

GPA를 이용한 가스터빈 엔진의 성능진단에 의한 최적 계측변수 선정에 관한 연구

김석균* · Riti Singh* · 공창덕**

Optimal Parameter Selection by Health Monitoring of Gas Turbine Engines using Gas Path Analysis

Sog Kyun Kim* · Riti Singh* · Chang Duk Kong**

ABSTRACT

For performance prediction and diagnostics of gas turbine engines, linear and non-linear gas path analysis are applied. In order to find optimal instrument parameters to detect the physical faults such as fouling, erosion and corrosion, non-linear gas path analysis is used. A typical industrial gas turbine engine, TB5000, is used to study the effect of physical faults on engine performance. Through comparison of RMS error between linear and non-linear gas path analysis, the optimal instrument parameters can be defined. As a result, it is found that the linear GPA has the level of error introduced by the assumption of the linear model can be of the same order of magnitude as the fault being sought while the non-linear GPA can be solved the non-linear relationships between dependent and independent parameters using an iterative method such as the Newton-Raphson method with sufficient accuracy.

초 록

가스터빈 엔진의 성능예측과 진단을 위해 선형 및 비선형 가스경로 해석방법이 적용되었다. 염, 부식, 침식과 같은 물리적 손상을 탐지하기 위한 최적 계측변수를 구하기 위해 비선형 가스경로 해석을 이용하였다. 물리적 손상이 엔진성능에 미치는 영향을 연구하는데 전형적 산업용 가스터빈 엔진인 TB5000에 적용하였다. 선형 가스경로 해석과 비선형 가스경로 해석의 큰 오차 비교를 통해 최적의 계측변수가 정의될 수 있었다. 결과적으로, 선형 가스경로 해석방법은 선형화 모델의 가정에 의해 유도된 오차정도가 손상의 크기와 같은 정도가 되는 반면에 비선형 가스경로 해석방법은 Newton-Raphson 반복기법을 사용하여 독립변수와 종속변수의 비선형 관계를 충분한 정확성과 함께 풀 수 있다는 점을 알 수 있었다.

*Dept. of propulsion, Power, Energy & Automotive Engineering, Cranfield University

**조선대학교 우주항공공학과 (Chosun University, Dept. of Aerospace Engineering)

1. 서 론

1973년과 1979년에 발생한 석유폭황은 가스터빈과 그들의 예비부품, 장비의 가격을 증가시켰다. 그 결과 가스터빈 엔진의 연료소비율, 예비부품 종류의 감소와 기타비용 감소를 통해 엔진 운용가격을 낮추고 엔진의 유용성을 증가 시키려는 연구가 고려되어졌다. 즉 운용가격을 감소시키고 유용성을 증대시킬 수 있는 새로운 정비방식을 고려하게 되었다. 그 결과 엔진상태 감시에 대한 연구는 다음과 같은 주요 목적을 가지고 시도되었다.

- 일정한 시간경과에 따른 엔진오버홀 개념보다는 엔진 상태에 따른 정비방식
- 정확한 계측으로 차후 손상의 예측
- 불필요한 엔진장탈이나 정비의 빈도수의 감소
- 정비팀이 적시에 필요한 작업을 할 수 있도록 하기 위한 엔진의 고장과 손상의 분석
- 불필요한 작업을 없애고 수리작업시 우선 순위를 정함으로써 정비작업 감소

가스터빈의 설계자나 운용자의 목적 중 하나는 엔진의 운용이 안전하고 작동 및 정비가격을 최소화하여 고객에 대한 유용성과 서비스를 극대화 하도록 하는 것이다.(Singh, 1998)

그러한 목적은 가스터빈 시스템의 성능저하의 모든 원인들을 제거하므로써 이루어질 수 있다. 이를 위한 방법중의 하나가 EHM(Engine Health Monitoring)으로 가스터빈 엔진의 전순기 비용을 감소 위한 효과적인 방법으로 알려져있다. 신뢰성 있고 효율적인 EHM은 불필요한 구성품 교체를 피할 수 있으며 엔진 오버홀을 위한 조건을 판단할 수 있으며 더 나은 정비계획과 예비부품의 최소종류를 제공한다.

EHM 기법의 하나인 가스경로해석(GPA : Gas Path Analysis) 방법은 구성품 효율의 감소와 질량 유량의 변화의 향으로 각각의 엔진 구성품들에 대해 엔진성능 저하를 확인할 수 있도록 한다. 저하성능분석(Deteriorated Performance Analysis)은 경제성 분석, 안전한 작동 예측 및 주요 구성품의 잔류 수명예측을 위해 수행된다. GPA를 통해 엔진 사용중에 발생하는 성능저하의 경향을 파악할 수 있으며, 이러한 정보에 바탕을 두고 정비를 계획할 수 있다.

