

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.3.361>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

대형운송용 항공기의 실제운항데이터 기반 연료소모 영향요인 분석 및 설명모형 개발

유재림*

Analysis of Factors affecting Fuel Consumption and Development of Explanatory Models for Large Transport Aircraft based on Actual Operational Flight Data

Jae leame Yoo*

ABSTRACT

This study analyzed the major factors affecting the Fuel Consumption Index (FCI) of large transport aircraft and developed aircraft-specific explanatory regression models using actual airline operational data. The dataset comprised 6,526 A330-300 flights and 3,299 A350-900 flights operated from July 2022 to December 2023. Multiple regression analysis was performed using seven operational and performance variables. The final A330-300 model included PLD, DIST, CG, APM, OAT, and EXTRA, with an adjusted R^2 of 0.624, while the A350-900 model included PLD, DIST, CG, and OAT, with an adjusted R^2 of 0.711. In both aircraft types, PLD showed the largest absolute standardized regression coefficient in both aircraft types, while CG showed a negative relationship and OAT a positive relationship. DIST showed different associations with FCI between the two datasets. These results provide empirical evidence for data-driven fuel management, including payload and CG optimization, aircraft performance management, and fuel uplift management.

Key Words : Fuel Consumption Index(연료소모성지수), Operational Flight Data(운항데이터), Multivariate Regression Analysis(다중회귀분석), Payload Effect(적재중량 효과)

1. 서 론

국제 항공 전문기관인 ICAO, IATA, FAA 및 EASA는 항공운송 부문의 탄소배출 저감과 에너지 효율 향상을 위해 지속가능항공연료(SAF), 항공기·엔진 기술혁신,

운항 및 인프라 개선(operations & infrastructure), 시장기반조치(market-based measures) 등을 주요 전략으로 추진하고 있다. ICAO는 감축수단별 기여도를 단일 값으로 제시하기보다 LTAG (long-term aspirational goal) 및 CAEP(committee on aviation environmental protection) 분석을 통해 기술, 연료 및 운항개선에 따른 장기적인 배출감축 잠재력을 시나리오별로 평가하고 있다. 이 가운데 운항 및 ATM 개선은 SAF나 차세대 항공기 기술보다 감축 잠재량은 상대적으로 작지만, 기존 항공기에 즉시 적용할 수 있고 대규모 기체 개조 없이 지속적인 효율 향상이 가능하다는 점에서 중

Received: 17. Aug. 2026, Revised: 12. Sep. 2026,

Accepted: 28. Sep. 2026

* 제주대학교 항공운항학과 교수

연락처 E-mail : okskyoo@hanmail.net

연락처 주소 : 충북 청주시 청원로 대성로 298, 교수연구동(10동) 517호

요한 탄소 저감 수단이다. 한편 최근 항공기 시스템의 디지털화와 데이터 획득 기술의 발전으로 비행단계별 에너지 시스템의 상태를 정량적으로 분석할 수 있는 대규모 운항데이터의 활용이 확대되고 있다.

한편 FDR(flight data recorder), QAR(quick access recorder), ACARS(aircraft communications addressing and reporting system), OFP (operational flight plan) 등에서 생성되는 데이터는 항공기 상태변수(state variables), 운항 입력변수(operational inputs) 및 연료소모 간의 관계를 분석하는 항공운항 빅데이터(aviation operational big data)로 활용될 수 있다. 특히 FMIS(fuel management information system)는 이러한 데이터를 통합하여 fuel burn, 연료효율 및 탄소배출 관련 지표를 산출하고, 노선·기종별 성능편차 분석과 fuel uplift optimization을 지원하는 데이터 기반 운항관리체제로 활용되고 있다(유재립, 2025).

항공기의 실제 연료소모는 payload, flight distance, center of gravity, OAT, aircraft performance 및 운항환경 등 다수의 변수가 상호작용하는 다변량 비선형 시스템(multivariate nonlinear system)의 특성을 갖는다. 따라서 단일 변수나 단순 상관관계만으로는 실제 운항에서 발생하는 연료소모의 변동성과 변수 간 결합효과(coupled effects)를 충분히 설명하기 어렵다. 이에 항공사는 운항 빅데이터를 기반으로 노선별 연료효율 분석, aircraft performance monitoring(APM), 기상·항공 교통정보 기반 항로 최적화 및 운항절차 개선 등을 수행하고 있으며, 연료관리 역시 경험적 접근에서 data driven fuel efficiency optimization 체계로 전환될 필요가 있다.

이와 관련하여 본 연구에서는 항공사의 A330 및 A350-900 항공기의 실제 운항데이터를 활용하여 연료효율에 영향을 미치는 주요 운항·성능변수를 정량적으로 분석하고, 연료소모 영향요인 분석 및 설명 모형을 구축하고자 한다. 이를 통해 각 영향변수와 연료효율 간의 공학적 관계를 규명하고, 기종별 운항특성에 적합한 연료효율 최적화 전략을 도출하여 데이터 기반 연료관리 및 탄소배출 저감을 위한 실증적 근거를 제시하고자 한다.

