

〈논 문〉

## 퍼지이론을 이용한 회전기계의 진동진단법

양보석\* · 전순기\*\* · 김호종\*\*\*

(1995년 3월 17일 접수)

### Vibration Diagnosis Method for Rotating Machinery Using Fuzzy Theory

Bo-Suk Yang, Soon-Ki Jun and Ho-Jong Kim

**Key Words :** Vibration(진동), Rotating Machinery(회전기계), Diagnosis(진단), Fuzzy Theory(퍼지이론), Membership Function(멤버쉽함수)

#### Abstract

Large scale plants are equipped with a number of the rotating machineries which occupy important positions in the plant system. Therefore, the most important one is a vibration diagnostic technology which can detect quickly any abnormal symptom of operating malfunction and give operational and inspection guides adequately. A new diagnosis method is developed in this paper, in which the fuzzy set theory is introduced to diagnose the defects of rotating machinery. The selection of membership function and the fuzzy operation model are discussed in detail here. The system is successfully used for various defects diagnosis of rotating machinery. The results indicate that realistic application can be built using this approach.

#### 1. 서 론

각종 산업 및 발전프랜트 등에는 많은 회전기계가 설치되어 사용되고 있다. 이들 회전기계는 플랜트 내에 중요한 위치를 차지하고 있기 때문에 기계의 신뢰성 및 가동률 향상을 위해 기계를 정기적으로 정지하고 점검하는 「정기진단」을 수행하고 있다. 이 방법으로는 이상의 조기발견이 곤란할 뿐만 아니라 정상적으로 기능을 발휘하고 있는 기계를 정지하는 것에 의해 오히려 이상을 일으킬 가능성도 있다. 따라서 가동중에 기계의 상태를 감시하고 진단을 수행하기 위해 이상진단기술의 개발이 강력하게 요망되고 있다.

중요한 회전기계에는 운전상태를 감시(monitor-

ing) 하기 위하여 온도, 압력, 유량 등의 프로세스 데이터를 계측하기 위해 각종 센서가 부착되어 있고, 설비보안 측면에서 유용하게 활용되어 왔다. 회전기계에서는 이들 데이터는 물론, 통상 가장 많이 이용되고 있는 데이터는 진동신호이다. 이는 진동이 회전기계의 건전성을 나타내는 중요한 지표가 되며, 이상이나 고장의 초기검지에 유익한 자료가 되기 때문이다.<sup>(1)</sup>

그러나 이상이나 고장이 발생하였을 경우, 진동 데이터로부터 원인을 추정하는 데에는 매우 전문적인 지식과 오랜 경험이 필요하다. 또한 원인추정에 있어서, 잘못된 판단은 큰 사고와 경제적 손실을 야기시키게 되는 경우가 많다. 최근 각종 프랜트는 고성능화, 복잡화, 시스템화 및 고도의 전문가 부족 등으로 인하여 이상진단 및 고장진단의 자동화에 대한 요구가 매우 높게 되었고, 이상진단 시스템의 개발에 관해 각종 연구가 수행되어져 왔다.<sup>(2,3)</sup>

\*회원, 부산수산대학교 기계공학과

\*\*회원, 인천기능대학 기계설계과

\*\*\*회원, 한국중공업(주) 기술연구소

회전기계의 진동진단법은 주로 측정된 진동주파수 스펙트럼의 성분분포와 진동진폭을 한계값(threshold value)과 비교하여 이상/정상을 판별하는 절대판정법이 이용되고 있다. 그러나 실제의 진동진폭이 한계값 이하라도 회전기계 내부에는 이상 원인이 되는 결함이 발생되고 있는 경우가 많으며, 이와같은 경우, 종래의 정상과 이상만을 판정하는 2차논리 반으로는 정상과 이상의 중간단계에 대한 중요한 정보를 간과할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 정상과 이상의 중간단계 정보를 퍼지개념을 이용하여 정량적으로 기술하고자 퍼지이론이 도입되고 있다.<sup>(4)</sup> 이와 관련된 연구로 Xia<sup>(4)</sup>는 퍼지종합조정법(fuzzy synthesis adjustment method)과 퍼지관계 행렬로 Sohre<sup>(5)</sup>와 Shiraki<sup>(6)</sup>의 자료를 이용한 진단법을 제안하였다. 그리고 Iwatsubo<sup>(7)</sup> 등은 퍼지역연산<sup>(8)</sup>과 이의 결점을 보완하기 위하여 인과행렬에 의한 주파수특점법을 병행한 수법을 제안하였다. 또한 복잡한 기계적 구조와 여러가지 외부요인들에 의하여 진단을 심각하게 악화시키는 gearbox의 이의 마모나 구름베어링의 마모결함 등의 명확하지 않은 결함에 대하여 Xu<sup>(9)</sup>는 신뢰도(credibility)와 가능성(possibility)의 개념으로 구름베어링의 결함진단 문제를 제시하였다. 그의 퍼지이론을 이용한 구름베어링의 결함진단<sup>(10)</sup> 등이 보고되고 있다.

