



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(1), 13-20(2022)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.1.13

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

A350 모델의 비행실적을 이용한 중량 효과 검증

장성우¹, 유재림², 유광의³

Verification of Weight Effect Using Actual Flight Data of A350 Model

Sungwoo Jang¹, Jae Leame Yoo² and Kwang Eui Yoo³Asiana Airlines, Seoul, Republic of Korea¹Cheongju University, Cheongju, Republic of Korea²Korea Aerospace University, Goyang, Republic of Korea³

ABSTRACT

Aircraft weight is an important factor affecting performance and fuel efficiency. In the conceptual design stage of the aircraft, the process of balancing cost and weight is performed using empirical formulas such as fuel consumption cost per weight in estimating element weight. In addition, when an airline operates an aircraft, it promotes fuel efficiency improvement, fuel saving and carbon reduction through weight management activities. The relationship between changes in aircraft weight and changes in fuel consumption is called the cost of weight, and the cost of weight is used to evaluate the effect of adding or reducing weight to an aircraft on fuel consumption. In this study, the problems of the existing cost of weight calculation method are identified, and a new cost of weight calculation method is introduced to solve the problem. Using Breguet's Range Formula and actual flight data of the A350-900 aircraft, two weight costs are calculated based on take-off weight and landing weight. In conclusion, it was suggested that it is reasonable to use the cost of weight based on the take-off weight and the landing weight for other purposes. In particular, the cost of weight based on the landing weight can be used as an empirical formula for estimating element weight and optimizing cost and weight in the conceptual design stage of similar aircraft.

초 록

항공기 중량은 성능 및 연료효율성에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 항공기의 개념 설계 단계에서는 요소 중량을 추정함에 중량 당 연료소모 비용과 같은 경험식을 이용하여 비용과 중량 간의 균형을 맞추는 과정을 수행한다. 또한, 항공사에서 항공기를 운용할 때 중량관리 활동을 통해 연료 효율성 향상 및 연료절감과 탄소저감을 추진한다. 항공기 중량 변화와 연료 소모 변화 사이의 연관성을 중량비용(Cost of Weight)이라고 하며, 중량비용은 항공기에 중량 추가 혹은 감소가 연료 소모에 미치는 영향을 평가함에 사용하고 있다. 본 연구에서는 기존 중량비용 산정 방법의 문제점을 확인하고, 이를 해결하기 위한 새로운 방법의 중량비용 산정 방법을 소개한다. Breguet의 Range Formula와 A350-900 항공기의 실제 비행 데이터를 이용하여 이륙중량과 착륙중량 기반의 두 가지 중량비용을 산정한다. 결론에서는 이륙중량과 착륙중량 기반의 중량비용을 다른 용도로 사용함이 합리적임을 제시하였다. 특히, 착륙중량 기반의 중량비용은 유사 항공기 개념설계 단계에서 요소중량 추정 및 비용과 중량 최적화에 하나의 경험식으로 활용할 수 있다.

† Received : October 27, 2021 Revised : Decmber 15, 2021 Accepted : December 20, 2021

¹ Doctor of Science, ^{2,3} Professor³ Corresponding author, E-mail : keyoo@kau.ac.kr

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Keywords : Fuel Consumption(연료소모량), Fuel Efficiency(연료효율성), Economic Analysis(경제성 분석), Cost of Weight(중량비용), Weight Factor(중량계수), Weight Management(중량관리), Cost/ Weight Optimization(비용/중량 최적화)

I. 서 론

항공기 중량은 성능 및 연료효율성에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 항공기의 개념 설계 단계에서 요소 중량을 추정함에 이미 알려진 경험식을 이용하고, 주어진 구조적 성능을 유지하면서 제조비용을 최소화하는 비용과 중량 간의 균형을 맞추는 과정을 수행한다. 여기에서 사용하는 비용/중량 관계는 구조적 중량 당 연료소모 비용을 의미하며, 낮은 비용과 낮은 중량의 조합을 최적화 목표로 한다. 일례로, 항공기 날개를 길게 설계함으로써 양항비를 높여 성능상 이득을 얻을 수 있지만, 항공기 중량이 증가함에 따른 연료소모량이 많아지는 단점이 있다. 중량이 증가함에 따라 얻어지는 이익과 비용의 경제성 분석 혹은 편익 분석 중 비용의 정확한 산정을 위해 중량에 따른 연료소모 비용을 적절하게 반영함이 필요하다.

항공사에서 항공기를 운용할 때 중량관리를 통해 연료효율성 향상 및 연료절감, 나아가 탄소저감 활동을 수행한다. 여기에서 사용하는 중량비용은 항공기 중량 변화와 연료소모 사이의 연관성을 이용하는데, 일정 중량을 운송하는 데 소모되는 연료량을 의미한다.