교체용 부품이 정비를 위한 엔진의 탈거 이전에 주문될 수 있으며, 또한 적절한 정비와 수리 작업을 위한 장비와 인력을 사전 준비할 수 있으므로 팩키지와 팀이 결집될 수 있어 down-time을 최소화할 수 있으며, 그 결과 높은 수준의 유용성 유지가 가능하다.

그러나 신뢰성 있는 결과를 위해 일반적으로 GPA는 적절한 독립변수와 종속변수의 선정에 강하게 의존하며 그것은 시행착오에 근간을 둔다. 나아가 정확성을 높이기 위해서는 더 많은 독립변수가 필요하다. 그러나 이는 계측변수의 수와 이에따른 운용가격을 상승시킴으로써 결과적으로 오히려 경제성을 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 선형과 비선형 GPA 기법을 산업용 가스터빈 엔진인 TB5000 엔진에 적용하여 엔진 손상에 따른 성능저하 경향을 살펴보고 최적의 계측변수의 수를 선정하였다.

2. 연구 배경

가스터빈 엔진의 성능진단에 관한 연구는 1970년대 초반부터 시작되었다. 이 분야의 선구자라 할 수 있는 Urban(1973)은 가스터빈 엔진의 상태를 해석할 수 있는 기술적인 선형 GPA기법을 개발하여 특허를 획득하였다. 그의 해석기법은 특정 손상이 가스터빈 엔진의 가스경로의 변수를 감시함으로써 정의될 수 있다는 것이다. 이 방법은 가스유동 구성품들이 특정 손상이 존재할 경우 유량이나 효율 등과 같은 독립성능변수의 저하를 유발시킬 수 있는데 이는 직접 측정이 불가능하므로 측정 가능한 온도, 입력, 회전속도, 추력, 연료유량과 같은 종속변수들을 획득하여, 이 저하성능 종속변수와 독립변수의 변화를 기준 성능변수와 비교하고 두 변수들 사이의 관계 즉 ICM(Influence Coefficient Matrix)을 구함으로써, 이를 이용하여 손상을 예측할 수 있는 것이다.

Smetana(1974)는 터보제트 엔진과 그의 주요 구성품의 열역학적 상태를 파악하기 위해 GPA를 이용하였다. 또한 다양한 계측기에 대해 연구하였다.

Hamilton(1988)은 정성적인 물리학에 기반을 둔

헬리콥터 진단 시스템인 HELIX 시스템을 개발하였다.

엔진의 3대 주요회사들도 자체 진단프로그램 개발에 힘써 Rolls-Royce(1987)는 COMPASS, General Electric(1994)은 TEMPER를 개발하였으며 Pratt&Whitney(1991)는 SHERLOCK 시스템을 개발하였다.

그러나 국내에서는 최근 10여년 엔진 성능예측에 관한 연구는 활발히 진행되어 왔으나 아직 성능진단에 관한 연구는 미흡한 실정에 있다.

3. 성능저하의 원인

전형적으로 엔진에서의 성능저하는 압축기의 오염(Fouling)과 침식(Erosion), 부식(Corrosion) 외부물질에 의한 손상(FOD: Foreign Object Damage), 터빈정익 및 동익의 파손, 막힌 연료노즐, 피로에서 오는 로터 디스크 또는 깃의 크랙 등의 원인이 복합적으로 발생함에 의해 일어난다 대표적인 물리적 손상의 원인이 다음과 같다.

3.1. 오염(Fouling)

압축기 오염은 가스터빈 성능의 감소, 유용동력의 저하, 연료소모량의 증가 등의 원인이 되어왔음은 잘 알려져 왔다. 가스터빈은 많은 양의 공기를 이용하며 들어오는 공기는 다양한 물질이 포함되어 있다. 이에 의해 압축기 깃에 퇴적되고 그 결과 유량의 감소와 깃의 유로형상의 변화를 가져온다. 이렇게 되면 요구되는 출력을 유지하기 위해 압축기 회전속도 증가를 필요로 하고 그것은 터빈입구온도의 상승을 가져와 결과적으로 엔진 수명의 저하를 가져오게 된다.

3.2. 침식(Erosion)

압축기 깃에서 침식의 영향은 앞전을 무디게 하고 뒷전을 얇게 한다. 첫 번째 영향은 입사각을 변화시키게 되고 심한 경우 흐름의 박리를 가져와 압축기 서지를 발생시킬 수 있다. 부식물은 입자의 직경, 질량, 집결, 충돌의 속도에 의해 영향을 받는다. (Tabakoff, 1987)

3.3. 부식(Corrosion)

부식은 에어포일 표면의 거칠기에 따라 정의과 동익의 pitting에서 기인하며 등 엔트로피 효율의 감소에 의해 엔진성능을 저하시킨다. 부식은 또한 영향을 받은 구성품의 피로강도의 저하를 가져온다.