II. 본 론

2.1 국제 항공기구별 탄소감축 및 연료 효율 향상 전략

ICAO는 LTAG를 기반으로 PBN, TBO, CCO/CDO 및 A-CDM 등을 통한 운항·ATM 효율화를 추진하고 있다(ICAO Environmental Report, 2025). IATA는 2050년 탄소감축에서 operations & infrastructure의 기여도를 7%로 제시하고, cost index 및 fuel uplift 최적화, APM과 운항데이터 분석 등을 항공사 차원의 연료효율 향상수단으로 제시하고 있다(IATA Report, 2023). FAA는 NextGen을 기반으로 PBN, OPD, ADS-B, data comm, TBFM 및 TFDM 등을 활용하여 비행경로와 지상·공중 지연을 최소화하는 ATM 최적화를 추진하고 있으며(FAA Report, 2026), 유럽 항공체계는 SESAR를 중심으로 CCO/CDO, FRA, TBO, A-CDM과 항공기 성능·연료관리를 연계하고 있다(EU Aviation Environmental Report, 2025). 이들 기관의 추진체계와 적용기술에는 차이가 있으나, 비행경로·프로파일 최적화, ATM 효율화, 항공기 성능관리 및 데이터 기반 운항최적화(data-driven operational optimization)를 기존 항공기의 연료소모와 탄소배출을 저감하기 위한 공통적인 운항전략으로 적용하고 있다.

2.2 국제 항공기구별 Operations & Infrastructure 정책 비교

국제 항공기구의 operations & infrastructure 정책을 비교해 보면, 모든 기관은 기존 항공기의 성능을 최대한 활용하기 위해 운항절차 최적화, 항공교통관리 고도화 및 데이터 기반 운항관리를 공통 전략으로 채택하고 있다.

ICAO는 국제표준과 권고기준을 중심으로 글로벌 운항절차를 제시하고, IATA는 항공사의 운항관리 모범 사례(best practice)를 중심으로 연료관리 체계를 제안하고 있다. FAA는 NextGen을 기반으로 디지털 ATM과 PBN을 확대하고 있으며, EASA는 SESAR를 중심으로 FRA, TBO 및 동적 비행계획(dynamic flight planning)을 구축하여 운항효율 향상을 추진하고 있다.

최근에는 모든 기관이 aircraft performance

Table 1. Major operations & infrastructure strategies by aviation organizations

분 야	ICAO	IATA	FAA	EASA
Continuous climb operations (CCO)	○	△	○	○
Continuous descent operations (CDO)	○	△	○	○
Performance based navigation (PBN)	○	△	○	○
Aircraft performance monitoring	○	○	△	○
Fuel uplift optimization	○	○	△	○
Weight reduction	△	○	△	○
Cost index optimization	△	○	△	○
Free route airspace (FRA)	△	-	-	○
Trajectory based operations (TBO)	○	-	△	○
Airport collaborative decision making (A-CDM)	○	△	○	○
Dynamic flight planning	△	○	○	○
Digital ATM / data communication	○	-	○	○

monitoring(APM)과 data-driven flight operations를 차세대 연료절감 전략의 핵심 요소로 제시하고 있다는 공통점을 확인할 수 있다(Table 1).

2.3 항공기 연료효율성 영향요인

항공기의 연료소모량(fuel burn)은 단일 변수에 의해 결정되지 않으며, 공력특성, 추진효율(propulsion efficiency), 운항환경 및 운항전략(operation strategy)이 상호작용하는 다변량 시스템의 결과이다. 주요 영향요인은 payload, flight distance, outside air temperature (OAT), center of gravity(CG), extra fuel, aircraft performance monitoring(APM), flight altitude 및 aircraft age 등으로 구성되며, 이들 변수는 요구추력(required thrust), 항력(drag), 연료유량(fuel flow) 및 추진효율을 변화시켜 연료소모를 결정한다. 이러한 관계는 이미 잘 알려진 항속거리와 연료소모량의 관계를 설명하는 Breguet

항속방정식(Breguet range equation)을 통해 알 수 있으며, 연료효율 향상은 공력, 추진 및 운항관리의 통합 최적화(system optimization)를 통해 달성된다. 주요 영향요인에 대하여 좀더 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

2.3.1 PLD (Payload)

Payload는 승객, 수하물 및 화물 등 유상탑재중량을 의미하며, 항공기 이륙중량을 결정하는 핵심 운항변수로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$W = OEW + PLD + Fuel \quad (1)$$

여기서 W는 이륙중량, OEW는 운용공허중량이다. Payload가 증가하면 총중량 증가에 따라 요구양력과 유도항력이 증가하여 연료소모량은 증가한다. 그러나 연료효율은 단위 운송실적(payload ton-kilometer) 기준으로 평가되므로 일정 수준 이상의 payload 확보는 운송효율을 향상시키며, 운항거리 및 연료탑재량과 결합되어 연료효율을 결정하는 핵심 독립변수이다.

2.3.2 DIST (Flight Distance)

Flight distance는 단순한 공간적 이동거리가 아니라 항공기의 에너지 소비시간(time exposure)을 결정하는 핵심 운항변수이다. 총 연료소모량은 비행시간 동안의 연료유량(fuel flow)을 적분한 값으로 아래 식 (2)와 같다.

$$Fuel_{burn} = \int_0^t FF(t)dt \quad (2)$$

또한 항공기의 연료소모는 이륙, 상승, 순항 및 강하 단계별 연료유량이 서로 다르므로 거리와 선형적인 관계를 갖지 않는다. 장거리 운항에서는 연료효율이 가장 우수한 순항구간의 비중이 증가하여 단위 운송거리당 연료소모율이 감소하는 stage length effect가 나타난다.