본 연구에서는 진동주파수 성분과 진동진폭에 대한 이상진동의 멤버십함수(membership function)를 도입하여 멤버십정도(grade)를 구하고, 퍼지연산에 의하여 회전동기와 비동기진동을 구별하는 1차 진단을 한후, 각각에 대한 진동진폭의 멤버십함수와 인과행렬(decision table)을 이용하여 보다 세분된 2차 진단을 수행하는 2단계의 진단법을 제안한다. 그리고 실험장치에서 여러가지의 결함을 인위적으로 발생시키고, 이들 계측자료와 관련자료를 이용하여 본 진단법의 유용성을 검토하였다.

## 2. 퍼지연산

고전적인 집합이론에서는 집합의 경계와 영역은 확정론적(deterministic)으로 표시되며, 이것은 0과 1로만 설명되므로 중간단계에 대한 중요한 정보를 놓칠 수 있다. 그러나 비결정론적인 범위를 갖는 퍼지집합은 폐구간  $[0,1]$ 에서 사건(event) A가 속하는 변수  $x_i$ 의 정도를 나타내는 수많은 구간으

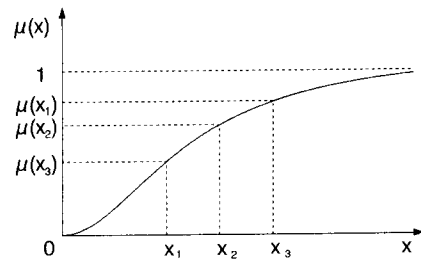


Fig. 1 Fuzzy logic scheme

로 Fig. 1과 같이 나누어진다. 멤버십함수  $\mu_A(x_i)$ 를 변수  $x_i$ 와 사건 A의 결과를 나타내고,  $\mu_A(x_i)$ 를 A에 속하는  $x_i$ 의 멤버십정도(grade)라고 부른다. 이때  $\mu_A(x_i)$ 의 값이 1에 가까우면 변수  $x_i$ 의 사건 A에 속하는 정도가 크고, 반대로 0에 가까우면  $x_i$ 의 A에 속하는 정도가 작은 것을 표시한다. 따라서 멤버십정도  $\mu_A(x_i)$ 는 결함진단에서 결함의 정도 또는 결함이 일어날 가능성의 척도로서 해석할 수 있다.

퍼지관계 기본연산으로서 본 논문에서 사용되는 대수곱, 대수합 연산을 정의하면 다음과 같다.<sup>(11)</sup>

(1) 대수곱 : Fuzzy관계 R, S의 대수곱 RS는

$$RS \Leftrightarrow \mu_{RS}(x, y) = \mu_R(x, y) \mu_S(x, y) \quad (1)$$

(2) 대수합 : Fuzzy관계 R, S의 대수합은  $R+S$ 라 쓰며

$$R+S \Leftrightarrow \mu_{R+S}(x, y) = \mu_R(x, y) + \mu_S(x, y) - \mu_R(x, y) \mu_S(x, y) \quad (2)$$

## 3. 결함진단의 실험

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치를 보이고 있다. 실험장치는 직경 20 mm의 구동축과 피동축을 커플링(disk flexible type)으로 연결했으며, 4개의 볼베어링(#6204)으로 지지하였다. 피동축 중간에는 직경 160 mm, 폭 17 mm인 원판을 장착하였고, 불평형 실험을 위해 원판은 임의로 불평형 질량을 부착할 수 있는 구조로 하였다. 정렬불량의 실험을 위하여, 베어링 지지대 밑에 shim plate를 삽입하여 편심정렬불량(parallel misalignment) 및 편각정렬불량(angular misalignment)을 발생하도록 하고 shim plate의 두께를 조정하여 편심을 1 mm까지, 그리고 편각은  $0.164^\circ$ 까지 변화시키며 실험을 수행하였다. 볼베어링 결함실험은 외륜에

