

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2022.30.2.024>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

국내선 항공기 연료소모량 분석을 통한 연료절감 방안연구 - B737 항공기 연료소모량을 중심으로 -

최지현*, 이경한**, 김용욱***, 김웅이****

A Study on the Fuel Saving Method through the Analysis of Fuel Consumption on Domestic Flight

- Based on the Fuel Consumption of B737 Aircraft -

Jihun Choi*, Kyung-Han Lee**, Yong-og Kim***, Woong-Yi Kim****

ABSTRACT

This study analyzed and derived a plan to reduce fuel consumption of domestic aircraft. Specifically, this study tested fuel consumption in the short-distance flights of B737. Fuel consumption was calculated by substituting the simulation variable values into Matlab. The strength of this study is that the actual operating environment was reflected by collecting the B737 flight data. As a result of the study, the domestic fuel consumption rate in the computed flight plan was less than the current fuel consumption rate. Existing limitations of this study is that it was difficult to reflect the various variables constituting the flight environment, and thus there can be errors in the measurement of the fuel consumption. There are two major expected applications from this study. First, applying the plans from this study will lead to a reduction in the amount of fuel and thus provide positive economic effects for commercial airlines. Second, the plan from this study will provide a basis for pilots to predict fuel consumption more accurately. In conclusion, this study proposes a fuel saving plan with useful applications for pilots and airlines.

Key Words : Fuel Consumption(연료소모량), Domestic(국내선), B737(Boeing-737 항공기), Fuel Saving(연료절감), Pilot(조종사)

1. 서 론

1.1 연구의 배경

항공기 운항에서 운항승무원은 비행계획서를 검토하여 운항 여부를 결정한다. 비행계획서는 항공 노선에 대한 연료량을 제공하고 조종사는 출발지, 목적지, 항로의 기상과 NOTAM(Notice to Airman) 등을 검토하여 연료량을 검토한다.

Received: 04. Mar. 2022, Revised: 31. Mar. 2022,

Accepted: 05. Apr. 2022

* 한서대학교 대학원 항공운항관리학과 박사과정, 진에어 기장

** 한서대학교 대학원 항공운항관리학과 박사과정

*** 한서대학교 대학원 항공운항관리학과 박사과정

**** 한서대학교 항공교통물류학과 교수

연락처 E-mail : wykim@hanseo.ac.kr

연락처 주소 : 충남 태안군 남면 신온리 산105번지 한서

대학교 태안비행장 312호

B737 항공기 연료소모율은 항공기 제작사 매뉴얼에 제공되며 이를 근거로 비행계획을 수립한다. B737 항공기 매뉴얼에 수록되어 있는 연료소모율 차트는 순항거리 200마일 이상 장거리 운항을 중심으로 제시되어 있다. 제작사 매뉴얼에서 국내선에 해당하는 단거리 운항구간의 연료소모율은 제공하지 않으며 운항승무원은 비행계획서에 제시된 연료량을 기준으로 비행을 계획하고 시행한다.

국내선 운항은 비행거리가 짧아서 연료량에 대한 중요성을 간과하기 쉽다. 그러나 실제 국내선 운항은 국제선 장거리 비행보다 연료를 면밀히 관리해야 할 경우가 발생한다. 특히 국내공항 중 대표적인 제주공항은 기상상태에 영향을 많이 받으며 이에 대한 연료량 판단과 예측은 중요하다. 또한 국내선 운항의 경우 과도하게 연료가 추가되어 목적지 공항 도착시 최대착륙중량이 초과하는 경우가 발생한다. 이런 경우 바로 착륙하지 못하고 연료를 소모하기 위해 목적지 공항 상공에서 대기요청을 하기도 한다. 본 연구는 이러한 국내 운항 환경의 특성을 반영한 연료소모량 분석과 국내선 표준 연료관리 기준의 필요성을 갖게 되었다. 따라서 연구자는 국내 운항 환경 하 면밀한 연료관리를 제공하기 위해 국내선을 대상으로 단거리 연료량을 측정하여 정확한 자료를 제공하고 안전한 운항에 기여하고자 한다.

1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 국내선 항공기 연료소모량을 분석하여 국내선 비행계획에 적용함으로써 효과적인 연료절감방안을 도출하는 것이다.

국내선은 단거리 비행구간으로 항공기의 제작사 매뉴얼을 적용하는 데 한계가 있다. 해당 항공기의 제작사에서 적용하는 연료소모율은 순항거리 200마일 이상 적용기준으로 되어 있어 국내선 연료소모율을 계산하기에는 한계가 있다.

현재까지 단거리 운항 구간에서 연료소모량을 분석한 연구는 미비하다. 이 연구는 단거리 구간에서 연료소모량을 실측하여 분석하였으며 국내 운항 환경의 특성을 반영하였다는 데 의미가 있겠다.

첫째로 정밀한 연료관리는 항공사의 경영이익을 창출할 수 있는 주요한 기초 자료로 연료 절감을 통한 비용절감을 도모할 수 있다. 둘째로 연구의 결과에 따른 국내선 연료소모율은 조종사들이 항공기를 운항하며 노선에 대한 연료소모율을 예측할 수 있는 주요 자료

가 될 것이다.