본 연구는 A350-900 항공기의 실제 비행 관련 항공사 데이터를 이용하며, 이륙중량과 착륙중량 기반의 두 가지 중량비용을 산정한다. 이륙중량 기반으로 한 중량비용은 연료탑재량 증가/감소에 의한 연료소모량 추가소모/절감 효과 확인에 활용하고, 착륙중량 기반의 중량비용은 항공기 장비 중량 등 고정 중량 탑재의 연료소모 효과를 산정함에 이용한다. 후자는 유사 항공기 개념설계 단계에서 요소중량 추정 및 비용/중량 최적화에 하나의 경험식으로 활용할 수 있다.

II. 본 론

2.1 항공기 중량의 최적화

항공기 중량은 성능과 연료효율성에 영향을 미치며, 개념설계 단계와 경제성 분석에서 고려해야 할 주요 요인이다.

일반적으로 항공기 시스템 중량 및 비용 분석은 개발에서 운용, 폐기에 이르기까지 여러 단계에 걸쳐 반복적으로 수행하는 업무이고, 항공기 개념설계 단계에서 형상의 정의 및 이에 따른 소요 시스템의 성능, 설계 요구조건의 설정 및 개발대상 항공기의 개발 비용을 예측하는 것은 중요한 과정이다. 개발대상 항공기의 형상을 정의하는데 필요한 시스템의 구성,

중량 및 중량중심 데이터 등과 비용을 추정하기 위해 적용하는 기법들의 대부분은 경험적 데이터에 의존하는 하향식 예측이다[1].

항공기의 개념설계 단계에서 최대이륙중량 및 요소 중량을 경험식을 이용하여 추정할 수 있으며, 이 값을 기반으로 이후의 설계 과정을 진행하게 된다. 이러한 개념설계 단계를 보다 효율적으로 진행할 수 있도록 이미 알려진 경험식을 활용하여 항공기의 최대이륙중량 및 요소중량을 추정할 수 있다[2].

개념설계 단계에서 주로 사용되는 통계적 중량 예측식 도출방법에 관한 연구 중 제트 여객기 날개 중량 예측식을 모델링한 것도 있다[3]. 항공기 개념설계 시 날개 중량 추정 및 빈번한 조정 요구 사항에 따라 설계자가 신속하고 정확하게 날개 중량 추정을 할 수 있도록 구조 강도 및 강성의 제약을 고려한 날개 중량 추정 방법을 제안한 연구도 있다[4].

2.1.1 항공기 구조의 비용/중량 최적화

항공기의 생산 비용 증가는 비용 효율적인 설계 전략의 적용을 필요로 한다. 복합 구조에 대한 비용/중량 최적화를 통해 항공기 중량에 따른 연료소모량을 고려한다. 여기에는 일련의 비용/중량 비율(중량 Penalty) 및 재료 구성에 최적화된 매개변수 연구가 포함된다. 특정 수명 연료 연소로 정의되는 중량 Penalty는 항공기의 연료 소비, 연료 가격 및 최적화 장치의 관점에 따라 달라진다. 설계 솔루션의 이상적인 선택은 낮은 비용도 낮은 중량도 아닌 그 조합이라고 할 수 있다.

가격 경쟁으로 인해 항공사는 비용을 절감해야 한다. 따라서 취득 비용 및 운용비용을 낮추기 위한 노력이 이루어지며 이러한 운용비용을 낮출 수 있는 한 가지 가능성은 항공기의 연료 소모를 줄이는 것이다.

연료소모는 여객기 운용비용의 상당 부분을 차지하며, 연료비용은 효율적인 엔진의 개발, 공기역학적 항력의 최적화, 항공기의 비행 궤적 최적화 또는 중량 감소를 통해 절감할 수 있다. 중량 감소는 금속에서 복합재료로 변화하는 주된 동기이며, 전체 구조 중량에서 복합재료의 비중은 지속해서 증가하고 있다.

상업용 항공기에 복합재료를 처음 적용한 것은 1940년의 레이더 돔이었다. 그 이후로 복합재료는 점차 금속 재료를 대체했다. 1975년 NASA는 연구 목적으로 일련의 복합 부품을 개발했으며 B727 및 B737의 승강기와 DC10의 수직 편이 재설계되었다. 보잉 777에서는 2차 구조(리딩 에지, 트레일링 에지, 에일러론, 러더)가 탄소 섬유로 만들어졌으며 A380의

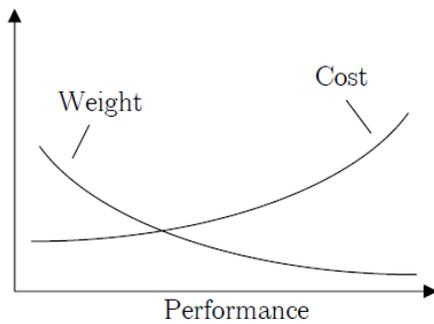


Fig. 1. Trade-off between cost and weight (Source: Cost/ Weight Optimization of Aircraft Structures[5])

센터 윙 박스에서는 복합 재료가 1차 구조에도 사용되었듯이 중량 감소는 지속적으로 이루어져 왔다.

