

비선형 GPA 기법을 이용한 터보프롭 엔진의 최적 계측 변수 선정에 관한 연구

기 자 영 · 공 창 덕 · 임 강 택(조선대)

A Study on Optimal Measurement Parameter Selection of Turboprop Engine using Nonlinear GPA Technique

Chang-Duk kong · Ja-Young Ki · Kang-Taek Lim(조선대)

초 목

터보프롭 엔진의 성능진단을 위한 선형 GPA(Gas Path Analysis) 및 비선형 GPA 프로그램을 개발하고 최적 계측 변수 선정에 관한 해석을 수행하였다. 압축기 오염과 압축기 터빈 및 동력터빈의 부식에 의한 손상을 가정하고 계측변수를 6개, 8개, 10개로 달리하여 각각 선형 GPA 기법과 비선형 GPA 기법을 이용하여 해석을 수행한 후 RMS 오차를 비교하였다. 해석 결과 비선형 GPA 기법을 이용한 경우의 RMS 오차가 선형 GPA 기법을 이용한 경우보다 적어 비선형 GPA 기법의 유용성을 확인할 수 있었다. 또한 적절한 계측변수의 선정에 의해 보다 적은 계측 장비로 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

가스터빈 엔진의 운용에 있어서 높은 신뢰성(Reliability)과 운용 비용의 최소화는 엔진 제작자나 사용자 모두에게 있어 중요한 문제이다.

최근 엔진의 정비 개념은 일정 사용 시간에 따른 정비에서 엔진 상태에 따른 정비 방법으로 바뀌고 있다. 즉 엔진의 운용상태를 파악하고 성능을 진단하여 주요 구성품의 고장시기를 예측함으로써 적기에 용이하게 수리나 교체를 할 수 있도록 하는 것이다. 이는 불필요한 정비를 방지하고 주요 구성품이 고장났을 경우 정비에 소모되는 시간을 최소화하여 이용률을 증가시킴으로써 전체 운용비용을 절감할 수 있도록 한다.

이를 위해서는 정확하게 엔진의 성능을 진단할 수 있는 성능 진단 방법의 개발이 선행되어야 한다.

엔진 성능 진단 방법으로는 Fault Tree 방법이나 Fault Matrix 방법 등이 개발되었으나 이

들은 모두 정성적인 진단 결과만을 제시함으로써 효율적이지 못한 결과를 보여주었다. 그러나 공기와 연소가스가 통과하는 구성품의 효율 감소와 질량유량의 변화량으로 엔진성능을 예측하는 선형 GPA(Gas Path Analysis) 방법이 Urban에 의해 제시됨으로써 정량적인 성능진단이 가능하게 되었다.[1] 그러나 선형 가스 경로 해석 방법은 아주 작은 상태의 변화에 대해서만 정확한 결과를 보인다는 문제가 있어 그 후 여러 차례의 반복 계산을 통한 비선형 가스 경로 해석 방법이 개발되었다. 이를 통해 아주 큰 상태의 변화에 대한 엔진의 성능 진단이 가능하게 되었다.[6]

GPA 기법은 그 후 꾸준한 발전을 거듭하여 현재 엔진 3사인 Rolls-Royce, Pratt & Whitney, General Electric사에서 모두 GPA 이론에 기반을 둔 성능 진단 프로그램을 개발하여 이용하고 있다.[2],[3]

최근에는 GPA 기법의 성능을 향상시키기

위해 퍼지, 신경회로망 이론 등과 같은 최신 인공지능 제어 이론의 도입도 활발하게 이루어지고 있다.[5],[7]

국내에서도 항공기가 개발되고 가스터빈 엔진의 수요가 증가됨에 따라 효율적인 정비와 운용을 위한 성능진단에 대한 관심이 커지고 있으나 선형 GPA에 관한 연구만이 일부 진행된 바 있다.[8]

이에 본 연구에서는 선형 GPA기법과 비선형 GPA 기법을 이용하여 터보프롭 엔진의 최적 계측변수를 선정하기 위한 해석을 수행하였다.

2. 연구대상 엔진

본 연구의 대상 엔진으로는 KT-1 항공기의 주 추진기관인 PT6A-62 터보프롭 엔진으로 선정하였다. 이 엔진은 가스발생기와 동력부로 구성되어 있으며 가스발생기는 압축기, 연소기 및 압축기 터빈으로 구성되어 있다. 가스발생기는 오일 펌프, 시동발전기 및 유압펌프를 구동한다. Fig. 1은 엔진의 외형 및 내부 구성도이다.