4. GPA(Gas Path Analysis)

GPA는 엔진 내부의 상태를 알기 위해 가스 경로를 따라 주요 엔진변수의 데이터를 측정하고 열역학적 및 수학적 해석을 통해 측정할 수 없는 주요엔진변수를 구해 엔진의 손상을 예측하기 위한 방법이다. 가스터빈 엔진의 성능해석 모델은 구성품 성능도와 에너지와 질량보존의 법칙과 같은 열역학적 관계에 기초하여 구성된다.

구성품 성능도가 정확하게 정의되었다고 가정하면 성능모델은 입력, 온도 등과 같은 측정할 수 있는 독립변수와 효율, 유량과 같은 측정 불가능한 종속변수의 향으로 엔진성능을 나타낼 수 있다.

부식, 오염, 침식, 비틀림 등과 같은 손상은 가스가 지나가는 구성품에 영향을 미치고 독립변수와 종속변수를 변화시킬 것이다. 엔진의 성능이 저하되면 엔진의 작동이 새로운 점에서 조화되어(Matching) 이루어질 것이며 그것은 측정할 수 있는 변수의 변화에 의해 분석될 수 있다. 이러한 방법으로 종속변수들 사이의 열역학적 관계식과 가스경로변수의 직접적인 측정으로부터 성능이 저하된 구성품 성능을 분석하는 것이 가능하다. 이러한 GPA의 기본이론이 Fig. 1과 같다.

종속변수의 변화가 상대적으로 작다고 가정하면 새로운 일련의 방정식들은 Taylor 전개에 의해 선형화될 수 있다. 그러한 선형화된 방정식은 행렬 형태로 표현될 수 있는데 이는 일반적으로 ICM (Influence Coefficient Matrix)으로 불리워진다. ICM의 역행렬을 구하면 FCM (Fault Coefficient Matrix)이 된다. 종속변수의 측정된 변화값과 FCM을 구하면 독립변수의 변화량을 구할 수 있음으로 그 결과 엔진성능저하의 원인을 정의할 수 있다.

GPA는 측정될 수 있는 성능변수인 독립변수와 측정될 수 없는 종속변수의 관계를 선형적으로 가

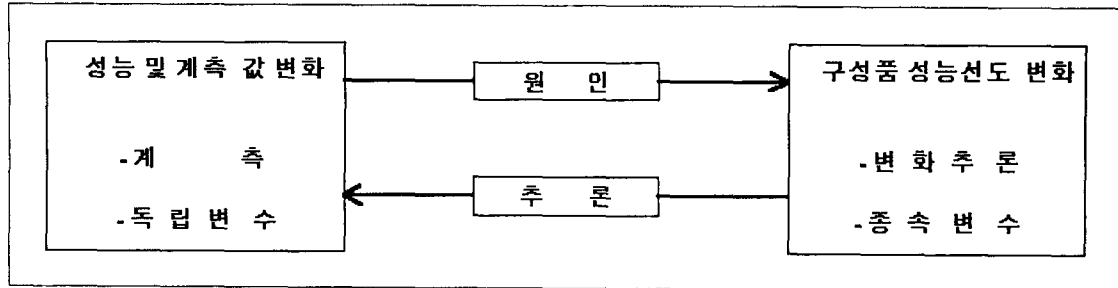


Fig. 1. Health monitoring in gas turbine engine performance

정하여 해석하는 선형 GPA와 비선형성을 고려하여 구간선형보간법을 이용한 비선형 GPA로 구분된다.

4.1. 선형 GPA

선형 GPA는 Urban의 연구에서 그 기초이론을 찾을 수 있다. Urban은 저하된 구성품의 성능을 평가하기 위해 선형미분방법을 개발하였는데 이 방법은 손상계수(Fault Coefficient)를 해석적으로 구하였다. 손상계수가 구해지면 구성품에서의 손상은 계측변수들의 변화로 알 수 있다. 가스경로의 온도, 압력, 연료유량, 로터 회전속도등은 측정될 수 있는 변수이다. 그러한 변수들을 종속변수라고 하며 독립변수의 함수이다. 그 결과 본래의 종속변수의 변화에서 기인한 독립변수의 변화를 해석할 수 있으며 초기조건 또는 기대되는 조건으로부터의 오차를 통해 성능저하 정도를 정의할 수 있다.

