

가변 속도 회전체의 퍼지 고장 진단 시스템의 개발

김성동*, 홍성욱**, 오길호***

Development of a Fuzzy Fault Diagnosis System in Variable Speed Rotating Shafts

Sung-Dong Kim*, Seong-Wook Hong**, Gil-Ho Oh***

ABSTRACT

A fault diagnosis system for a variable speed rotating shaft probably demands a huge database, which makes it difficult to be realized. This study presents an effective method of fault diagnosis for variable speed rotating shafts. The proposed method is based upon a fuzzy reasoning and it includes a stepwise strategy to reduce the size of database in a diagnosis system. A computer program is developed to show the procedure of the diagnosis, and four cases of faults are applied to the program to illustrate the effectiveness of the proposed method. The proposed method is found to be useful in reducing the size of database from observation of the data files of the diagnosis system. The case studies show that the proposed method can be useful for the diagnosis of variable speed rotating shafts.

Key Words: Fuzzy Fault Diagnosis (퍼지 고장 진단), Root Mean Square (제곱평균), Peak to Peak (양진폭), Power Spectrum (파워 스펙트럼)

1. 서론

최근의 자동 생산 시스템 환경에서 생산 설비의 고장 진단 기능은 핵심적 요소 중의 하나이다. 대부분의 생산 설비들은 회전부를 가지게 되며, 자동제어 기술이 발전함에 따라서 회전부의 회전 속도를 가변시킬 수 있는 기능을 가진 설비가 점점 증가하는 추세이다. 그러므로, 운전 속도 조건이 일정하지 않는 회전기계에 적합한 고장진단 방법을 개발해야 할 필요성이 증대하고 있다.

회전설비의 고장진단에 관해서 많은 연구가 수행되어 왔다. 일반적으로 진동신호가 기계상태에 대한 많은 정보

를 내포하고 있으므로, 이제까지의 회전기계 고장진단은 거의 대부분이 진동신호를 이용하는 방법에 관한 것이었다. 양보석⁽¹⁾, Collacott⁽²⁾ 등은 진동의 측정 및 분석방법, 판정 기준, 고장원인과 진동특성의 상관관계 등에 관하여 종합적으로 분석 정리하였다. 산업 현장에서 널리 사용되어지는 진단 방법은 진동신호의 제곱평균(root mean square)이나 양진폭(peak to peak)의 측정값을 기준값과 비교하는 방법이다. 이 방법은 시간 영역에서의 해석 방법으로서 간단하며, 고장의 심각도를 판정함에는 비교적 유효한 방법이지만, 고장원인을 진단하는 방법으로는 사용할 수 없는 단점이 있다. 회전 기계의 고장원

* 금오공과대학교 생산기계공학과
 ** 금오공과대학교 정밀기계공학과
 *** 금오공과대학교 컴퓨터공학과

인을 진단하는 방법으로서 효과적이며 널리 사용되어지는 해석 방법은 주파수 영역에서의 파워 스펙트럼(power spectrum)을 이용하는 방법이다. 회전장치를 구성하는 베어링, 축, 기어 등에 결함이 발생하면, 그 결함에 의해서 발생되어지는 진동신호는 각각의 결함의 원인에 대응하는 특성 주파수를 가지게 되며, 이 특성 주파수의 파워(power)가 기준값보다 크게 나타나게 된다. Jackson⁽³⁾은 여러 가지 고장원인과 그것의 특성 주파수를 분류하였으며, O' Dea⁽⁴⁾, Randall⁽⁵⁾ 등은 진동신호의 1 옥타브 또는 1/3 옥타브 파워 스펙트럼을 진단에 활용하는 것을 소개하였다. 진동신호의 파워 스펙트럼을 이용하는 방법은 고장의 원인을 진단할 수 있다는 장점을 가지지만, 여러 가지 고장의 원인에 대한 특정 주파수와 진단기준 값에 대한 데이터 베이스의 구축을 필요로 한다. 특히, 회전속도가 변화하는 가변속도 회전체에서는 회전속도의 조건에 따라서 특성주파수와 진단기준의 스펙트럼 파워가 변화하기 때문에 데이터 베이스의 규모가 매우 크게 되어서, 데이터 베이스의 구축과 고장진단 시스템의 실제 구현에 어려움이 따른다.