2.3.3 OAT(Outside Air Temperature)

OAT는 아래의 식 (3)의 ρ 값에 영향을 미치는 운항 고도에서의 실제 대기온도로서 공기밀도와 엔진성능을 결정하는 환경변수이다.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3)$$

식 (3)의 ρ 는 공기밀도, P 는 압력, T 는 절대온도이다. 온도가 증가하면 공기밀도가 감소하여 양력 생성능력과 엔진 흡입질량유량이 감소하고, 결과적으로 요구추력과 연료유량이 증가한다. 반대로 저온환경에서는 공력 및 추진효율이 향상되어 연료효율성이 개선된다.

2.3.4 CG (Center of Gravity)

CG는 항공기 질량중심의 위치를 나타내는 세로안정성 변수이다. 종적 평형을 유지하기 위해 전방 CG에서는 꼬리날개의 하향력이 증가하여 트림 항력이 증가하고, 연료소모가 증가한다. 반대로 후방 CG에서는 트림 항력이 감소하여 양항비(L/D)가 향상되므로 연료효율이 개선된다(Airbus Flight Physics, 2021).

2.3.5 Extra Fuel

Extra fuel은 법정 최소연료를 초과하여 운항 안전성을 위해 추가 탑재하는 연료로 아래 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 추가 연료는 이륙중량 증가를 통해 요구추력과 유도항력을 증가시키며, 추가 연료를 운반하기 위해 다시 연료를 소비하는 Fuel Penalty를 유발한다. 따라서 최적 연료탑재전략은 안전성과 연료효율 간의 균형을 결정하는 핵심 운항관리 요소이다. 일반적으로 추가 연료 1kg당 약 0.03~0.05 kg의 추가 연료가 소비되는 것으로 보고되고 있다(ICA0, 2018; Airbus, 2021).

2.3.6 APM (Aircraft Performance Monitoring)

APM은 실제 항공기 성능과 기준성능 간의 편차를 정량적으로 평가하는 성능지표로 아래 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$APM(\%) = \frac{FF_{Actual} - FF_{Reference}}{FF_{Reference}} \times 100 \quad (4)$$

APM값이 증가할수록 항력이 증가하고 엔진 성능 저하 및 기체 오염 등에 따른 성능 저하가 발생한 것으로 해석되며, 동일한 운항조건에서도 요구추력과 연료소모가 증가하게 된다. 일반적으로 APM이 $\pm 3\%$ 이상 기준 성능에서 벗어날 경우 성능 이상으로 판단하며, 항공사는 APMS 및 FOQA를 활용하여 성능 변화를 지속적으로 감시하고 정비계획 및 운항 최적화에 활용한다(StorkJet et al., 2023).

2.3.7 Flight Altitude

비행고도는 공력효율과 추진효율을 동시에 결정하는 운항변수로 고도가 증가하면 공기밀도가 감소하여 항력이 감소하고 요구추력과 연료유량이 감소한다. 그러나 과도하게 높은 고도에서는 엔진추력 여유와 Mach Margin이 감소하여 연료효율이 저하될 수 있으므로 실제 운항에서는 Optimum Flight Level과 Step Climb을 적용한다.

2.3.8 AGE (Aircraft Age)

Aircraft age는 운항기간 증가에 따른 공력 및 추진계통의 성능 저하를 나타낸다. 이는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_f = TSFC \times T_{req} \quad (5)$$

여기서 $\dot{m}_f$ 는 연료유량, TSFC(thrust specific fuel consumption)는 추력당 연료소모율이다. 항공기 성능 저하는 항력 증가와 추진효율 저하를 동시에 유발하여 연료소모를 증가시키며, 일반적으로 기령이 증가할수록 연료소모율은 연간 약 0.3~0.5% 증가하는 것으로 보고되고 있다(IATA, 2009).

2.4 연구 방법 및 고려사항

2.4.1 운항실적 자료

두 개 기종(A330-300, A350-900)에 대하여 운항성능 데이터는 연료관리 및 정보시스템(fuel management & information system)으로부터 수집된 것으로 데이터 범위는 아래 Table 2와 같다.

분석자료는 실제 운항자료(actual data)를 원칙으로 하되, 일부 변수는 비행계획자료(planned data)를 활용하였다. 변수별 자료유형을 구분하고, 사전에 설정한 유효범위를 벗어난 이상자료를 제외하여 A330-300 6,526편과 A350-900 3,299편을 최종 분석에 사용하였다.

Table 2. Scope of flight performance data

기종	비행시간 (hour)	자료갯수	유상탑재량 (ton)	연료 소모성 지수
A330	3.00~11.00	6,526	2.5~45.0	0.3~2.7
A350	11.0~15.00	3,299	5.0~50.0	0.3~2.8

2.4.2 분석 방법

PLD(operation input variable), DIST(flight profile variable), CG(flight mechanics variable), OAT(environmental variable), APM(performance variable), EXTRA Fuel(fuel management variable) 및 AGE(aircraft characteristic variable)를 독립변수로 선정하고, 이들이 종속변수인 연료소모성지수(FCI)에 미치는 영향과 상대적 영향력을 분석하기 위해 SPSS 25.0을 활용한 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 수행하였다.

