

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2021.29.3.044>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

성능향상 패키지 적용 효과 분석 - Airbus 350 기종을 중심으로 -

장성우*, 조울현**, 유재림***, 유광의****

Performance Improvement Package Application Effect Analysis - Focused on Airbus 350 Case -

Sungwoo Jang*, Yul Hyun Cho**, Jae Leame Yoo***, Kwang Eui Yoo****

ABSTRACT

PIP is an abbreviation of 'Performance Improvement Package', which is a package that can improve performance by applying some design changes to existing aircraft. Boeing provides PIP applicable to B777-200, and Airbus provides PIP applicable to A350-900 as standard. PIP provided by Boeing and Airbus is a separate task, but it is expected to reduce fuel consumption by reducing drag through aerodynamic improvements. The PIP applied to the A350-900 includes work such as increasing Winglet Height and re-twisting Outboard Wing. This study is to verify the effect of PIP application of the A350-900 aircraft and use it as basic data for economic analysis. The aerodynamic improvement studies and expected effects of the PIP application were examined, and the actual flight data of the PIP-applied and the non-applied aircraft were compared to confirm the PIP application effect. This paper provides empirical results for the aviation industry on the PIP application efficiency as a method of improving fuel efficiency and reducing carbon emission.

Key Words : PIP, Performance Improvement Package(성능향상 패키지), Winglet(윙렛), Fuel Consumption(연료소모량), Carbon Emission(탄소배출), Fuel Efficiency Index(연료효율성 지수), Fuel Efficiency Prediction Model(연료효율성 예측 모델), Economic Analysis(경제성 분석)

1. 서 론

PIP는 'Performance Improvement Package'의

약어로 기존 항공기에 일부 설계 변경을 적용하여 성능을 향상할 수 있는 패키지이다[1][2]. 본 연구를 위해 살펴본 PIP적용 가능 기종은 보잉 B777-200과 에어버스 A350-900이고, 그 중 에어버스 A350-900에 대한 실증적 연구를 진행하고자 한다. 보잉사와 에어버스사에서 제공하는 PIP에 대한 명칭과 개발 배경을 살펴보면 항공역학 항공기 구조개선을 통해 항력을 줄이고, 그에 따른 운항 중 연료소모량을 줄이고자 함이 목적인 점에서 유사하지만, 설계형식이나 장착방식 등에서 차이를 보이는데, 향후 PIP 구매를 위한 의사결정 시 정확한 판단기준을 확보하기 위해 제작사에서 제시하

Received: 15. Apr. 2021, Revised: 10. May. 2021,
Accepted: 09. Aug. 2021

* 아시아나항공, 이학박사, 항공교통 전공

** 아시아나항공, 박사, 항공운항관리 전공

*** 청주대학교 항공학부 교수

**** 한국항공대학교 항공교통물류학부 명예교수

연락처 E-mail : keyoo@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

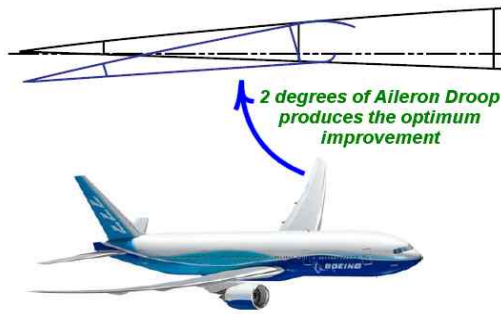
는 효율수치와 유사한 결과로 PIP 적용 항공기의 실제 비행 중 사용 연료효율이 개선되는지에 대한 실증적 검증이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구는 A350-900 항공기의 PIP 적용 기변과 미적용 기변의 실제 비행 데이터를 통계로 분석하여, PIP 적용 항공기의 연료효율성이 실제로 향상되었는지를 검증함에 목적을 둔다. 부가적으로, 기존 항공기에 Retrofit 투자와 연관된 경영 의사 결정에 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 본 론

