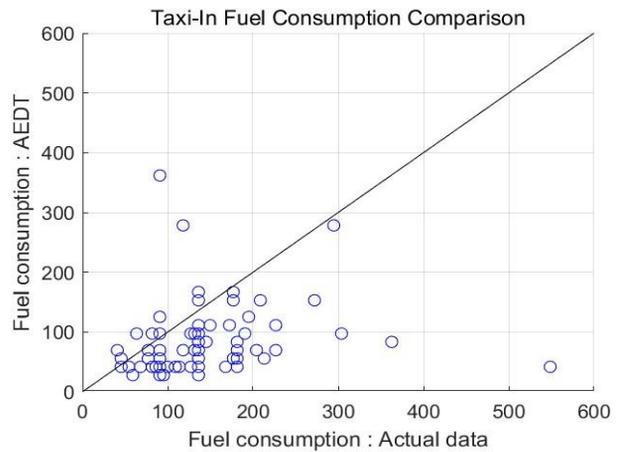


그림 7. 도착 지상이동구간의 연료소모량 실제 값과 추정 값 비교
Fig. 7. Comparison the actual and estimated fuel consumption(taxi-in)

4-3 지상이동구간 연료소모량 추정 방법의 고도화

지상이동구간 연료소모량 추정 모형의 정확도를 향상시키기 위해 주성분분석(PCA; principal component analysis)을 이용하였다. 주성분분석은 총 분산을 최대로 설명하는 설명변수들의 선형결합을 통해 총 변동의 대부분을 설명하는 주성분을 찾아내고 이를 통해 차원을 축소하는 분석 기법이다. 첫 번째 주성분인 PC1은 변수들의 총 분산을 최대로 설명해주는 방향으로 선택한 변수들의 선형결합식이다[10]. 실제 값과 추정 값의 특성을 반영한 주성분 PC1을 구할 때 이상치가 영향을 줄 수 있으므로 주성분분석 전 이상치로 추정되는 데이터를 제거하였다. 이상치가 제거된 데이터를 대상으로 각 구간별 주성분분석을 수행한 결과는 그림 8, 그림 9와 같다. 각 그림에 위치한 빨간 선이 첫 번째 주성분인 PC1을 의미한다. 선형 변환을 위해서는 PC1과 Y=X선의 교점을 기준으로 데이터를 회전

시켜야 한다. 구간별 교점 산출 결과, 출발 지상이동구간의 교점은 (-115.4113, -115.4113)이고 도착 지상이동구간의 교점은 (-111.5654, -111.5654)이다. 교점을 중심으로 PC1과 Y=X선 사이의 각도만큼 데이터를 회전시키기 위해 교점을 원점으로 이동시킨 후, PC1 상의 임의의 점과 Y=X선 상의 임의의 점 그리고 교점을 이용하여 회전각을 산출하였다. 그 결과 출발지상이동구간은 2.9936도, 도착지상이동구간은 7.5999도의 각도가 산출되었다. 산출된 회전각을 중심으로 회전된 데이터를 구하기 위해 수식 4를 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 10과 그림 11은 구간별로 산출된 회전각에 따라 데이터 회전 전과 후를 비교한 그림이다. 이는 교점을 원점으로 이동시킨 후의 데이터이므로, 회전 각도를 유지한 상태에서 다시 원래의 위치로 되돌린 결과는 그림 12, 그림 13과 같다.