2.4.3 회귀모형상 고려사항

일부 선행연구논문에서는 PLD(payload) Ton- Kilometer당 연료소모량(lb/Ton·km)을 연료효율성지수로 정의하였다(장성우·조율현·유재림·유광의, 2021; 장성우·유재림·유광의, 2022). 그러나 본 연구에서는 회귀계수의 방향성과 변수 간 영향관계를 명확히 해석하기 위해 종속변수를 연료소모성지수(fuel consumption index, FCI)로 정의하였다. 따라서 연료소모성지수(fuel consumption index, FCI)는 단위 수송실적당 연료소모량으로 정의하였으며, 다음과 같이 산출하였다.

$$FCI = \frac{\text{Fuel Consumption}(lb)}{\text{Payload}(ton) \times \text{Flight Distance}(km)} \quad (6)$$

FCI의 단위는 lb/(ton·km)이며, 값이 낮을수록 단위 수송실적당 연료소모가 적음을 의미한다. 다만 PLD와 DIST는 FCI 산정식의 구성요소이므로, 이들 변수와 FCI 간에는 구조적인 수학적 상관관계(mathe-matical coupling)가 발생할 가능성이 있음을 분석결과와 해석에 고려하였다. 다중회귀분석은 1차적으로 7개 독립변수를 모두 적용한 후, 통계적 유의성과 공학적 타당성을 검토하여 일부 변수를 제외한 최종모형을 추가 분석함으로써 모형의 간결성과 해석 타당성을 확보하였다. 모형 평가는 결정계수(R^2), 수정된 결정계수(Adjusted R^2), F -검정, t -검정, 유의확률(p -value), 공차한계(tolerance), 분산팽창계수(VIF) 및 민감도 분석(sensitivity analysis)을 이용하였다. 본 연구는 통계이론 자체보다는 실제 운항데이터 기반 FCI 설명모형의 구축과 공학적 해석에 중점을 두었으며, 통계기법에 대한 이론적 설명은 최소화하였다.

2.5 분석 결과

2.5.1 Airbus 330-300 연료소모성 설명모형

연료소모성지수 분석은 처음 계획에 따라 7개 변수를 독립변수로 설정하여 종속변수에 대한 영향과 원인을 추정하였다. ANOVA를 이용한 회귀모형의 통계적 유의성 검정 결과 Table 3과 같이 $F=1546.321$, $p<.001$ 로 나타나 회귀모형 전체가 통계적으로 유의한 것으로 확인되었다. 이는 독립변수들이 연료소모성지수의 변동을 유의하게 설명하고 있음을 의미하며, 본 회귀모형은 연료소모성지수 예측을 위한 통계적 유의성이 확보된 모형으로 판단된다.

1차 분석 결과는 Table 4와 같이 다중상관계수 R 은 0.790, 결정계수 R^2 와 수정된 결정계수(Adjusted R^2)는 각각 0.624로 나타나, 독립변수들이 종속변수 변동의 약 62.4%를 설명하는 것으로 분석되었다.

또한 모형의 유의확률은 $p<.001$ 로 통계적으로 유의하였고, Durbin - Watson 통계량은 1.354로 나타나 잔차의 양의 자기상관 가능성이 일부 존재하는 것으로 나타났고, AGE의 회귀계수는 0.001, 유의확률은 $p=0.371$ 로 나타나, 다른 변수들을 통제한 조건에서 연료소모성지수에 대한 AGE의 독립적인 영향은 통계적으로 유의하지 않았다($p>0.05$). 따라서 모형의 간결성과 설명변수의 유효성을 고려하여 최종 회귀모형에서 독립변수 AGE를 제외한 후 2차(최종) 통계분석을 실시하였다.

AGE를 제외한 2차 분석결과, Table 5 및 6과 같이 회귀제곱합은 242.458에서 242.440으로 0.018 감소하였고 잔차 평균제곱은 0.022로 동일하게 유지되었으며, 수정된 R^2 에서도 실질적인 변화가 나타나지 않았다. 최종 A330-300 연료소모성지수(FCI) 설명모형은 다음과 같다.

$$FCI=0.885-0.026PLD+0.015DIST-0.007CG+0.010APM+0.002OAT+0.003EXTRA$$

Table 3. ANOVA for initial FCI model (A330-300)

모형	제곱합	자유도	평균 제곱	F	유의 확률
회귀	242.458	7	34.637	1546.321	.000
잔차	146.000	6518	0.022		
전체	388.458	6525			

Table 4. Regression results for fuel consumption index (A330-300)

요인	비표준화 계수		표준화계수	t	p	다중공선성 통계량	
	B	SE	β			Tolerance	VIF
(상수)	0.885	0.115		7.611	0.000		
PLD	-0.026	0.000	-0.790	-100.561	0.000	0.934	1.071
DIST	0.015	0.002	0.057	7.125	0.000	0.908	1.102
CG	-0.007	0.001	-0.082	-10.444	0.000	0.939	1.065
APM	0.010	0.002	0.046	6.041	0.000	0.974	1.027
OAT	0.002	0.000	0.036	4.393	0.000	0.860	1.163
EXTRA	0.003	0.001	0.020	2.566	0.010	0.938	1.066
AGE	0.001	0.001	0.007	0.894	0.371	0.971	1.030

종속변수 : 연료소모성 지수

 $R^2=.624$, Adjusted $R^2=.624$, D/W=1.354 $p<.001$.

