

# 퍼지 경향 감시 기법을 이용한 무인기용 터보팬 엔진의 손상 탐지에 관한 연구

공창덕\* · 고성희\* · 기자영\*\* · 고한영\*\*\*\* · 오성환\*\*\* · 김지현\*\*\*

## A Study on Fault Detection using Fuzzy Trend Monitoring Technique of UAV Turbofan Engine

C. D. Kong\* · S. H. Kho\* · J. Y. Ki\*\* · H. Y. Kho\*\*\*\* · S. H. Oh\*\*\* · J. H. Kim\*\*\*

### ABSTRACT

In this study a fuzzy trend monitoring method for detecting the engine mechanical faults was proposed through analyzing performance trends of measurement data. The trend monitoring is an engine conditioning method which can find engine faults by monitoring important measuring parameters such as fuel flow, exhaust gas temperatures, rotational speeds, vibration. etc.

Using engine condition data set as a input which generated by linear regression analysis of real engine instrument data, an application of fuzzy logic in diagnostics estimate a cause of fault in each components.

### 초 록

본 연구에서는 계측 데이터의 성능 추이를 분석하여 엔진의 기계적 결함 여부를 탐지하기 위한 퍼지 경향감시 방법을 제안하였다. 경향감시 방법은 연료유량, 배기가스 온도, 로터회전수, 진동수와 같은 중요 엔진 파라미터를 모니터링하여 시간에 따른 변화를 분석하여 엔진 상태를 진단하는 것이다.

선형회귀분석을 통해 엔진 상태 변화를 수식화하고 퍼지 로직을 통해 진단 결과를 분석하여 예측되는 손상 원인을 제시한다.

Key Words: Linear Regression Analysis(선형회귀분석), Trend Monitoring(경향감시), Fuzzy Logic(퍼지 로직), Fault Detection(손상탐지)

### 1. 서 론

엔진 성능진단은 엔진 운용 시 외부 이물질 등의 흡입으로 압축기 블레이드의 일부 손상, 장기간 운용 시 발생할 수 있는 열응력, 열 부식에 의한 터빈 블레이드 손상, 동력 축 베어링 마모에 의한 축간 진동 및 파손 등 심각한 성능저하를 야기 시킬 수 있는 징후를 예측하기 위해 수

\* 조선대학교 항공우주공학과

\*\* (주)이지가스터빈 R&D

\*\*\* 국방과학연구소

연락처, E-mail: young@ezgtc.com

행된다.

엔진의 상태진단 방법에는 추진시스템의 성능 모델을 만들고 실제 계측된 엔진 성능과 비교하여 엔진의 현재 상태를 정량적으로 파악하는 모델 기반(Model Based) 상태진단 방법과 정성적으로 기계적 결함을 탐지하는 방법이 있다. 전자는 주로 압축기, 터빈과 같이 가스가 통과하는 주요 구성품의 상태를 파악하는데 이용되는데 이는 다른 부분품의 기계적 손상을 탐지하는데는 한계가 있다. 또한 계측변수가 많을 수록 정확한 진단 결과를 얻을 수 있으나 항공기의 경우에는 제약이 많이 따르므로 보다 정확한 판단을 위해서는 부가적인 진단 기법이 필요하다[1].

시간에 따른 엔진 계측 변수들의 추이를 분석하여 엔진 상태를 진단하는 경향감시(Trend Monitoring) 기법은 주요 구성품 뿐만 아니라 진동특성 등의 분석을 통한 부분품의 기계적 결함 탐지부터 오랜 시간 축적된 전문 지식을 바탕으로 한 엔진 상태 예측까지 폭넓게 응용될 수 있다[2].

이에 본 연구에서는 터보팬 엔진의 계측 데이터를 이용하여 엔진의 상태를 감시하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 모니터링된 계측 데이터들은 매우 비선형적인 특성을 가지므로 이를 효과적으로 분석하여 엔진 상태에 대한 진단 결과를 제시하기 위하여 퍼지로지식을 적용하였다.