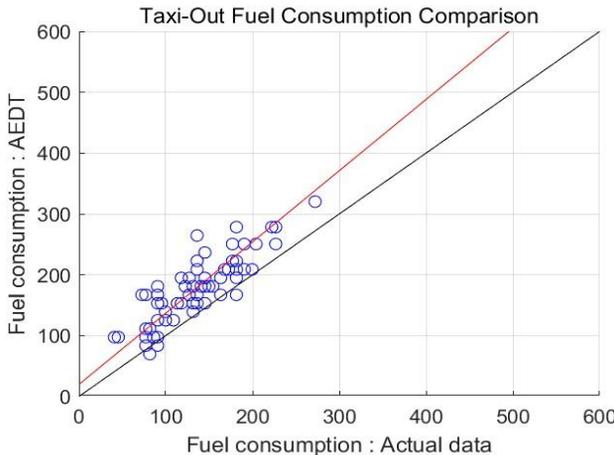


그림 8. PCA를 적용한 출발 지상이동구간 데이터
Fig. 8. Taxi-out data with PCA

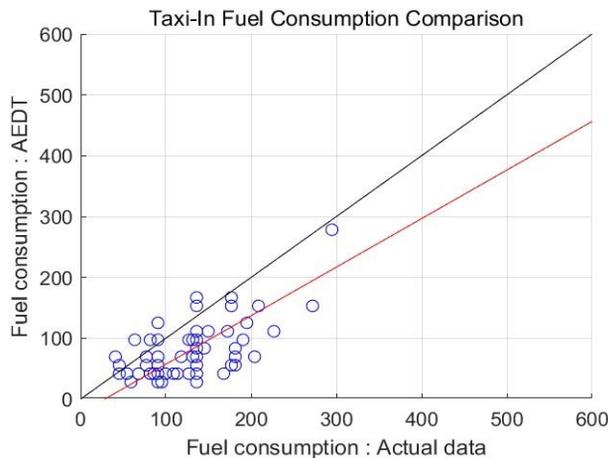


그림 9. PCA를 적용한 도착 지상이동구간 데이터
Fig. 9. Taxi-in data with PCA

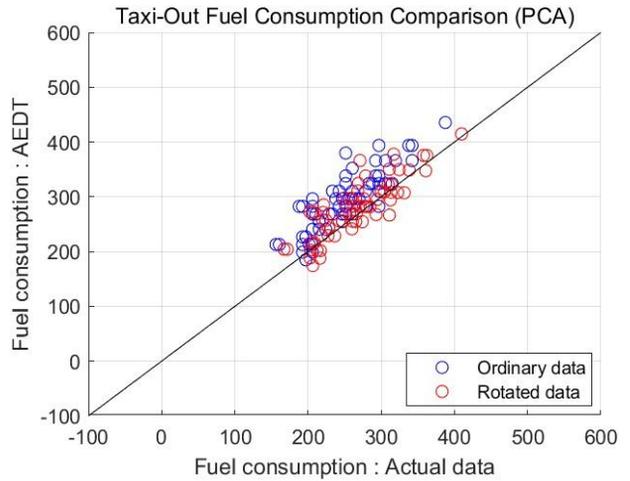


그림 10. 출발 지상이동구간 데이터의 회전 전후 비교
Fig. 10. Comparison of data rotation results(taxi-out)

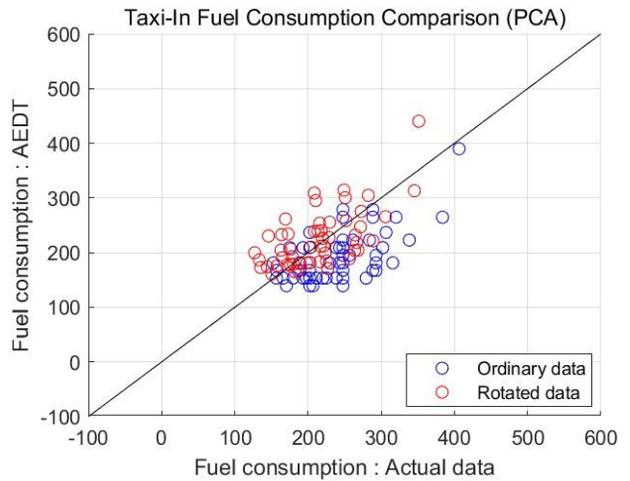


그림 11. 도착 지상이동구간 데이터의 회전 전후 비교
Fig. 11. Comparison of data rotation results(taxi-in)

