



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(4), 273-279(2021)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.4.273>

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

## A321 Sharklet 모델의 운항실적을 이용한 윙렛 장착 효과 검증 및 경제성 분석

장성우<sup>1</sup>, 이영재<sup>2</sup>, 김강욱<sup>3</sup>, 유재림<sup>4</sup>, 유광의<sup>5</sup>

## Verification of Winglet Effect and Economic Analysis Using Actual Flight of A321 Sharklet Model

Sungwoo Jang<sup>1</sup>, Youngjae Lee<sup>2</sup>, Kangwook Kim<sup>3</sup>, Jae Leame Yoo<sup>4</sup> and Kwang Eui Yoo<sup>5</sup>

Flight Operations Engineering, Asiana Airlines

### ABSTRACT

Winglets are specialized wingtip devices to reduce induced drag, and they have been installed on Boeing-made aircraft since the 1980s, Airbus has also developed a winglet named 'Sharklet' since 2009 and has started providing them as an option to the A320 Family. The winglet has the effect of improving take-off performance, reducing fuel consumption, increasing payload, and increasing flight distance by reducing the induced drag generated at the tip of the wing. The purpose of this study is to analyze the actual flight data of the sharklet-installed and non-sharklet-installed models of the A321 aircraft to verify the fuel efficiency improvement due to the winglet installation, and to analyze the economic analysis accordingly. Through this, it can be used to determine the winglet installation when introducing an aircraft or to make a decision for upgrading the existing aircraft. To this end, a case study on the aerodynamic characteristics and effects of the winglet installation was conducted, and the economic analysis was verified.

### 초 록

윙렛은 유도항력을 줄이기 위한 장비로, 1980년대부터 보잉사에서 제작한 항공기에 장착되기 시작했고, 에어버스에서는 2009년부터 'Sharklet'이라는 이름의 윙렛을 개발하여 A320 Family에 장착 옵션으로 제공하기 시작했다. 윙렛은 날개 끝단에서 발생하는 유도항력을 감소시켜 이륙성능 향상, 연료소모량 감소, 유상탑재량 증대 및 운항거리 증가의 효과를 내고 있다. 본 연구는 Sharklet이 장착된 A321 항공기와 미장착된 A321 항공기의 실제 운항 데이터를 분석하여 윙렛 장착에 따른 연료 효율성 향상을 검증하고 이에 따른 경제성 분석을 목적으로 한다. 이를 통해 항공기 도입 시 윙렛 장착 사양 결정 혹은 기존 항공기의 업그레이드를 위한 의사 결정에 활용할 수 있다. 이를 위해 윙렛 장착에 따른 공력 특성 연구 사례조사와 효과 확인 연구를 수행하고 경제성을 검증하였다.

**Keywords :** A321, Sharklet(샤크렛), Winglet(윙렛), Fuel Consumption(연료소모량), Fuel Efficiency Index(연료효율성 지수), Fuel Efficiency Model(연료효율성 모델), Economic Analysis(경제성 분석)

† Received : October 21, 2020    Revised : February 17, 2021    Accepted : February 23, 2021

<sup>1</sup> Doctor of Science, <sup>2,3</sup> Graduate Student, <sup>4,5</sup> Professor

<sup>5</sup> Corresponding author, E-mail : keyoo@kau.ac.kr

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

## I. 서 론

윙렛은 유도항력(Induced Drag)을 줄이기 위한 구조물로, 1980년대부터 보잉사에서 제작한 항공기에 장착되었고, 에어버스에서는 2009년부터 'Sharklet'이라는 이름으로 윙렛을 개발하여 A320 Family를 위한 신규 장착 또는 개량 선택 사양 옵션으로 제공하고 있다. 윙렛은 날개 끝단에서 발생하는 유도항력을 감소시켜 이륙성능 향상, 연료소모량 감소, 유상탑재량 증대 및 운항거리 증가의 효과를 내고 있다. 윙렛 장착 및 날개 보강을 하므로 무게가 증가하지만, 각 항공사와 제작사는 유도항력 감소에 따른 효과를 더 크게 보고 장착하는 것을 더 선호하고 있다.

윙렛이 장착된 항공기를 운영하는 것과 미장착 항공기 운영하는 것의 연료 소모율을 비교하고 이를 토대로 경제성을 분석 및 평가하여 항공사의 경영 의사 결정에 활용할 수 있다.