Table 5. ANOVA for final FCI model (A330-300)

모형	제곱합	자유도	평균 제곱	F	유의 확률
회귀	242.440	6	40.407	1,803.964	.000
잔차	146.018	6519	0.022		
전체	388.458	6525			

최종모형은 $R^2=.625$, Adjusted $R^2=.624$, $F=1803.964$, $p<.001$ 로 FCI 변동의 약 62.4%를 설명하였으며, 모형 전체의 통계적 유의성이 확인되었다. VIF는 1.005~1.162로 다중공선성 문제는 없는 것으로 판단된다. 다만 Durbin-Watson 값은 1.354로 나타나 잔차의 양의 자기상관 가능성에 대한 추가 검토가 필요하다.

개별 변수의 상대적 영향력은 표준화계수의 절댓값

Table 6. Final regression model for fuel consumption index(A330-300)

요인	비표준화 계수		표준화계수	t	p	다중공선성 통계량	
	B	SE	β			Tolerance	VIF
(상수)	0.885	0.115		7.696	0.000		
PLD	-0.026	0.000	-0.791	-100.794	0.000	0.937	1.067
DIST	0.015	0.002	0.027	7.159	0.000	0.909	1.100
CG	-0.007	0.001	-0.082	-10.512	0.000	0.942	1.062
APM	0.010	0.002	0.045	5.974	0.000	0.995	1.005
OAT	0.002	0.000	0.036	4.400	0.000	0.860	1.162
EXTRA	0.003	0.001	0.020	2.566	0.010	0.938	1.066

종속변수 : 연료소모성 지수

 $R^2=.625$, Adjusted $R^2=.624$, D/W=1.354 $p<.001$.

을 기준으로 PLD(.791)>CG(.082)>APM (.045)>OAT (.036)>DIST(.027)>EXTRA(.020) 순으로 나타났다. 특히 PLD는 $B = -.026$, $\beta = -.791$, $p < .001$ 로 가장 지배적인 변수였으며, PLD 증가에 따라 FCI가 감소하였다. 이는 총 연료소모량은 증가하더라도 **단위 유상수송량당 연료소모가 감소하는 수송효율 효과(payload efficiency effect)**로 해석할 수 있다. 다만 PLD가 FCI 산정식의 분모에 포함되어 있으므로, 높은 표준화 계수에는 실제 payload efficiency effect뿐만 아니라 산식에 의한 mathematical coupling이 함께 반영되었을 가능성이 있다. 따라서 이를 PLD의 순수한 독립적·인과적 영향으로 해석하는 데에는 주의가 필요하다. CG 역시 음(-)의 관계($B = -.007$)를 보여, 허용범위 내 후방 CG 이동에 따른 tail download와 Trim Drag 감소 및 L/D 향상이라는 공력학적 특성과 부합하였다. 반면 APM, OAT 및 EXTRA는 FCI와 양(+)의 관계를 나타내어 각각 항공기 성능저하(performance deterioration), 대기·추진성능 변화 및 추가 연료탑재에 따른 fuel carrying penalty와 관련된 것으로 해석된다. DIST도 양(+)의 계수를 보였으나 영향력($\beta = .027$)은 상대적으로 작아, 거리 자체보다는 노선, 평균중량 및 비행프로파일의 복합적인 영향으로 해석할 필요가 있다.

종합하면, A330-300의 FCI에는 PLD가 가장 지배적인 영향을 미치며 CG가 그 다음 주요 변수로 나타났

다. 따라서 연료효율 향상을 위해서는 단순한 fuel burn 감소보다 payload 대비 수송효율 향상, 허용범위 내 CG 최적화, APM 기반 성능저하 관리 및 불필요한 EXTRA Fuel 최소화를 통합적으로 적용하는 운항관리 전략이 효과적인 것으로 나타났다.

2.5.2 A350-900 연료효율성 설명모델

A330-300 항공기와 동일하게 7개 독립변수를 적용하여 A350-900의 1차 다중회귀분석을 수행한 결과, Table 7과 같이 $R^2 = .714$, Adjusted $R^2 = .714$ 로 나타나 모형이 연료소모성지수(FCI) 변동의 약 71.4%를 설명하였다. ANOVA에 의한 모형의 F -검정 결과도 $p < .001$ 로 나타나 회귀모형 전체의 통계적 유의성이 확인되었다. 다만 Durbin-Watson 값은 0.377로 낮게 나타나 잔차의 양의 자기상관 가능성이 존재하는 것으로 판단되었다.

개별 변수에서는 PLD가 $\beta = -.828$ 로 FCI에 가장 큰 영향을 미치는 지배적 변수로 나타났으며, DIST($p = .033$), CG($p < .001$), OAT($p < .001$) 및 EXTRA($p < .001$)도 통계적으로 유의하였다. 반면 APM($p = .255$)과 AGE($p = .212$)는 유의한 영향을 나타내지 않았다. 특히 EXTRA는 통계적으로 유의하였으나 예상된 fuel carrying penalty에 따른 양(+)의 관계와 달리 음(-)의 회귀계수를 나타내어 공학적 해석의 일관성이 확보되지

Table 7. Regression results for fuel consumption index(A350-900)