## 2. 연구대상 엔진의 계측 데이터

연구대상 엔진은 Pratt-Whitney 사의 JT8D 터보팬 엔진으로 바이패스비는 0.96~1.74, 전체 압력비는 15.4~21이며 14,000에서 21,000 lb의 추력을 낸다. 이 엔진의 주요 계측데이터는 저압 및 고압 로터, 배기가스 온도, 연료유량, 진동 등이다. 이 엔진의 압축기에 오염이 발생하였을 때 계측데이터는 시간에 따라 Fig. 1과 같은 변화를 보인다. 시간에 따른 계측데이터의 변화를 살펴보면 압축기에 오염이 발생하였을 경우 연료소모량이 증가되었다가 세척 후 다시 줄어드는 것을 볼 수 있다. 반면 로터회전수의 변화나 진동

수의 변화는 그리 크지 않다[2].

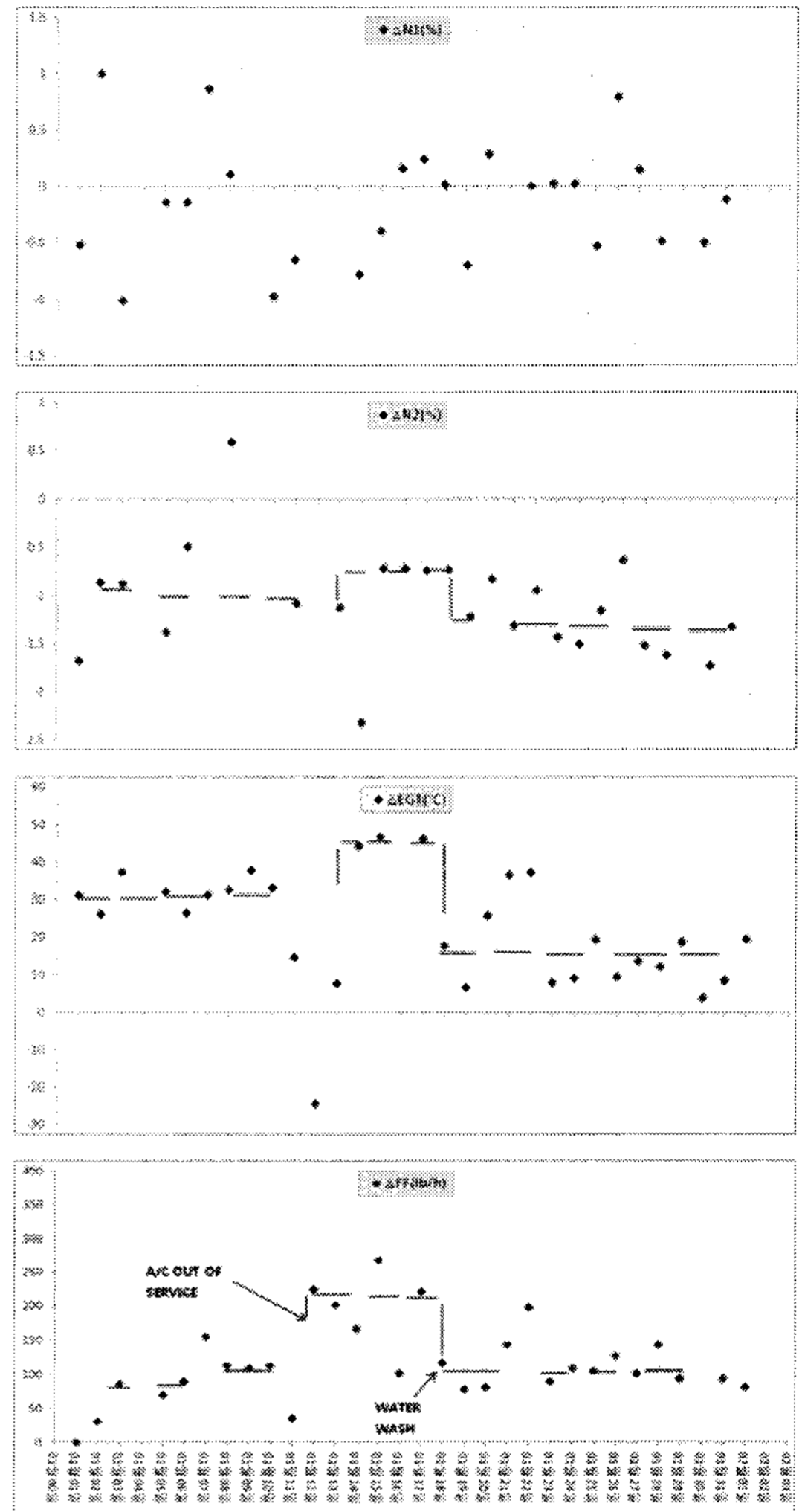
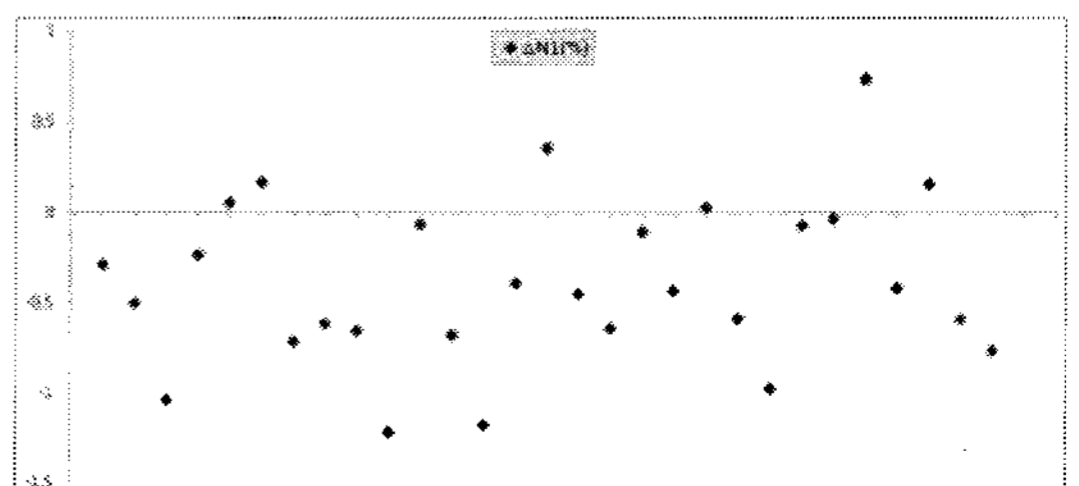