비용과 중량 간의 균형은 Fig. 1에 나와 있으며, 여기서 중량과 비용은 재료의 성능에 대해 정성적으로 표시되었다. 일반적으로 고성능을 내기 위해서는 제조비용이 더 많이 든다. 구조 구성요소의 성능에 따른 비용과 중량 사이의 절충안을 찾아야 한다. 여기에서 사용하는 비용과 중량 관계는 “구조적 중량 당 연료 소모비용(fuel burn cost per structural mass)”을 나타낸다.

이러한 최적화 문제에는 저비용, 저중량 및 테스트 가능성과 같은 다양한 목표가 포함된다. 대부분의 연구는 중량 최적화 분야 또는 주어진 구조적 성능을 유지하면서 제조비용을 최소화하는 분야에서 수행된다[5].

2.1.2 중량관리를 통한 연료효율성 향상

항공사는 다양한 방법으로 연료효율성 향상, 연료 절감, 나아가 탄소저감 활동을 수행하고 있다.

A321 CEO 대비 연료효율이 향상된 A321 NEO와 같은 최신 기종을 도입하거나[6] A321 기종에 Sharklet이라는 연료절감 목적의 장비를 장착하거나[7] B777 혹은 A350 기종에 성능향상 패키지(Performance Improvement Package)를 적용함으로써 연료절감이 가능하다[8].

항공사는 중량관리(Weight Management) 정책을 수행하여 항공기의 운항중량을 감소하여 연료효율성 향상을 추진하기도 한다. 좌석 경량화, 승객 서비스용품 탑재용기와 화물탑재용기 경량화, 예비품 탑재수량 감소 등 항공기의 운항자중을 근본적으로 감소하기도 하고, 운항구간에 적절한 음용수 탑재, 통계 실적에 기반을 둔 추가연료 탑재 등을 통해서 항공기의 운항중량을 줄인다.

Wen-Hsien Tsai는 환경 보호가 CSR (Corporate Social Responsibility)의 지표가 되므로 환경에 미치는 영향을 줄이기 위한 하나의 방법으로 객실 좌석의 중량을 줄여 연료 소모를 감소하는 방법을 제시

하였다. 무거운 좌석을 더 가벼운 새 좌석으로 교체함으로써 생기는 이익이 교체 관련 비용을 상쇄할 수 있도록 효율적인 교체를 검토하였다[9].

Jun-Oh Lee는 항공기 연료효율에 있어 가장 기본적인 것인 비용 대비 가치적인 효과를 볼 수 있는 것으로 중량관리 방법을 연구하였다. 유상탑재중량의 정확한 예측을 통한 비행계획서 작성과 이에 따른 연료탑재량 감소로 연료비용 절감이 가능하다고 보았다[10].

항공사는 운항연료 외에 운항 안전상의 이유로 목적지 교체공항 연료, 최종예비연료 및 보정연료로 구성된 예비연료를 탑재해야 한다. 예비연료는 운항 안전성을 높일 수 있지만, 항공기의 총중량 증가와 함께 연료소모도 증가시킨다. Sihyun Yoo는 적정 안전수준을 유지하면서 예비연료를 줄일 수 있는지 여부를 판단하고, 궁극적으로 예비연료를 줄이는 타당성을 제시하였다[11].

교체공항으로 우회 시 연료가 고갈될 위험이 있다는 점을 감안할 때, 항공사 운항관리사는 추가연료를 탑재할 수 있다. 이러한 보수주의는 연료 소모가 항공기 중량의 함수이기 때문에 초과 연료를 소모하는 대가를 치르게 된다. Megan S Ryerson은 예측 가능한 비상사태에 필요한 것 이상으로 연료를 운반함으로써 초과 소모되는 연료량을 정량화하였다. 1파운드의 중량을 운송하는 데 추가로 소모되는 연료의 양을 파악하고, 도착 시 사용하지 않은 연료와 예측 가능한 비상사태에 대비하여 보수적인 완충 장치 이상의 추가 연료를 운송하는 추가 비용과 추가 온실가스 배출량을 계산하였다[12].

2.2 중량비용(Cost of Weight) 산정

항공기 중량의 변화와 연료 소모의 변화 사이의 관계를 중량비용(Cost of Weight)이라고 한다. 중량비용은 일정 중량을 운송하는 데 소모되는 연료의 양을 말하며, kg/kg 또는 lb/lb 또는 %로 표시한다. 중량비용은 항공기에 중량을 추가하거나 줄이는 것이 전체적인 연료 소모에 미치는 영향을 평가하기 위해 항공업계에서는 널리 사용하고 있다.