1.3 선행연구 검토

항공기 연료관리에 대한 연구는 여러 가지 다양한 주제로 접근하여 작성한 여러편의 논문들이 있다. 특히 Jeon(2020)은 B737 항공기 연료절감 관련 연구로 연료절감은 항공사는 물론 타 산업의 에너지 고갈 및 환경문제를 연계하여 다루었다. 저비용항공사(LCC)에서 주력으로 운용하는 B737 항공기에 대한 연료소모 관련 내용이 제시되어 있다. 항공기 연료소모에 영향을 미치는 요인으로는 크게 항공기 성능, 운항절차, 무게 및 운항관리 요인으로 나눌 수 있으며 항공기 중량관리, Arrival Fuel 및 APMS(airplane performance monitoring system) 관리에 대한 연구는 비교적 적절한 분석이 이루어졌지만 Flight Procedure 부분에 관한 연구는 국내 항공사 연구데이터 분석에 관한 내용이 미포함되어 있어 보충 연구가 필요한 부분이다.

Yoo(2017)는 항공기의 중량과 연료효율의 영향에 대해 연구하였다. 항공사들은 안전을 위해 대체공항연료, 보정연료, 최종예비연료로 구성되는 예비연료를 항공기에 탑재한다. 탑재된 예비연료로 인해 안전성은 보장되지만 항공기 중량 증가로 항공기의 연료 효율을 저하시키기도 한다. 이 연구는 특정 항공사의 인천-방콕 노선을 운항한 항공기들의 연료소모 및 탑재 자료에 대하여 정량적인 접근을 통해 충분한 안전 수준을 유지하면서 연료 탑재량을 어느 수준까지 감소시킬 수 있는지, 그리고 안전이 저하되지 않는 범위 내에서의 연료 탑재량 감소를 통해 얻을 수 있는 연료소모 및 이산화탄소 배출량 감소 효과를 무게인자와 연비손실 계산 방법을 적용해 산출하였다. 연구 결과에서는 실제 항공기 운항 자료와 적절한 안전 수준에 대한 정량적 접근을 통하여 항공기 탑재연료 감축의 필요성을 제시하고 탑재연료 감축을 통해 얻을 수 있는 연료 및 이산화탄소 배출 절감 효과를 산출할 수 있는 방법론을 제시하였으나 국내노선에 대한 분석이 제시되지 않았다.

Joo(2015)의 연구는 국제적 요구와 국내 온실가스 관련 감축목표에 부합하기 위해서 여러 항공기급에 대해 비행거리와 적재량에 따른 항공기 온실가스 배출량 민감도와 순항속도와 고도변화에 따른 연료소모량을 분석하여 속도와 고도변화시 연료 절감의 부분을 이해하는 데 유용하였다. 그러나 온실가스 산정 및 성능해석 프로그램(Piano-X) 사용 데이터로 한정되어 있고 국내 항공기에 대한 분석이 부족한 것이 제한적이라 하겠다.

Park(2014)의 연구를 살펴보면 항공기 연료 소모량은 순수 경제적인 편익을 측정할 수 있는 지표임과 동시에 항공기 운항에 따른 환경적인 영향을 정량화할 수 있는 지표이다. 이 연구에서는 EUROCONTROL의 BADA(base of aircraft data) 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. 이 연구는 항공관계 시스템에 의해 상시 수집되는 항적자료를 활용하여 개별 항공기의 연료소모량을 추정한 연구로서, 추정된 연료 소모량의 오차 범위를 제시함으로써 BADA자료를 활용하여 운항효율성을 분석하여 결과를 제시하고 있다는 점에서 의미가 있다고 판단된다.

Noh(2012) 연구는 항공기 탑재연료기준과 항공사에서 적용하고 있는 최소보정연료에 대한 분석을 함으로써 연료절감 부분을 분석하였으며 항공기 연료탑재 국제기준과 국내기준의 비교를 통해서 보정연료 감축 적용을 통한 유류비 절감효과를 나타내고 있으며, 항공기 연료의 정량적 비교분석으로 제한하였다는 한계가 있다.

II. 연구방법

2.1 연구설계

이 연구는 국내에 투입되는 B737 항공기를 적용하였다. B737항공기는 국내선 항공기 운항 기종 중 가장 많은 비중을 차지하고 있다. 연구에 필요한 자료수집

기간은 2021년 7월 10일부터 2022년 2월 5일까지로 연료소모량을 측정하였다. 연료소모량 측정은 총 106편의 비행계획서에 의거하여 출발(ramp out), 도착(ramp in), 이륙(take off), 착륙(landing) 구간으로 구분하고 연료량과 시간을 기록하였다. 해당 항공사는 J항공사로 B737 항공기를 운영하고 있다. B737 항공기는 시리즈 별로 차이는 있으나 연구대상 항공기는 엔진출력 24K 형식을 사용하고 있어 형식별 차이는 고려하지 않는다.

항공사는 연료관리 기본정책에 따라 연료량 산정시 최신의 기상정보, 비행 중 예상되는 지연을 고려하여 안전한 비행이 수행될 수 있도록 충분한 연료 및 오일을 탑재하여야 한다.¹⁾

연료 탑재량 계산시 고려사항은 예상 항공기 중량, NOTAM, 기상, 운항의 혼잡성 등 다양한 변수가 고려된다. 이러한 운항환경을 고려하여 이 연구에서는 총구간의 연료소모량을 기준으로 적용하였다.