이 방법은 열역학의 Taylor 급수 전개와 구성품간의 연속방정식 및 열역학 관계식을 이용하여 이루어진다. 일련의 방정식들이 열역학법칙, 연속방정식, 질량과 에너지 보존법칙, 구성품 성능곡선, 비열비값 등으로부터 유도된다. 계산의 용이함을 위해 모든 종속변수들은 행렬의 형태로 독립변수의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \overline{Ze} &= He \times \overline{Xe} \\ \overline{Ye} &= Ge \times \overline{Xe} \end{aligned} \tag{1}$$

여기에서 \overline{Ze} = 종속변수의 변화량의 열 벡터,

He = 엔진 손상계수의 행렬, \overline{Xe} = 독립변수의 변화량의 열 벡터, \overline{Ye} = 독립 성능 변화량의 열 벡터, Ge = 독립성능계수의 행렬이다.

예를들어 독립 성능 변화량은 연료유량과 축마력으로부터 직접적으로 평가되는 비연료소모율의 변화이다. 행렬의 역에 의한 해는 측정된 변화량으로부터 산출되는 구성품 효율의 저하를 계산하도록 한다.

$$\begin{aligned} \overline{Xe} &= He^{-1} \times \overline{Ze} \\ \overline{Ye} &= Ge \times \overline{Xe} = Ge \times He^{-1} \times \overline{Ze} \end{aligned} \tag{2}$$

이 행렬은 단지 선택된 작동점에 근접한 특정 영역에서만 적용될 수 있다.

Urban은 구하고자 하는 손상을 규명하기 위해 측정 센서의 적절한 조합을 분석하였다.

4.2. 비선형 GPA

복합적인 성능저하를 감시할 수 있는 GPA는 가스터빈의 성능 상태를 연구하기 위한 강력한 도구는 하나 많은 경우에 선형화 모델의 가정에 의해 유도된 오차정도가 손상의 크기와 같은 정도가 되는 제한점을 가지므로, 이를 개선하기 위해 비선형 GPA 기법이 고려되었다. 비선형 GPA의 기본개념은 엄밀해가 구해질 때까지 선형 GPA의 반복적 적용에 의한 것으로 반복기법에는 Newton-Raphson 방법이 사용된다.

행렬은 독립변수의 영향이 구성품 성능을 어떻게 변화시키는지 하는 일련의 함수이다. 수학적 항에서

n 함수 관계 $F_i, i = 1, 2, \dots, n, m$ 종속변수를 포함하는 n $x_j, j = 1, 2, \dots, m$, 그리고 n 종속변수를 포함하는 $y_i, i = 1, 2, \dots, n$:

$$F(x) = y \tag{3}$$

여기에서 x 는 전체벡터 x_i 를 표시하며 y 는 전체 벡터 y_i 를 나타내며 F 는 함수 F_i 의 전체 벡터를 나타낸다. x 의 영역에서 만일 작은 변화 δx 를 가정하면

$$\begin{aligned} F(x + \delta x) &= y + \delta y \\ F(x + \delta x) &= F(x) + \delta y \end{aligned} \quad \text{or} \tag{4}$$

단일변수함수 $g(a)$ 를 위해 작은 변화 b 에 의한 변수에 대한 Taylor 급수 전개를 하면

$$\begin{aligned} g(a + b) &= g(a) + b \cdot g'(a) \\ &+ \frac{b^2}{2!} \cdot g''(a) + \frac{b^3}{3!} \cdot g'''(a) + \dots \end{aligned} \tag{5}$$

그 결과 식 (4)를 다시 쓰면

$$F(x + \delta x) = F(x) + J \cdot \delta x + H. O. T \tag{6}$$

여기에서 Jacobean 행렬 기호는 행렬함수 $F(x + \delta x)$ 의 테일러 급수전개에서 일차도함수를 정의하는데 사용되었다. 그 결과

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_m} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_m} \end{pmatrix}$$

$$\text{and } \delta x = \begin{pmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \vdots \\ \delta x_m \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

여기에서

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x) \\ y_2 &= f_2(x) \\ &\vdots \\ y_n &= f_n(x) \end{aligned} \quad \text{and } x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} \tag{7}$$

만약 x 의 변화량이 작다면 우리는 2차항과 고차항(H.O.T)을 무시할 수 있다. 그 결과 식 (6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(x + \delta x) = F(x) + J \cdot \delta x \tag{8}$$

식 (4)와 (8)을 다시 정렬하면

$$\delta y = F(x + \delta x) - F(x) = J \cdot \delta x \tag{9}$$

행렬 식 (10)은 J 의 역행렬을 구하므로써 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} J^{-1} \cdot \delta y &= J^{-1} \cdot J \cdot \delta x \quad \text{or} \\ J^{-1} \cdot \delta y &= \delta x \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 J 는 ICM(Influence Coefficient Matrix)이며 역행렬 J^{-1} 는 FCM(Fault Coefficient Matrix)로 Fig. 2의 기울기를 나타낸다.