항공기에 장착된 장비를 탈거하거나 음용수 탑재량을 줄임으로써 항공기 운항자중을 감소시킨다면 연료 소모를 줄일 수 있다. 추가연료와 같이 필요한 연료량보다 더 많은 양을 탑재하는 경우에는 연료가 많이 소모된다. 실제로 항공기에 추가되는 중량은 항공기 장비뿐 아니라 추가연료에서 비롯되는 것이 더 크다. 이러한 중량 증가 때문에 발생하는 비용을 계산할 때 중량비용을 사용한다.

연료 탱커링의 비용 산정에도 중량비용을 사용한다. 연료 탱커링은 목적지 공항 대비 출발 공항에서의 연료 가격이 저렴할 때 가능한 많은 양의 연료를 탑재하는 방식이다. 단 비행시간이 길어질수록 추가

적인 연료소모가 많이 발생함으로 경제적인 이익은 떨어진다. 중량비용 개념을 이해하고 연료 탱커링의 비용/편익 분석을 수행하여 최적의 탱커링 정책을 수립함이 경제적이다.

무연료중량을 상당히 높게 예측한다면, 필요 이상의 많은 연료량을 탑재하게 되고, 결과적으로 추가 연료 소모가 발생하게 된다. 무연료중량을 정확하게 예측하지 못함에 따른 비용 산정에도 중량비용이 사용된다.

앞선 몇 가지 예에서 보듯 중량비용의 정확한 계산은 연료 과소모를 평가하고 비행계획을 준비함에 중요하다. 단, 중량비용은 항공기 타입, 비행시간과 이륙중량과 같은 여러 변수에 따라 달라지므로 중량비용을 보다 정교한 방법을 사용해서 산정함이 경제적이고 합리적인 의사 결정이 가능해진다[13].

2.2.1 기존 중량비용 산정방법

기존 중량비용은 착륙중량과 시간당 연료소모율의 상관관계에서 산정한다. 착륙중량은 항공기 자체중량, 유상탑재량, 착륙 당시 남은 연료량의 합산이고, 시간당 연료소모율은 이륙에서 착륙까지의 연료소모량을 Flight Time으로 나눈 값이다. ‘연료소모량/비행시간’으로 수치가 높으면 단위 시간 당 연료소모가 많음으로 해석한다[11,14].

국내 항공사, A350-900 기종의 비행편(2019년 1월~2020년 4월; 9.5~12.0의 평균 비행시간; 2,719편)의 선형 회귀분석 결과는 Table 1-3 및 Fig. 2에 표시하였다.

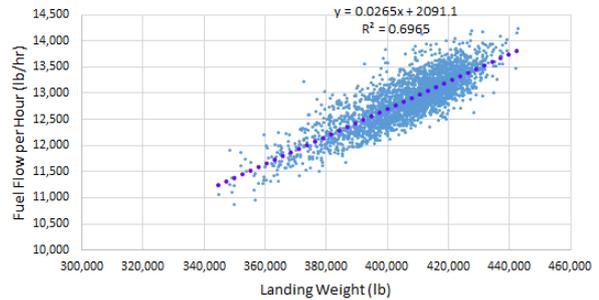


Fig. 2. fuel flow vs. landing weight

Table 1의 모형 요약을 살펴보면 독립변수와 종속변수 간의 상관관계는 0.835로 상당히 높고, 독립변수에 대한 종속변수의 설명력(R Square)은 69.6%이다. Table 2의 분산분석 결과, F값의 유의확률(Sig.)은 0.000으로 0.05보다 상당히 작은 수치로 나타났으므로 모델이 적합하다고 해석한다. Table 3의 분산분석 결과, 상수를 포함한 회귀계수(B)의 t 값은 ±1.96보다 크고, 유의확률(Sig.)은 각각 0.00으로 0.05보다 상당히 작은 수치이다. 상수를 포함한 회귀계수가 적합하다고 해석할 수 있다.

Figure 2에서 X축은 착륙중량(파운드)이고, Y축은 시간당 연료소모율(파운드/시간)이다. 선형회귀의 기울기인 2.65%가 중량계수(Weight Factor)가 된다.

예를 들어 착륙중량 400,000파운드의 시간당 연료소모율은 식 (1)과 같고, 1,000파운드 더 많은 착륙중량 410,000파운드의 시간당 연료소모율은 식 (2)와 같다고 하자.

$$2.65\% \times 400,000 + 2091.1 = 12691.1 \text{ 파운드/시간 (1)}$$

$$2.65\% \times 401,000 + 2091.1 = 12717.6 \text{ 파운드/시간 (2)}$$

식 (1)과 식 (2)의 시간당 연료소모율 차이(12717.6 - 12691.1)인 26.5파운드/시간은 착륙중량 차이(401,000 - 400,000)인 1,000파운드의 2.65%이다. 즉, 착륙중량이 증가하면, 증가한 만큼(1,000파운드)의 2.65%의 연료를 시간당으로 더 소모하게 된다. 여기에 비행시간을 곱하면 추가로 소모하는 연료량이 나오는데 이를 총 중량비용(Total Cost of Weight)이라고 하고 식 (3)과 같이 표시한다.

