

항공기용 터보팬 엔진의 성능변수를 이용한 정비 주기 및 비용 예측에 관한 연구

강명철* · Stephen Ogaji** · Pericles Pilidis** · 공창덕*

An Approach to Maintenance Cost Estimation for Aircraft Turbofan Engines

Myoungcheol Kang* · Stephen Ogaji** · Pericles Pilidis** · Changduk Kong*

ABSTRACT

This study presents a detailed analysis of aircraft engine maintenance cost based on the relationships between engine performance and geometric parameters. Some trend equations based on the engine performance and maintenance database were developed for the estimation of shop-visit interval, work-scope, man-hours, material cost and Life Limited Part cost. The results show that this approach can give a more reasonable and detailed estimation of engine maintenance cost than older empirical methods.

초 록

본 연구에서는 항공기용 엔진의 성능 및 기하학적 데이터를 입력 값으로 하여 창정비 주기 및 비용을 예측할 수 있는 새로운 방법을 제시하였다. 엔진의 순주기비용 중에서 엔진의 성능과 가장 밀접하게 관련된 부분은 연료비용과 정비비용이다. 큰 비중을 차지하는 정비비용의 예측은 경제적인 정비계획을 수립하기 위하여 정확한 예측이 필요하다. 현재 운용중인 상업용 항공기 엔진들의 성능 및 정비 비용 요소 데이터베이스를 구성하여 그 사이의 통계적 관계식을 이용하여 정비비용을 예측하는 연구를 수행하였다. 예측결과는 이전 식들의 결과와 비교하였으며 보다 세밀하고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

Key Words: Turbofan(터보팬), Performance Simulation(성능모사), Economic Analysis(경제성평가), Maintenance Cost(정비비용)

1. 서 론

일반적인 항공기의 직접 운용비용(Direct Operating Cost; DOC) 중에서 엔진의 성능, 설계, 신뢰성과 직접적으로 관련이 있는 세 가지 주요 요소들은 연료비용, 엔진 획득비용 및 정비 비용이다. Figure 1에서와 같이 일반적인 광-동

* 조선대학교 항공우주공학과
** Cranfield University, U.K.
연락처, E-mail: k0914@stmail.chosun.ac.kr

체(Wide-Body) 항공기의 경우, 이 비용은 항공기 직접 운용비용의 40%를 차지하며 각각의 비율은 55%, 15%, 30%를 차지한다[4].

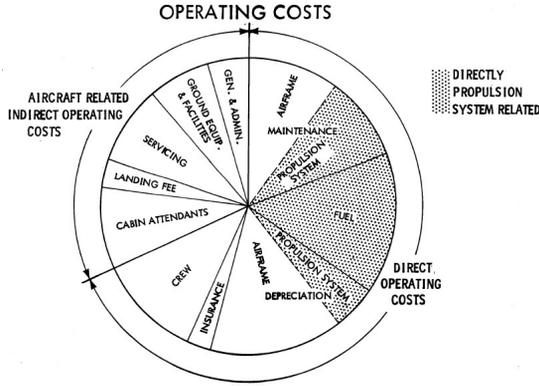


Fig. 1 Aircraft Operating Costs

항공기용 터보팬 엔진의 정비비용 예측은 주로 엔진 제작사나 항공사에서 실험이나 장시간 동안 엔진을 운용하면서 구축된 데이터베이스를 바탕으로 이의 경향 분석을 통해 얻어지는 경험식을 주로 사용한다. 이러한 정밀한 경험식들은 회사의 고유자산으로 공개되지 않기 때문에 정비비용 계산이 필요한 경우에는 공개된 참고문헌 등에 나와 있는 단순한 식을 사용하여 계산을 하여야 한다. 하지만 대부분의 공개된 기법들은 60 ~ 70 년대 데이터를 바탕으로 하기 때문에 현재 운용중인 엔진들에 적용하기에는 예측 결과의 신뢰성이 크게 떨어지고 특히, 현재 주로 이용되는 상태 모니터링을 바탕으로 한 정비운용 개념에 적용하기 위한 보다 세밀한 계산을 수행하기 어렵다[1,2,3]. 1974년 NASA에서 수행된 연구는 엔진의 주요 구성품들의 성능변수와 정비비용 요소들의 관계식을 구하고 이를 통하여 평균 정비주기와 비용을 계산하는 좀 더 세밀하고 향상된 기법을 제시하였으나 이 역시 오래된 데이터들을 바탕으로 하기 때문에 현재 운용중인 엔진들에 적용하기에는 신뢰성이 떨어진다[4].