본 연구는 Sharklet 장착 A321과 Sharklet 미장착 A321의 실제 운항 데이터를 분석하여 Sharklet 장착에 따른 연료효율성 향상을 검증하고 이를 토대로 경제성을 분석하였다. 비교한 두 항공기 집단은 Sharklet 장착 여부만 다르고, 엔진과 동체 등 다른 제원은 같다. 또한, 윙렛 장착에 따른 공력 특성 연구와 효과 확인 연구 등을 살펴보고 두 항공기 집단의 경제성을 비교, 검증하고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1 윙렛 기본 자료 확인

#### 2.1.1 윙렛과 Sharklet 개발

윙렛은 1970년대에 NASA 엔지니어인 Richard Whitcomb이 개발한 공기역학적으로 효율적인 날개 구조물이다. 이 윙렛은 유도항력을 20% 줄이고 전체 항공기의 양항비율을 6~9% 개선할 것으로 예측되었다. 이 윙렛은 1988년에 최초로 보잉 B747-400에 적용되었다. 1993년에 Aviation Partners Inc.는 Gulfstream II 성능향상 프로그램에 Blended Winglet 기술을 적용하였다. 보잉은 Aviation Partners와 협조하여 737NG(Next Generation) 항공기에 옵션 사양으로 이 윙렛을 적용하였고, 이어서 Classic 737, 757 및 767 모델에 Retrofit 옵션으로 이 기술을 반영하였다[1].

한편 에어버스는 A320 Family에 적용할 새로운 윙팁 디자인을 2009년 11월에 선보였고, 2012년 말 항공사에 납품할 A320 Family 비행체에 적용하여 납품하였다. 2.5m 높이의 새롭게 적용한 윙렛은 항공기의 기존의 윙팁 펜스(Wingtip Fence)를 대체한 것으로, 3,000 NM의 장거리 노선을 기준으로 연료 소모를 최대 3.5%까지 줄였다[1]. 에어버스는 이 윙렛에

'Sharklet'이라는 이름을 사용하여 마케팅하였다. 사실상 Sharklet과 Winglet의 차이는 없으며 이름만 다르다고 할 수 있다. 이 두 윙렛의 목적은 항력을 줄임으로써 3.5~7%의 연료 소모를 줄이는 것이다. 윙렛을 장착한 항공기의 운용에 있어 가장 효율적인 방법은 중·장거리 비행에서 순항 속도를 오래 유지하여 윙렛으로 인해 증가한 무게를 보상하는 것이다[2].

#### 2.1.2 윙렛 장착에 따른 공력 특성 연구

각종 연구를 통해 윙렛은 유도항력을 감소시키는 등 공력 특성에 큰 영향을 가져온다는 것을 확인하였다. 천음속에서 윙렛을 가진 날개는 양항비에 있어 윙렛을 가지지 않은 날개보다 공력 특성이 더 좋은 것으로 나타났다[3].

한편 2007년에 소형제트기의 윙렛 특성을 분석한 결과, 기존 비 윙렛 특성보다 순항 시 양력이 크고, 상승 또는 착륙 시에 양항비의 증가 효과와 이에 따른 성능의 향상을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 즉 유도항력 감소와 양력증가를 동반한 양항비 증가가 관찰되었으며, 적절하게 설계된 윙렛은 소형제트기의 순항성능을 향상한다는 결과를 얻었다[4]. 또한, 윙렛의 붙임각에 따른 공력 특성을 연구한 결과, 윙렛은 날개 끝 와류의 완화를 통하여 유도항력 감소에 효과적인 것으로 나타났다[5]. 그리고 윙렛 최적화 과정의 초기연구를 통해 윙렛이 부착된 날개는 일정 받음각 이상에서 양력계수가 증가하고 유도항력이 감소하여 공력성능이 향상된다는 사실을 알게 되었다[6].

마지막으로 2013년에는 95인승급 중형항공기에 대해 전산해석을 통해서 순항 거리가 증가할수록 윙렛으로 인한 연료 절감 효과가 더욱 증가할 것으로 예상하였으며[7], 윙렛의 와류 수와 와류 분포를 변경하고, 이를 기본 날개의 공기역학적 특성과 연관지어 유도항력을 감소시키는 세 가지 다른 윙렛 설계에 관한 비교 연구를 제시하기도 하였다[8].