$$\text{총 중량비용 (Total Cost of Weight)} = \text{증가 중량} \times \text{중량계수(Weight Factor)} \times \text{비행시간 (3)}$$

Table 1. Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.835	0.697	0.696	270.2267	1.214

Table 2. Analysis of Variance

Model	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Regression	4.55E+08	1	4.55E+08	6235.58	.000
Residual	1.98E+08	2717	73022		
Total	6.54E+0.8	2718			

Table 3. Coefficients

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(Constant)	2091.05	136.62		15.306	0.00		
X1	0.0265	0.00	0.835	78.966	0.00	1.00	1.00

1,000파운드의 중량을 추가 탑재하고 10시간을 비행한다고 가정하면 식 (4)와 같이 총 중량비용은 265 파운드이고, 이는 265파운드의 연료가 추가로 소모된다는 의미이다.

$$265\text{파운드} = 1,000\text{파운드} \times 2.65\% \times 10\text{시간} \quad (4)$$

산정방법은 간단하지만 몇 가지의 문제점이 있다. 첫 번째, 선형 추세선의 적합도인 69.6%는 괜찮은 값이지만 통계적으로 높은 편은 아니다. 두 번째, 지금까지의 방법은 착륙중량을 기반으로 한 것이기에 추가연료 탑재와 같이 이륙중량 증가 시의 중량비용을 정확하게 계산할 수 없다. 무연료중량 증가와 동일한 중량의 연료 탑재는 다른 연료소모 효과를 갖는다 [14]. 즉, 무연료중량은 이륙 혹은 착륙 단계에서도 중량 변화가 없기에 일정한 연료소모 효과를 내지만 연료는 이륙 이후 연료소모로 착륙 시의 연료량은 감소함으로 시점에 따라 연료소모 효과에 차이가 난다.

2.2.2 새로운 중량비용 산정방법

앞에서 기술한 문제점을 개선하고자 새로운 접근 방식을 시도한다. 본 연구에서는 Aircraftfit.com에서 제시한 방식에 항공사 운항 실적을 반영, 그 결과를 해석하고 기존 방법과 비교하고자 한다.

식 (5)의 Breguet의 Range Formula는 운항거리가 공기역학적 효율, 추진효율 및 중량과의 관계로 정의한다[14,15].

$$Range = \frac{V}{g \cdot TSFC} \cdot \frac{L}{D} \cdot \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right) \quad (5)$$

- V = speed (속도)
- g = acceleration of gravity (중량가속도)
- TSFC = thrust specific fuel consumption
- ln = natural logarithm (자연로그)
- L/D = lift over drag ration (양항비)
- Wi = initial weight (초기중량)
- Wf = final weight (최종중량)

식 (5)를 RFAC라는 Range Factor를 이용하여 식 (6)과 같이 정리한다.

$$Range = RFAC \times \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right) \quad (6)$$

$$\text{※ RFAC: Range Factor} = \frac{V}{g \cdot TSFC} \cdot \frac{L}{D}$$

식 (6)의 양변을 Constant Speed로 나누면, 식 (7)과 같이 Flight Time Formula가 된다.

$$FlightTime = TFAC \times \ln\left(\frac{W_i}{W_f}\right) \quad (7)$$

$$\text{※ TFAC: Time Factor} = \frac{1}{g \cdot TSFC} \cdot \frac{L}{D}$$

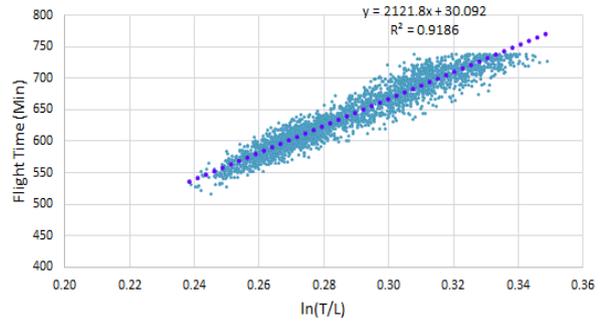


Fig. 3. flight time vs. ln(T/L)

Flight Time과 ln(Wi/Wf)의 상관관계를 이용하여 Flight Time을 ln(Takeoff weight/Landing weight)로 설명되는 모델을 확인한다.

2.2.1의 분석과 동일한 자료인 A350-900 기종의 비행 편(2019년 1월~2020년 4월; 9.5~12.0의 평균 비행 시간; 2,719편) 실적을 이용한 분석 결과는 Table 4~6 및 Fig. 3에 표시하였다.

Table 4의 모형 요약을 살펴보면 독립변수와 종속변수 간의 상관관계는 0.958로 상당히 높고, 독립변수에 대한 종속변수의 설명력(R Square)은 91.9%이다. Table 5의 분산분석 결과, F값의 유의확률(Sig.)은 0.000으로 0.05보다 상당히 작은 수치로 나타났으므로 모델이 적합하다고 해석한다. Table 6의 분산분석 결과, 상수를 포함한 회귀계수(B)의 t 값은 ±1.96보다 크고, 유의확률(Sig.)은 각각 0.00으로 0.05보다 상당히 작은 수치이다. 상수를 포함한 회귀계수가 적합하다고 해석할 수 있다.