요인	비표준화 계수		표준화계수	t	p	다중공선성 통계량	
	B	SE	β			Tolerance	VIF
(상수)	1.084	0.127		8.566	0.000		
PLD	-0.023	0.000	-0.828	-80.175	0.000	0.814	1.229
DIST	-0.004	0.002	-0.021	-2.132	0.033	0.878	1.137
CG	-0.014	0.001	-0.114	-11.164	0.000	0.838	1.194
APM	0.006	0.005	0.011	1.138	0.255	0.988	1.012
OAT	0.003	0.001	0.049	5.277	0.000	0.987	1.013
EXTRA	-0.011	0.002	-0.051	-5.407	0.000	0.981	1.019
AGE	0.004	0.004	0.013	1.249	0.212	0.823	1.215

종속변수 : 연료소모성 지수

$R^2 = .714$ Adjusted $R^2 = .714$, $F = 1,175^{***}$, $p = .000$, $D/W = 0.377$

$p < .001$

않았다. EXTRA는 통계적으로 유의한 음(-)의 관계($B = -.011, \beta = -.051 < .001$)를 나타냈으나, 이는 노선거리, 운항조건 및 연료탑재 특성 등의 복합적인 영향을 포함할 가능성이 있어 인과적 해석에는 주의가 필요하다. 본 연구에서는 통계적 유의성, 모형의 간결성 및 공학적 해석 가능성을 종합적으로 고려하여 APM, AGE 및 EXTRA를 제외한 최종 설명모형을 추가 분석하였다.

A350-900의 최종 분석 결과, 연료소모성지수(FCI) 설명모형은 다음과 같이 도출되었다.

$FCI = 1.079 - 0.023PLD - 0.004DIST - 0.013CG + 0.003OAT$ 로 최종모형은 $R^2 = .712$, Adjusted $R^2 = .711$, $F = 2031.929$, $p < .001$ 로 FCI 변동의 약 71.2%를 설명하였으며, 모형 전체의 통계적 유의성이 확인되었다. VIF는 1.007~1.149로 다중공선성 문제는 나타나지 않았다. 다만 Durbin-Watson 값이 0.350으로 잔차의 강한 양의 자기상관 가능성을 나타냈다. 이는 동일 항공기, 노선 및 운항시기 등의 반복측정 구조와 관련될 수 있으며, 이에 따라 OLS 회귀계수의 통계적 유의성 해석에는 주의가 필요하다. 개별 변수에서는 PLD가 $B = -.023$, $\beta = -.823$, $p < .001$ 로 가장 지배적인 영향을 나타냈으며, 이는 PLD 증가에 따라 단위 유상수송량당 연료소모가 감소하는 payload efficiency effect로 해석할 수 있다. CG 역시 음(-)의 관계($B = -.013$, $\beta = -.106$)를 보여, 허용범위 내 후방 CG 이동에 따른 Trim Drag 감소와 L/D 향상이라는 공력학적 특성과 부합하였다. OAT는 양(+)의 관계($B = .003$, $\beta = .046$)를 보여 온도에 따른 대

기 및 추진성능 변화가 FCI 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다. DIST는 음(-)의 관계($B = -.004$, $\beta = -.022$)를 나타냈으나 영향력은 상대적으로 작아, 장거리 운항에서 순항구간 비중이 증가하는 stage length effect와 운항조건에 대한 복합효과로 해석할 필요가 있다.

표준화계수의 절댓값은 $PLD(.823) > CG(.106) > OAT(.046) > DIST(.022)$ 순으로 나타났다. 따라서 A350-900의 연료효율 향상을 위해서는 payload 대비 수송 효율 향상과 허용범위 내 CG 최적화가 우선적으로 고려되어야 하며, OAT와 비행거리 등 운항환경을 함께 반영한 연료관리 전략이 필요한 것으로 나타났다.

2.5.3 A330-300과 A350-900 회귀 모형 비교

Table 6과 Table 8의 회귀분석 결과, PLD는 두 기종 모두에서 연료소모성지수(FCI)에 가장 큰 영향을 미치는 지배적 변수로 나타났다. A330은 $B = -0.026$, $\beta = -0.791$, A350-900은 $B = -0.023$, $\beta = -0.823$ 으로 강한 음(-)의 관계를 보였으며, PLD 1단위 증가 시 FCI는 약 0.023~0.026 감소하였다. 이는 PLD 증가로 총 연료소모량은 증가하더라도 단위 유상수송량당 연료소모가 감소하는 payload efficiency effect로 해석할 수 있다.

DIST는 A330-300에서 $B = +0.015$, $\beta = +0.027$, A350-900에서 $B = -0.004$, $\beta = -0.022$ 로 부호가 상반되었으나, 두 기종 모두 $|\beta| < 0.03$ 으로 영향력은 매우 작았다. 이는 총 fuel burn 증가와 장거리 운항에서 상승구간 비중 감소 및 순항비중 증가에 따른

Table 8. Final regression model for fuel consumption index(A350-900)

요인	비표준화 계수		표준화계수	t	p	다중공선성 통계량	
	B	SE	β			Tolerance	VIF
(상수)	1.079	0.126		8.574	0.000		
PLD	-0.023	0.000	-0.823	-82.075	0.000	0.870	1.149
DIST	-0.004	0.002	-0.022	-2.202	0.028	0.886	1.128
CG	-0.013	0.001	-0.106	-10.949	0.000	0.934	1.071
OAT	0.003	0.001	0.046	4.922	0.000	0.993	1.007

종속변수 : 연료소모성 지수

$R^2 = .712$, Adjusted $R^2 = .711$, $F = 2,031.929^{***}$, $p = .000$, $D/W = 0.350$

*** $p < .001$

stage length effect가 복합적으로 반영된 결과로 판단된다. 다만 두 기종의 표본은 각각 약 3~11시간과 11~15시간의 서로 다른 비행시간 범위로 구성되어 있으므로, DIST 계수의 방향 차이는 기종 자체의 특성보다는 서로 다른 운항거리 및 노선구성의 영향을 포함한 연관성으로 해석할 필요가 있다.