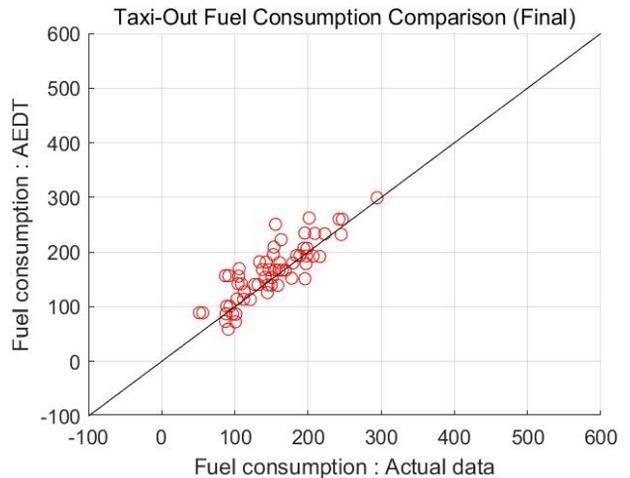


그림 12. 출발 지상이동구간 모형 보정 결과
Fig. 12. Model calibration results(taxi-out)

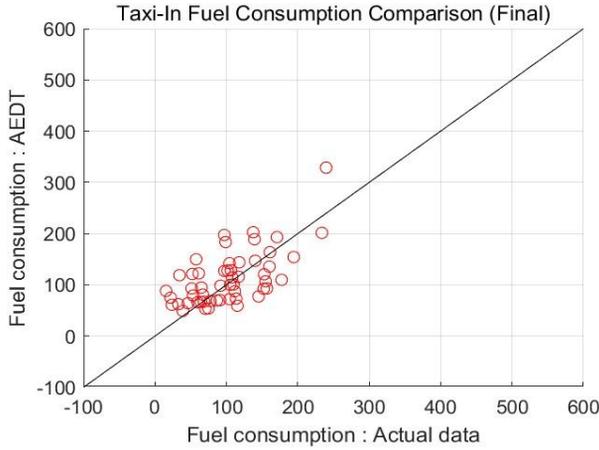


그림 13. 도착 지상이동구간 모형 보정 결과
 Fig. 13. Model calibration results(taxi-in)

표 7. 지상이동구간 연료소모량 추정 모형의 고도화 전후 비교
 Table 7. Comparison of model advancement results(taxi phase)

	Taxi-Out		Taxi-In	
	Before	After	Before	After
RMSE	42.8	27.7	57.3	37.9
R ²	0.481	0.714	0.0311	0.395

표 7은 구간별 주성분분석을 적용하기 전과 후의 RMSE와 R²를 비교한 결과이다. 주성분분석을 적용한 후 출발 지상이동구간의 RMSE = 27.7, R² = 0.714이며, 도착 지상이동구간의 RMSE = 37.9, R² = 0.395이다. 주성분분석 적용 결과, 두 구간 모두 기존 대비 정확도가 향상되었음을 확인하였다.

V. 항공기 연료소모량 추정 방법의 검증

5-1 비행구간 실제 연료소모량과 추정된 연료소모량 비교

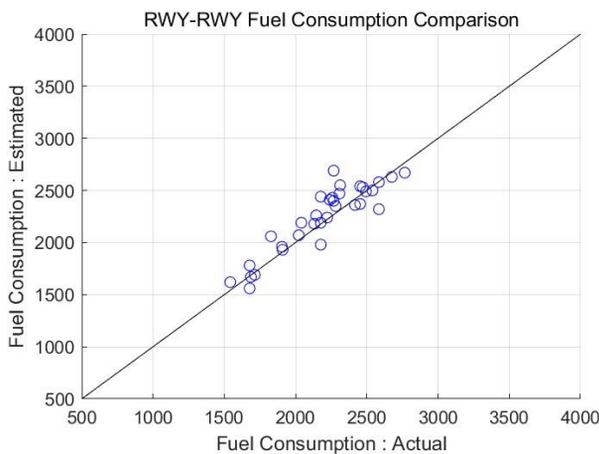


그림 14. 비행구간 연료소모량 추정 모형 검증
 Fig. 14. Verification of fuel consumption estimation model(rwy to rwy)