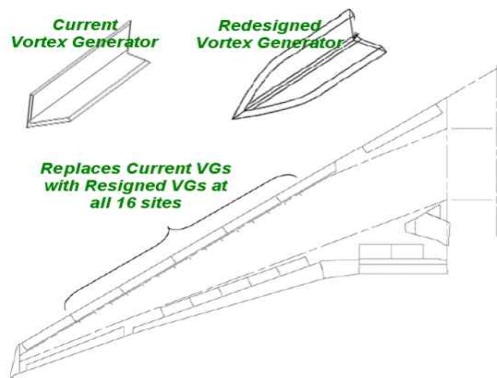
2.1 보잉사와 에어버스사의 PIP 개발 현황

보잉사는 B777-200, -200ER, -300에 개조 작업을 통해 적용할 수 있는 PIP를 제공한 바 있다. 보잉사의 성능향상 패키지는 세 가지로 구성되어 있는데, Fig.



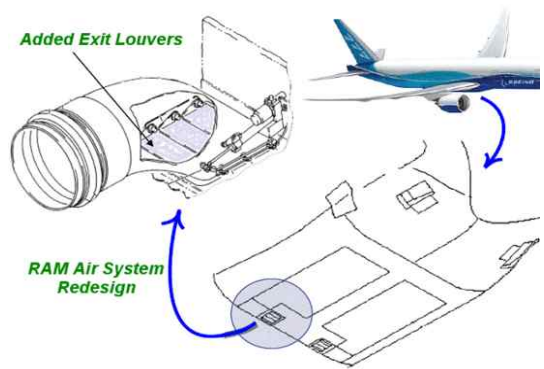
Source: "Delivering Fuel and Emissions Savings for the 777" by Ken Thomson, Boeing.

Fig. 1. Drooped aileron



Source: "Delivering Fuel and Emissions Savings for the 777" by Ken Thomson, Boeing.

Fig. 2. Vortex generator redesign

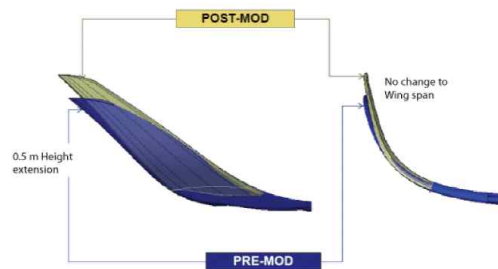


Source: "Delivering Fuel and Emissions Savings for the 777" by Ken Thomson, Boeing.

Fig. 3. Ram air system redesign

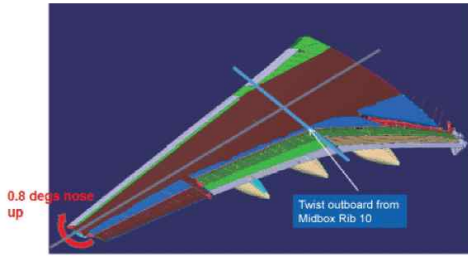
1-3에 표시한 Aileron 위치를 날개 기준면 대비 2도 정도 아래로 기울이는 작업, Vortex Generator를 재설계한 것으로 교체하는 작업, Ram Air System에 Louver를 추가로 장착하는 작업이다[1].

에어버스사에서는 2018년부터 A350-900의 상품 경쟁력을 향상하고자, A350-1000의 개선된 디자인을 반영한 성능향상 패키지가 기본으로 제공되었다. 동체 구조 최적화와 함께 윙렛 높이 증가, outboard wing re-twist, over wing fairings 길이 증가와 flap support fairing 디자인 변경을 포함한 공기역학적 성능 개선 패키지로 구성되었다. Fig. 4와 같이 윙렛의 높이가 약 50cm 늘어났고, Fig. 5와 같이 outboard wing은 nose up 방향으로 약 0.8도를 더 뒤틀었으며, Fig. 6과 같이 over wing fairings 디자인을 개선하였고, flap support fairings의 길이는 24~35cm 더 길어졌다. 280톤의 최대이륙중량 선택 옵션과 함께 이루어진 개선으로 유상탑재량/ 운항거리 능력 (payload/range capability)을 향상시켰다. 즉, 동일 유상탑재