따라서 x_{new} 는 δx 로 x_{old} 를 보정하므로써 다음과 같이 구해진다.

$$x_{new} = x_{old} + \delta x \tag{11}$$

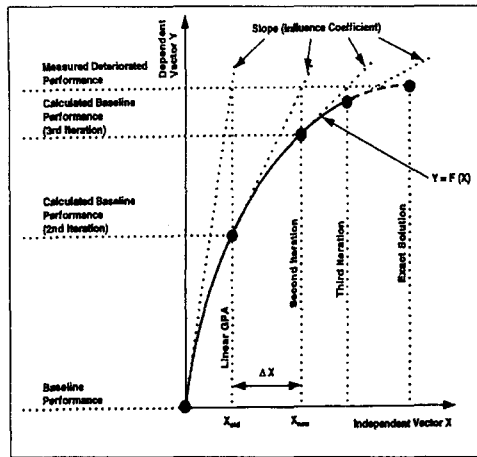


Fig. 2. Simplified illustration of linear and non-linear gas path analysis method

그리고 위의 반복은 엄밀해에 수렴할 때까지 반복된다.

이러한 반복과정으로 δx 의 변화율이 작아야만 한다는 선형 GPA의 문제점을 극복하였다. 비선형 방정식들을 수치적으로 계산하는데 식 (11)이 이용되는데 각 단계의 선형 GPA 계산을 위해서는 Fig. 2에서와 같이 적절한 기준성능이 요구된다. 첫 번째 계산에서는 실측된 기준성능이 사용되며 이에 따라 정의되어진 기율기 J와 Fig. 2에서와 같은 새롭게 정의되어진 기준성능을 이용하여 새로운 δx 를 계산하며 그에 따른 ICM을 계산한다. 이렇게 두 번째 반복 이후에서는 계산된 기준성능을 사용하며 이러한 과정을 반복하여 수렴할 때까지 수행한다.

4.3. 비선형 GPA를 위한 독립변수와 종속변수의 선정

GPA는 독립변수와 종속변수의 선정을 요구한다. 엔진운용 중 모든 독립변수가 변화를 일으키지는 않는데 이러한 이유는 좀처럼 발생하지 않는 손상과 연관된 독립변수의 변화는 나타나지 않기 때문이다. 이때 독립변수는 미분방정식으로부터 제외될 수 있으며 따라서 감지되지 않는 모든 종속변수는 식으로부터 제외될 수 있다. 그러나 감지되는 종속변수의 수가 작아질수록 엔진 손상의 정확한 탐지의 가능성

을 감소시킬 수 있다. 따라서 성능을 정확하게 예측하기 위해서는 종속변수의 적절한 선정이 요구되며 이는 식에서 독립변수와 연관된다.

5. 산업용 가스터빈에의 적용

본 연구에서는 엔진의 성능에 미치는 손상의 영향을 살펴보기 위해 TB5000과 같은 전형적인 산업용 가스터빈이 고려되었다. 이 엔진은 Ruston(현재 European Gas Turbine Ltd.에서 산업용으로 개발한 분리축 방식의 터보축 엔진으로 천연가스 등을 포함한 다양한 종류의 연료들을 이용할 수 있으며 역방향 실린더 연소실은 점점과 취급에 용이하게 구성되어 있다. 터빈 블레이드와 같은 고온 고압의 부품들은 그 수명이 40,000 시간에 달하며 전체적인 오버홀에는 75,000 시간이라는 긴 수명을 가지고 있다. 가변입구 안내 깃과 압축기의 블리드 공기를 이용한 공냉식 터빈 블레이드를 장착하고 있으며 동력 터빈은 변속이 가능하여 압축기, 펌프, 발전기 등에 적합하다. TB5000은 설계점에서 3.8 MW를 생산하고 26.5%의 열효율을 가지며 압축기의 압력비가 7.3일 때 20.78kg/s의 공기유량이 요구되며, 터빈 입구온도는 약 1173K이다. 엔진의 개략도는 Fig. 3과 같다.

엔진 성능저하의 영향을 모사하기 위해 산업용 가스터빈 엔진에서 가장 일반적인 성능저하의 원인인 압축기 오염과 터빈 침식이 선택되었다. 그들은 산업용 가스터빈 엔진에서 가장 일반적인 성능저하의 원인이다. Diakunchch는 1992년에 발표한 그의 논문에서 이러한 산업용 가스터빈 엔진의 압축기 오염과 터빈 침식에 따른 성능 저하량을 실험을 통해 정리하였다.^[4] 이에 근간을 두고 본 연구에서는 압축기 오염과 터빈 침식에 대해 다음과 같은 성능저하를 가정하였다.