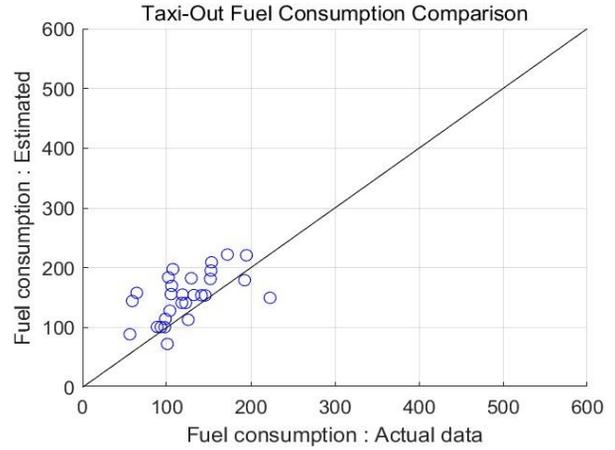


그림 15. 출발 지상이동구간 연료소모량 추정 모형 검증
 Fig. 15. Verification of fuel consumption estimation model(taxi-out)

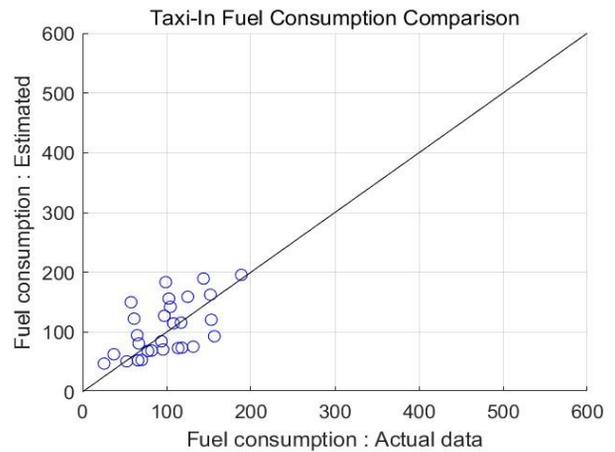


그림 16. 도착 지상이동구간 연료소모량 추정 모형 검증
 Fig. 16. Verification of fuel consumption estimation model(taxi-in)

비행구간을 대상으로 구축한 연료소모량 추정 모형을 검증하기 위해 전체 데이터 개수의 30%에 해당하는 검증용 데이터를 활용하였다. 총 33개의 실제 연료소모량 데이터를 이용하여 모형을 검증한 결과 RMSE = 136, R² = 0.825로 그림 14와 같이 모형의 정확도가 높음을 확인할 수 있다.

5-2 지상이동구간 실제 연료소모량과 추정된 연료소모량 비교

검증용 데이터를 이용하여 고도화된 지상이동구간의 연료소모량 추정 모형을 검증한 결과, 출발 지상이동구간은 그림 15, 도착 지상이동구간은 그림 16과 같은 결과가 도출되었다. 출발 지상이동구간은 과대추정, 도착 지상이동구간은 과소추정하는 경향이 있으나 고도화된 모형을 적용함으로써 개선됨을 확인할 수 있었다. 모형 검증 결과, 출발 지상이동구간은 RMSE = 32.5, R² = 0.296이며, 도착 지상이동구간은 RMSE = 35.3, R² = 0.336임을 확인하였다.