Figure 3에서 X축은 이륙중량과 착륙중량의 비율에 자연로그를 취한 값이고, Y축은 비행시간이다. X값과 Y값 사이의 선형관계는 명확하고, 회귀모델은 91.9% 수준으로 상당히 잘 맞는다.

Table 6 혹은 Fig. 3의 회귀모델은 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

Table 4. Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.958	0.919	0.919	14.9109	1.424

Table 5. Analysis of Variance

Model	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Regression	6812921	1	6812921	30642.23	.000
Residual	604091	2717	222		
Total	7417012	2718			

Table 6. Coefficients

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(Constant)	30.09	3.52		8.56	0.00		
X1	2121.81	12.12	0.958	175.05	0.00	1.00	1.00

$$FlightTime = A \cdot \ln\left(\frac{T}{L}\right) + B \tag{8}$$

T = takeoff weight
L = landing weight

ln(T/L)의 회귀계수를 TFAC로 정의하면 식 (9)가 된다.

$$FlightTime = TFAC \cdot \ln\left(\frac{T}{L}\right) + B \tag{9}$$

한편 소모연료(Trip Fuel)는 이륙중량(T)에서 착륙중량(L)을 감한 것으로 식 (10)과 같이 표현 가능하다.

$$TripFuel = T - L \tag{10}$$

식 (10)의 우변을 L로 묶으면 식 (11)과 같이 된다.

$$TripFuel = L\left(\frac{T}{L} - 1\right) \tag{11}$$

식 (9)를 T/L로 풀면 식 (12)와 같고, 식 (11)에 식 (12)를 대입하면 식 (13)이 된다.

$$\frac{T}{L} = e^{\frac{FlightTime - B}{TFAC}} \tag{12}$$

$$TripFuel = L\left(\frac{T}{L} - 1\right) = L\left(e^{\frac{FlightTime - B}{TFAC}} - 1\right) \tag{13}$$

식 (13)을 L로 편미분 하면 식 (14)와 같이 착륙중량 기반의 중량비용을 산정할 수 있게 된다.

$$COW(L)Factor = e^{\frac{FlightTime - B}{TFAC}} - 1 \tag{14}$$

식 (14)에서 COW는 Cost of Weight를 의미한다. Fig. 3의 예측모형, Y=2121.8x+30.092을 이용하여 식 (14)의 TFAC는 2121.8로, B는 30.092로 치환하여 계산한다. 식 (14)를 이용, 착륙중량에 기반을 둔 중량비용은 Fig. 4와 같고, 이를 비행시간 당으로 표시한 것은 Fig. 5와 같다.

착륙중량에 기반을 둔 중량비용 산정과 동일한 방법으로 이륙중량에 기반을 둔 중량비용을 산정한다.

식 (10)의 우변을 T로 묶으면 식 (15)가 된다.

$$TripFuel = T\left(1 - \frac{L}{T}\right) \tag{15}$$

식 (15)에 식 (12)를 대입하면 식 (16)이 된다.

$$TripFuel = T\left(1 - \frac{L}{T}\right) = T\left(1 - e^{-\frac{B - FlightTime}{TFAC}}\right) \tag{16}$$

식 (16)을 T로 편미분 하면 식 (17)과 같이 이륙중량 기반의 중량비용을 산정할 수 있다.

$$COW(T)Factor = 1 - e^{-\frac{B - FlightTime}{TFAC}} \tag{17}$$

Figure 3의 예측모형, Y=2121.8x+30.092을 이용하여 식 (17)의 TFAC는 2121.8로, B는 30.092로 치환하여 계산한다. 식 (17)을 이용, 이륙중량에 기반을 둔 중량비용은 Fig. 6의 점선과 같고, 이를 비행시간 당으로 표시한 것은 Fig. 7의 점선과 같다.