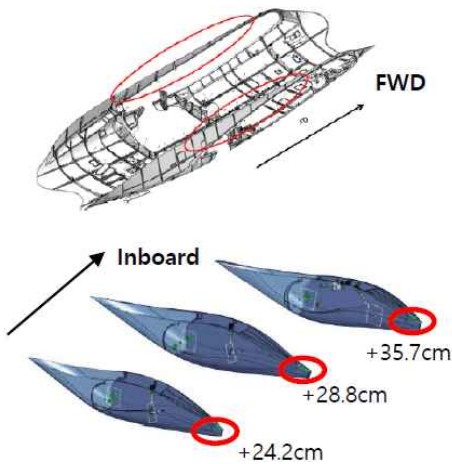
source: "pip - fuselage and wing optimization" in technical information, airbus.

Fig. 4. Extended winglet



Source: "PIP - Fuselage and Wing Optimization" in Technical Information, Airbus.

Fig. 5. Wing re-twist



Source: "PIP - Fuselage and Wing Optimization" in Technical Information, Airbus.

Fig. 6. Enhanced over-wing fairings & modified flap support fairings

일 경우에는 운항가능거리를 길게 하였고, 동일 운항거리에서는 유상탑재 가능중량을 높일 수 있게 되었다.

모든 디자인 개선의 과제는 항공기에 대한 무게 증가 영향을 피하면서 최적의 디자인을 제공하는 것이었다. 두 가지 모두 시험비행 중에 얻은 지식과 신형 항공기 개발에 신기술을 적용함에서 생긴 설계 허용 범위 내 중량 감소 개조로 가능하였다[2].

2.2 PIP 적용에 따른 공력 특성

에어버스사는 PIP로 윙렛 높이 증가와 outboard wing re-twist를 통한 공기역학적 성능 개선을 제공한다[2].

윙렛 높이 증가는 기하학적 날개 길이를 65m(212ft) 이상으로 늘리지 않고도 항공기의 유효 날개 길이를 확장하는 효과를 낸다. 높이 증가한 윙렛은 시험비행을

거쳤으며, 항공기 구조가 추가 중량을 견딜 수 있을 만큼 충분히 좋은지 확인하였다. 윙렛 높이 증가는 날개의 Spanwise 압력 분포를 변경하여, 날개 주변과 날개 뒤의 공기 흐름을 변화시킨다. 날개는 통과하는 공기를 강제로 아래로 가속하여 양력을 생성하게 된다. 공기가 아래쪽으로 가속함에 따라 잘 알려진 '힘 = 질량×가속(뉴턴의 두 번째 법칙)'이 작용하고, 가속되는 공기의 무게가 양력을 생성한다.

양력 발생의 또 다른 설명으로, 윗면의 날개 근처에서 가속하면 공기층이 얇아져 압력이 낮아진다. 날개 아랫면은 상대적으로 고압이 된다. 압력 차이로 인해 공기 분자가 날개 아랫면에서 윗면으로 움직이게 되므로 양력이 발생한다. 단, 윙팁 주위에서는 아랫면에서 윗면으로의 공기분자의 회전흐름이 Fig. 7과 같이 생긴다. 이 회전 흐름에 의해 소비되는 에너지는 유도 항력이 되고, 이로 인한 에너지 소비는 윙팁 주위의 회전에만 국한되지 않고, 날개 Span 전반에 영향을 주게 된다.

Ludwig Prandtl은 직사각형 날개의 spanwise 압력 분포가 타원형 모양을 가질 때 최소 유도 항력이 생김을 보여주었다. 윙렛을 포함하여 더 발전된 날개 형태를 사용하면 모양이 수정되지만, 여전히 타원형에 가깝다. Fig. 8에서 보듯, 유도 항력을 줄이기 위해서, 날개의 spanwise 압력 분포를 더욱 넓게 변경해야 한다. 이는 날개 주위 공기의 회전 흐름을 늦추게 한다.

A350-900의 시험비행을 통해 에어버스사는 날개의 spanload를 개선할 가능성이 있음을 알게 되었다. 이러한 변경은 일반적으로 날개의 spanwise twist를 적용하여 수행된다. A350의 경우 에어버스사는 더 넓고 최적의 spanload 분포를 얻기 위해 outboard wing re-twist를 더 크고 다른 모양의 winglet과 결합하기로 했다. 에어버스사는 outboard wing re-twist와 높이가 증가한 winglet 결합으로 유도 항력을 감소시켰다 [3].