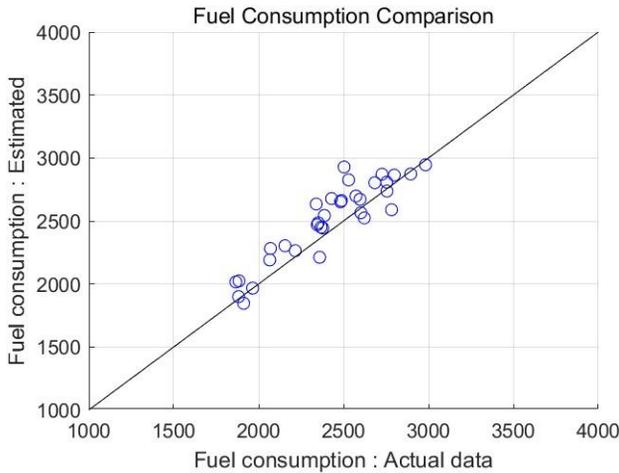


그림 17. 전체 비행구간 연료소모량 추정 모형 검증
 Fig. 17. Verification of fuel consumption estimation model(all phases)

표 8. 연료소모량 추정 모형의 검증 결과
 Table 8. Verification results of the fuel consumption estimation model

	RWY-RWY	Taxi-Out	Taxi-In	All
RMSE	136	32.5	35.3	130
R2	0.825	0.296	0.336	0.834

5-3 전체비행구간 실제 연료소모량과 추정된 연료소모량 비교

전체 비행구간의 연료소모량 추정 모형을 검증하기 위해 비행구간과 출발 지상이동구간, 도착 지상이동구간의 실제 연료소모량과 추정 연료소모량을 각각 합하였다. 그림 17과 같이 비교한 결과 RMSE = 130, R² = 0.834로 정확도가 높음을 확인할 수 있었다. 각 구간과 전체 비행구간의 검증 결과를 표 8에 정리하였다. 출발 지상이동구간과 도착지상이동구간의 R²는 각 0.296, 0.336으로 정확도가 낮은 편이나, 비행구간과 출발 도착 지상이동구간을 모두 합한 총 구간의 R²는 0.834로 정확도가 높은 것으로 확인되었다. 따라서 추후 출발공항의 게이트부터 도착공항 게이트까지 개별 항공편의 연료소모량을 추정하는 경우 실제와 유사한 수준에서 추정이 가능할 것이다.

VI. 결 론

본 논문은 실제 연료소모량 데이터 확보의 한계를 고려하여 FAA의 AEDT를 활용한 연료소모량 추정 모형을 구축하고 이를 실제 연료소모량과 비교하여 모형의 정확도를 확인하였다. 실제 연료소모량 데이터는 모 항공사의 운항승무원을 통해 수집하였으며 그 중 70%는 모형 구축용, 30%는 모형 검증용으로 구분하여 사용하였다. 비행구간과 출발 지상이동구간, 도착 지상이동구간의 세 구간으로 구분하여 연료소모량을 추정하였으며, 비행구간의 연료소모량 추정 모형 구축 결과

RMSE = 129, R² = 0.886의 값이 산출되어 정확도가 높은 편임을 확인하였다. 지상이동구간의 연료소모량 추정 모형 구축 결과 출발 지상이동구간은 RMSE = 42.8, R² = 0.481, 도착 지상이동구간은 RMSE = 57.3, R² = 0.0311로 비행구간에 비해 모형의 정확도가 낮음을 확인하였다. 따라서 주성분분석을 기반으로 선형변환을 통한 모형의 고도화를 수행하였고 그 결과 출발 지상이동구간은 RMSE = 27.7, R² = 0.714, 도착 지상이동구간은 RMSE = 37.9, R² = 0.395로 기존 대비 정확도가 향상되었다. 검증용 데이터를 이용하여 모형을 검증한 결과 비행구간은 RMSE = 136, R² = 0.825이며 출발 지상이동구간은 RMSE = 32.5, R² = 0.296, 도착 지상이동구간은 RMSE = 35.3, R² = 0.336임을 확인하였다. 세 개의 구간을 모두 합한 전체 구간을 대상으로 연료소모량 추정 모형을 검증한 결과 RMSE = 130, R² = 0.834로 정확도가 높음을 확인하였다. 지상이동구간 모형의 정확도는 낮은 편이나, 전체 구간에 대한 정확도는 높으므로 국내선 연료소모량 추정에 문제는 없을 것이라 생각한다.