이 연구는 조종사가 실 운항편을 대상으로 구간별 연료소모량을 기록하였으며 측정값은 연료와 시간이다. 연료소모량 측정은 Fig. 1의 탑재연료 구분에 의거 Ramp Out Fuel²⁾, Planned Takeoff Fuel³⁾, Required Takeoff fuel⁴⁾, Taxi Fuel⁵⁾, Trip Fuel⁶⁾로 구분하고 연료량과 시간을 기록하였다.⁷⁾ 세부구간은 상승구간, 순항구간, 강하구간으로 구분하였다. 상승구간은 이륙(take off)부터 순항시작구간(top of climb), 순항구간은 순항시작시점(top of climb)부터 강하시작시점(top of descend), 강하구간은 강하시작시점(top of descend)부터 착륙(landing)구간으로 하였다. 본 연구에서는 국내선 운항 특성을 반영하였다. 국내선 비행계획서는 최대탑재량을 적용하므로 최대이륙중량을 가정하였다. 순항구간에서는 고도별 자료수집을 통해 고도와 연료소모량간의 관계를 밝힌다(Fig. 2).

1) Jinair, "Flight Operation Manual", 2020, p.209.

2) 해당 편 운항을 위해 출발 전 탑재하는 전체 연료이다(Jinair, "Flight Operation Manual", 2020, p.265). 제5장 운항관리 연료 및 오일 연료산정기준에 명시되어 있다.

3) 비행계획 시 항공기에 탑재되어 있는 연료로서 taxi fuel은 포함되지 않는다(Jinair, "Flight Operation Manual", 2020, p.265). 제5장 운항관리 연료 및 오일 연료산정기준에 명시되어 있다.

4) 이륙시 반드시 탑재되어야 하는 minimum takeoff fuel이다(Jinair, "Flight Operation Manual", 2020, p.265). 제5장 운항관리 연료 및 오일 연료산정기준에 명시되어 있다.

5) Taxi fuel은 push-back 시점부터 takeoff 전까지 엔진시동, APU 운용 및 지상활동에 소모되는 연료를 말한다(Jinair, "Flight Operation Manual", 2020, p.265). 제5장 운항관리 연료 및 오일 연료산정기준에 명시되어 있다.

6) 출발공항 이륙부터 목적공항 착륙까지 비행에 필요한 연료량을 말한다(Jinair, "Flight Operation Manual", 2020, p.266). 제5장 운항관리 연료 및 오일 연료산정기준에 명시되어 있다.

7) 탑재연료구분은 운항기술기준에 의거하여 항공사 비행운영교범에 공통으로 명시되어 있다(Korean Air, "Flight Operating Manual", 2020, pp.291-305; Asiana Airline, "Flight Operating Manual", 2019, pp.223-230; Jejuair, "Flight Operation Manual", 2020, pp.110-116; Jinair, "Flight Operation Manual", 2020, p.264-271).

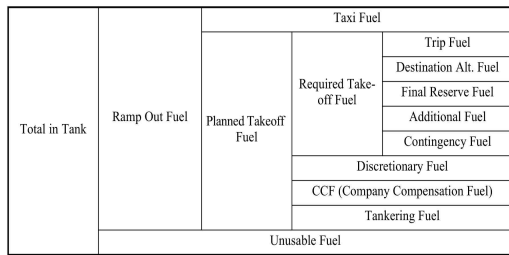


Fig. 1. Fuel loading classification

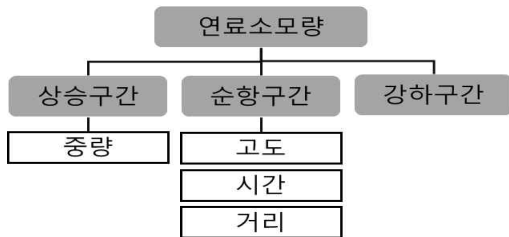


Fig. 2. Research model

운항환경은 자연과학의 영역, 사회과학의 영역을 포함한 다양한 변수로 구성되며 이를 세부별로 구분하기는 현실적으로 불가능하다. 이러한 한계를 보완하기 위해 이 연구는 연료 총사용량을 기준값으로 설정하였다. 연료 총사용량은 다양한 변수가 반영된 운항환경을 반영한 기준값이다. 그러므로 비행단계별 연료사용량은 운항환경에 미치는 변수의 변화들을 반영한 총량이라고 할 수 있다.

2.2 연구분석 방법 및 적용

연구에서는 수집된 자료를 분석하기 위해 Matlab (2021b)를 활용하여 구간별 연료소모량을 산출할 수 있는 함수를 고안하여 적용하였으며 국내선 단거리 운항 비행계획서에 적용할 수 있게 설계하였다.

Matlab(2021b)을 활용하여 실측 DATA, Panel DATA를 대입하여 국내선 단거리 연료 소모율을 산출, 비교하였다.