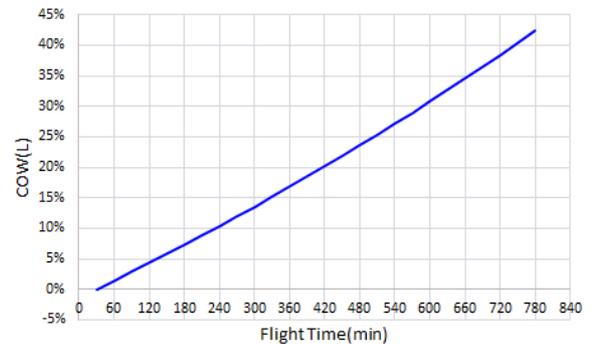


Fig. 4. COW based on landing weight

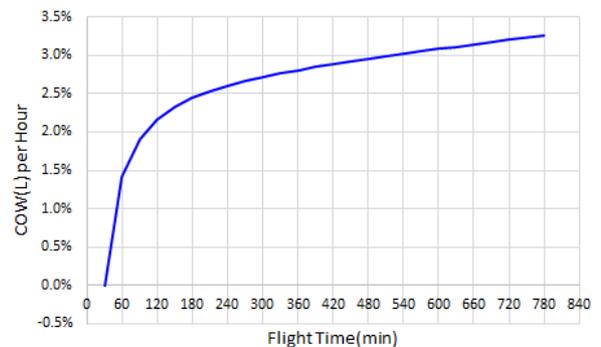


Fig. 5. COW per Hour based on landing weight

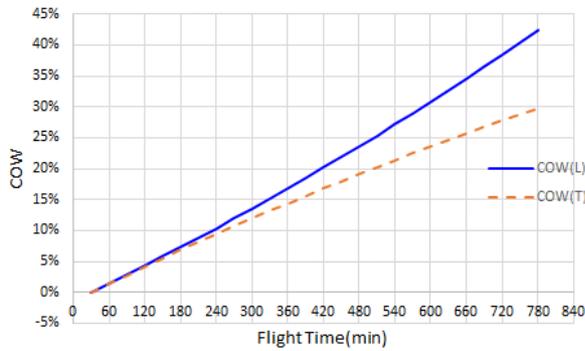


Fig. 6. COW based on takeoff & landing weight

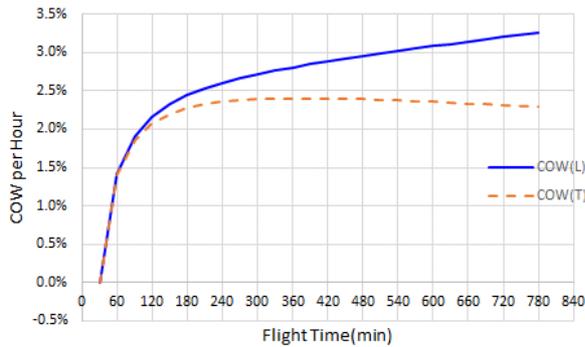


Fig. 7. COW per Hour based on takeoff & landing weight

III. 결 론

Breguet의 Range Formula를 이용한 새로운 중량 비용 산정방법은 기존 방법(착륙중량과 시간당 연료 소모율의 상관관계 이용)의 문제점을 해결할 수 있다. 첫 번째, 선행 추세선의 적합도를 90% 수준으로 높임으로써 예측의 신뢰도가 한층 높아졌다. 두 번째, 비행시간에 따라 동일한 중량계수가 아니라 다른 중량계수 적용으로 상황별로 더욱 정확한 중량비용 산정이 가능하다. 즉, 기존 방법에서는 비행시간에 무관하게 중량계수가 2.65%로 같지만, 새로운 방법에서는 Table 7에서와 같이 비행시간에 따라 중량계수가 1.4~3.3% (착륙중량 기반) 및 1.4~2.4% (이륙중량 기반)의 범위를 제공하고 있다. 세 번째로, 착륙중량 기반과 이륙중량 기반의 중량비용 산정을 통해 추가 중량항목 별로 최적의 중량비용을 파악하게 되었다. Table 7은 식 (14)와 식 (17)을 이용하여 산정한 것으로 Figs. 4~7의 그래프의 값들과 동일하다.

본 논문에서는 A350 통계실적을 이용하여 Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 얻었다. Fig. 6에서 보듯 비행시간이 증가할수록 중량비용은 증가하며, 이륙중량 기반 대비 착륙중량 기반 중량비용의 증가량이 더 크다.

Figure 7의 실선을 보면 착륙중량에 기반을 둔 중

Table 7. Summary: Cost of Weight

Flight Time (min.)	COW(L)		COW(T)	
	Cost of Weight (%)	Weight Factor (%)	Cost of Weight (%)	Weight Factor (%)
60	1.4	1.4	1.4	1.4
120	4.3	2.2	4.1	2.1
180	7.3	2.4	6.8	2.3
240	10.4	2.6	9.4	2.4
300	13.6	2.7	11.9	2.4
360	16.8	2.8	14.4	2.4
420	20.2	2.9	16.8	2.4
480	23.6	3.0	19.1	2.4
540	27.2	3.0	21.4	2.4
600	30.8	3.1	23.6	2.4
660	34.6	3.1	25.7	2.3
720	38.4	3.2	27.8	2.3
780	42.4	3.3	29.8	2.3

량계수는 비행시간이 늘어남에 따라 전반적으로 증가 경향을 보인다. 착륙중량의 증가는 추가중량을 수송하기 위해 더 많은 추가연료가 소요되므로 장거리 비행에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 예를 들어 1,000파운드의 예비품을 추가로 탑재 시 착륙중량이 1,000파운드 늘어난 것이다. 예비품 1,000파운드의 추가중량을 수송하기 위해 연료가 추가로 소모되고, 이는 장거리 비행에 더 많은 양의 연료가 추가로 소모됨에 기인한다.