동력터빈은 연소기 및 압축기 터빈을 거친 연소가스에 의해 구동되며 감속기어를 통하여 프로펠러를 구동시킨다. 압축기 터빈과 동력터빈은 거의 엔진 중앙에 위치하며 서로 반대 방향으로 회전한다.

압축기는 3단의 축류 및 1단의 원심 식으로 구성되어 있으며, 연소기는 Inverse Flow Type

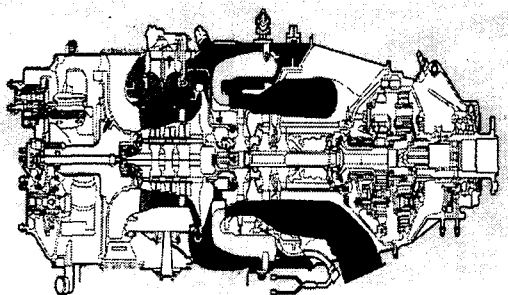


Fig. 1. Study Engine Layout

이다. 압축기 터빈은 1단이며 동력터빈은 2단으로 구성되어 있다. 대부분의 에너지는 동력터빈의 구동에 소요되며 잔여량은 엔진 양쪽의 배기구를 통하여 대기로 방출된다.

엔진은 1,150 마력 급이지만 엔진 감속기어부의 과응력을 방지하기 위하여 토크 상한치를 최대출력 950 마력으로 제한한다.

프로펠러는 Hartzell사의 HC-E4N-3EX1/E9512CK-1로 2.4m, 4 블레이드, 가변피치, 페더 기능을 가지며 프로펠러 정속제어기에 의해 2000RPM으로 제어된다.

최대이륙조건(지상정지 표준대기 조건)에서의 성능은 Table 1과 같다.

Table 1. Performance Data for Study Engine

변 수	성 능
공기유량 (kg/s)	3.696
압축기 압력비	8.25
압축기 효율	0.77
Bleed Air 량	0 %
연소기 압력강하율	3 %
연료유량 (kg/s)	0.072
압축기터빈 입구온도	1269.5
압축기터빈 효율	0.92
동력터빈 효율	0.91
노즐면적 (m ²)	0.058
S.H.P (HP)	950
가스발생기 회전속도	100 %
동력터빈 회전속도	100 %

3. 선형 GPA 이론

GPA는 각 구성품의 계측변수를 이용하여 수학적 해석을 통해 유량이나 효율 등 중요 엔진 변수의 변화를 파악하여 엔진 내부의 상태를 예측하는 방법이다. 즉 엔진의 주요 구성품을 통과하는 가스의 매개변수의 해석을 통해 다양한 물리적 손상 문제를 파악할 수 있다.

GPA의 목적은 경제적으로 알맞게 선택된 변수들의 계측을 통해 그러한 문제들을 암시적으로 발견하는 것이다. 예를 들어 압축기와 팬의 손상은 공기유량 또는 단열압축효율, 또는 둘 다의 변화로 나타날 것이다. 터빈 손상은 터빈 유효 노즐면적크기 또는 단열팽창효율 또는 둘 다의 변화를 명시할 것이다.

가스터빈 엔진의 성능해석 모델은 구성품 성능도와 에너지와 질량보존의 법칙과 같은 열역학적 관계에 기초한다. 따라서 계산은 모든 구성품이 열역학적 관계를 만족하도록 진행된다.

구성품 성능도가 정확하게 정의되었다고 가정하면 모델은 압력, 온도, 연료유량, 회전속도 등과 같은 측정할 수 있는 독립변수와 효율, 유량과 같은 측정 불가능한 종속변수의 향으로 엔진의 성능을 파악할 수 있다.

부식, 오염, 마모, 비틀림 등으로 인해 엔진에 손상이 발생하면 각각의 손상은 가스경로 구성품에 영향을 미치고 독립변수와 종속변수를 변경시킬 것이다. 엔진은 성능저하로 인해 새로운 작동점에서 작동이 될 것이며, 이에 따른 손상 정도는 측정할 수 있는 변수의 변화를 관찰함으로써 발견될 수 있다. 이러한 방법으로 구성품의 종속변수 사이의 열역학적 관계식과 독립변수의 직접적인 측정으로부터 성능저하된 구성품을 분리시키는 것이 가능하다. 종속변수의 변화가 상대적으로 작다고 가정하면 새로운 일련의 방정식들은 테일러 전개에 의해 선형화될 수 있다. 그러한 선형화된 방정식은 행렬 형태로 표현된다.[1]

독립변수와 종속변수의 관계는 다음과 같다.

$$Z = f(x) \quad (1)$$

여기에서 Z는 측정가능한 종속변수이며 x는 독립변수이다.