본 연구에서는 공개된 참고문헌을 바탕으로 현재 운용중인 항공기용 엔진들의 성능 및 정비

비용 요소 데이터베이스를 구축하고 이를 바탕으로 하여 보다 세밀한 정비비용 예측이 가능한 연구를 수행하였다.

2. 엔진 성능계수

엔진의 성능 변수들과 정비비용 요소들 사이의 관계식을 구성하기 위해서 먼저 고려해야 할 사항은 어떠한 엔진 성능변수들이 엔진의 주요 모듈의 크기(size), 복잡성(complexity), 적용된 기술(technology)의 수준을 반영하는가를 찾아내는 것이다. 이와 관련된 주요 연구가 1974년 아메리칸 항공사의 G. P. Sallee에 의해 NASA와의 계약 연구로 수행되었다[4]. 이 연구에서 사용된 성능계수들은 Eq. (1) ~ (8)과 같다.

$$Y_{LPC} = T_{T3} \times (P_{T3} / P_{T2})^{\frac{1}{\#STGS_{FAN} + \#STGS_{LPC}}} \times Ut_{FAN/LPC} \times 10^{-6} \quad (1)$$

$$Y_{HPC} = T_{T4} \times (P_{T4} / P_{T3})^{\frac{1}{\#STGS_{HPC}}} \times Ut_{HPC} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$Y_{HPT} = \sqrt{T_{T5}} \times P_{T5} / P_{T6} \times Ut_{HPT} \times \#STGS_{HPT} \times 10^{-5} \quad (3)$$

$$Y_{LPT} = \sqrt{T_{T6}} \times P_{T6} / P_{T7} \times Ut_{LPT} \times \#STGS_{LPT} \times 10^{-5} \quad (4)$$

$$Z_{LPC} = \left(Ut_{FAN}^2 \times DIA_{FAN} \times \#STGS_{FAN} \right) \times 10^{-8} + Ut_{LPC}^2 \times DIA_{LPC} \times \#STGS_{LPC} \quad (5)$$

$$Z_{HPC} = Ut_{HPC}^2 \times DIA_{HPC} \times \#STGS_{HPC} \times 10^{-8} \quad (6)$$

$$Z_{HPT} = \sqrt{T_{T5}} \times DIA_{HPT} \times \#STGS_{HPT} \quad (7)$$

$$Z_{LPT} = \sqrt{T_{T6}} \times DIA_{LPT} \times \#STGS_{LPT} \quad (8)$$

Where, Temperatures – K, Sea Level Take-off, Hot Day, Pressures – PSIA, Sea Level Take-off, Hot Day, Tip Speeds – FT/SEC, Sea Level Take-off, Hot Day (Use 1st Stage except Ut FAN/LPC; The Stage Weighted Average), Diameter – Inches: Fan – Fan Blade Tip, LPC – 1st Stage Blade Tip, HPC – 1st Stage Blade Tip, HPT – 1st Stage Blade Tip, LPT – Mean LPT Blade Tip

위 식에서 압축기의 경향을 잘 설명해주는 성능변수는 압축기 팁 스피드, 직경, 단 수의 곱으로 표현된다. 여기서 팁 스피드는 모듈의 기술수준 인자(technology factor), 직경은 사이즈 인자(size factor), 단 수는 복잡도 인자(complexity factor)이다.

위에서 계산된 Y 와 Z 계수들은 각각 주요 구성품들의 평균 정비주기(Mean Time Between Repair)와 맨아워(Manhours/repair)를 예측하는데 사용된다.

본 연구에서는 엔진의 성능과 정비비용 요소들 사이의 관계식을 구하기 위하여 이 계수들을 입력 변수 적용하였으며, 현재 많이 쓰이는 경-중-경 정비 패턴(Light-Heavy-Light shop visit pattern)에 적용하기 위하여 이 계수들을 Eq. (9) ~ (12)와 같이 엔진의 코어 부분과 저압 부분 계수로 나누어 적용하였다.

$$Y_{HOT} = Y_{HPC} + Y_{HPT} \quad (9)$$

$$Y_{COLD} = Y_{LPC} + Y_{LPT} \quad (10)$$

$$Z_{HOT} = Z_{HPC} + Z_{HPT} \quad (11)$$

$$Z_{COLD} = Z_{LPC} + Z_{LPT} \quad (12)$$

3. 엔진 성능 및 정비비용 요소 데이터베이스

엔진 성능과 정비 요소 데이터베이스를 공개된 자료들을 통하여 구성하였다. Table 1과 같이 대상 엔진은 13개의 장, 중거리용 엔진과 6개의 단거리 운용 엔진을 선정하였다[5, 6, 7]. 엔진 성능과 정비요소 사이의 입, 출력 변수들은 Table 2와 같다.

