

터보프롭 엔진의 최적 계측 변수 선정을 위한 비선형 GPA 기법에 관한 연구

공 창 덕^{*} · 기 자 영^{**}

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

Chang-Duk kong^{*} · Ja-Young Ki^{**}

ABSTRACT

Linear GPA(Gas Path Analysis) and non-linear GPA programs for performance diagnostics of a turboprop engine were developed, and a study for selection of optimal measurement variables was performed. Simultaneous faults in the compressor, the compressor turbine and the power turbine, which occur damage of the engine, were assumed.

The non-linear GPA analysis was carried out with an iterative method, where the performance degradation rate of independent parameters was divided into same intervals. It was compared with the result by the Newton-Raphson method for observing the effect of an iterative method. According to the analysis result, it was found that performance of non-linear GPA can be influenced on the type of the iterative method.

For showing effects of the number of measurement variables both the linear and non-linear GPAs were analyzed with 10, 8 and 6 measurement sets, respectively. RMS error between them were compared each other. It was realized that the more measurement parameters are used, and the more accurate result may be obtained. However much better result can be obtained with measurement parameters selected properly. Moreover, RMS error by using non-linear GPA was less than that by using linear GPA.

초 록

터보프롭 엔진의 성능진단을 위한 선형 GPA(Gas Path Analysis) 및 비선형 GPA 프로그램을 개발하고 최적 계측 변수 선정을 위한 해석을 수행하였다. 엔진의 손상은 압축기 오염과 압축기 터빈 및 동력터빈의 부식이 동시에 발생하는 경우를 가정하였다.

^{*} 조선대학교 우주항공공학과 (Chosun Univ., Dept. of Aerospace Eng.)

^{**} 조선대학교 대학원 기계공학과 (Chosun Univ., Graduate School, Dept. of Mechanical Eng.)

먼저 비선형 GPA에서 반복기법에 대한 영향을 알아보기 위해 독립변수의 저하량을 등간격으로 나누어 반복 해석한 경우와 Newton-Raphson법을 이용하여 해석한 경우를 선형 GPA 해석 결과와 비교하였다. 해석 결과 비선형 GPA의 성능은 반복기법에 의해 많은 영향을 받음을 알 수 있었다. 다음 계측변수 수에 대한 영향을 알아보기 위해 계측변수를 6개, 8개, 10개로 달리하여 각각 선형 GPA 기법과 비선형 GPA 기법을 이용하여 해석을 수행한 후 RMS 오차를 비교하였다. 해석 결과 계측변수가 많으면 보다 정확한 진단 결과를 얻을 수 있으나 계측변수를 잘 선정한다면 보다 적은 계측변수로도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 비선형 GPA 기법을 이용한 경우의 RMS 오차가 선형 GPA 기법을 이용한 경우보다 적어 비선형 GPA 기법의 유용성을 알 수 있었다.

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 운용 상태를 파악하고 성능을 진단하여 주요 구성품의 고장 시기를 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 운용 비용을 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 이들은 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 차례

의 반복 계산을 통한 비선형 GPA 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 GPA와 비선형 GPA 프로그램을 개발하여 두가지 방법의 성능을 비교하였으며 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 오

일 펌프, 시동발전기 및 유압펌프를 구동한다. Fig. 1은 엔진의 외형 및 내부 구성도이다.

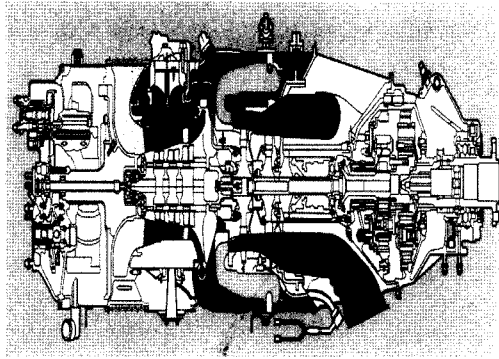


Fig. 1. Study Engine Layout

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 Type이다. 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 최대 출력 950 마력으로 제한한다.