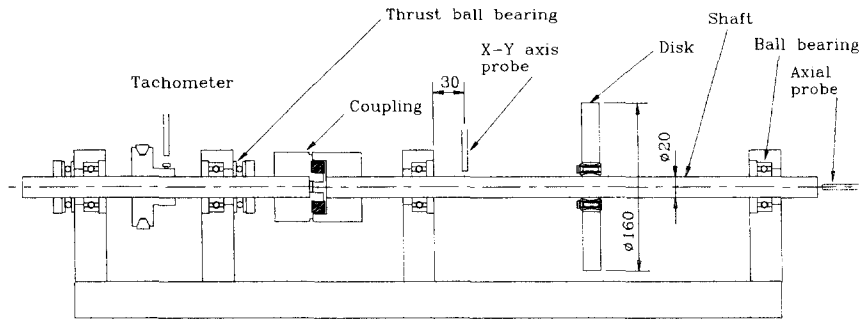


Fig. 2 Experimental apparatus

직경 2 mm, 길이 0.5 mm의 인공적인 결함을 만든 시험베어링(#6204)을 설치하여 실험하였다.

구동축은 5마력(1800 rpm)의 전동기를 이용하여 120 rpm 에서 최대 3600 rpm까지 구동시키면서 비접촉식 변위계(Bently 7200)의 출력신호를 주파수 분석기에서 분석하고, 이 결과를 각종의 이상진단을 위한 자료로 사용하였다.

#### 4. 퍼지수법에 의한 진단

본 연구에서 제안하는 퍼지결함진단 시스템은 Fig. 3과 같이 1차 및 2차 진단으로 구성된다. 1차 진단에서는 편의상 회전 동기진동과 저주파 및 고주파의 비동기진동으로 구별하는 진단을 수행한다. 그리고 1차 진단 결과에 따라 그 영역 내에 존재하

는 이상원인을 세분하여 최종진단을 하게 된다. 이하에 각 단계별로 본 실험에서 얻어진 정렬불량(misalignment)에 대한 계측자료를 이용하여 본 진단법을 설명한다.

##### 4.1 진동진폭의 멤버십 함수

멤버십함수는 최종 진단결과에 영향을 미치므로, 이 함수를 어떤 형태로 선택하는 가는 매우 중요하고 따라서 진단시스템의 안전성과 보전비용 등을 포함한 여러 요소를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 계측된 진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 진동치 라는 것을 나타내기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 Fig. 4의 high pass형(semi Caush형)의 멤버십함수<sup>(4)</sup>를 식 (3)과 같이 채용하였다.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & (a < x < \infty) \end{cases} \quad (3)$$

회전수동기 성분(1X)의 계수로는  $a=0, k=1/645$ 를 이용한다. 이는 Fig. 5와 같이 1X 성분의 변위 진폭이 터보기계의 축진동기준으로 널리 사용되는