#### 2.1.3 윙렛 장착에 따른 효과 확인 연구

윙렛이 장착된 날개의 항력과 구조적 중량에 대하여 어떠한 영향이 있는지 연구를 한 사례가 있다. 이 연구를 통해 항공기의 최대이륙중량, 연료 중량 및 직접 운영 비용의 세 가지 성능 수치를 장기간에 걸쳐 추적해본 결과, 윙렛을 장착한 B747 항공기의 경우 15년 동안 약 3.8%의 연료 절감과 약 29M \$의 비용 절감이 된 것으로 분석되었다[9]. 또한, 2016년 Thomas Budd는 윙렛이 장착된 차세대 항공기가 기존 항공기보다 연료 소모 및 이산화탄소 배출에 대한 측면에 있어 이점을 제공할 가능성이 크다고 보았다[10].

2017년, 에너지 효율성을 개선하기 위한 목적으로 항공기의 구조를 개선하면 연료 소모를 줄임으로써 온실가스배출량을 크게 줄일 수 있는 것으로 확인되었고, 이는 윙렛의 적용으로 개선될 수 있다고 하였다[11]. 또 2010~2014년 동안 스페인에서의 실적 자료를

확인해 본 결과, 윙렛 장착을 통해 상당량의 CO<sub>2</sub> 등 가 배출량이 감소한 것으로 확인되었다[11]. 항공기의 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄이기 위해 항공사는 연료 효율이 높은 항공기를 구매하거나, 기존 항공기에 윙렛과 같은 구조물을 적용할 수 있다. 두 개의 주요 유럽 항공사의 사례를 분석해본 결과, 개조가 단기간의 배출 목표 달성에 상당한 공헌을 할 수 있는 것으로 나타났다. 단, 기존 투자 예산 제약과 개조 가능한 항공기 제한으로 실제적인 효과는 제한적인 것으로 나타났다[12].

에어버스에 따르면 기존 A320과 비교하였을 때, Sharklet이 장착된 A320의 경우 3,000 NM 이상의 구간에서는 3.5%의 연료 절감 효과가 있다고 하였다. 또한, 연료 가격이 더 상승할 경우 Sharklet 장착 A320에 한하여 약 2년 반 또는 그보다 빨리 투자비 회수가 가능한 것으로 추정하였다. Sharklet이 적용되었을 경우, 약 500kg의 유상탑재량이 증가하거나 동일한 유상탑재량에서 추가로 100 NM을 더 운항이 가능한 것으로 나타났다. 또한, 장애물이 제한되어 이륙중량이 제한된 활주로에서 이륙 중량을 높일 수 있다. 이륙능력이 제한되지 않으면 평균 이륙추력 감소 효과를 얻을 수 있으며, 이는 엔진 정비 비용을 약 2% 절감할 수 있다[1].

윙렛은 항력을 감소시켜서 연료 소모를 감소시킨다. 항공기가 비행할 때 날개는 기압의 차이를 만드는데, 날개 위의 공기압은 날개 아래의 공기압보다 낮아 양력을 생성한다. 그러나 날개 끝단으로 갈수록 서로 다른 두 압력의 영역이 만나게 되고, 이 합류는 나선형 소용돌이(Wingtip Vortex)를 만든다. 소용돌이가 클수록 더 많은 항력이 생기고 이는 항공기 속도를 느리게 한다. 비행기가 감속함에 따라 엔진은 속도를 유지하기 위해 더 많은 연료를 소모해야 하므로 운항에 더 큰 비용이 들게 된다. 항공사와 항공기 제작사는 이러한 날개 끝단의 소용돌이의 크기를 줄이기 위해 윙렛에 관한 연구를 활발히 진행하였다. 그 결과 이러한 윙렛은 소용돌이의 크기를 줄일 수 있고, 이에 난류 직경이 상당히 좁아지게 하는 것을 알게 되었다. 미국도 보잉과 같은 항공기 제작사는 NASA와 협력하여 항력을 줄이고 연료를 더 오래 사용할 수 있는 방법을 연구하였다[13].

ICAO의 2013 Environmental Report에서는 항공기 연관 기술개발의 하나로 기존 항공기에 윙렛을 장착함으로써 날개의 Aspect Ratio를 증가시켜 항력 감소 및 성능향상이 가능하다고 하였다[14].

탄소 등 배기가스 배출에 관한 국제 항공 규정이 더욱 엄격해지고 있다. 이에 따라 더욱 새로운 윙렛의 개발이 진행되고 있으며, 대표적인 것이 'Camber Morphing' 윙렛이다. 이 윙렛은 중형 비즈니스 제트기에 적용되고 있으며, 최적화된 고정 윙렛과 비교할 때 더 크게 연료 소모를 개선할 수 있음을 보여주었다[15].