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

설계점인 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 %
프로펠러 회전속도(RPM)	2000

3. GPA 이론

3-1. 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 단일 압축효율, 또는 둘다의 변화로 나타날 것이다. 터빈 손상은 터빈 유효 노즐면적크기 또는 단일 팽창효율 또는 둘다의 변화를 명시할 것이다.[4]

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 가스가 통과하는 구성품에 영향을 미치고 독립변수와 종속변수를 변경시킬 것이다. 엔진은 성능저하로 인해 새로운 작동점에서 작동이 될 것이며, 이에 따른 측정할 수 있는 변수의 변화를 관찰함으로써 손상 정도를 발견할 수 있다. 이러한 방법으로 구성품의 종속변수 사이의 열역학적 관계식과 독립변수의 직접적인 측정으로부터 성능이 저하된 구성품을 분리시키는 것이 가능하다. 종속변수의 변화가 상대적으로 작다고 가정하면 새로운 일련의 방정식들은 테일러 전개에 의해 선형화 될 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.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\text{독립변수 수}} (INDHOL - INDOBS)^2}{\text{독립변수 수}}} \quad (5)$$

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 상태 변화량이 크고 계측변수가 적은 경우에는 다음과 같은 비선형 GPA 기법이 유용하다.

3-2. 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. 2는 Newton-Raphson 반복 기법을 이용한 비선형 GPA 해석방법을 도시한 것이다.[6]

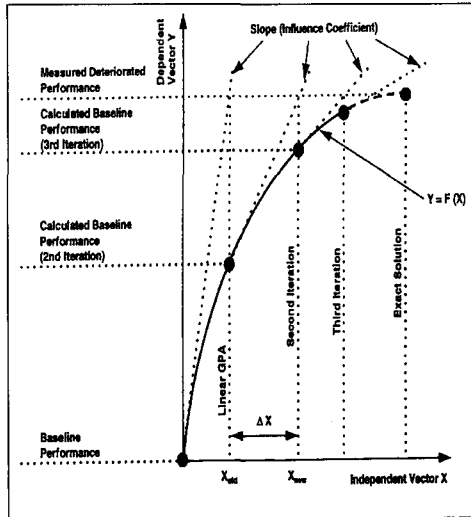


Fig. 1. Simplified illustration of non-linear gas path analysis method

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

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

여기에서 p 는 독립변수의 변화량이며 r 는 수렴을 빠르게 하기 위한 상수이다.

4. GPA의 적용

가스터빈 엔진의 주요구성품에서 가장 쉽게 발견되는 성능저하 원인이 압축기 오염과 터빈부식이다. 압축기 오염은 들어오는 질량유량의 감소와 효율저하를 가져오며 터빈부식은 질량유량의 증가와 효율저하를 가져온다.[4]

본 연구에서는 압축기 오염과 압축기 터빈 및 동력 터빈의 부식이 동시에 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.

4-1. 반복기법에 따른 영향

비선형 GPA 기법에서 적용하는 반복기법에 따른 영향을 알아보기 위해 독립변수의 저하량을 균일하게 나누어 해석한 경우와 Newton-Raphson법을 적용하여 해석한 경우를 비교하였다. 이 때 계측변수는 축마력, 연료유량, 압축기 출구 온도 및 압력, 압축기 터빈 입구의 온도 및 압력, 동력터빈 입, 출구의 온도 및 압력으로 10개를 선정하였다.

해석은 Table 3에서 제시한 3가지 방법으로 수행하였으며 그때의 RMS 오차는 Fig. 3과 같다.

Table. 3 RMS Error Accoding to Analysis Method

선형 GPA	$r = 1$	$r = 0.66$
1.6811	1.7017	1.5924

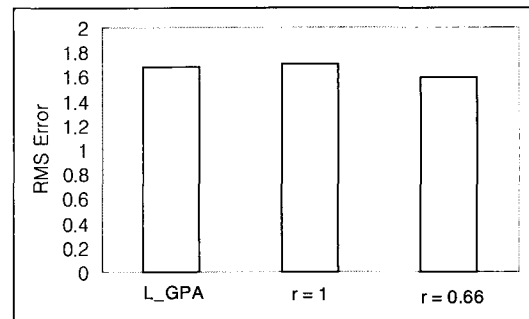


Fig. 3. RMS Error

해석 결과를 살펴보면 독립변수 변화량을 균등

하게 나누어 해석한 결과($r=1$)는 선형 GPA보다 RMS 오차가 크게 나타났으며 $r=0.66$ 을 고려한 비선형 GPA 해석 결과는 선형 GPA보다 더 적은 오차를 보임을 확인하였다.