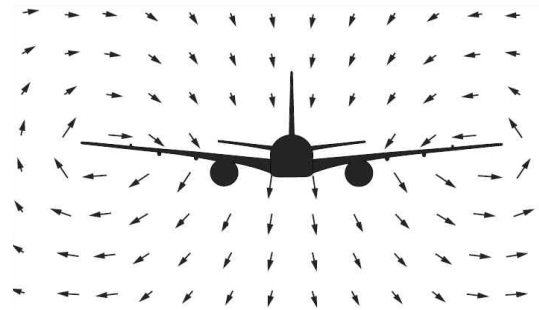
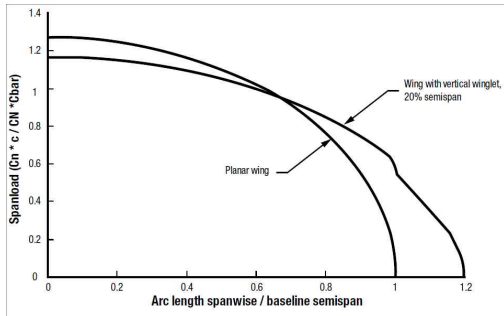


Fig. 7. Flow behind an aircraft, from "wingtip devices" by Doug McLean, Boeing



Source: “wingtip devices” by Doug McLean, Boeing.

Fig. 8. Ideal spanloads for a rectangular planar wing and a wing with a winglet

2.3 PIP 적용 효과 추정

Sharklet 장착 A321은 미장착 A321 대비, 연료효율이 3% 향상되었고[4], A321 NEO는 A321 CEO 대비 연료효율이 15% 향상되었다[5]. 항로복선화 등 항로단축을 통한 연료절감[6], 지상 및 비행단계의 절차 개선을 통한 연료절감[7][8][9] 등과도 비교 시, 장착된 Winglet의 높이 증가 등 기존 장비에 유체역학적 개선을 반영한 PIP의 연료절감 효과는 상대적으로 작은 편이다.

보잉 B777에 적용한 PIP에 의해 공기를 원활하게 흐르게 함으로써, 약 1%의 항력이 감소하며, 운항 거리에 따라 달라지지만, PIP 적용 전 대비 연료소모량은 0.65~1.2% 절감 가능하다고 한다. 이를 선택한 항공사도 있었으나, 모든 항공사가 선택한 것은 아니었는데, 이는 성능향상 효과를 실증적으로 확인하기 어려워 투자가 쉽지 않았기 때문이다[1].

에어버스사에 따르면 A350에 제공된 성능향상 패키지 적용으로 유체역학 및 항공기 동체가 최적화되고, 연료효율이 약 1% 개선될 것으로 예상한다고 발표했다[2][10][11].

2.4 연구 방법

2.4.1 그룹 구분 및 실적 자료

A350-900 항공기 중, PIP 적용 4개 기번, PIP 미적용 5개 기번의 두 가지 그룹으로 구분하였다. 항공사의 연료관리정보시스템 이용, PIP 적용한 기번의 508개의 실적 자료, PIP 미적용한 기번의 1,187개의 실적 자료를 통계분석에 이용하였다.

기간은 2019년 1월에서 8월까지이고, 운항 거리는

7,500km부터 13,000km까지로 한정된 자료를 사용하였다.

2.4.2 종속변수 선정: 연료효율성 지수

연료효율성 지수를 종속변수로 선정하여, 두 그룹의 연료효율성 예측 모델을 수립하였다. 연료효율성 지수는 ‘Payload Ton-Km 당 연료소모량’을 사용하였다. 연료소모량의 경우, 지상 활주 혹은 APU 사용 등 지상에서 소모한 연료를 제외한 순수 비행단계에서 소모한 연료량으로 한정하였다.

연료효율성 지수는 원 단위(unit cost)기에 단위 ‘Payload Ton-Km’ 당 효율을 의미한다. 즉, 연료효율성 지수가 상대적으로 작으면 연료효율은 상대적으로 우수하다고 본다[12].