연구과정에서 측정한 노선별, 구간별 연료소모량은 실제 운항환경을 반영한 실측값으로써 의미가 있다. 실측된 Data는 국내선 운항 비행계획수립시 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 항공사는 이를 활용하여 효율적

인 연료관리는 물론 유연한 경영관리 및 경영이익을 도모할 수 있을 것이다. 이 연구는 K항공사 B737 시뮬레이션을 통해 산출된 Table 1, 2, 3의 김포공항 Data를 Matlab(2021b)에 적용하여 Fig. 3 코딩모델(coding model)을 구현하였다.⁸⁾

B737 항공기 시뮬레이션 기준은 이륙중량(gross weight) 130,000LBS, ZFW(zero fuel weight) 150,000LBS, Fuel 15,000LBS, 외기온도(OAT: 15℃ 기준), 연료절감을 위한 Reduced Thrust(no assumed temperature)이다. 대상 공항은 김포공항이며 RWY 32, RWY 14 양방향 활주로를 사용한다.

시뮬레이션 결과에 의하면 순항고도 도달까지 연료

Table 1. Distance of takeoff-climb phase

구분	400ft	1,500ft	3,000ft	5,000ft	10,000ft
Brake release	1.1NM	1.8NM	2.8NM	5.5NM	14NM

Table 2. Data of takeoff-cruise phase

From	To	Fuel	Horizontal distance	비고
Brake release	3,000ft	400LBS	2.5NM	VNAV 직전
	5,000ft	600LBS	5.5NM	Flap Retract 완료, Speed: 220-230kts
	10,000ft	1,100LBS	14NM	ECON (Economy) Acceleration 직전
	15,000ft	1,600LBS	30NM	RWY 14 이륙시
	20,000ft	2,100LBS	41NM	RWY 14 이륙시
	25,000ft	2,600LBS	52NM	RWY 14 이륙시
	30,000ft	3,000LBS	78NM	RWY 14 이륙시

Table 3. Fuel consumption of cruise altitude

순항고도	10,000ft	15,000ft	20,000ft	25,000ft	30,000ft
연료	170 LBS	160 LBS	150 LBS	145 LBS	130 LBS

8) J항공사는 K항공사와 동일그룹에 속한 항공사로 조종사 교육훈련을 통합으로 실시하며 동일기재를 사용한다. J항공사의 항공기는 K항공사가 사용하던 항공기를 도입하였다. 본 연구에 사용된 시뮬레이터 데이터는 K항공사, J항공사가 운항승무원이 훈련하는 동일장비의 결과이다.

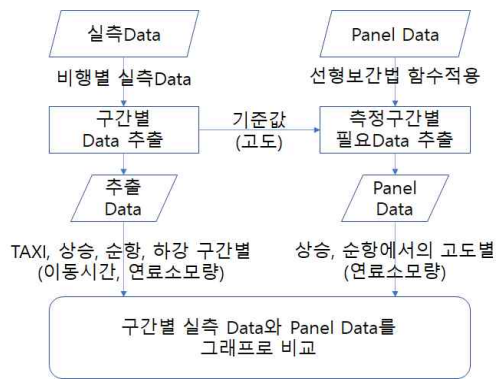


Fig. 3. Coding model

소비량은 500LBS/5NM 소모율로 100LBS/1NM 소모 되는 것으로 측정되었다.

고도 10,000ft~25,000ft까지는 5NM 상승당 수평 거리 11NM, 25,000ft 이상은 밀도 감소로 수평거리는 더욱 증가되는 것으로 나타났다. 국내선과 같은 단거리의 경우, TRIP FUEL의 50%는 상승구간에서 소모된다.

III. 자료수집 및 결과분석

3.1 노선별 분석

3.1.1 개요

국내선 자료수집 대상은 김포공항, 제주공항, 청주공항, 김해공항, 광주공항 등 5개 공항이다. 국내선 공항 중 제주공항은 활주로 방향이 동서로 설계되어 있어 항공기 이착륙이 어려운 공항이다. 이러한 이유로 일본항공사는 제주공항에 취항하지 않고 있다. 따라서 제주공항 운항시에는 연료탑재를 신중히 계획해야 한다.

청주공항, 김해공항, 광주공항은 군 공항으로 평일 군 비행훈련 영향을 받아 장시간 대기하는 경우가 종종 발생한다. 이러한 공항별 특성은 연료소모량 결과 분석에서도 잘 나타나고 있다.

Fig. 4는 국내선 노선별 비행근무시간이다. 비행시간을 지상구간, 상승구간, 순항구간, 강하구간별로 분석하였다. 광주노선은 지상구간의 taxi 시간이 높게 나타난다. 그 이유는 첫째, 국내선 청사가 위치와 이륙할 주로 RWY 04까지의 지상이동거리가 길기 때문이다. 둘째, 광주공항은 군사공항이며 비행훈련을 전담하고 있는 관계로 주간시간대 교통량이 많고 혼잡하다. 공항 청사와 활주로까지의 거리, 공군 비행훈련 항공기로 인한 지상대기 시간이 반영되었다고 볼 수 있다.

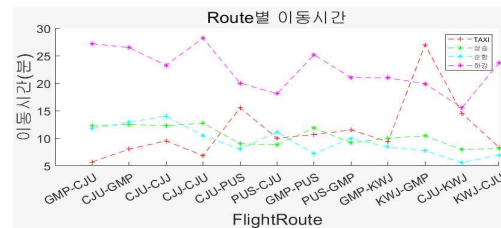


Fig. 4. Block time of domestic flight route

Fig. 5는 국내선 노선별 연료소모량(LBS/MIN)을 보여주고 있다. 일반적으로 노선별 비행구간의 연료소모량은 상승구간, 순항구간, 강하구간, 지상구간 순으로 나타난다.