회전기계의 고장진단 시스템을 실제로 구현하는 단계의 연구로서 윤중호⁽⁶⁾는 베어링의 진단에 있어서 확률적 기법을 적용하는 방법을 소개하였으며, 이안성⁽⁷⁾은 스팀 터빈 발전기에서 스팀온도, 부하의 크기, 베어링 온도 등의 운전조건과 상태를 고려하여서 구성된 진동원인과 결과의 인과관계를 이용하는 진단시스템을 개발하였다. 최근에 의료진단에 퍼지 추론법의 적용이 시도되어 왔으며^(8,9), 전순기⁽¹⁰⁾는 회전기계의 진단에 퍼지이론을 적용하는 연구를 수행하였으며, 언어적 변수(linguistic variable)에 의한 진단규칙의 표현과 진단 결과의 표현을 소개하였다.

이제까지의 회전기계 고장진단의 연구들과 진단시스템들은 일정한 회전속도의 조건에 대한 연구들이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 이전의 연구 결과들을 토대로 하여서 회전속도가 변화하는 가변속도 회전체에 적합한 진단 방법을 개발함이 일차적 목표이다. 진단 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 진동 신호이외에 베어링 온도, 소음 등의 보조적인 진단 신호의 이용이 필요하며, 여러 가지 진단신호와 진단 매개변수에 대한 다중분석의 기능이 필요하다. 또한, 효과적인 예방진단과 예방보전을 실현하기 위해서는 기계의 고장상태를 보다 세분화하여서 '정상', '조금 이상', '고장일 가능성이 높음', '확실한 고장' 등과 같이 다치적 표현이 필요하며, 진단 법칙의 표현 및 추

론 과정도 다치 논리적으로 표현되어야 한다. 다중 분석 기능과 다치 논리적으로 진단하고 표현하는 기능을 효과적으로 실현할 수 있는 방법으로서 다치 논리의 한 종류인 퍼지 추론법의 적용을 시도하고, 그 유용성을 살펴보는 것이 이차적인 연구 목적이다.

연구의 진행은 간단한 회전체 장치를 구성하여 진동을 측정하는 실험을 수행하며, 실험 결과로부터 고장의 심각도와 진동의 정량적 상관관계를 분석하여서 다치논리적 진단의 가능성 및 타당성을 확인한다. 가변속도 회전체의 고장진단에 적합한 모델 진단시스템으로서 한가지 진단 시스템을 개발하고, 그 유용성을 확인하기 위하여 간이 회전체 장치에 대하여 적용하여 진단한 결과를 제시하기로 한다.

2. 맘다니 퍼지 추론법

퍼지 추론법에는 여러 가지 종류의 방법이 존재하지만, 맘다니 추론법⁽¹¹⁾이 직접추론법⁽¹²⁾의 한 형태로서 추론과정이 간단 용이하여 가장 널리 사용된다. 본 연구에서도 맘다니 추론법을 적용하였는데, 앞으로의 설명을 위하여 간단히 소개한다. 예로써 다음의 2가지 추론 규칙에 대하여, 추론의 과정 및 결과는 Fig.1과 같이 도식화된다.

$$R_1: \text{if } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_{12} \text{ then } y \text{ is } B_1 \quad (1)$$

OR

$$R_2: \text{if } x_1 \text{ is } A_{21} \text{ AND } x_2 \text{ is } A_{22} \text{ then } y \text{ is } B_2 \quad (2)$$

여기서 R_1 과 R_2 는 if ~ then ~ 형태의 추론 규칙을 의미하며, x_1 과 x_2 는 추론을 위한 입력 정보를 나타내는 규칙의 전건부 변수이며, y 는 추론의 결과 정보를 나타내는 후건부 변수이다. A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} 와 B_1 , B_2 등은 퍼지 집합이므로써 Fig. 1에서 보여 주는 바와 같이 언어적 변수

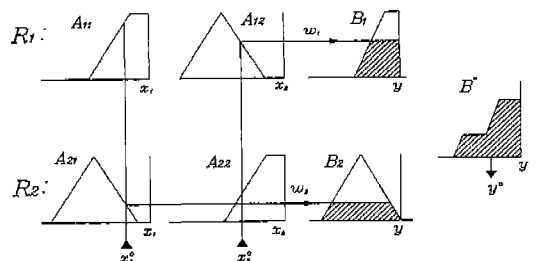


Fig. 1 Mamdani's reasoning method

x_1, x_2, y 에 대한 소속함수로 정의 될 수 있으며, '매우 크다', '심각 고장' 등과 같이 언어적 변수의 레이블(label)으로써 표현될 수 있다.