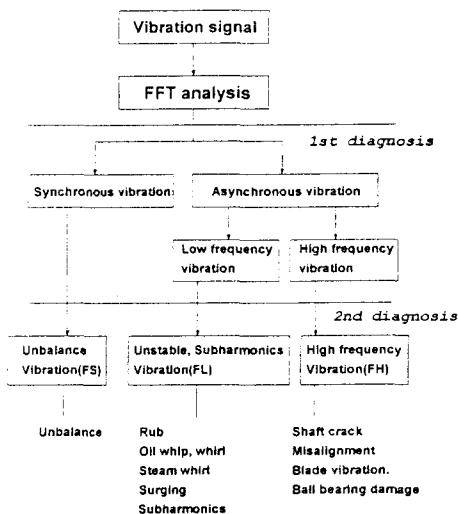


Fig. 3 Flow chart of diagnosis method

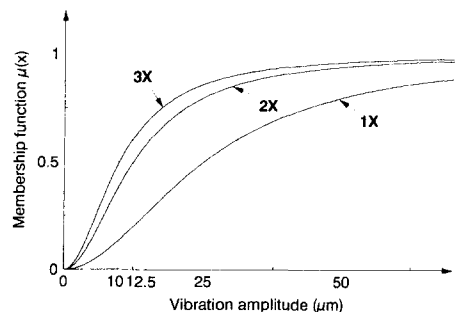


Fig. 4 Membership function for vibration amplitude

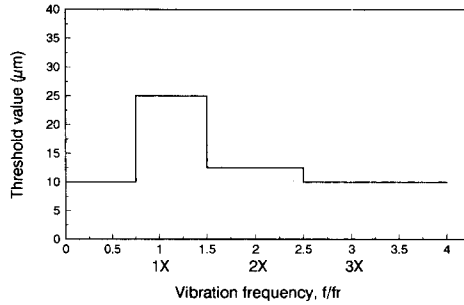


Fig. 5 Threshold value for vibration amplitude

API 규격의 변위 기준인 2 mil (50.8 μm)의 50% 인 25.4 μm일 때 멤버십함수의 정도(grade)가 0.5로 되도록 기울기  $k$ 를 정하고, 이 값을 초과할 때 진동이 강하다(strong)고 판단하도록 하였다. 회전동기성분의 2배수 성분(2X)의 진동진폭은 12.7 μm, 그 외의 진동수 성분에 대한 진동진폭은 10 μm로 가중치를 고려한 한계치를 설정하여 각각  $k=1/161.3$ ,  $k=1/100$ 으로 정하였다. 이는 통상 회전체에는 잔류불평형이 상존하므로 어느 정도 크기의 1X 성분은 항상 존재하게 되지만, 이외의 진동성분은 제의 이상에 의해 발생하게 되고 이들 성분의

진동진폭은 이상이 상당히 진전되기 전까지는 1X 성분의 진동진폭에 비해 적기 때문이다. 이 멤버십함수에 의해 진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 주파수인 것을 판정하는 퍼지 정도치를 구하면 Table 1과 같다.

4.2 발생주파수의 멤버십함수

이상에 의해 발생하는 진동주파수가 어느 영역에 어느 정도 소속하는가를 나타내기 위해 3가지 영역의 성분, 즉 회전동기성분(FR), 저주파성분(FL) 및 고주파성분(FH)으로 구별하기 위한 Fig. 6의 선형 멤버십함수를 제안한다. 이 함수는 1X 성분의 정점과 저주파성분과 고주파성분의 정점을 멤버십정도 1로 놓고 그 주파수와 인접하는 다른 주파수에서의 멤버십정도 0의 점을 연결하는 3각형으로 만든 선형멤버십 함수의 형태이다. 이 멤버십함수를 이용하여 Table 1의 주파수에 대해 Table 2에 각 주파수성분 마다의 퍼지정도치를 구하였다.

4.3 퍼지 결함진단

Table 1의 진동진폭 멤버십정도를 Table 2의 각 주파수 마다의 퍼지 정도값과 식(2)의 퍼지 대수곱

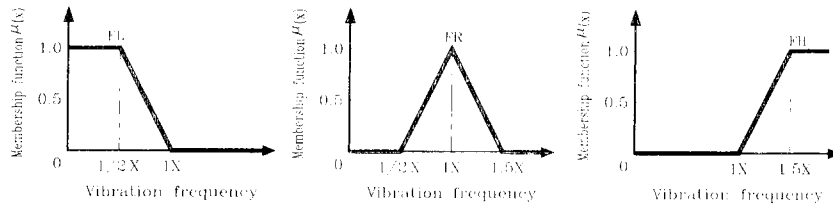


Fig. 6 Triangular membership function for frequency

Table 1 Fuzzy grade of vibration amplitude

No	Frequency	Amplitude	Grade of membership
1	1X	14.224 μm	0.246
2	2X	13.716 μm	0.547
3	3X	2.54 μm	0.061

Table 2 Fuzzy grade of vibration frequency

No	Frequency	FL	FR	FH
1	1X	0	1.0	0
2	2X	0	0	1.0
3	3X	0	0	1.0



진동은 Table 5로 구분하여 2차 진단을 수행한다.

1차 진단의 결과 고주파진동이므로, Table 5를 이용하여 Table 1의 진동진폭 멤버쉽함수의 퍼지 정도값과 퍼지대수곱 연산을 한후 각각의 결함원인 항목을 퍼지 대수합연산을 하면 Fig. 7(b)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 0.348로 가장 많은 특징을 한 것은 정렬불량(FH1)이고, 이어 축크랙(FH3)도 특징값이 0.206으로서 결함 가능성이 있으므로 역시 진단에 고려하여야 한다. 이들 특징이 비교적 적은 것은 발생진동의 진폭이 한계치에 비해 적기 때문이다. 따라서 종래의 2차 논리에 따른 진단의 경우에는 이 경우 정상으로 판정될 수 있으나 본 진단법의 경우는 이상이 발생하여 진전되는 정상과 이상의 중간단계에서의 정량적인 정보를 제공하여 주므로서 사전에 대책수립을 용이하게 할 수 있음을 나타내고 있다. 즉, 상기의 결과는 현상태에서는 아직 중대한 정렬불량은 아니지만 계속