2.4.3 독립변수

PIP 적용 기번의 실적에는 ‘1’, PIP 미적용 기번 실적에는 ‘0’이라는 Dummy를 부여한 그룹 구분변수를 독립변수로 사용하였다. 연료효율성에 영향을 줄 기타 변수로 유상탑재량, 연비 변화량, 운항 거리의 3가지 독립변수를 추가하였다.

‘유상탑재량’은 탑승객 증량과 화물, 위탁 수하물증량을 Ton 단위로 반영한 것으로, Weight & Balance System의 실적 자료를 기준으로 하였다. 유상탑재량이 많아지면, 증량 증가 때문에 연료소모량이 많아질 것으로 추정한다.

항공기 운영시간이 길어지면 연비저하 경향이 있고, 연료소모량을 증가 보정해 주는 항공기 성능분석 프로그램(APMS; Airplane Performance Monitoring System)의 기번 별 APM 수치를 ‘연비변화량’으로 반영하였다. 연료소모량이 많아지면, APM 수치가 크게 반영된다. 역으로, APM 수치가 커지면 연료소모량은 많아진다고 추정할 수 있다. 특히, PIP 적용 기번이 최근 도입된 기번일 경우, 연료효율성이 노후기종에 비해 상대적으로 좋을 수 있기에, 연비 변화량을 독립변수에 반영함으로써 항공기 사용시간 증가에 따른 성능저하 값을 보정하였다.

‘운항 거리’는 1,000Km 단위로, 상층풍 성분을 고려한 실제 비행거리로, 전자 비행계획서의 Nautical Air Miles 자료를 근거로 하였다. 운항거리가 길어지면 총 연료사용량은 증가하나, 상대적으로 연료효율이 좋은 순항구간의 비율도 증가하면서 연료소모율은 줄어들 것으로 예상했다.

고도, 속도, 외기온도 등 연료소모량 변화에 추가적으로 영향을 미칠 수 있는 환경 변수들을 모두 고려하는 것이 좀 더 정확한 결과를 도출하는 데 도움이 될 수 있으나, 매 운항편의 평균자료 추출에 어려움이 있어 제외하였다.

2.4.4 통계분석

본 논문의 통계분석은 SPSS Statistics 25.0을 사용하였다.

2.5 연구 결과

2.5.1 그룹 실적 상이 확인: 독립표본 검정

회귀분석 모델 수립 전에, 두 그룹의 실적이 다를 수 있음을 독립표본 검정으로 확인하였다. 종속변수인 연료효율성 지수 (INDEX)에 대한 검정 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1에서 '0'은 PIP 미적용 기변의 실적을, '1'은 PIP 적용 기변의 실적을 의미한다. Table 2의 Levene의 등분산 검정에서 F값 유의확률은 0.396으로 0.05보다 커서 등분산이 가정된다. '등분산을 가정함'의 t값은 4.50으로 ±1.96보다 크고, 해당 유의확률(양측)은 0.000으로 0.05보다 상당히 작은 수치이다. 결과적으로, 두 그룹의 실적이 같지 않음을 확인하였다.

Table 1의 두 그룹의 INDEX 평균은 0.441, 0.425로 PIP 적용 그룹의 평균이 작다. 이는 PIP 적용 그룹의 연료효율성이 상대적으로 우위에 있다고 해석할 수 있다.

Table 1. Collective statistics

	Dummy	N	평균	표준화 편차	표준오차 평균
INDEX	0	1,187	0.441	0.0651	0.0019
	1	508	0.425	0.0661	0.0029

Table 2. Independent sample test

	Levene의 등분산 검정	평균의 동일성에 대한 T검정						
		F	유의 확률	t	자유도	유의 확률 (양측)	평균 차이	표준 오차 차이
INDEX	등분산을 가정함	0.721	0.396	4.50	1,693	0.000	0.016	0.003
	등분산을 가정하지 않음			4.47	946.2	0.000	0.016	0.003

2.5.2 연료효율성 모델 수립: 분산분석

2.4.2의 연료효율성 지수(INDEX)를 종속변수로, 2.4.3의 4가지 변수인 그룹 구분변수(Dummy), 유상탑재량(PLD), 연비 변화량(APM), 운항거리(DIST)의 4가지를 독립변수로 놓고, 다중 회귀분석 모델로 연료효율성 예측모델을 수립하였다.