Fig. 1 Instrument Parameter Variation with Compressor Contaminants

다른 예로 베어링에 손상이 일어날 경우 Fig. 2와 같은 경향을 보인다.



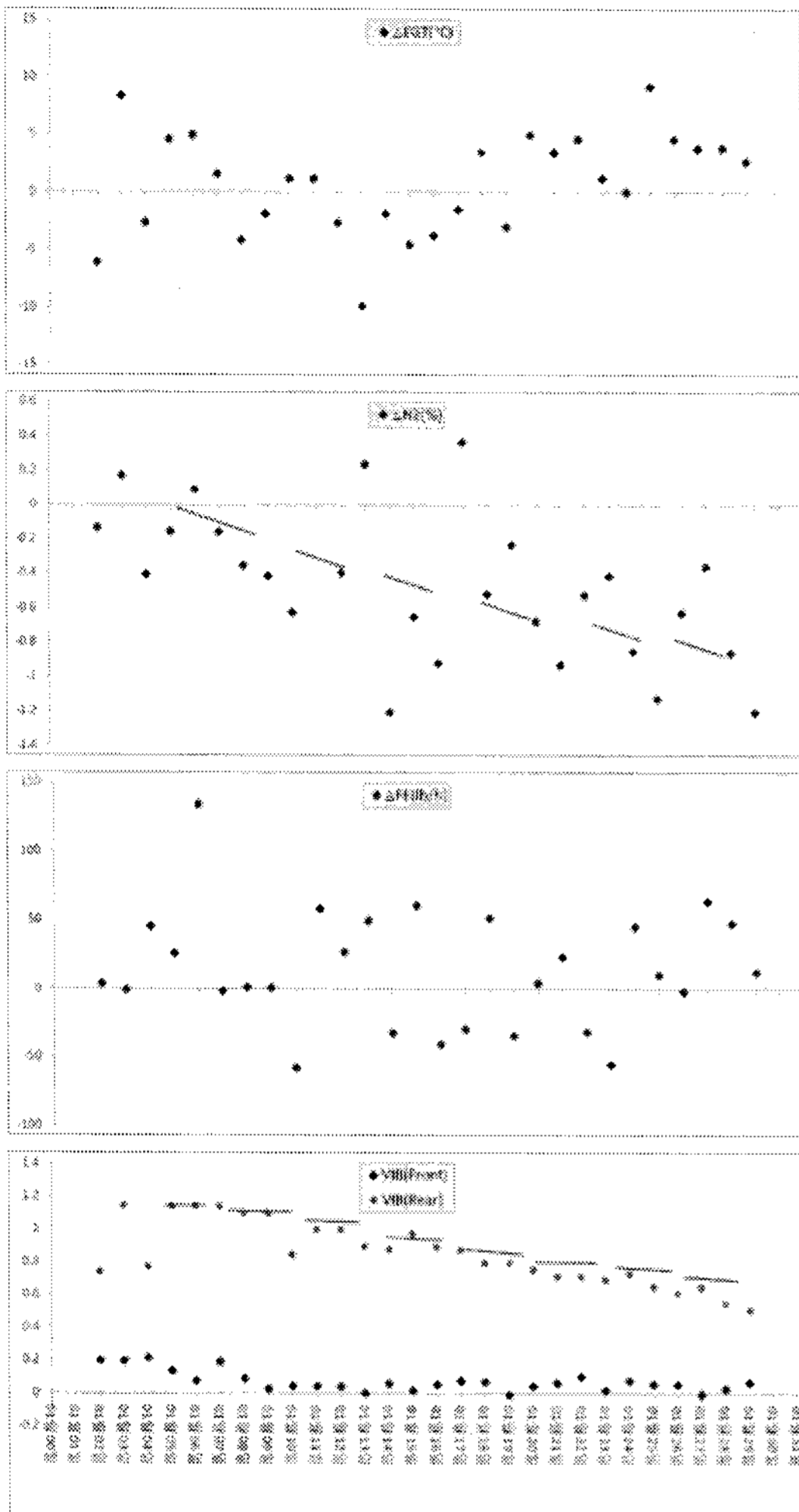


Fig. 2 Instrument Parameter Variation with Bearing Failure

베어링에 손상이 발생하면 저압로터 회전수가 많이 감소되며 전방 로터 진동수가 감소되는 특성을 확인할 수 있다.

이와 같이 계측파라미터들의 변화 추세를 분석하면 압축기 오염이나 연소기의 변형, 덕트, 베어링 등의 기계적 결함, 센서 손상까지 고장 유무를 진단할 수 있다.

### 3. 퍼지를 이용한 경향감시 알고리즘

위와 같은 계측데이터들을 이용하여 엔진의 고장 여부를 판단하기 위해서는 먼저 다양한 엔진 상태에서 계측된 파라미터들의 데이터베이스를 구축하여야 한다. 다음 선형 회귀분석을 통해 모니터링된 파라미터의 변화 추세를 분석한다[3].

회귀분석으로부터 얻어진 기울기 값으로 퍼지 로직을 이용하여 진단을 위한 퍼지규칙을 생성한다. 퍼지는 물리적인 변화의 정도를 나타내줄 수 있으며 엔진 상태에 대한 분석 결과를 0에서부터 1까지 범위의 값으로 제시하여 가능성이 높은 손상 원인에 1에 가까운 값을 부여한다.

선형 회귀분석을 통해 Fig. 1과 Fig. 2를 포함한 7가지 엔진 손상에 대한 계측파라미터 변화에 대한 추세 기울기를 구한 결과가 Table 1과 같다. 기울기 값을 분석하면 계측 파라미터 값의 증가, 감소 정도를 정량적으로 비교할 수 있다.