CG는 각각 $B = -0.007$, $\beta = -0.082$ 와 $B = -0.013$, $\beta = -0.106$ 으로 두 기종 모두 음(-)의 관계를 나타냈으며, 이는 허용범위 내 후방 CG 이동에 따른 tail download 및 trim drag 감소와 요구추력 감소라는 공력학적 특성과 부합한다. OAT는 각각 $B = +0.002$, $\beta = +0.036$ 과 $B = +0.003$, $\beta = +0.046$ 으로 양(+)의 관계를 보여, 온도 상승에 따른 대기 및 추진성능 변화가 FCI 증가에 영향을 미친 것으로 해석된다.

A330-300의 APM($B = +0.010$, $\beta = +0.045$)과 EXTRA($B = +0.003$, $\beta = +0.020$)도 FCI와 양(+)의 관계를 나타냈으며, 각각 항공기 성능저하(performance deterioration)와 추가 연료탑재에 따른 fuel carrying penalty를 반영한 것으로 판단된다. 이들 변수는 A350-900 최종모형에서는 제외되었다.

종합하면, PLD가 두 기종의 FCI에 가장 지배적인 변수이며, CG는 음(-), OAT는 양(+)의 일관된 관계를 나타낸 반면 DIST는 영향력이 작고 기종별로 방향이 상이하였다. A350-900의 수정된 $R^2 = .711$ 은 A330-300의 .624보다 높았으며 두 모형 모두 통계적으로 유의하였다. 다만 A350-900의 Durbin-Watson 값이 0.350으로 낮아 잔차의 양의 자기상관 가능성에 대한 추가 검토가 필요하며, 기종과 표본이 서로 다르므로 설명력의 차이를 모형의 직접적인 성능 차이로 해석하는 데에는 주의가 필요하다(Table 9).

III. 결론 및 시사점

3.1 주요연구 결과

본 연구는 A330-300항공기 6,526편과 A350-900항공기 3,299편의 실제 운항데이터를 이용하여 FCI 영향요인을 정량화하고 기종별 설명모형을 구축하였다. A330-300 최종모형은 6개 변수로 FCI 변동의 약 62.4%를, A350-900 최종모형은 4개 변수로 약 71.1%를 설명하였다. 두 기종 모두에서 PLD의 표준화 회귀계수 절댓값이 가장 크게 나타났으나, FCI 산정구

Table 9. Comparison of fuel consumption index regression models

구분		A330	A350
독립변수 개수		6	4
수정된 R 제곱		0.624	0.711
예측모델의 F-검정		OK	OK
개별 독립변수의 T-검정		OK	OK
회귀 계수	상수	+0.885	+1.079
	PLD	-0.026	-0.023
	DIST	+0.015	-0.004
	CG	-0.007	-0.013
	APM	+0.010	-
	OAT	+0.002	+0.003
	EXTRA	+0.003	-

조에 따른 mathematical coupling 가능성을 고려하여 해석할 필요가 있다. 이는 항공사의 연료효율 관리가 편당 절대 fuel burn만을 최소화하는 방식보다 단위 유상수송량을 함께 고려하는 방향으로 이루어져야 함을 시사한다. 또한 CG의 음(-)의 관계는 허용범위 내 후방 CG 운용을 통한 trim drag 저감 가능성을, OAT의 양(+)의 관계는 환경조건에 따른 성능보정의 필요성을 보여준다. A330-300의 APM과 EXTRA 결과는 항공기 성능저하와 추가연료 탑재가 연료관리의 실질적인 관리대상임을 나타내고 있다. 또한 항공사 운항관리 및 연료관리 시사점으로는 첫째, 항공사는 연료 효율 KPI를 편당 fuel burn 중심에서 payload ton-km 등 운송생산성을 반영한 지표와 병행하여 관리할 필요가 있다. 높은 탑재율, 수요에 적합한 기종배정 및 Payload 최적화는 단위수송량당 연료효율을 개선하는 핵심 관리수단이다. 둘째, CG는 단순 weight & balance 준수항목을 넘어 연료효율 변수로 관리할 수 있다. 안전한 CG envelope 내에서 승객·수하물·화물 배치와 연료분배를 통합하여 가능한 후방 CG를 유도하면 trim drag와 요구추력을 줄이는 데 기여할 수 있다. 셋째, APM은 정비와 운항을 연결하는 연료관리 지표로 활용할 필요가 있다. 기체별 성능편차와 fuel flow deviation을 지속적으로 추적하여 성능저하가 확인될 경우 engine wash, airframe cleaning, rigging 점검 및 성능계수 보정 등과 연계하는 체계가

필요하다. 넷째, EXTRA Fuel은 안전규정을 충족하는 범위에서 확률·데이터 기반으로 관리해야 한다. 노선별 기상, ATC 지연, diversion 가능성 및 과거 연료사용 실적을 FMIS와 연계하여 불필요한 fuel carrying penalty를 줄이는 것이 바람직하다.