Table 3에서, 독립변수와 종속변수 간의 상관관계를 나타내는 R값은 0.974로 상당한 연관성이 있음을 보인다. 독립변수에 대한 종속변수의 설명력을 나타내는 R 제곱 값은 0.948로 94.8%의 설명력이 있다고 본다.

2.006이라는 Durbin-Watson 수치는 0 또는 4에 가깝지 않고, 2에 가깝기에 잔차들 간의 상관관계가 없어 수립한 회귀모델이 적합하다는 해석이 가능하다.

Table 4의 모델 적합성 확인 결과, 유의확률은 0.000으로 0.05보다 상당히 작은 수치로 모델이 적합하다고 해석한다.

Table 5의 회귀계수 적합성 확인 결과, 상수를 포함한 각 회귀계수의 유의확률은 0.05보다 작아, 적합하다고 해석한다. Dummy 변수의 t값이 -1.97로 +/-1.96 이상이고, 유의확률이 0.049로 0.05보다 작으므로 회귀계수인 -0.004도 유의한 것으로 확인하였다. 다중 회귀분석에서는 독립변수 간의 상관관계가 존재하지 않아야 한다. Table 5의 각 변수 공차한계 값은 0.1 이상으로 다중공선성에 문제는 없다고 해석하며, 독립변수 간의 상관관계 없음을 확인하였다.

연료효율성에 부(-) 영향을 주는 독립변수는 유상탑재량(PLD)과 그룹 구분변수(Dummy)이고, 정(+) 영향을 주는 독립변수는 연비변화량(APM)과 운항거리(DIST)이다. 즉, 유상탑재량이 많아질수록, PIP 적용한 기변일

Table 3. Model summary

모형	R	R ²	수정된 R ²	추정값의 표준오차	Durbin-watson
1	.974	0.948	0.948	0.0149	2.006

Table 4. Analysis of variance

	제공합	자유도	평균 제곱	F	유의확률
회귀	6.954	4	1.739	7,780.846	.000
잔차	0.378	1,690	0.000		
전체	7.332	1,694			

Table 5. Coefficients

	비표준화계수		표준화 계수	t	유의 확률	공선성 통계량	
	B	표준화 오류	베타			공차	VIF
(상수)	0.801	0.005		164.04	0.000		
PLD	-0.012	0.000	-0.956	-172.11	0.000	0.99	1.01
APM	0.003	0.001	0.033	2.42	0.016	0.17	6.08
DIST	0.006	0.000	0.089	16.03	0.000	0.98	1.02
Dummy	-0.004	0.002	-0.027	-1.97	0.049	0.17	6.06

수록 연료효율성 지수가 작아져서 연료효율성이 좋아지는 것으로 나타나고 있는 반면 연비 변화량이 커질수록, 운항거리가 길어질수록 연료 효율성지수는 커져서 연료효율이 나빠지는 것으로 나타났다.

유상탑재량이 많아질수록 중량효과에 의해 연료소모는 많아진다[13]. 단, 연료소모량 증가분이 유상탑재량 증가분 대비 작기에, 단위당 효율 개념의 연료효율성은 좋아지게 된다.

일반적으로 운항 거리가 길어지면 연료효율성이 좋아지는 것으로 인식하고 있는데, 본 논문의 실증 분석 자료를 통해 알아본 바로는 운항거리가 길어진 만큼 이륙중량도 동반상승하여 그 무게 증가분만큼 항공기 이륙중량도 동반상승하여 연료소모량이 많아지므로 운항거리에 따른 차이는 상호 상쇄되는 것으로 추정하였다. 즉, 동일한 중량 기준하에서는 운항거리가 길어지면 연료효율성이 좋아지게 되나, 장거리에 적합한 높은 중량 운영에 따른 추가 연료소모 발생으로 그 효과가 반감되고 있다. 운항중량 변수를 일반화하여 조정하지 않는다면, 운항거리와 연료효율성과의 상관관계를 일반화하기는 어렵다.