Figure 3은 이와 같은 퍼지 경향감시 알고리즘을 나타낸 것이다.

Table 1. Trend Slope of Monitoring Data using Linear Regression Analysis

	$\Delta Ng$	$\Delta EGT$	$\Delta Np$	$\Delta FF$	Vib_front	Vib_rear
Bleed Duct	-0.0208	3.2479	0.0817	18.4233	0	0
Compressor	-0.0031	0.1898	0.0008	9.6802	0	0
Combustor	-0.0533	1.0948	-0.0651	5.4163	0.0055	0.0089
Nozzle GV	-0.0331	0.9785	-0.0510	-4.2717	0.0182	0.0179
Turbine Case	-0.0015	0.2327	-0.0414	3.9566	0.0131	-0.0072
Bearing	0.0116	0.1682	-0.0297	-0.4566	-0.0046	-0.0187
Exhaust System	-0.0429	0.1966	0.0202	0.0527	0	0

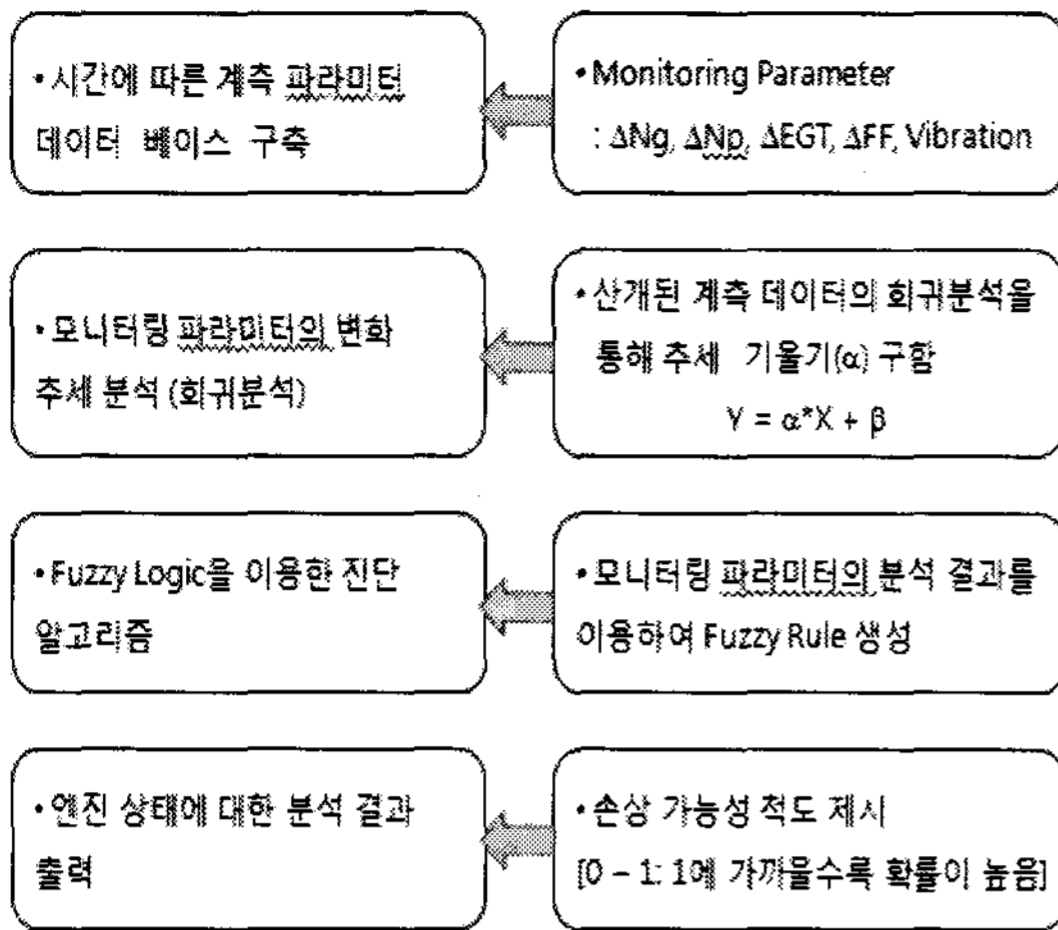


Fig. 3 Fuzzy Trend Monitoring Algorithms

MATLAB을 이용하여 Fig. 4와 같은 퍼지 추론 시스템을 개발하였다[4]. 퍼지추론에는 'MAMDANI' 이론을 적용하였으며 비퍼지화에는 'Centroid' 기법을 이용하였다. 퍼지 로직의 입력 변수는 다음 6가지의 계측 변수이다.