3.1.2 Trip Fuel(이륙-착륙구간)

국내선 비행계획서에 명시된 Trip Fuel은 고정연료량으로 항상 동일하게 반영된다. 운항관리사는 비행고도, 비행속도, Cost Index를 반영한 Domestic Flight Plan을 발행하며 조종사는 항상 반복된 비행계획서를 검토한다. Table 4는 국내선 노선별 비행계획서에 명

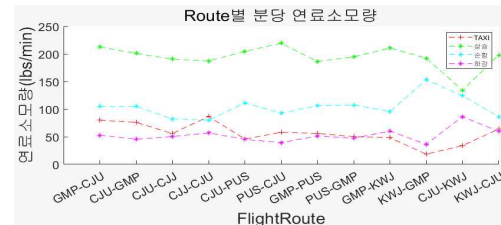


Fig. 5. Fuel consumption of domestic flight route (LBS/MIN)

Table 4. Trip fuel consumption of domestic flight route (단위: LBS, 분)

구분	계획		실제측정값		연료소모량 (-)
김포-제주	6,400	53	5,563	53	837
제주-김포	5,500	50	5,208	51	292
제주-청주	5,300	46	4,803	49	497
청주-제주	6,000	51	4,994	50	1,006
제주-부산	3,600	36	3,823	37	+223
부산-제주	5,600	47	3,670	38	1,930
김포-부산	4,800	40	4,273	44	527
부산-김포	5,000	41	4,043	41	957

시된 Trip Fuel 연료량과 실제 측정된 값을 정리하여 작성하였다.

Table 4를 보면 제주-부산 구간의 비행계획 연료량과 실제 소모연료량은 유사하다. 제주-부산 구간은 활주로 접근에 대한 STAR(standard instrument arrival, 표준계기접근절차)보다는 레이더 유도 방식으로 접근하는 경우가 많아 비행계획 거리와 실 비행거리가 유사하기 때문이다.

Fig. 6에서 노선별 TRIP 구간 비행시간은 비행계획 시간과 유사하게 나타난다. Fig. 7에서 노선별 TRIP 구간의 연료소모량은 비행계획보다 적게 소모됨을 알 수 있다. 이러한 분석을 통해 도출된 결과를 비행계획에 반영시 항공사는 연료절감을 통한 비용절감 효과를 볼 수 있을 것이다. 그러나 국내선의 경우 비행계획 수립시 단거리 운항으로 인하여 최대착륙중량을 적용하기 때문에 중량 조절을 통한 연료절감을 기대할 수는 없을 것이다.

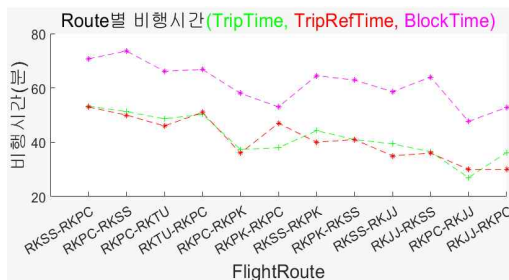


Fig. 6. Trip time of domestic flight route

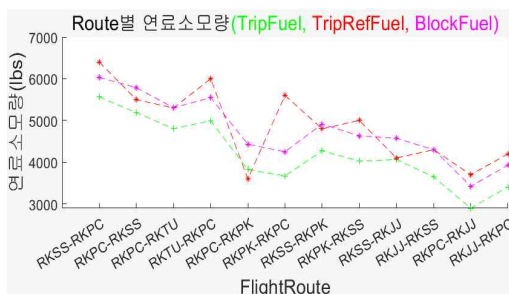


Fig. 7. Fuel consumption of domestic flight route

3.2 비행 구간별 분석

3.2.1 개요

Fig. 8은 국내선 노선에 대한 비행구간별 연료소모량이다. Fig. 8은 국내선 비행환경에 대한 특성을 잘 반영하고 있다. 일반적으로 국내선의 경우 단거리로 인해 순항구간이 짧은 특성이 있다. 제주공항은 교통량 증가로 비행혼잡이 자주 발생하여 강하시점부터 착륙까지 비행시간 비중이 높다.

3.2.2 지상구간

지상구간은 push back부터 이륙(take off)구간까지, 착륙(landing) 후 도착까지(ramp in) 구간으로 구분하였다.

일반적으로 B737 항공기의 taxi fuel은 APU burnoff rate 3.8LBS/MIN, taxi burnoff rate 25LBS/MIN으로 구분된다.⁹⁾

Taxi fuel 산정은 국제선의 경우 operational flight plan의 공항별/시간대별 taxi time 실적 통계 및 taxi burn rate에 근거하여 산정된다. 국제선의 경우 2개월간의 통계를 적용하고 있지만 국내선은 비행계획 시 taxi fuel 전 구간에 400LBS를 적용한다.