## 2.2 연료효율성 산정을 위한 비행 실적분석

A321 CEO (Current Engine Options) 항공기 중 Sharklet이 장착된 기종과 Sharklet이 없는 기종의 비행실적을 이용하여 두 모델간의 연료효율성을 비교하였다. 비교 분석에 사용한 연료효율성 지수의 산출방법과 운항실적 자료, 통계분석 방법을 소개하면 다음과 같다.

### 2.2.1 연료효율성 지수의 산출방법

비교 분석을 위한 연료효율성 지수로는 'RTK (Revenue Ton-Km)당 연료소모량'과 유사한 'Payload Ton-Km 당 연료소모량'을 사용하였다. 지수의 분모에 해당하는 것은 유상탑재량과 운항거리이다. 유상탑재량으로 승객 중량뿐 아니라 Lower Deck에 탑재되는 Checked Baggage와 화물 중량을 모두 반영하였고, 운항거리는 GCD (Great Circle Distance) 대신 실제 비행거리를 적용하였는데, 상층품의 정/배품 성분을 반영하여 항공기가 비행한 실제 거리를 기준하였다. 또한, 지수의 분자에 해당되는 연료소모량은 지상활주나 지상에서 소모한 연료를 제외한 순수 비행 단계인 상승, 순항, 하강 단계에서 소모한 연료량으로 한정하였다.

연료효율성 지수(Fuel Efficiency Index)는 원단위(Basic Unit) 개념으로, 지수가 크다면 단위 당 연료소모량이 많다는 의미로 연료효율성이 저하된 상태를 나타낸다. 반면, 연료효율성 지수가 작아지면 단위 당 연료소모량이 작은 것으로 연료효율성이 높음으로 해석할 수 있다[16].

### 2.2.2 운항실적 자료

항공사 연료 관리 시스템(Fuel Management & Information System)의 운항실적 자료로 분석 기간은 2015년 1월부터 2020년 4월까지의 국제선 자료를 이용하였다. A321 기종 중 Sharklet 미장착 기종 7대의 18,024개의 실적, Sharklet 장착 기종 6대의 15,956개의 실적으로 통계분석 하였다. 통계분석은 SPSS Statistics 25.0을 사용하였다.

## 2.3 연료효율성 비교

### 2.3.1 운항실적 자료 확인

회귀분석 모델 수립 전, Sharklet 장착 기종과 미장착 기종의 운항실적이 다름을 확인하고자 한다. 종속변수인 INDEX (연료효율성 지수)에 대한 T-검정 결과는 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 2의 Levene의 등분산 검정에서 F값 유의확률은 0.000으로 0.05보다 현저히 작아 등분산이 가정되지 않는다. '등분산을 가정하지 않음'의 t 값은 33.6으로 ±1.96보다 크고, 해당 유의확률(양측)은 0.000으로 0.05보다 상당히 작은 수치이다. 통계적 유의수준 아래에서 두 집단 간 INDEX 평균은 같지 않다. 즉, 두 집단 간 운항실적 자료는 다르기에 우월성을 비교할 수 있다.

Table 1. Collective Statistics

	Sharklet	N	Average	Standard deviation	Standard error
Index	Without	18024	0.663	0.121	0.001
	With	15956	0.620	0.113	0.001

Table 2. Independent Sample Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means				
Index	Equal variances assumed	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference
				77.982	0.000	33.4	33978	0.000
	Equal variances not assumed			33.6	33887	0.000	0.043	0.001

Table 1의 집단통계량에서 두 집단 Index의 평균을 보면, 0.663과 0.620으로 Sharklet 장착 기번의 평균이 낮다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 Index는 통계적 유의수준 아래에서 Sharklet 장착 기번이 Sharklet 미장착 기번보다 작다고 할 수 있기에 연료 효율성은 상대적으로 우수하다고 해석할 수 있다.

2.3.2 통계분석

Sharklet 미장착 기번을 '0'으로, Sharklet 장착 기번을 '1'로 대체한 Dummy 변수(분류 변수)를 포함하여 다중 회귀분석을 수행하였다. 종속변수는 Index(연료 효율성 지수)이고, 독립변수는 분류변수와 유상탑재량, 연비변화량, 외기온도, 운항거리이다.