첫째 저압 및 고압 압축기의 오염시에 무차원 질유량 $\Delta \Gamma_c$ 는 5%정도 감소하고 등엔트로피 효율 $\Delta \eta_c$ 은 1% 감소하며, 둘째 압축기터빈과 동력터빈의 침식시에는 무차원 질량유량 $\Delta \Gamma_t$ 는 2%정도 증가하고 등엔트로피 효율 $\Delta \eta_t$ 는 1%정도 감소한다.

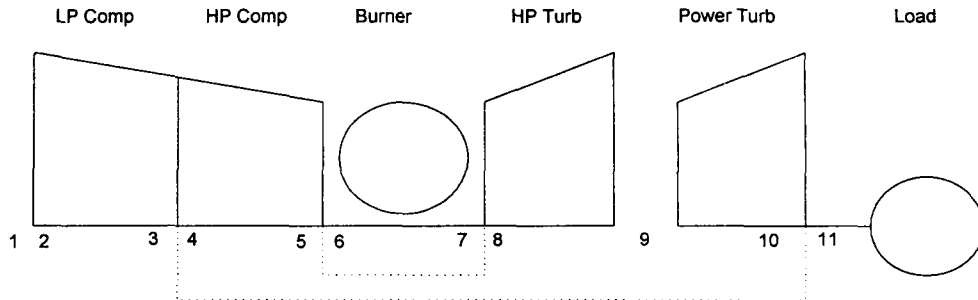


Fig. 3. TB5000 schematic layout and station numbering (--- cooling)

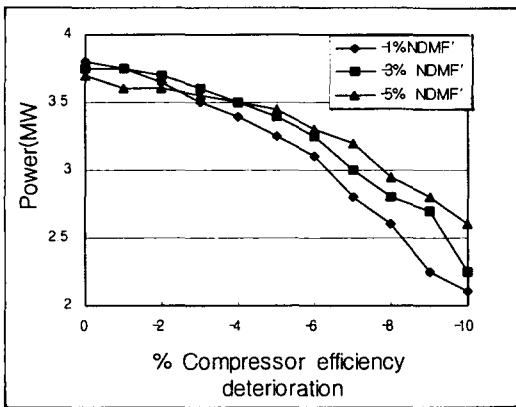


Fig. 4. TB5000 Power variation due to variation of compressor efficiency and NDMF

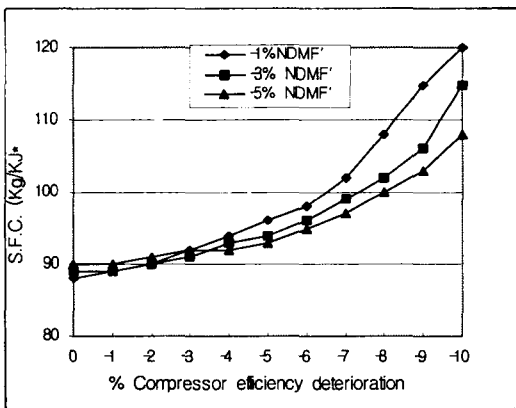


Fig. 5. TB5000 S.F.C. variation due to variation of compressor efficiency and NDMF

Fig. 4와 Fig. 5는 압축기의 오염으로 NDMF (Non-dimensional mass flow)가 각각 1%, 3%, 5% 감소하고 동시에 압축기 효율이 0%에서 10% 까지 저하한 경우 탈설계점 전용프로그램인 TURBOMATCH (Palmer JR, 1983)를 이용하여 TB5000 엔진 출력 저하와 연료소모율(S.F.C ; Specific Fuel Consumption Rate)증가의 성능해석결과를 나타낸다.

그 결과 압축기 효율을 0에서 3%까지 감소시켰을 때는 무차원 질유량이 크게 감소한 경우가 더 큰 출력저하와 동시에 비연료소모율 증가를 보였다. 그러나 압축기 효율이 3%에서 10%까지 감소되었을 때는 무차원 질유량이 -1%로 아주 작게 감소했을 때가 더 큰 출력저하와 비연료소모율을 보였다. 이는 압축기 성능저하에 있어서는 단순한 열역학적 해석만으로는 예측이 불가능하며 특히나 압축기의 효율변화에 더 민감하다는 것을 보여주는 결과이다.