중량 증가에 따른 추가 연료소모는 일반적으로 기종에 상관없이 증가된 중량의 약 3% 연료가 매시간 추가 소모되는데 이 수치를 weight factor 또는 surplus라고 한다. 예를 들어 비행 편당 1,000LBS 중량이 증가되면 시간당 30LBS의 연료가 추가 소모된다.¹⁰⁾ 그러

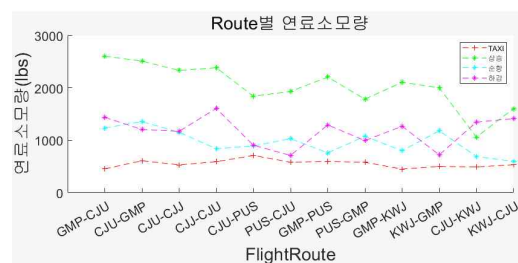


Fig. 8. Fuel consumption of domestic flight phase

9) 비행운영교범(Flight Operation Manual)에 명시된 연료소모량 기준이다. B737을 운용하는 항공사 매뉴얼에 공통 적용사항이다. 이 연구에서는 진에어 매뉴얼을 인용하였다(Jinair, "Flight Crew Reference Manual", Jinair, Seoul, 2021, p.210).

10) Jinair, "Flight Crew Reference Manual", Jinair, Seoul, 2021, p.149.

나 국내선의 경우 MTOW(최대이륙중량)과 MLDW(최대착륙중량)을 반영하기 때문에 중량에 의한 연료소모량은 고려하지 않는다.

Table 5에서 보면 지상구간에 대한 연료소모량은 비행계획서에 반영된 기준값 400LBS보다 사용량이 높게 산출되었다. 이 원인은 교통량 혼잡으로 인한 지연 이륙, 착륙 후 APU¹¹⁾시동과 사용에 필요한 연료소모, 도착장 GATE 사용 증으로 인한 대기시간 증가로 인한 도착하는 경우로 추정된다.

Fig. 9는 국내선 노선별 지상구간 연료소모량으로 이륙구간보다 착륙구간 연료소모량이 높게 나타난다. 지상구간에서 이륙구간보다 착륙후 연료소모율이 높은 것은 APU 사용에 의한 연료소모량이 포함되기 때문이다.

3.2.3 상승구간

상승구간은 이륙(take off)부터 순항시작구간(top of climb)으로 구분하였다. 상승구간은 연료소모율이 높은 구간으로 연료절감을 위해 reduced thrust(assume temp, derate) 방식을 적용한다.¹²⁾ 이 구간에 대한 평균 분당 연료소모율은 Table 6과 같다.

Table 5. Fuel consumption of taxi phase
(LBS/MIN) (단위: LBS)

구분	이륙 전 taxi	착륙 후 taxi	합계
전체	271.163	286.826	557.990
LBS/MIN	21.076	51.280	29.617

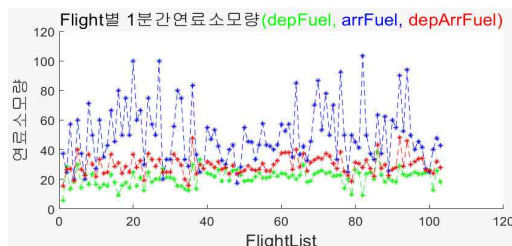


Fig. 9. Taxi fuel consumption of domestic flight route

Table 6. Fuel consumption of climb phase
(LBS/MIN) (단위: LBS)

구분	기준값	실측값	차 이
전체	2,340.9	2,156.4	184.53
LBS/MIN	212.47	195.72	16.75

국내선 순항고도는 16,000ft 초과부터 29,000ft이하까지 인천컨트롤 범위에서 운항하며 순항고도 도달까지 상승구간의 연료소모량은 Table 7과 같다.

Fig. 10을 보면 상승구간 연료소모량은 trip fuel의 50%가 소모되는 것으로 나타났으며 제작사 매뉴얼 설

Table 7. Fuel consumption of climb phase
(average) (단위: LBS)

구분	기준값	실측값	차이
18,000ft	1,900	1,525	375
19,000ft	2,000	1,803	196
20,000ft	2,100	2,042	58
21,000ft	2,200	2,174	26
22,000ft	2,300	2,048	251
23,000ft	2,400	2,337	62
24,000ft	2,500	2,283	216
25,000ft	2,600	2,242	357
26,000ft	2,680	2,430	250
27,000ft	2,760	2,542	218
28,000ft	2,840	2,620	220

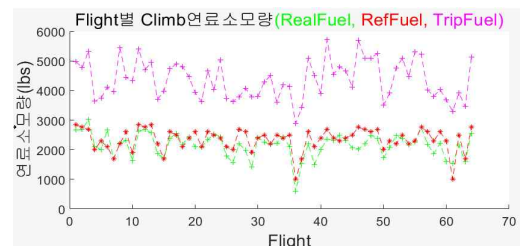


Fig 10. Climb fuel consumption of domestic flight route

11) APU(auxiliary power unit): 항공기에 보조적인 동력을 공급하도록 만들어진 장치이다.

12) ATM(assume temp) 또는 derate thrust를 사용한 이륙절차를 계속해서 사용할 경우 연료효율은 평균 2% 개선되며, 갑작스러운 engine failure의 위험성을 줄이게 되는 효과를 얻을 수 있다.

명과 동일하였다.