본 논문은 특정 항공사의 실제 연료소모량 데이터만을 이용한 것으로 추후 다양한 항공사의 데이터가 확보된다면 더욱 정확한 추정이 가능할 것이다. 또한 추정 모형을 통해 연료소모량을 추정하고 탄소 배출량 감소를 위한 방안별 연료소모량 절감 효과 분석에 활용함으로써 ICAO의 CORSIA 제도 이행에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgements

본 연구는 국토교통부 데이터 기반 항공교통관리 기술 개발 사업 연구비 지원 (과제번호 : RS-2021-KA163373)에 의해 수행되었습니다. 지원 기관에 감사드립니다.

References

- [1] ICAO, Annex 16, Environmental Protection Volume 4, Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation(CORSIA), *International Civil Aviation Organization*, 2018.
- [2] ICAO, Environmental Report, Chapter 6, Climate Change Mitigation : CORSIA, *International Civil Aviation Organization*, 2019.
- [3] J. H. Park, Estimation of flight fuel consumption based on flight track data and the reliability analysis, Master's thesis, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, Korea, Feb. 2014.
- [4] E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau and S. Federici, Guidelines for National

- Greenhouse Gas Inventories, Volume 2, Energy, IPCC, 2006.
- [5] J. S. Woo, Y. J. Lee and K. E. Yoo, "A case study of aircraft taxi fuel consumption prediction model (A380 case)," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 28, No. 2, pp.29-35, Jun. 2020.
- [6] K. Seymour, M. Held, G. Georges and K. Boulouchos, "Fuel estimation in air transportation: modeling global fuel consumption for commercial aviation," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 88, Nov. 2020.
- [7] U.S. DOT Volpe Center, Aviation Environmental Design Tool (AEDT) User Manual, version 3e, *U.S. Department of Transportation Volpe National Transportation Systems Center*, 2022.
- [8] U.S. DOT Volpe Center, Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Technical Manual, version 3e, *U.S. Department of Transportation Volpe National Transportation Systems Center*, 2022.
- [9] J. Y. Yang, S. Y. Jeon and H. S. Lee, "Predictive models and visualizations according to outcome variables using r – focusing on regression analysis," *Journal of Health Informatics and Statistics*, Vol. 47, pp. 21-30, Aug. 2022.
- [10] G. Zhang, Comparison of principal component analysis methods of missing data, Master's thesis, Korea University, Seoul, Korea, Jun. 2015.



홍혜진 (HyeJin Hong)

2022년 2월 : 한서대학교 항공산업공학과 졸업
 2022년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 일반대학원 항공운항관리학과 석사과정
 ※ 관심분야 : 항공교통관리, 시스템공학, 최적화, 운항효율성



최지헌 (JiHun Choi)

2013년 4월 ~ 2019년 10월 : 대한항공 등 B737, B777 부기장
 2023년 2월 : 한서대학교 일반대학원 항공운항관리학과 이학박사
 2019년 10월 ~ 현재 : 진에어 B737 기장
 ※ 관심분야 : 항공운항, 비행데이터 분석, 시스템다이내믹스, UAM



구성관 (SungKwan Ku)

2017년 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 이학박사
 2009년 9월 ~ 2014년 2월 : 한국산업기술시험원 기계시스템본부 연구원
 2015년 6월 ~ 2016년 8월 : Virginia Tech 방문 교수
 2014년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공산업공학과 부교수
 ※ 관심분야 : 항공교통, 시험평가인증, 시스템분석, 시뮬레이션, 안전성평가