또한 진단의 정확성의 정량적인 비교를 위해 RMS(Root Mean Square) 오차를 다음과 같이 계산한다. RMS 오차의 값이 적을수록 진단의 정확성은 더 높다는 것을 의미한다.

$$RMS_{error} = \sqrt{\frac{1}{m}(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_n^2)} \quad (12)$$

여기에서 m은 독립변수의 수이며 n은 종속변수의 수이다. δ 은 가정된 독립변수와 탐지된 독립변수 사이의 차이이다.

Table 1은 저압압축기 오염(ΔT_c 5%감소, η_c 1%감소의 전형적인 경우)을 탐지용 측정종속변수

Table 1. Dependent parameter selection for TB5000

| Case | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PR1 | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # |
| N1 | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # |
| P3 | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # |
| T3 | | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # |
| PR2 | | | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # |
| P5 | | | | # | # | # | # | # | # | # | # | # | # |
| T5 | | | | | # | # | # | # | # | # | # | # | # |
| WF | | | | | | # | # | # | # | # | # | | |
| T9 | | | | | | | # | # | # | # | # | | |
| P9 | | | | | | | | # | # | # | # | | |
| T10 | | | | | | | | | # | # | # | # | # |
| P10 | | | | | | | | | | # | # | # | # |
| SHP | | | | | | | | | | | # | | # |
| RMS Error | | | | | | | | | | | | | |
| Linear | 11.89 | 1.104 | 1.046 | 1.027 | 1.096 | 15.92 | 18.28 | 18.52 | 1.794 | 1.773 | 1.164 | 12.85 | 29.66 |
| Non-Linear | 7.944 | 0.925 | 0.898 | 0.886 | 0.911 | 1.612 | 10.78 | 7.282 | 0.028 | 0.018 | 0.022 | 27.11 | |

Table 2. Effect of multiple faults with 6 instruments set

| Case | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|-----------|-------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| NDM_c1 | # | # | | | | | # | # | # | # |
| Eff_c1 | # | # | | | | | # | # | # | # |
| NDM_c2 | | # | # | | | | | # | | # |
| Eff_c2 | | # | # | | | | | # | | # |
| NDM_t1 | | | | # | # | | # | # | # | # |
| Eff_t1 | | | | # | # | | # | # | # | # |
| NDM_t2 | | | | | # | # | | | # | # |
| Eff_t2 | | | | | # | # | | | # | # |
| RMS Error | | | | | | | | | | |
| Linear | 1.027 | 0.8464 | 0.87134 | 1.24677 | 1.21492 | 0.8567 | 1.45101 | 1.92824 | 1.4228 | 1.58797 |
| Non-Lin | 0.886 | 1.2087 | 0.8883 | 20.9134 | 1.0537 | 0.77583 | 1.24832 | 4.5791 | 1.3253 | 1.58678 |

set을 선정하기 위한 13가지 case에 대해 선형 및 비선형 GPA를 수행한 후 RMS 오차를 비교한 것이다. 여기서 case 1~case 11의 경우 비선형 GPA가 선형 GPA보다 RMS 오차가 낮아 효과적임을 알 수 있고 case 12는 오히려 선형 GPA의 RMS 오차가 효과적이며 case 13의 비선형의 경우는 수립하지 않았다. 분석결과 case 9, 10, 11의 경우가 가장 오차가 적으나 측정변수가 너무 많아 비경제적인 것이 결점이고 case 3, 4, 5 경우가 측정변수가 상대적으로 적으면서 오차가 적으므로 효과적인 측정변수 set이라고 할 수 있다.

그러나 앞의 해석 결과는 저압압축기의 오염만을 고려한 것이며, 실제의 경우에는 고압압축기의 오염, 압축기터빈이나 동력터빈의 침식(Erosion)이 동시에 일어날 수 있으므로 이러한 다중손상에 관한 분석도 이루어져야만 할 것이다.

저압압축기에서 선정된 6개의 측정변수를 갖는 case 4와 12개의 측정변수를 갖는 case 10을 가지고 여러 경우(case A~case J)의 다중손상 경우의 선형 GPA와 비선형 GPA를 수행하여 RMS 오차를 비교하였다.