Fig. 11에서 보면 상승구간 이륙(take off)부터 순항시작 구간(top of climb)까지 노선별 연료소모량은 비행계획 및 시뮬레이션 기준값보다 실측값이 작게 분포되어 있다. 상승구간 평균 연료소모량 184.53LBS/MIN로 평균 비행계획 대비 16.75LBS/MIN 절감된다.

3.2.4 순항구간

국내선은 단거리 순항구간으로 optimum altitude (최적고도)에 도달하지 못한다. 비행구간이 너무 짧아 optimum altitude까지 상승할 수 없는 경우, 가장 연료 효율적인 비행방식은 순항구간 없이 강하구간과 만 날때까지 상승하는 것이다. 그러나 실제 운항에서는 항공교통관제, 승객서비스를 고려하여 3~5분의 순항 구간을 계획하는 것이 보편적이다.¹³⁾

순항구간은 순항시작시점(top of climb)부터 강하시작시점(top of descend)으로 구분하였다. 제작사 매뉴얼은 200마일 이내의 연료소모율은 제공하지 않는다. 때문에 국내선 비행계획은 정확한 연료소모량을 반영하지 못하는 것이 현실이다. 현재 COVID 19 이후 국내 저비용항공사의 운항은 국내선의 집중되어 있고 실제 운항률은 COVID 19 이전보다 높은 상태이다. 이러한 현실에서 200마일 이내의 연료소모량 측정은 의미있는 연구일 것이다.

Table 8, 9와 Fig. 12는 순항고도에서 연료소모량은 시뮬레이션 기준값과 실측값을 분석한 것이다. 순항구간은 순항시작시점(top of climb)부터 강하시작시점(top of descend)으로 계획 및 시뮬레이션 기준값과 실측값이 유사하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 순항고도에서 분당 연료소모량과 시뮬레이션 기준값의 분포이다. 산점도가 유사하게 분포되어 있어 실제 운항환경이 잘 반영된 것으로 확인할 수 있다.

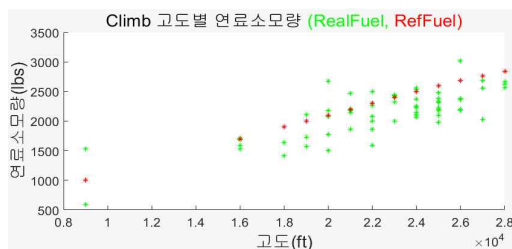


Fig. 11. Fuel consumption of climb phase

Table 8. Fuel consumption of cruise phase (LBS/MIN) (단위: LBS)

구분	기준값	실측값	차이
전체	964.9	957.5	7.4
LBS/MIN	100.7	99.9	0.8

Table 9. Fuel consumption of cruise phase (average) (단위: LBS)

구분	기준값	실측값	차이
18,000ft	1,351	1,510	-159
19,000ft	833	985	-152
20,000ft	1,212	1,205	7
21,000ft	1,203	993	210
22,000ft	910	956	-46
23,000ft	787	661	125
24,000ft	776	771	5
25,000ft	1,088	1,057	31
26,000ft	1,396	1,410	-14
27,000ft	1,126	1,287	-160

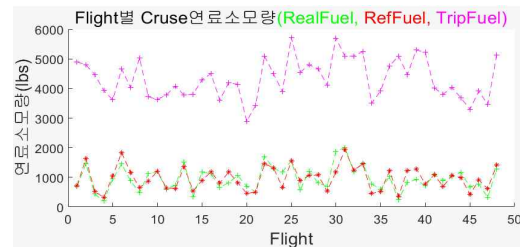


Fig. 12. Fuel consumption of cruise phase

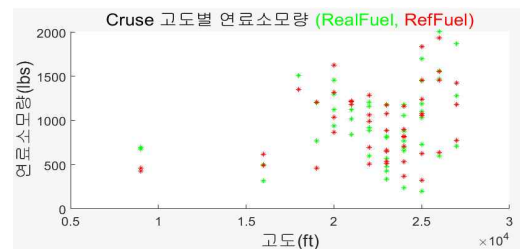


Fig. 13. Fuel consumption of cruise phase

3.2.5 강하구간

강하구간은 강하시작시점(top of descend)부터 착륙(landing)구간으로 하였다. 강하구간의 연료소모율은 51.49LBS/MIN로 타 구간에 비행 작게 산출된

13) Jinair, "Flight Crew Reference Manual", Jinair, Seoul, 2021, p.156.

다. 이러한 결과는 강하구간에 대한 연료소모율은 idle descent 정책을 수행하는 조종사의 조작과 관련이 있다.

3.3 연료절감 분석 결과

국내선 비행계획서에 반영된 법정연료량과 측정값을 비교한 결과 비행계획서에 반영된 연료량이 상대적으로 많은 것으로 확인되었으며 국내선 비행계획서에 반영된 노선별 연료량을 연구결과 값으로 반영한 차이는 Table 10, 11과 같다.¹⁴⁾

IV. 결 론

이 연구는 B737 운송용 항공기의 운항편을 대상으로 실험을 통한 실측 자료를 활용한 연구로서, 국내선

Table 10. Fuel consumption of domestic flight plan (LBS/MIN) (단위: LBS/MIN)

구분	비행 계획서 A	측정값 반영B	절감량A-B	절감액(원)
전노선 합계	4,689	4,037	652	23,472

Table 11. Fuel comparison (Plan vs Results) (단위: LBS)

구분	비행 계획서 A	측정값 반영 B	절감량 A-B	절감액(원)
김포-제주	6,400	5,563	837	30,132
제주-김포	5,500	5,208	292	10,512
제주-청주	5,300	4,803	497	17,892
청주-제주	6,000	4,994	1,006	36,216
제주-부산	3,600	3,823	+223	-8,028
부산-제주	5,600	3,670	1,930	69,480
김포-부산	4,800	4,273	527	18,972
부산-김포	5,000	4,043	957	34,452

운항시 연료소모량에 대한 연구를 분석하였다.