해서 운전이 이어질 때는 열화에 의해 중대한 정렬 불량으로 진전될 수 있음을 예측할 수 있다. 그러나 상기와 같이 여러 결함항목의 특징에 큰 차가 없는 경우 이들에 의한 복수결함인지 여부를 진동 주파수 및 진동진폭 정보만으로 정확히 진단할 수 없는 경우에는 진동주파수 및 진동진폭 이외의 운전조건 등의 다양한 정보를 추가하는 것에 의해 보다 정밀하게 진단이 이루어져야 할 것이다.

4.4 결함진단의 적용예

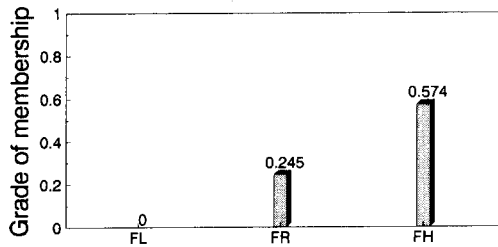
본 진단방법의 유용성을 검증하기 위하여 여러가지의 결함이 발생한 진동계측자료를 수집하여 본 진단법에 다음과 같이 적용하였다.

본 실험장치에서 얻어진 불평형(unbalance)진동의 계측자료는 Table 6과 같으며, 식(3)으로 진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 진동치라는 것을 나타내기 위하여 가중된 멤버쉽함수를 이용하여 구하였다.

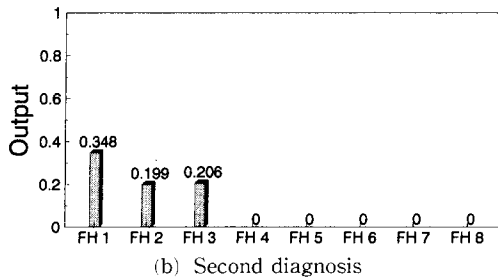
상기의 방법으로 1차 진단을 한 결과 Fig. 8과 같이 회전동기성분의 값이 0.801로 Fig. 3에 의하여 1차 진단만으로 불평형진동으로 진단할 수 있다.

Fig. 9(a)는 저널베어링으로 지지된 실험장치에서 측정된 자료<sup>(7)</sup>로 1차 진단결과 저주파진동으로 언어졌으며(Fig. 9(a)), 2차 진단을 한 결과 Fig. 9(b)의 오일휩(oil whip, FL5)으로 진단되었다.

Fig. 10은 외륜에 결함이 있는 볼베어링의 계측



(a) First diagnosis



(b) Second diagnosis

Fig. 7 Diagnosis result in misalignment defects

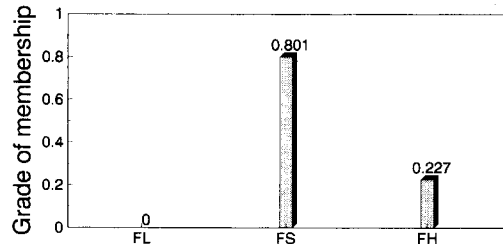
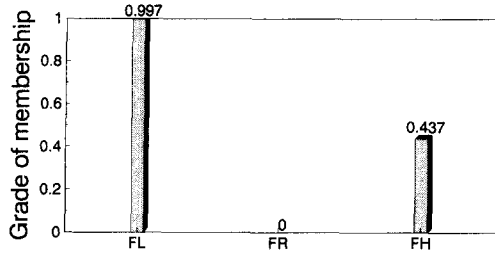


Fig. 8 Diagnosis result in unbalance

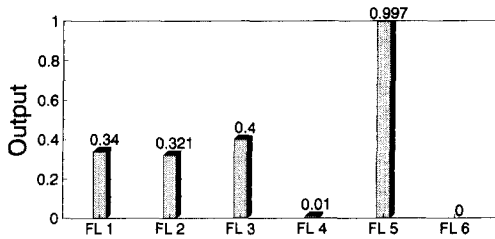
Table 6 Fuzzy grade of vibration amplitude

No	Frequency	Amplitude	Grade of membership
1	16.5Hz	50.2 $\mu$ m	0.801
2	33.5Hz	4.1 $\mu$ m	0.097
3	50.0Hz	4.1 $\mu$ m	0.144

자료<sup>(10)</sup>에 대한 진단예로서 주파수 분석결과를 이용하여 1차진단을 한 결과 1X, 2X 성분에 비하여 고주파성분(전동체 통과주파수)의 진동진폭이 특히 탁월한 결과를 보이고 있다. 따라서 Table 5를 이용하여 진단한 결과 Fig. 10과 같이 베어링의 외륜 결함(FH7)으로 진단할 수 있다.