따라서 해석의 빠른 수렴과 정확성을 위해서는 반복 기법의 선정이 중요하여 적절한 r 의 선택도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

또한 비선형 GPA 기법은 큰 상태 변화량에서 선형 GPA보다 더 정확한 해석 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

4-2. 계측변수 수에 따른 영향

정확한 성능 진단을 위해서는 계측변수의 선정이 중요하다. 많은 계측변수를 사용한다면 보다 정확한 진단이 가능하겠으나 계측변수의 증가는 계측 장비의 증가를 의미하는 것으로 운용 가격의 상승을 가져오게 된다. 또한 항공기의 경우에는 항공기 무게를 증가시키게 된다. 따라서 보다 적은 계측변수를 이용하여 정확한 진단 결과를 얻을 수 있는 계측변수의 선정이 중요하다.

Table 4. Dependent Variable Selection and RMS Error

종속변수	1	2	3
SHP	○		○
MF	○		○
P2	○	○	
T2	○	○	
P3	○	○	○
T3	○	○	○
P4	○	○	○
T4	○	○	○
P5	○	○	
T5	○	○	

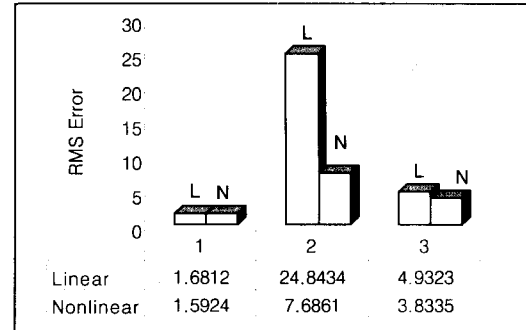


Fig. 4. RMS Error

본 연구에서는 계측변수를 Table 4와 같이 6개, 8개, 10개로 다르게 선정하여 해석하고 RMS 오차를 살펴보았다.

해석 결과 먼저 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 선정한다면 보다 적은 계측장비로도 신뢰성 있는 성능진단을 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 해석 결과는 Fig. 4와 같다.

5. 결 론

터보프롭 엔진의 성능진단을 위한 선형 GPA 및 비선형 GPA(Gas Path Analysis) 프로그램을 개발하고 최적 계측 변수 선정을 위한 해석을 수행하였다. 엔진의 손상은 압축기 오염과 압축기 터빈 및 동력터빈의 부식이 동시에 발생하는 경우를 가정하였다. 먼저 비선형 GPA에서 반복 기법에 대한 영향을 알아보기 위해 독립변수의 저하량을 선형적으로 나누어 반복 해석한 경우와 Newton-Raphson법을 이용하여 해석한 경우를 선형 GPA 해석 결과와 비교하였다. 해석 결과 독립변수 변화량을 균등하게 나누어 해석한 결과($r=1$)는 선형 GPA보다 RMS 오차가 크게 나타났으며 $r=0.66$ 을 고려한 비선형 GPA 해석 결과는 선형 GPA보다 더 적은 오차를 보임을

확인하였다. 따라서 해석의 빠른 수렴과 정확성을 위해서는 반복 기법의 선정이 중요하여 적절한 r 의 선택도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 다음 계측변수 수에 대한 영향을 알아보기 위해 계측변수를 6개, 8개, 10개로 달리하여 각각 선형 GPA 기법과 비선형 GPA 기법을 이용하여 해석을 수행한 후 RMS 오차를 비교하였다. 해석 결과 먼저 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 선정한다면 보다 적은 계측장비로도 신뢰성 있는 성능진단을 수행할 수 있음을 알 수 있었다. 추후 해석의 정확도를 높이기 위한 인공지능 제어 이론의 도입에 대한 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

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