엔진의 성능 데이터베이스 구성을 위한 선정 엔진들의 열역학적 성능모사를 위해 성능해석 프로그램인 TUBOMATCH(Cranfield Univ., U.K.)를 이용하였다. 성능모사 조건은 지상 정지 최대

추력 조건으로 정하였다.

데이터베이스 엔진들의 비행시간당 창 정비비용(Shop-Visit maintenance cost/engine flight hours (EFH))의 경향은 Fig. 2와 같다.

Table 1. List of Studied Engine

Engine Manufacturer	Engine Type	Operating Range	EFH: EFC
GE	CF6-50C2	Long	5.0
	CF6-80C2A2	Short	1.0
	CF6-80C2A3	Mid	3.0
	CF6-80C2B1F	Long	7.5
	CF6-80C2B6F	Long	6.5
	CF6-80C2D1F	Long	7.0
Pratt & Whitney	JT9D-7Q	Long	5.0
	JT9D-7R4G2	Long	8.0
	PW4056	Mid	3.0
	PW4156	Long	8.0
	PW4158	Mid	3.0
	PW4060	Long	6.5
	PW4460	Long	7.0
	PW4462	Long	7.0
CFM International	JT8D 217A	Short	1.5
	CFM56-5B4/P	Short	1.5
	CFM56-7B27	Short	1.5
International Aero Engines	CFM56-7B18	Short	1.5
	V.2530-A5	Short	1.5

Table 2. Engine Performance & Maintenance Parameters

Independent Parameters	Dependent parameters
Temperature	Shop Visit Interval
Pressure	Workscopes for SV
Rotational Speed	Manhours/SV
Tip Speed	Material Cost
No. of Blades	Subcontract
Diameter	LLP Lives
Entry Into Service Year	LLP List Price

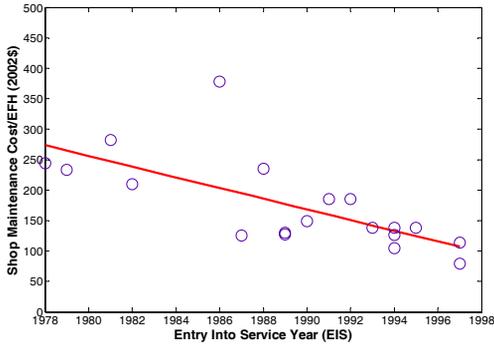


Fig. 2 Current Trend of Shop Visit Maintenance Cost

4. 경향 분석 및 정비비용의 예측

엔진의 창 정비비용은 공임(Labor) 비용, 재료 및 하청정비(Sub-contract) 비용, 수명제한부품(Life Limited Parts) 교환비용으로 구성된다.

엔진 성능변수에 대한 이러한 비용요소들의 경향식들이 데이터베이스의 통계적 해석에 의해 유도되었으며, 이식들을 적용하여 정비비용을 예측하였다. 계산결과들은 NASA 기법의 결과 및 데이터베이스와 비교하였다. 모든 비용은 2002년 미국 달러화를 기준으로하고 시간당 노동비용은 \$70 US를 적용하였다.

2.1 공임 비용 (Labor Cost)

공임비용은 정비창 입고주기(Shop Visit interval)와 정비 당 맨아워(Man Hours per repair)의 곱으로 표현된다.

장, 단거리용 엔진에 대한 입고주기의 관계는 Y_{Cold} 계수를 입력 값으로 하였다. 이의 경향식은 Eq. (13)과 Fig. 3과 같다.

$$\begin{aligned} SVEFC_{SHORT} &= -3619 \times Y_{COLD}^2 + 39910 \times Y_{COLD} - 97800 \\ SVEFC_{LONG} &= 345.8 \times Y_{COLD}^2 - 3027 \times Y_{COLD} + 7886 \end{aligned} \quad (13)$$

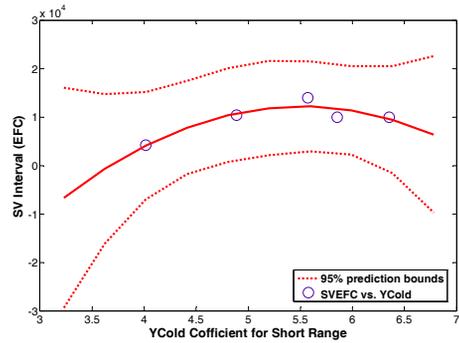


Fig. 3 Shop Visit Interval (EFC) vs. YCold Coefficient for Short Range

Table 3. Comparison of Shop Visit Intervals

Mean Error; %	Vs. YCold
New Eq.	18.3
NASA Method	33.1

계산결과를 원래 데이터 값과 비교하였을 때 NASA 경향식의 결과와 비교하여 훨씬 적은 오차율을 보였으며 결과는 Table 3과 같다.