운항 거리 외, 기타 변수의 연료효율성에 대한 영향성은 충분히 합리적이고 예측 가능한 것으로 보인다. 그 영향력의 세기는 표준화 계수로 확인해 보니, 변수들 중 유상탑재량(PLD)의 영향력이 절대적으로 우세하고, 나머지 변수들은 거의 비슷한 수준의 영향력을 나타내고 있다.

2.5.3 연료효율성 비교

Table 5의 분산분석 반영, Table 6은 A350-900 항공기의 연료효율성 예측 모델이다. 종속변수는 연료 효율성 지수이고, 네 개의 독립변수와 상수로 수식화한

Table 6. Fuel efficiency prediction model

모델	모델의 설명력 (R Square)
연료효율성 지수 = - 0.012X ₁ +0.003X ₂ + 0.006X ₃ - 0.004X ₄ + 0.801	0.948

종속변수: 연료효율성 지수
 독립변수(X₁): 유상탑재량(톤)
 독립변수(X₂): 연비 변화량(APM value)
 독립변수(X₃): 운항 거리(1,000km)
 독립변수(X₄): Dummy 변수; 0 (Non PIP), 1 (PIP)

다중회귀분석 모델이다.

Table 6의 연료효율성 예측 모델을 이용, A350 항공기의 연료효율성을 PIP 적용/ 미적용을 구분하여 Table 7과 같이 예측하였다. 연비변화량(APM)은 1.5, 운항거리(DIST)는 9.7천킬로미터로 평균 실적을 적용하였고, 유상탑재량(PLD)은 실적 범위인 20, 25, 30, 35, 40, 45톤으로 구분하였다.

Table 7을 해석하면, 유상탑재량(PLD)에 따라 다르지만, PIP 적용 항공기의 연료효율성이 PIP 미적용 항공기의 연료효율성 대비, 0.65~1.25% 수준으로 우수한 것으로 나타났다. 평균 유상탑재량 35톤 수준에서는 0.91% 정도 우수하나, 본 연구의 실증을 통해 얻은 값이 제작사에서 제시한 1.0% 효율성이 향상된다는 수치와 유사한 것으로 나타났다.

III. 결 론

보잉사는 B777-300ER 항공기 설계 시에 개발된 기본 사양을, B777-200, -200ER, -300에도 retrofit 개조 작업을 통해 적용할 수 있는 PIP(성능향상 패키지)

Table 7. Fuel efficiency index

유상탑재량 (톤)	PIP 미적용	PIP적용	향상률(%)
	연료효율성 지수		
20	0.624	0.620	0.65
25	0.564	0.560	0.71
30	0.504	0.500	0.80
35	0.444	0.440	0.91
40	0.384	0.380	1.05
45	0.324	0.320	1.25

연료효율성 지수: Ton·Km당 연료소모량.
 향상률: (PIP 적용 연료효율성 지수 - PIP 미적용 연료효율성 지수) / (PIP 적용 연료효율성 지수).

를 제공하였고, 에어버스사에서는 2018년부터 A350-900에 성능향상 패키지가 기본으로 제공되었다. 동체 구조 최적화와 함께 윙렛 높이 증가와 outboard wing re-twist 등을 통한 공기역학적 성능 개선 패키지로 구성되어, 연료효율이 약 1% 개선될 것이라는 제작사의 의견을 바탕으로 실제 운영상에서 연료효율향상이 1% 수준에서 이루어지는지를 검증하고자, 실제 운항실적 자료를 이용해 A350 항공기의 연료효율성 예측 모델을 수립하였다. 연료효율성 지수를 종속변수로 선정하여 그룹 구분변수, 유상탑재량, 연비 변화량, 운항 거리의 총 4가지 변수를 독립변수로 선정하여 통계분석을 하였다.

회귀분석 모델 수립 전에, 두 그룹의 실적이 다름을 독립표본 검정으로 확인하였고, 분산분석을 통해 예측 모델이 적합함을 확인하였다. 또한, 회귀 계수의 적합성 확인을 통해 상수를 포함한 각 회귀계수별 적합성도 확인하였다.