Table 3의 모형 요약을 살펴보면, 독립변수와 종속변수 간의 상관관계는 0.946으로 상당히 높고, 독립변수에 대한 종속변수의 설명력(R Square)은 89.5%이다. Durbin-Watson은 1.701인데, 수치가 2에 가깝고 0 혹은 4에 가깝지 않기에 잔차(Residual) 간 상관관계가 없어 회귀모델이 적합하다고 해석 가능하다.

Table 4의 분산분석 결과, F값의 유의확률(Significance Probability, Sig.)은 0.000으로 0.05보다 상당히 작은 수치로 나타났으므로 연료효율성 모델이 적합하다고 해석한다.

Table 5의 분산분석 결과, 상수를 포함한 각 회귀계수(B)의 t 값은 ±1.96보다 크고, 유의확률은 각각 0.000으로 0.05보다 상당히 작은 수치이다. 상수를 포함한 각 회귀계수가 적합하다고 해석할 수 있다.

Table 3. Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	.946	0.895	0.895	0.039	1.701

Table 4. Analysis of Variance

Model	Sum of Squares	Df	Mean Square	F	Sig.
Regression	431.61	5	86.32	58137.75	.000
Residual	50.44	33974	0.001		
Total	482.06	33979			

Table 5. Coefficients

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(Constant)	1.400	0.002		601.80	0.00		
Dummy	-0.022	0.000	-0.09	-43.60	0.00	0.71	1.41
PLD	-0.050	0.000	-0.93	-524.97	0.00	0.98	1.02
APM	0.007	0.000	0.07	34.72	0.00	0.71	1.42
OAT	0.001	0.000	0.06	33.03	0.00	0.97	1.03
DIST	-0.016	0.000	-0.11	-63.53	0.00	0.94	1.06

공차한계(Tolerance) 값이 0.1 이하이거나 분산팽창요인(VIF; Variance Inflation Factor) 값이 10 미만일 경우에 다중공선성(multicollinearity)에 문제가 있다고 하지만, 분석 결과가 이에 해당하지 않으므로 다중공선성에는 문제가 없다고 해석한다.

Sharklet 장착/미장착 구분변수인 Dummy 변수에 대해서 정리한다면, Sharklet 장착 기번은 -0.022만큼 연료효율성 지수에 영향을 준다는 것이고, 이는 그만큼 연료효율성이 좋아진다는 것이다. INDEX라는 종속변수에 부(-)의 영향을 나타내는 독립변수는 Dummy 변수(구분변수) 외, PLD(유상탑재량), DIST(운항거리)가 있고, APM(연비변화량)과 OAT(외기온도)는 정(+)의 영향을 주고 있다. 즉, 유상탑재량이 많아질수록, 운항거리가 길어질수록 연료효율성은 좋아지고, 연비변화량이 클수록, 외기온도가 클수록 연료효율성은 저하된다는 것이다.

표준화계수를 이용해 다른 단위를 보정해주면, PLD(유상탑재량) 영향이 우세하고, 나머지 변수는 거의 유사한 수준임을 알 수 있다.

2.3.3 연료효율성 모델

Table 5의 자료를 반영하여 연료효율성 모델을 Table 6에 표시하였다. 종속변수는 연료효율성 지수이고, Dummy 변수(구분변수) 포함한 다섯 개의 독립변수가 있는 다중회귀분석 모델이다.

수립한 연료효율성 모델을 이용하여, Dummy 변수(구분변수)에 따른 연료효율성 지수를 Table 7과 같이 예측하였다. 기타 변수는 평균실적을 동일하게 적용하였고, PLD(유상탑재량)를 실적 범위인 8, 10, 12, 14, 16톤으로 한정하였다. 기타 변수의 평균실적 관련, 연비변화량은 2.8, 외기온도는 -37°C, 운항거리는 2.7천 km이다.