3.2 연구의 한계 및 향후 연구방향

본 연구의 한계로는 첫째, 특정 항공사의 A330-300과 A350-900 항공기 자료를 사용하였으므로 결과를 모든 항공사와 기종에 일반화하는 데 한계가 있다. 둘째, 두 항공기의 비행시간 범위와 표본구성이 상이하여 기종 간 회귀계수를 직접적인 성능차이로 해석하기 어렵다. 셋째, wind component, flight level, cost index, step climb, ATC delay, engine condition 등 일부 주요 변수가 최종모형에 직접 포함되지 않았다. 넷째, 선형회귀는 변수별 방향과 상대적 영향력의 해석에는 유용하지만 실제 연료소모의 비선형성과 상호작용을 완전히 표현하기 어렵다. 다섯째, 특히 A350의 Durbin-Watson 값이 0.350으로 낮아 잔차 자기상관에 대한 추가적인 시계열·패널 분석이 요구된다. 여섯째, Fuel Burn 자체를 종속변수로 한 별도의 모형과 FCI 모형을 비교하여 PLD 및 DIST의 실질적 영향과 mathematical coupling 효과를 구분하여 검증할 필요가 있다. 일곱째, 본 연구의 회귀모형은 전체 표본을 이용한 설명적 모형으로 별도의 out-of-sample 검증을 수행하지 않았다. 향후 연구에서는 학습·검증자료 분리 또는 교차검증을 적용하고 RMSE, MAE 등의 지표를 활용하여 모형의 예측성능을 검증할 필요가 있다.

향후 연구 방향으로는 동일 stage length와 유사 Payload 조건을 매칭한 기종 간 비교와 함께, 좀더 고차원적인 OLS를 기준모형으로 두고 random forest, XGBoost 및 neural network 등 비선형 예측기법을 적용하여 R^2 , RMSE 및 MAE를 비교하고, SHAP 등 설명가능한 분석기법을 통해 예측성능과 공학적 해석력을 동시에 확보할 필요가 있다. 궁극적으로는 FMIS, FOQA 및 APM을 통합하여 비행 전 최적 payload, fuel, CG, flight level을 산출하고, 비행 후 Actual FCI와 Predicted FCI의 편차를 자동 진단하는 closed-loop fuel management system으로 발전시킬 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2025.3.1.~2027.2.28. 학년도에 청주대학교 항공모빌리티연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제 유형2)에 의해 연구되었음.

References

1. Anderson, D., "Cruise Performance Monitoring", AERO Magazine, Boeing Commercial Airplanes, 2006.
2. Jang, S. W., Lee, Y. J., and Yoo, K. E., "A321 NEO/CEO fuel efficiency comparison and economic analysis", Journal of the Aviation Management Society of Korea, 18(5), 2020, pp.3-16.
3. Jang, S. W., Cho, Y. H., Yoo, J. L., and Yoo, K. E., "Performance improvement package application effect analysis: Focused on Airbus 350 case", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 29(3), 2021, pp.44-51.
4. Kim, Y., "Impact of aircraft aging on operational fuel efficiency: A case study using flight data", Journal of Aerospace Operations, 9(2), 2020, pp.113-126.
5. Park, Y. M., "Design and performance analysis of 95 passenger turboprop regional aircraft with winglet", Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, 2013, pp.1497-1500.
6. Tait, K., Khan, A. H., and Bullock, S., "Aircraft emissions, their plume-scale effects, and the spatio-temporal sensitivity of the atmospheric response: A review", Aerospace, 9(7), 2022, Article 395.
7. Yoo, J. L., "Fuel efficiency analysis in large transport aircraft based on operational flight data", Ph.D. Thesis, Chungbuk National University, Cheongju, Korea, 2025.
8. Yoon, J. W., Kim, H. J., and Kim, S. K., "A study on fuel tankering and economic fuel

- planning for transport aircraft", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 23(1), 2015, pp.16-22.
9. Airbus, "Getting to Grips with Aircraft Performance Monitoring", Airbus, Blagnac, France, 2002.
 10. International Civil Aviation Organization, "Global Air Navigation Plan (GANP)", Doc 9750, 8th ed., ICAO, Montreal, Canada, 2024.
 11. International Air Transport Association, "Operations Net Zero Roadmap", IATA, Montreal and Geneva, 2024.
 12. Federal Aviation Administration, "NextGen Implementation Plan", FAA, Washington, DC, USA, 2024.
 13. European Union Aviation Safety Agency, "European Plan for Aviation Safety (EPAS) 2024", 13th ed., EASA, Cologne, Germany, 2024.
 14. SESAR Joint Undertaking, "European ATM Master Plan", SESAR Joint Undertaking, Brussels, Belgium, 2020.
 15. International Air Transport Association, "Policy Roadmap", IATA, Montreal and Geneva, 2024.
 16. International Civil Aviation Organization, "Flight Planning and Fuel Management Manual", Doc 9976, ICAO, Montreal, Canada, 2018.
 17. Federal Aviation Administration, "Aircraft Weight and Balance Control", Advisory Circular AC 120-27F, FAA, Washington, DC, USA, 2019.