위 식을 Taylor 급수로 전개한 후 고차항을 무시하면

$$\Delta Z = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \times \Delta X = H \times \Delta X \quad (2)$$

여기에서 H는 ICM(Influence Coefficient Matrix)이며 ICM의 역행렬을 구하면 FCM(Fault Coefficient Matrix)이 된다. 독립변수의 측정된 변화값과 FCM을 구하면 다음과 같이 종속변수의 변화량을 구할 수 있다.

$$\Delta X = H^{-1} \times \Delta Z \quad (3)$$

그 결과 엔진 성능저하의 원인을 정의할 수 있다.

여기에서 Δ 는 성능저하 이전의 기준성능과 성능저하 후의 성능사이의 차로 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta = \frac{\text{저하된 성능} - \text{기준성능}}{\text{기준성능}} \times 100 \quad (4)$$

또한 해석의 정확성을 알기 위해 다음과 같이 RMS 오차를 계산한다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\text{독립변수 수}} (INDHOL - INDOBS)^2}{\text{독립변수 수}}}$$

(5)

여기에서 INDHOL은 처음에 가정한 독립변수의 성능저하량이며 INDOBS는 해석 후 관찰된 독립변수의 성능저하량이다.

그러나 선형 GPA 기법은 상태 변화량이 적을 때에만 유효한 결과를 낼 수 있다는 단점이 있어 상태변화량이 크고 계측변수가 적은 경우에는 다음과 같은 비선형 GPA 기법이 유용하다.

4. 비선형 GPA 이론

엔진의 손상이 심한 경우, 즉 독립변수의 저하량이 큰 경우에는 선형 GPA 기법을 이용하여 해석하면 정확도가 떨어진다. 이러한 해석의 정확도를 개선하기 위해 독립변수와 종속변수 사이의 비선형 관계를 선형 GPA 방법을 반복적으로 적용하여 해석하는 비선형 GPA 방법이 제안되었다.[6]

독립변수와 종속변수의 비선형 관계를 짧게 나누면 선형으로 가정할 수 있으므로 각 구간에서의 종속변수와 독립변수의 관계를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta z = [H] \cdot \delta x \quad (6)$$

$$\therefore \delta x = [H]^{-1} \cdot \delta z \quad (7)$$

여기에서 δx 는 측정 불가능한 독립변수, δz 는 측정 가능한 종속변수를 나타내며, Jacobean 행렬 H를 ICM(influence coefficient matrix), 역 Jacobean 행렬 H^{-1} 을 FCM(fault coefficient matrix)라 한다.

반복 기법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 독립변수의 성능 저하량을 균등하게 나누어 해석한 방법과 Newton-Raphson 방법을 적용하여 그 차이를 살펴보았다.

Fig. 1은 Newton-Raphson 반복 기법을 이용한 비선형 GPA 해석방법을 도시한 것이다.[6]

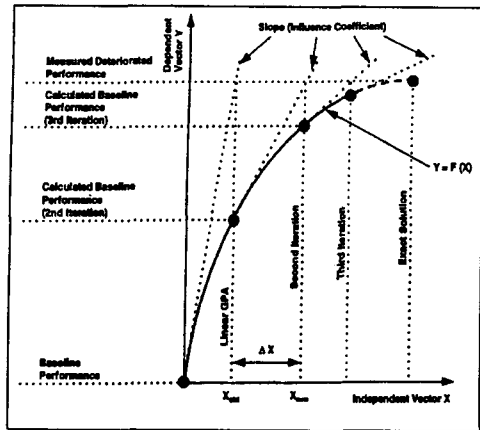


Fig. 1. Simplified illustration of non-linear gas path analysis method

비선형 GPA기법에서 새로운 작동점 Δx_{new} 는 다음과 같이 정해진다.

$$\Delta x_{new} = \Delta x_{old} + r \hat{p} \quad (8)$$

여기에서 \hat{p} 는 독립변수의 변화량이며 r 는 수렴을 빠르게 하기 위한 상수이다.