**Table 6. Fuel Efficiency Prediction Model**

Fuel Efficiency Prediction Model	R Square
Fuel Efficiency Index = $-0.022X1 - 0.0050X2 + 0.007X3 + 0.001X4 - 0.016X5 + 1.400$	0.895

Dependent variable: Fuel efficiency index  
 Independent variable (X1): Dummy variable; 0 (Without), 1 (With)  
 Independent variable (X2): Payload(ton)  
 Independent variable (X3): Fuel mileage (APM Value)  
 Independent variable (X4): Outside air temperature (°C)  
 Independent variable (X5): Flight distance (1,000km)

**Table 7. Fuel Efficiency Index**

Payload (ton)	Without Sharklet	With Sharklet	Improvement Rate
	Fuel Efficiency Index		
8	0.926	0.905	2.3%
10	0.826	0.804	2.6%
12	0.726	0.704	3.0%
14	0.625	0.604	3.5%
16	0.525	0.504	4.1%

Fuel Efficiency Index: Fuel Consumption per Ton·Km  
 Improvement Rate: (Fuel Efficiency Index of With Sharklet - Fuel Efficiency Index of Without Sharklet) / (Fuel Efficiency Index of Without Sharklet)

PLD(유상탑재량)에 따라 다르지만, Sharklet 장착 기번의 연료효율성 지수가 미장착 기번의 지수 대비 낮으며, 이는 연료효율성이 좋다는 것을 의미한다. 향상률은 2.3~4.1%로 제작사 자료와 유사하다.

**2.4 경제성 분석**

Sharklet 장착이 미장착 대비 연료효율성이 우월함을 통계적 분석을 통해 확인하였다. 전통적인 재무적 비교 기법을 적용, 항공사가 항공기 도입 시 Sharklet 장착 사양 결정 혹은 기존 항공기에 Retrofit 투자 관련 경제성 평가를 수행해 보았다. 즉, Sharklet 구매 가격을 투자비용으로, Sharklet 장착에 따른 연료효율성 향상 때문에 절감할 수 있는 연료비용을 투자수익으로 간주하여 순현재가법으로 평가해 보았다.

순현재가(NPV; Net Present Value)는 식 (1)과 같으며, NPV가 양수이면 투자가치가 있다고 평가한다[17].

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CI_t}{(1+R)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{CO_t}{(1+R)^t} \tag{1}$$

CI<sub>t</sub>: t 기간의 현금유입  
 CO<sub>t</sub>: t 기간의 현금유출

**2.4.1 투자 비용(Cost: CO<sub>0</sub>)**

Sharklet 구매가격을 투자비용으로 간주하여 식 (1)

**Table 8. Cost of Purchase [1]**

-	Without Sharklet	With Sharklet	CO <sub>0</sub> (Without-With)
Cost of Purchase	\$ 0.0	\$ 950,000	-\$ 950,000

의 현금유출 항목의 값인 초기비용 (CO<sub>0</sub>: t 기간의 현금유출, t=0)으로 가정하였다. 단, 구매가격은 항공기 제작사 혹은 항공기 임대사와 항공사의 계약 조건 등에 따라 차이가 있어 일반화하기 어렵다(2014년 기준, Engineering, Service Bulletin, Technical & Operational Manuals Update 포함한 Sharklet의 구매가격은 항공기 대당 \$750,000이었음). 구매가격 외 연간 발생 비용(Annual Cost)은 없는 것으로 가정하였고, Sharklet 구매가격은 Table 8과 같이 산정하였다.

**2.4.2 투자 수익(Benefit: CI<sub>t</sub>)**

수립한 연료효율성 모델을 이용하여 두 집단의 연료소모량 차이를 산정하니 Sharklet 장착 기번이 700 파운드 적게 소모됨을 확인하였다(유상탑재량: 12톤, 운항거리: 2,700km 반영). 이를 연간으로 환산하여 연간 절감 금액을 Table 9와 같이 산정하였고, 이를 투자수익으로 간주한다.

**2.4.3 순현재가(Net Present Value)**

연료 절감 금액으로 Sharklet 구매가격을 상쇄할 단순 Payback Years는 4.2년이다. Table 10은 항공유 가격, 항공기 사용기간, 연간 이자율을 합리적 가정한 순현재가(Net Present Value)이다(항공유가격: 갤런당 \$2, 항공기 사용기간: 20년, 연간 이자율: 5% 반영). NPV가 양수이기에, Sharklet 옵션 선택 혹은 Retrofit 장착의 경제성은 있다고 평가할 수 있다.