- 고압로터 회전수 (Ng)
- 배기가스 온도 (EGT)
- 저압로터 회전수 (Np)
- 연료유량 (FF)
- 전방 진동수 (Vib\_f)
- 후방 진동수 (Vib\_r)

출력 변수는 다음 7가지의 손상 원인이다.

Table 2. The Cases of Engine Fault State

Case 1	Cracked bleed duct
Case 2	Compressor contamination
Case 3	Deformed combustion chamber
Case 4	Nozzle guide vane failure
Case 5	Turbine case separation
Case 6	Bearing failure
Case 7	EGT instrumentation system error

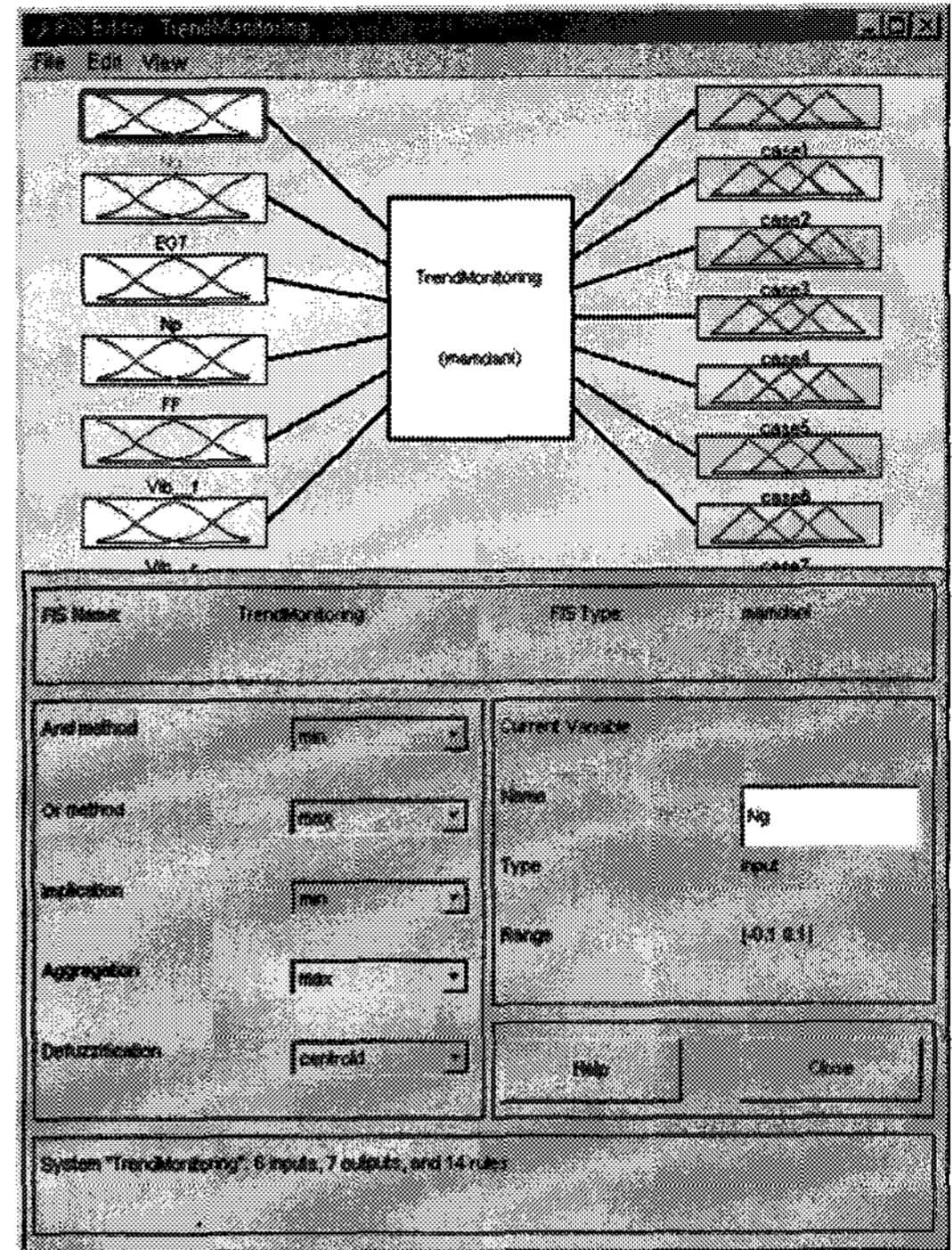


Fig. 4 Fuzzy Inference System for Turbofan Engine Trend Monitoring

#### 4. 터보팬 엔진의 퍼지 경향 감시 결과

6가지 계측변수의 회귀분석을 통해 얻어진 기울기 값이 Table 3과 같을 때 퍼지경향 감시를 통해 엔진 손상을 진단한 결과 예상되는 손상 원인의 가능성 척도가 Table 4과 같다.

Table 3. Trend Analysis of Instrument Data

Instrument Data	Slope (α)	
	A	B
Ng	-0.02	0.05
EGT	3.02	0.1
Np	0.08	-0.03
FF	16.03	-1.03
Vib_f	0.02	-0.005
Vib_r	0.02	-0.01

Table 4. The Results of Trend Monitoring using Fuzzy

	A	B
Case 1	0.905	0.250
Case 2	0.750	0.108
Case 3	0.500	0.108
Case 4	0.095	0.75
Case 5	0.095	0.500
Case 6	0.095	0.893
Case 7	0.500	0.107