Table 2는 6개 측정변수인 경우의 각기 다른 다

Table 3. Effect of multiple faults with 12 instruments set

| Case | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|-----------|-------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| NDM_c1 | # | # | | | | | # | # | # | # |
| Eff_c1 | # | # | | | | | # | # | # | # |
| NDM_c2 | | # | # | | | | | # | | # |
| Eff_c2 | | # | # | | | | | # | | # |
| NDM_t1 | | | | # | # | | # | # | # | # |
| Eff_t1 | | | | # | # | | # | # | # | # |
| NDM_t2 | | | | | # | # | | | # | # |
| Eff_t2 | | | | | # | # | | | # | # |
| RMS Error | | | | | | | | | | |
| Linear | 1.773 | 1.6842 | 1.3938 | 0.3335 | 0.03688 | 0.07022 | 1.7304 | 2.0028 | 1.9009 | 1.76564 |
| Non-Lin | 0.018 | 0.01567 | 0.0173 | 0.01415 | 0.02114 | 0.02063 | 0.02105 | 0.1551 | 0.00718 | 0.01133 |

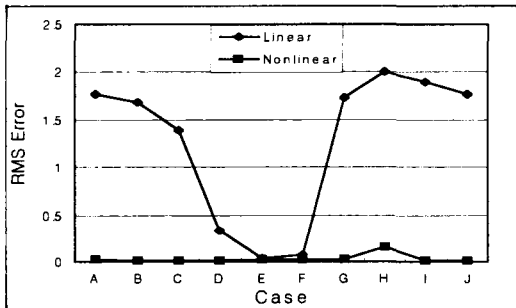


Fig. 6. Comparison of RMS error between linear and non-linear GPA with 7 instruments set for TB5000

중손상경우를 분석한 경우로 오히려 선형 GPA 경우가 안정된 해를 가짐을 알 수 있으나 오차 범위가 다소 큰 것이 결점이다.

Table 3와 Fig 6는 12개 측정변수를 갖는 경우로 모든 다중손상경우에 비선형 GPA가 매우 낮은 오차를 보이므로 보다 정확한 다중손상예측을 위해서는 12개의 측정변수를 선정하여 비선형 GPA를 사용해야 한다. 이 경우 측정변수 증가로 인한 계측시스템의 복잡성과 경제성이 좀 더 검토 되어야 할 것이다.

6. 결 론

선형 및 비선형 GPA 기법을 이용한 가스터빈 엔

진의 성능예측 및 진단을 연구하고 전형적 산업용 가스터빈 엔진인 TB5000에 적용하여 최적의 계측 변수를 정의하였다.

물리적인 손상으로는 압축기 오염과 터빈의 침식을 가정하였으며 선형 GPA와 비선형 GPA의 결과를 비교한 결과 비선형 GPA의 경우 오차가 적어 신뢰성이 높음을 확인할 수 있었다.

최적의 계측변수는 12개의 변수(PR_1 , N_1 , P_3 , T_3 , PR_2 , P_5 , T_5 , WF , T_9 , P_9 , T_{10} , P_{10})를 갖는 경우로 비선형 GPA를 이용시 RMS오차가 0.15% 미만이었다.

그러나 이 경우 계측 변수가 다소 많으므로 시스템이 복잡하고 경제성을 감소시킬 수 있으므로 추후 시스템의 신뢰성과 비교 검토 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 RRC 수송기계부품센터의 지원으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Singh, R., "Managing gas Turbine Availability, Performance and Life usage

- Via Advanced Diagnostics”, Invited Keynote Paper at The Rotating Equipment in the Power Industry Conference, Amsterdam, 24~26, 1998
2. Urban, L. A., “Parameter Selection for Multiple Fault Diagnostics of Gas Turbine Engines”, AGARD-CP-165, 1974
 3. Escher, P. C., “Pythia: An Object-Oriented Gas Path Analysis Computer Program for General Applications”, Ph.D. Thesis, Cranfield University, UK, 1995
 4. Diakunchak, I. S., “Performance Deterioration in Industrial Gas Turbines, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power”, Vol.114, pp.161~168, 1992
 5. Saravanamutto, H. I. and Lakshminarasimha, A. N., A “Preliminary Assessment of Compressor Fouling”, Paper No. ASME 85-GT-153; Turbomachinery International, pp.14~18, 1985
 6. Tabakoff, W., “Compressor Erosion and Performance Deterioration, Journal of Fluids Engineering”, Vol.109, pp.297~306, 1987
 7. Palmer J.R. “The TURBOMATCH Scheme for Gas Turbine Performance Calculation-User’s Guide”, CIT, 1983
 8. Smetana, F.O., “Turbojet Engine Gas Path Analysis - A Review” in AGARD-CP-165, 1974
 9. Hamilton, T.P., “HELIX: A Helicopter Diagnostic System Based on Qualitative Physics”, Artificial Intelligence in Engineering, Vol.3, No.3, pp.141~150, 1988
 10. Barwell, M.J., “COMPASS-Ground Based Engine Monitoring Program for General Application”, SAE-TP-871734, 1987
 11. Doel, D.L., “TEMPER-A Gas-Path Analysis Tool for Commercial Jet Engines” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.116, pp.82~89, 1994
 12. Winston, H., et al, “Integrating Numeric and Symbolic Processing for Gas Path Maintenance”, AIAA-91-501, 1991