**Table 9. Benefit of Fuel Saving**

Fuel Saving per Flight (pound)	700	
Annual Number of Flights	1,095	
Annual Fuel Savings	in pound	766,500
	in gallon	114,403
Fuel Price per gallon	\$ 2.0	
Annual Savings	\$ 228,806	

**Table 10. Net Present Value**

Initial Cost	-\$ 950,000
Annual Savings	\$ 228,806
Aircraft Usage Period	20 years
Annual Interest Rate	5%
Net Present Value	\$ 1,901,428

Net Present Value,  
 1,901,428 = -950,000 + 228,806 X Uniform Series, Present Worth Factor  
 \* Uniform Series, Present Worth Factor = (P/A, 5%, 20 years) = 12.46221

Table 11. NPV Sensitivity to Fuel Price

Fuel Price (\$/Gallon)	Net Present Value (\$)
2.75	2,970,714
2.50	2,614,285
2.25	2,257,857
2.00	1,901,428
1.75	1,545,000
1.50	1,188,571

Net Present Value Sensitivity to Fuel Price

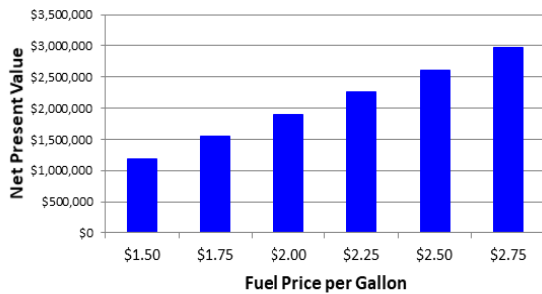


Fig. 1. NPV Sensitivity to Fuel Price

2.4.4 민감도 분석(Sensitivity Analysis)

경제성 분석의 변수인 항공유 가격, 항공기 사용기간, 연간 이자율은 여러 조건에 따른 변동성이 크다. 본 연구에서는 항공유 가격, 연간 이자율 및 항공기 사용기간의 민감도 분석을 통해 프로젝트 경제성의 변동성 있음을 확인해 본다.

항공유 가격에 따른 순현재가 변동은 Table 11, Fig. 1과 같다. 연간이자율 5% 가정 시, 항공유 가격이 갤런당 \$1.50을 초과하여 유지된다면, 동 프로젝트는 경제성 있음이다.

항공유 가격과 연간이자율의 변화 반영한 순현재가 변동은 Table 12, Fig. 2에 나타내었다. 항공유 가격이 커질수록, 연간 이자율이 작아질수록 순현재가는 커진다.

항공기 사용기간의 민감도 분석 결과는 사용기간이 길어질수록 순현재가는 커지게 된다.

Table 12. NPV Sensitivity to Fuel Price and Annual Interest Rate

Annual Interest Rate	Fuel Price (\$/Gallon)						
	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.5	2.75
3%	1.2	1.6	2.0	2.5	2.9	3.3	3.7
4%	1.0	1.4	1.8	2.2	2.5	2.9	3.3
5%	0.8	1.2	1.5	1.9	2.3	2.6	3.0
6%	0.7	1.0	1.3	1.7	2.0	2.3	2.7
7%	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4

(NPV Unit: \$ Million)

Net Present Value Sensitivity to Fuel Price & Annual Interest Rate

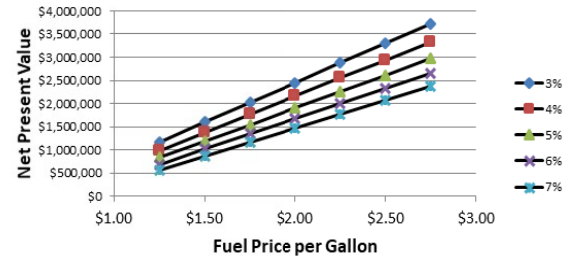


Fig. 2. NPV Sensitivity to Fuel Price and Annual Interest Rate

III. 결 론

에어버스는 Sharklet 장착 항공기는 날개 끝단 유도항력의 감소 효과로 3.5%의 연료 절감 효과가 있다고 하였다. 이 효과가 정확한지 실제 운항실적 자료를 이용해 검증하기 위해 연료효율성 지수를 활용한 연료효율성 예측모델을 수립하였다.

종속변수는 연료효율성 지수이고, 독립변수는 Dummy 변수(분류변수)와 유상탑재량, 연비 변화량, 외기온도, 운항거리인 모델이다. 회귀분석 모델 수립 전, Sharklet 장착 기변과 미장착 기변의 운항실적이 상이함을 확인하기 위해 T-검정을 시행하였다. 그리고 그 결과가 달라서 이어서 회귀분석을 진행하였다.