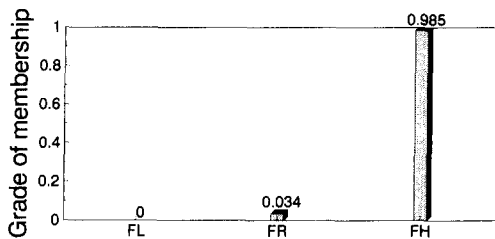


(a) First diagnosis

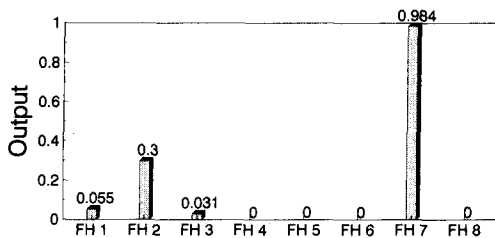


(b) Second diagnosis

Fig. 9 Diagnosis result in oil whip



(a) First diagnosis



(b) Second diagnosis

Fig. 10 Diagnosis result in ball bearing defects

## 5. 결 론

본 연구에서는 회전기계의 진동변위측정에 의해 얻어진 진동진폭과 주파수분석결과를 기초로 진동진폭과 진동주파수에 대한 멤버쉽함수의 퍼지연산을 이용한 회전기계의 이상진단법을 제안하였다. 그리고 실제 실험 및 각종 계측자료를 이용하여 이상진단을 수행하고 진동원인의 추정 가능성이 가능함을 보였다.

앞으로 본 퍼지진단법에 주파수 특성뿐만 아니라 시간, 부하 및 회전수 의존성, 작동유체와 베어링의 온도와 압력의 운전조건 특징 등의 다양한 관찰 항목을 2차진단을 위한 인과행렬에 고려하므로써 보다 발전된 정밀진단법이 될 것이며, 이는 향후 연구과제가 될 것이다.

## 참고문헌

- (1) 豊田利夫, 1982, 設備診断の進め方, 日本 Maintenance 協會.
- (2) Boyce, M.P. et al., 1983, "On-Line Monitoring and Diagnostics of Power Plants," *EPRI Report CS-2920*, pp. 19~53.
- (3) Hisa, S. et al., 1989, "Vibration Diagnosis for Large Turbine Rotor," *12th Conf. on Mechanical Vibration and Noise, ASME*, pp. 7~14.
- (4) Xia, S. and Huang, W., 1991, "A Method in the Fault Diagnosis of Turbomachine and its Application," *13th Conf. on Mechanical Vibration and Noise, ASME*, pp. 131~134.
- (5) Sohre, G.S., 1968, "Operating Problems with High Speed Turbomachinery," *Causes and Correction, ASME Petroleum Mechanical Eng. Conf. Dallas*.
- (6) Shiraki, K., 1984, *A Detective Symptom for the Vibration Safety of Rotating Machine*, Mitsubishi Heavy Ind. Ltd, pp. 1-40.
- (7) Iwatsubo, T. and Kawamura, S., 1993, "Application of Fuzzy Algorithm to the Diagnosis of Rotating Machinery," 일본기계학회 강연논문집.
- (8) Tsukamoto, Y. and Tashiro, T., 1979, "Method of Solution to Fuzzy Inverse Problem," 計測自動

- 制御學會論文集 15-1, pp. 21~25.
- (9) Xu, J. and Peeken, H., 1989, "Failure Diagnosis System Using Fuzzy Logic," *12th Conf. on Mechanical Vibration and Noise, ASME*, pp. 93~99.
- (10) 양보석, 전순기, 김남설, 1993, "퍼지이론을 이용한 구름베어링의 결함진단," 대한기계학회 추계학술대회 논문집( I ), pp. 193~197.
- (11) Mizumoto, M., 1991, *ファジイ理論とその應用*, Science社.