창 입고에 대해서 Z 계수에 대한 비행시간당 맨아워(Man Hours per EFH)의 관계는 Fig. 4와 같다. 해석결과 첫 번째 정비창 입고의 경우에는 Z_{Hot} 계수가 보다 적은 오차율을 보였고 두 번째 입고의 경우에는 Z_{Cold} 계수와와의 관계가 타당함을 알 수 있었다. 이러한 경향은 경-중-경 정비 패턴(Light-Heavy-Light shop visit pattern)을 적용할 경우 첫 번째 입고는 엔진 코어부의 정비를 위한 입고이고 두 번째 입고 시에는 저압부의 정비를 위한 결과임을 확인 할 수 있었다.

Eq. (14)는 각 입고주기에 대한 맨아워 경향식으로서 결과 값과 입고주기 값을 사용하여 얻어진 노동비용 계산 결과는 40.1%로 상대적으로 높은 오차율을 보였으나 NASA의 결과인 71.2% 보다는 상당히 적은 오차율을 보였다.

$$\begin{aligned} 1stSVMH / EFH &= 4.057E - 7 \times Z_{HOT}^2 - 1.267E - 3 \times Z_{HOT} + 1.208 \\ 2ndSVMH / EFH &= 1.175E - 7 \times Z_{COLD}^2 - 9.871E - 4 \times Z_{COLD} + 2.46 \end{aligned} \quad (14)$$

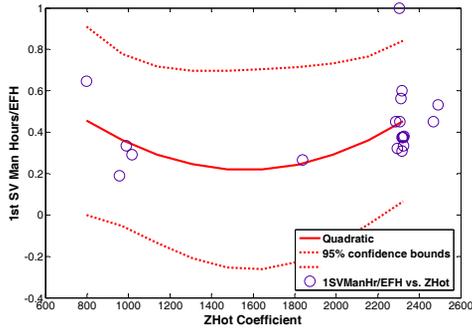


Fig. 4 1st SV ManHours/EFH vs. ZHot Coefficient for Long & Short Range

2.2 재료비용 및 하청정비 비용 (Material & Subcontract Cost)

본 연구에서 사용된 재료 비용은 수명제한부품(LLP)의 교환비용을 제외한 정비상의 재료비용으로서 라인정비 및 창정비 재료비용을 포함한 모든 재료비용으로 정의한 NASA 기법과는 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 원래 재료비용 및 하청정비 비용과의 비교결과만 제시하였다.

통계해석을 통해 얻어진 각각의 정비창 입고 시 Z 계수와 재료비용의 관계식은 Eq. (15)와 같다. 해석결과 평균 오차율 7.3%로서 상당히 낮은 결과를 보였다.

$$\begin{aligned} 1stSVMatCost &= -0.5055 \times Z_{HOT}^2 + 1646 \times Z_{HOT} - 218700 \\ 2ndSVMatCost &= -0.1224 \times Z_{COLD}^2 + 1024 \times Z_{COLD} - 917400 \end{aligned} \quad (15)$$

하청정비 비용과 재료비용 사이에는 서로 보완적인 비율의 역비례 관계를 가지며 이는 창정비 능력에 따라 달라진다. 통계적 분석결과를 통해 첫 번째 정비창 입고 시에는 재료비용을 입력으로 하고 두 번째 입고 시에는 재료비와 노동비용을 합한 값을 입력으로 하는 관계식을 얻을 수 있었으며 Eq. (16)과 같다.

$$\begin{aligned} 1stSVSub &= 4.294E - 6 \times MatCost_{SP1}^2 - 7.936 \times MatCost_{SP1} \\ &\quad + 3.929E + 6 \\ 2ndSVSub &= 1.863E - 6 \times MatLabCost_{SP1}^2 - 5.79 \times MatLabCost_{SP1} \\ &\quad + 4.961E + 6 \end{aligned} \quad (16)$$

위의 계산결과 평균오차율 13.5로서 타당한 결과를 얻을 수 있었다.

2.3 수명제한부품 교체 비용 (Life Limited Part; LLP Change Cost)

장, 단거리용 엔진의 ZCold 계수 및 YCold 계수와 수명제한부품의 수명 관계식은 Eq. (17)과 같고, 두 가지 경우 모두 저압부 성능 계수가 입력 값으로 타당하다는 것을 알 수 있었다.