회귀분석에 따른 연료효율성 모델을 해석한 결과, Sharklet 장착 A321은 미장착 A321 대비 연료효율성이 좋은 것으로 나타났다. 유상탑재량에 따라 다르지만, 향상률은 2.3~4.1%로 제작사 자료와 유사하다. 또한, 유상탑재량이 많아질수록, 운항거리가 길어질수록 연료효율성은 좋아지고, 연비변화량이 클수록, 외기온도가 높을수록 연료효율성은 저하된다는 것을 확인하였다.

추가로 항공기 도입 시 Sharklet 장착 사양 결정 혹은 기존 항공기에 대한 업그레이드 투자와 관련한 경제성 평가를 수행하였다. Sharklet 장착에 따른 연료소모 감소를 Benefit으로, 장착에 따른 구매가격을 Cost로 하는 경제성을 분석한 결과, 단순 Payback Year는 4.2년으로 나타났다. 항공유 가격, 연간 이자율 및 항공기 사용기간 변동에 따른 민감도 분석 결과는 항공유 가격이 갤런당 \$1.50을 초과하여 유지된다면, 텀렛 장착은 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 항공유 가격이 높아질수록, 연간 이자율이 낮아질수록, 사용기간이 길어질수록 현재 가치는 커지게 된다. 그러나 본 연구는 제한사항이 존재한다. 특정 항공사의 실적 자료이기 때문에 다른 사례가 필요하다. 타 항공사의 실적 자료를 분석하여 신뢰도를 강화하면 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- 1) "Winglets and Sharklets," <http://theflyingengineer.com/flightdeck/winglets-and-sharklets/>
- 2) "When is a winglet a sharklet?," <https://www.macleans.ca/economy/business/aviation-industry-on-a-wing-and-tip/>
- 3) Kang, J. H., Rho, O. H. and Lee, D. H., "Numerical Analysis of Transonic Flow around Wing/Winglet Configuration," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 21, No. 1, 1993, pp. 1~11.
- 4) Lee, E. K., Kim, C. W. and Shim, J. Y., "Winglet Characteristics for a Very Light Jet," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2007, pp. 197~200.
- 5) Lee, E. K., Ahn, S. M., Yeom, C. H. and Lee, D. S., "Incidence Angle Effects on Aerodynamic Characteristics of Winglets," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2008, pp. 192~195.
- 6) Jung, J. H., Min, S. G., Kang, H. M., Jun, S. O., Lee, D. H., Seo, H. S. and Jeong, H. H., "Aerodynamic Analysis of Winglet for Small Aircraft using Shape Modeling Function," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2010, pp. 153~156.
- 7) Park, Y. M., Lee, J. H. and Lee, H. C., "Design and Performance Analysis of 95 Passenger Turboprop Regional Aircraft with Winglet," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2013, pp. 1497~1500.
- 8) Narayan, G. and John, B., "Effect of winglets induced tip vortex structure on the performance of subsonic wings," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 58, November 2016, pp. 328~340.
- 9) Elham, A. and van Tooren, M. J. L., "Winglet multi-objective shape optimization," *Aerospace Science and Technology*, Volume 37, August 2014, pp. 93~109.
- 10) Budd, T. and Suau-Sanchez, P., "Assessing the fuel burn and CO<sub>2</sub> impacts of the introduction of next generation aircraft," *Research in Transportation Business and Management*, Vol. 21, December 2016, pp. 68~75.
- 11) Cansino, J. M. and Román, R., "Energy efficiency improvements in air traffic: The case of Airbus A320 in Spain," *Energy Policy*, Vol. 101, February 2017, pp. 109~122.
- 12) Müller, C. S., Kieckhäfer, K. and Spengler, T. S., "The influence of emission thresholds and retrofit options on airline fleet planning: An optimization approach," *Energy Policy*, Vol. 112, January 2018, pp. 242~257.
- 13) "Why Boeing Has Winglets And Airbus Has Sharklets," <https://simpleflying.com/boeing-winglet-s-airbus-sharklets/>
- 14) ICAO, 2013 Environmental Report, p. 160.
- 15) Eguea, J. P., da Silva, G. P. G. and Catalano, F. M., "Fuel efficiency improvement on a business jet using a camber morphing winglet concept," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 96, January 2020, 105542.
- 16) Jang, S. W. and Yoo, K. E., "New Fuel Efficiency Model Setup and Airline's Method to Enhance Fuel Efficiency," Doctoral Thesis, 2019, pp. 40~51.
- 17) Park, J. S. and Park, J. W., *Financial Management*, Dasan Publishing House, 1999, p. 271.