수립한 예측 모델을 이용하여, 연료효율성을 예측한 결과는 PIP 적용 항공기의 연료효율성이 PIP 미적용 항공기의 연료효율성 대비, 0.65~1.25% 우수하였다. 평균 유상탑재량 기준으로 하였을 때는 0.91% 정도 우수한 것으로 나타나, 제작사가 제시한 1.0% 효율성에 근접했다. PIP 적용을 통해 연료효율 향상과 그에 따른 탄소 저감효과를 기대할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 A350 항공기에 PIP 적용 효과를 실증적으로 검증한 사례 연구이나, 다음과 같은 연구의 한계점이 있다.

첫째로, 실제 운항 시 수집할 수 있는 다양한 환경(고도, 속도, 외기온도)에 대한 변수정보를 추가 반영하였다면 PIP 적용 효과를 보다 명확하게 파악할 수 있었을 것인데, 자료 확보의 어려움이 있었다. 둘째로, 본 모델의 연료효율성에 대한 추가 검증을 위해 A350 APM 수치를 이용하고자 하였으나, A350 항공기의 APM 적용을 위한 baseline(book value)의 경우, Non-PIP 항공기는 basic version, PIP 항공기는 PIP version으로 상이하기에 A350 PIP 항공기와 A350 non-PIP 항공기의 APM 값의 절대적 수치 비교만으로 연료효율성 우위를 판단하기 어려웠다.

본 연구에서는 양대 항공기 제작사의 주요모델에 적용된 PIP를 살펴보고, 실증분석을 하여 향후 Retrofit 옵션에 대한 투자 결정시 참고할 수 있는 의사결정의 배경자료를 제공하였다. B/C 분석과 민감도 분석 등 세부적인 경제성 분석 등에 관해서는 추가적 연구가 필요하다.

References

1. Boieng AERO Magazine (QTR_03, 2009), https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_03_09/article_02_1.html. Accessed August 5, 2021.
2. Airbus Technical Magazine (October 2018) #62, Flight Airworthiness Support Technology, p.35.
3. Leeham News and Analysis, "New pictures of the changed Sharklets for A350", 2017. <https://leehamnews.com/2017/11/01/new-pictures-changed-sharklets-a350>. Accessed August 5, 2021.
4. Jang, S., Lee, Y., Kim, K., Yoo, J. L., and Yoo, K. E., "Verification of winglet effect and economic analysis using actual flight of A321 sharklet model", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 49(4), 2021, pp.273-279.
5. Jang, S., Lee, Y., 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.
6. Cho, J. H., Baik, H. J., and Chang, J. W., "A study on congestion change of dual airways between Korea-China", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 28(1), 2020, pp.7-13.
7. Jang, S., Lee, Y., and Yoo, K. E., "A case study of aircraft taxi fuel consumption prediction model (A380 Case)", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 28(2), 2020, pp.29-35.
8. Kim, H.-J., and Baik, H., "Empirical method for estimating aircraft fuel consumption in ground operations", Journal of the Transportation Research Board, 2674(12), 2020, pp. 385-394.
9. Chati, Y. S., and Balakrishna, H., "Data-driven modeling of aircraft engine fuel burn in climb out and approach", Journal of the Transportation Research Board, 2672(29), 2018,

- pp.1-11.
10. Leeham news and analysis, "Iberia gets upgraded A350-900", 2018. <https://leehamnews.com/2018/01/31/iberia-get-upgraded-a350-900>. Accessed August 5, 2021.
 11. Bangalore Aviation, "Iberia receives first upgraded Airbus A350-900", 2018. <https://www.bangaloreaviation.com/2018/06/iberia-receives-first-upgraded-airbus-a350-900.html>. Accessed August 5, 2021.
 12. Irene Kwan and Daniel Rutherford, "Assessment of U.S. domestic airline fuel efficiency since 2010", Journal of the Transportation Research Board, 2501(1), 2015, pp.1-8.
 13. Yoo, S., Yoo, K. E., Choi, S.-H., and Chang, H., "A study on reducing aircraft fuel consumption by reserve fuel reduction", Journal of the Aviation Management Society of Korea, 15(3), 2017, pp.67-95.