연구결과를 종합해 보면 국내선 비행계획 연료량보다 실제 연료소모량이 적은 것으로 나타났다. 분당연료소모율(LBS/MIN)을 기준으로 비행계획서, 시뮬레이션 기준값과 실측값을 비교해 본 결과 지상구간은 기준값보다 연료사용량이 많았다. 상승구간은 기준값보다 실측값이 적게 나타났다. 순항구간은 기준값과 실측값이 유사하게 나타났다. 강하구간은 공항혼잡도에 따른 영향이 있음에도 타 구간보다 연료소모율이 적게 나타났다. 총 구간을 기준으로 연료소모량에 따른 연료절감이 가능하다는 결론을 도출하였다. 이 연구결과를 국내선 운항노선에 적용해 보았다. 2021년 국내선 노선별 통계를 기준으로 노선별 연료절감효과를 Table 12와 같다.¹⁵⁾

이 연구의 한계는 운항에 미치는 다양한 변수를 세부적으로 구별하여 반영하지 못한 점과 B737 항공기의 연료량 측정 시점에서 항공기 자세에 따른 연료지시계의 부정확성, 항공기별 엔진 fuel flow의 오차, 연료지시계와 항공기 FMS(flight management system)에서 계산된 오차가 고려되지 못한 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해서는 실시간 연료소모율 데이터 자료수집을 통해 오차를 최소화하는 방안으로 항공기 FOQA(flight operation quality assurance) DATA를 활용하는 방법이 있겠다.

이 연구는 이러한 한계에도 불구하고 실측값을 기반으로, 측정값을 확인해 보면 시뮬레이션을 통하여 산출된 값과 유사한 패턴을 형성하고 있어 측정값을 활용하였다는 점에서 상당히 의미 있는 연구이다.

Table 12. Results of fuel economy (단위: LBS, 원)

구분	절감량	운항편	절감액(원)
김포-제주	1,129	87,353	1,775,187,666
제주-청주	1,503	17,425	471,415,950
제주-부산	1,717	21,584	667,075,104
김포-부산	1,484	35,353	944,349,336

14) 연료값은 갤런당 2,600원을 반영한다. 1갤런당(Gallon) ≍ 4리터이며 약 72LBS이다.

264.69cts/gal: US cents per gallon(<https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>, 검색일(2022. 2. 16)).

15) https://www.airport.co.kr/www/cms/frFlightStatsCon/domesticLineStats.do?MENU_ID=1250, 검색일(2022. 2. 16).

References

1. Jeon, H. S., "A study on the fuel efficient management of B737 aircraft", Master's Thesis, Korea Aerospace University, Goyang, South Korea, Feb 2020.
2. Yoo, S. H., and Yoo, K. E., "A study on reducing aircraft fuel consumption by reserve fuel reduction", Journal of Korean Aviation Management Association, 15(3), 2017, pp.67-69.
3. Joo, H. J., and Hawang, H. Y., "Aircraft emission and fuel burn estimation due to changes of payload and range", Journal of Korean Aviation Operation Association 22(4), 2015. 8., pp.278-286.
4. Park, J. H., and Ku, S. K., "Estimation of flight fuel consumption based on flight track data and its accuracy analysis", Journal of Korean Aviation Operation Association, 22(4), 2014. 12., pp.25-33.
5. Noh, K. S., "Efficiency analysis upon the revision of contingency fuel and minimum contingency fuel requirements", Journal of Korean Aviation Management Association, 10(4), 2012. 12., pp.97-105.
6. Jang, Y. W., "A study on the amount of fuel on board aircraft", Master's Thesis, Korea Aerospace University, Goyang, South Korea 2012.
7. Noh, K. S., "A study on the need to adjust aircraft calibration fuel payload", Journal of Korean Aviation Management Association, 8(1), 2010, pp.47-56.
8. Newman, B. Scott., "A comparison of fuel efficiencies between DC-9-30 and B-737NG aircraft for delta airlines at Atlanta Hartsfield Airport", Ph.D. Dissertations and Master's Theses, 111., Embry-Riddle Aeronautical University-Daytona Beach, 2011, <https://commons.erau.edu/edt/111>
9. Kusrini, E., "Analysis of Boeing Aircraft's fuel consumption B737-800 NG for Yogyakarta-Singapore-Jakarta route", Journal of Industrial Engineering and Halal Industries, 1(1), 25 Aug 2020.
10. "2021 Cirium Airline Insights Review-Analysis of the industry's recovery from the pandemic", Cirium, 2021, <https://www.cirium.com/studios/2021-airline-insights-review/>
11. <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>
12. https://www.airport.co.kr/www/cms/frFlightStatsCon/domesticLineStats.do?MENU_ID=1250