계산 결과 평균 오차율이 7.6%로서 상당히 낮은 수준임을 알 수 있었다.

$$\begin{aligned} LLPLives_{short} &= -601.4 \times Y_{COLD}^2 + 4612 \times Y_{COLD} + 1.224E + 4 \\ LLPLives_{long} &= 0.001259 \times Z_{COLD}^2 - 8.336 \times Z_{COLD} + 2.714E + 4 \end{aligned} \quad (17)$$

일반적으로 LLP의 교체 시기는 설계수명을 완전히 소모하지 않고 어느 정도 여유 수명이 있는 상태에서 정비 계획에 따라 교체한다. 데이터 베이스를 통해서 교체수명은 설계수명의 약 86.5%임을 알 수 있었고 이를 적용하여 교체 주기를 계산하였다.

엔진의 서비스 개시년도(Entry Into Service; EIS)에 따른 LLP 표시가격(List price)의 관계식은 Eq. (18)과 같다. 표시가격의 평균 오차율은 5.1%로서 가장 낮은 오차율을 보였으며 교체비용은 10.7%로 낮은 오차율을 얻을 수 있었다.

$$LLPList Price = -2585 \times EIS^2 + 1.031E + 7 \times EIS - 1.027739E + 10 \quad (18)$$

위에서 계산된 모든 비용 항목에 대한 결과는 Table 4와 같다. 여기서 총 창정비 비용은 10.5%의 평균 오차율을 보였으며 이는 기존의 관계식들이 최소 50 ~ 60% 정도의 평균 오차율을 보이는 것에 비교하여 새로운 관계식이 상당한 신뢰성을 갖는다고 할 수 있다.

Table 4. Mean Errors (%) of New Estimation of SV Maintenance Cost

Cost Elements	New Approach	NASA's Method
Shop Visit Interval (EFC)	18.3	33.1
Labor Cost	39.2	71.2
Material Cost	7.3	-
Subcontract	23.9	-
Shop Visit Total Cost	13.5	-
LLP Lives (EFC)	7.6	-
LLP List Price	5.1	-
LLP Change Cost	10.7	-
Total Maintenance Cost	10.5	-

5. 결 론

본 연구에서는 민간 항공기용 터보팬 엔진의 장 정비 비용을 예측하는 새로운 방법을 제시하였다. 공개된 엔진의 성능 데이터와 정비 비용 요소 데이터베이스를 이용하여 이들의 상관관계를 보여줄 수 있는 관계식을 구성하여 보다 세밀한 정비비용을 예측할 수 있었다.

대상 엔진은 19개의 장, 단거리 상업용 항공기용 엔진을 선정하고 이에 대한 성능과 정비비용 요소들의 데이터베이스를 구성하였다. 이를 바탕으로 통계적인 해석을 수행하여 성능변수와 정비비용 요소들 사이의 관계식을 얻어내었다.

이들 관계식을 이용하여 선정된 엔진들의 정비비용을 계산하여 NASA 관계식의 결과 및 데이터베이스 값과 비교를 하였다. 계산결과, 총 정비비용 평균 오차율 10.5%로 기존의 관계식과 비교하여 새로운 관계식들이 상당한 신뢰성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 영국 크랜필드 대학교 (Cranfield Univ., U.K.)의 지원으로 수행한 VITAL Project (2005년 10월 ~ 2007년 09월) 연구결과의 일부임

참 고 문 헌

1. ATA, "Standard Method of Estimating Comparative Direct Operating Costs of Turbine Powered Transport Airplanes", Air Transport Association of America, 1967
2. Roskam, "Airplane Design Part VIII: Airplane Cost Estimation: Design, Development, Manufacturing and Operating", Roskam Aviation and Engineering Corporation, 1990
3. Jenkinson, Lloyd R. Paul Simpkin, Darren Rhodes, "Civil Jet Aircraft Design", Arnold Pub., 1999
4. Sallee, GP. "Economic Effects of Propulsion System Technology on Existing and Future Transport Aircraft", NASA CR 134645, 1974
5. Jane's Information Group, 2006, "Jane's Aero Engines", 2006
6. Aircraft Commerce, "Maintenance Cost Analysis: JT9D, PW4000 & CF6 50/80", Issue 23, Aircraft Commerce, June / July 2002
7. Aircraft Commerce, "CFM56 5B/ 7 & V.2500 Maintenance Cost Re Examined", Issue 28 Aircraft Commerce, April / May 2003