5. GPA를 이용한 최적 계측 변수 선정

가스터빈 엔진의 주요구성품에서 가장 쉽게 발견되는 성능저하 원인이 압축기 오염과 터빈 부식이다. 압축기 오염은 들어오는 질량유량의 감소와 효율저하를 가져오며 터빈부식은 질량유량의 증가와 효율저하를 가져온다. 본 연구에서도 성능저하원인으로 압축기 오염과 터빈 부식을 가정하였으며 압축기와 압축기터빈, 동력터빈에서 동시에 손상이 발생하는 경우를 고려하였다.

압축기 오염과 터빈 부식에 따른 성능저하량은 Table 2.와 같이 가정하였다.[4]

Table 2. Source of Performance Deterioration and Deterioration Capacity

성능저하 원인	성능저하량
압축기 오염	$\Gamma = -5\%$, $\eta = -2\%$
압축기 터빈	$\Gamma = +3\%$, $\eta = -2\%$
동력터빈 부식	$\Gamma = +3\%$, $\eta = -2\%$

Table 2에서 Γ 와 η 는 각각 공기유량과 효율을 의미한다.

계측변수는 Table 3과 같이 6개, 8개, 10개로 다르게 선정하여 해석하였으며 그때의 RMS 오차는 Table 3과 같다:

해석 결과를 살펴보면 비선형 GPA 기법을 이용한 경우 선형 GPA를 이용한 경우보다 RMS 오차가 적음을 확인하였다. 또한 6개의 계측변수로 8개의 계측변수를 사용한 경우보다 더 적은 RMS 오차를 보여 계측변수를 잘 이용한다면 보다 적은 계측장비로도 신뢰성 있는 성능진단을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Dependent Variable Selection and RMS Error

종속변수	1	2	3
SHP	○		○
MF	○		○
P2	○	○	
T2	○	○	
P3	○	○	○
T3	○	○	○
P4	○	○	○
T4	○	○	○
P5	○	○	
T5	○	○	
RMS (Linear)	1.6812	24.8434	4.9323
RMS (Nonlinear)	1.5924	7.6861	3.8335

6. 결 론

터보프롭 엔진의 성능진단을 위한 선형 GPA 및 비선형 GPA(Gas Path Analysis) 프로그램을 개발하고 최적 계측 변수 선정을 위한 해석을 수행하였다. 압축기 오염과 압축기 터빈 및 동력터빈의 부식에 의한 손상을 가정하고 계측변수를 6개, 8개, 10개로 달리하여 해석을 수행한 결과 비선형 GPA 기법을 이용한 경우 선형 GPA를 이용한 경우보다 RMS 오차가 적음을 확인하였다. 또한 6개의 계측변수로 8개의 계측변수를 사용한 경우보다 더 적은 RMS 오차를 보여 계측변수를 잘 이용한다면 보다 적은 계측

장비로도 신뢰성 있는 성능진단을 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행된 "PT6A-62 엔진의 동적 거동 모사 기법에 관한 연구"의 일부임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Urban, L.A., "Gas Path Analysis Applied to Turbine Engine Condition Monitoring", Journal of Aircraft, Vol. 10, No. 7, pp. 400~406, 1973b
2. Baswell, M.J., "COMPASS-Ground Based Engine Monitoring Program for General Application", SAE-TP-871734, 1987
3. Doel, D.L., "TEMPER-A Gas-Path Analysis Tool for Commercial Jet Engines", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 116, Jan
4. Diakunchak, I.S., "Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines" Trans. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol.114 : 161-168, 1992
5. Vivian, B., Singh, R., "Application of Expert System Technology to Gas Path Analysis of a Single Shaft Turboprop Engine", 5th European Propulsion Forum, Pisa, Italy, April, 1995
6. Escher, P.C., "Pythia : An Object-Oriented Gas Path Analysis Computer Program for General Applications", Ph.D. Dissertation, SME, Cranfield University, 1995
7. Kim, S. K., "Application of Neural Networks to Gas Path Analysis for Health Monitoring of Gas Turbine Engine", MSc Thesis, 1998
8. 공창덕, 기자영, 장현수, 오성환, "터보프롭엔진(PT6A-62)의 성능저하 진단을 위한 최적 계측변수 선정에 관한 연구", 추진공학회지, 4-4, pp. 87-97, 2000