Figure 7의 점선을 보면 이륙중량에 기반을 둔 중량계수는 착륙중량에 기반을 둔 중량계수와 다른 패턴을 보인다. 비행시간이 늘어날수록 중량계수는 전반적으로 감소 경향이다. 이륙중량의 증가는 추가중량을 수송하기 위해 약간의 연료가 추가로 소모되면서 그 차이가 천천히 감소하면서 영향이 줄어들기 때문이다. 예를 들어 1,000파운드의 연료를 추가로 탑재 시 이륙중량이 1,000파운드 늘어난 것이다. 연료 1,000파운드의 추가된 중량을 수송하기 위해 연료가 추가로 소모되고, 비행을 계속할수록 이륙단계에서 추가된 연료량은 줄어들어 기인한다.

중량계수를 계산하는 새로운 방법은 통계적으로 더 강력하며, 세부적으로 이륙중량 기반과 착륙중량 기반 중량계수를 다른 용도로 사용할 수 있어 합리적이다. 이륙중량 기반 중량계수는 추가연료 탑재에 따른 추가 비용 확인 혹은 연료 탱커링 실시 여부 결정 등에 사용하고, 착륙중량 기반 중량계수는 무연

료중량에 변화가 있는 경우에 한해 중량비용 산정에 사용한다. 이에는 유상탑재량, 음용수, 서비스 용품, 항공기 장비, 정비 예비품 등이 해당된다. 더 나아가 착륙중량 기반의 중량비용과 중량계수는 유사 항공기 개념설계 단계에서 요소중량 추정 및 비용과 중량 최적화에 하나의 경험식으로 활용할 수 있다.

References

- 1) Park, I. K., "Weight & Cost Estimation of General Aviation Aircraft on the Conceptual Design Phase," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2007, pp. 369~373.
- 2) Bai, C., Mingqiang, L., Zhong, S., Zhe, W., Yiming, M. and Lei, F., "Wing weight estimation considering constraints of structural strength and stiffness in aircraft conceptual design," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 15, No. 4, 2014, pp. 383~395.
- 3) Woo, J. M., "Software Development for Aircraft Weight Estimation," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2013, pp. 214~217.
- 4) Kim, S. B., Jeong, H. G. and Hwang, H. Y., "A Study on Deriving the Statistical Weight Estimation Formula for an Aircraft Wing," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 1, 2018, pp. 32~40.
- 5) Kaufmann, M., "Cost/Weight Optimization of Aircraft Structures", Licentiate Thesis, KTH School of Engineering Sciences, Stockholm, February 2008.
- 6) 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*, Vol. 18, No. 5, 2020, pp. 3~16.
- 7) Jang, S. W., Lee, Y. J., Kim, K. Wo., 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 and Space Sciences*, Vol. 49, No. 4, 2021, pp. 273~279.
- 8) Jang, S. W., Cho, Y. H., Yoo, J. L. and Yoo, K. E., "PIP Application Effect Analysis (A350 Case)," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 29, No. 3, 2021, pp. 44~51.
- 9) Tsai, W. H., Chang, Y. C., Lin, S. J., Chen, H. C. and Chu, P. Y., "A green approach to the weight reduction of aircraft cabins," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 40, August 2014, pp. 65~77.
- 10) Lee, J. O., Jeon, J. H. and Park, J. M., "A Study on Fuel Saving Measure by Fuel Efficiency Analysis Associated with Weight," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 26, No. 4, 2018, pp. 142~148.
- 11) Yoo, S. H., Yoo, K. E., Choi, S. H. and Chang, H. S., "A Study on Reducing Aircraft Fuel Consumption by Reserve Fuel Reduction - A Case Study by Statistical Analysis," *Journal of the Aviation Management Society of Korea*, Vol. 15, No. 3, June 2017, pp. 67~95.
- 12) Ryerson, M. S., Hansen, M., Hao, L. and Seelhorst, M., "Landing on empty: estimating the benefits from reducing fuel uplift in US Civil Aviation," *Environmental Research Letters*, Vol. 10, No. 9, August 2015, pp. 1~11.
- 13) Openairlines.com, "How to use the cost of weight to be more fuel efficient?," February 2019. <https://blog.openairlines.com/how-to-use-the-cost-of-weight-to-be-more-fuel-efficient>. Accessed August 6, 2021.
- 14) Aircraftit.com, "A New Approach to Cost of Weight (COW)", 2012, <https://www.aircraftit.com/articles/a-new-approach-to-cost-of-weight-cow/>. Accessed August 6, 2021.
- 15) Aerospaceengineeringblog.com, "Breguet Range Equation," 2013, <https://aerospaceengineeringblog.com/breguet-range-equation/>. Accessed August 9, 2021.