계측 데이터의 회귀분석을 통한 기울기 값이 'A'와 같을 경우 고압로터 회전수가 감소하고 연료유량의 증가가 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이 데이터를 퍼지 경향감시 알고리즘을 통해 분석한 결과 Case 1이 1에 가장 가까워 손상 원인이 될 확률이 가장 높은 것을 알 수 있다. 즉 'A'의 경우 블리드 덕트에 크랙이 발생했을 가능성이 가장 높으며 다음 원인으로서는 압축기 오염 발생을 예상해 볼 수 있다.

'B'의 경우에는 저압로터 회전수와 연료유량이 감소하는 특징을 보이며 전, 후방 진동수 역시 감소 특성을 보인다. 계측 데이터의 추세가 이러한 특성을 보이는 경우 Case 6, 즉 베어링 손상이 원인일 가능성이 가장 높으며 Case 4, 즉 노즐 가이드 베인의 손상 가능성도 의심해 볼 수 있다.

## 5. 결 론

중고도 무인기 추진시스템의 손상 탐지를 위한 경향감시 방법을 제안하였다. 선형회귀분석을 통해 로터회전수, 연료유량, 배기가스온도, 진동수 등과 같은 계측변수의 변화 추세를 분석하고 기존의 손상에 따른 계측 파라미터 데이터 베이스를 이용하여 만든 퍼지 알고리즘에 적용하여 손상 원인을 예측하였다. 연구 결과 퍼지 경향감시 기법은 가능성이 높은 손상 원인부터 그 정도를 정량적으로 나타내어 엔진 상태 진단에 효율적일 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 중고도무인기 개발사업 위탁연구 결과 중 일부임

## 참 고 문 헌

1. Urban, L.A., "Gas Path Analysis Applied to turbine Engine Condition Monitoring", J. of Aircraft, Vol. 10, No. 7, pp. 400~406, 1972
2. Treager, I.E., "GLENCOE Aviation Technology Series - Aircraft Gas Turbine Engine Technology", McGraw-Hill
3. 임종수, "Matlab's Power", 도서출판 아진, 2002
4. "MATLAB - Fuzzy Logic Toolbox", Mathworks