추론을 위한 입력 정보는 상수(crisp number)값의 수치로 측정되어지는 것이 보통인데, 그 값을 x_1^0, x_2^0 라고 가정한다. 이 경우에 입력 정보는 다음과 같은 특수한 형태의 퍼지 집합인 A_1^0 와 A_2^0 으로 표현된다.

$$A_1^0(x_1) = \begin{cases} 1 & \text{for } x_1 = x_1^0 \\ 0 & \text{for } x_1 \neq x_1^0 \end{cases} \quad (3)$$

$$A_2^0(x_2) = \begin{cases} 1 & \text{for } x_2 = x_2^0 \\ 0 & \text{for } x_2 \neq x_2^0 \end{cases} \quad (4)$$

i 번째 추론 규칙에 대한 추론 결과를 $R_i(x_1^0, x_2^0, y)$ 이라고 한다면, 맘다니 추론법의 결과는 다음과 같이 표현된다.

$$R_1(x_1^0, x_2^0, y) = \{A_1^0(x_1) \wedge A_{11}(x_1)\} \wedge \{A_2^0(x_2) \wedge A_{12}(x_2)\} \wedge B_1(y) \\ = w_1(x_1^0, x_2^0) \wedge B_1(y) \quad (5)$$

$$R_2(x_1^0, x_2^0, y) = \{A_1^0(x_1) \wedge A_{21}(x_1)\} \wedge \{A_2^0(x_2) \wedge A_{22}(x_2)\} \wedge B_2(y) \\ = w_2(x_1^0, x_2^0) \wedge B_2(y) \quad (6)$$

관계식(5)과 (6)에서 연산기호 \wedge 는 연산의 대상이 되는 퍼지 집합들에서 최소의 소속함수 값을 취하는 최소 연산을 의미한다. 즉, 맘다니 추론법은 입력 정보와 추론 규칙의 전건부를 이루는 퍼지 집합과의 연산이 최소연산으로 이루어지고 전건부에서의 AND연산도 최소 연산으로 이루어지며, 전건부와 후건부 사이의 연산까지도 퍼지 집합의 최소 연산으로 대체하는 방법이다. 관계식(5)와 (6)에서 w_1 과 w_2 는 추론 규칙의 전건부에 대하여 입력정보가 부합되는 정도를 의미하며, 적합도(compatibility)라고 호칭된다. R_1 과 R_2 의 추론 규칙에 대한 추론의 결과는 Fig. 1에서 추론 규칙 후건부의 퍼지 집합에서 사선으로 표시된 부분이다.

맘다니 추론법에서 추론 규칙들 사이의 OR 연산은 최대 연산으로 이루어지며, 연산 기호 \vee 으로 표현된다.

$$B^0(y) = \{w_1 \wedge B_1(y)\} \vee \{w_2 \wedge B_2(y)\} \quad (7)$$

추론의 결과 B^0 도 하나의 퍼지 집합인데, 퍼지 집합이 아

닌 상수값의 형태로 나타내고자 한다면 비퍼지화(defuzzification)의 과정을 거쳐야 한다. 비퍼지화의 방법에 있어서도 여러 가지가 존재하지만, 본 연구에서는 가장 널리 사용되어지는 하중중심법을 적용한다. 하중중심법의 결과값 y_0 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_0 = \int B^0(y)ydy / \int B^0(y)dy \quad (8)$$

3. 가변 속도 회전체의 퍼지 고장진단

회전기계의 종류에 따라서 기계의 특성이 다르며, 적합한 측정 신호의 종류와 분석 방법 등이 달라질 수 있다. 그러므로 다양한 기계에 공통적으로 적용될 수 있으며 가장 효과적인 진단 방법을 개발한다는 것은 생각하기 어렵다. 본 연구에서는 가변 속도 회전기계의 한가지 고장진단 방법으로 퍼지 진단 방법을 제시하고, 진단 시스템의 한가지 모형을 설명하고자 한다.

3.1 진단 시스템의 구성

가변속도 회전체에서 회전속도가 변화하면 진동과 소음, 온도 등의 측정 신호의 정도도 따라서 변화한다. 그러므로, 회전속도가 변화하면 진단의 기준 데이터도 변화하여야 한다. 그러나, 운전 영역의 모든 속도에 대하여 진단의 기준을 갖추어야 한다면, 진단 기준의 데이터 베이스가 방대해지고 데이터 베이스의 구축에 어려움이 따른다.

본 연구에서 두 가지의 해결 방안을 고려하였는데, 첫째는 Fig. 2에서 보여주는 바와 같은 단계적 진단 방법이다. Fig. 2의 구성의 1차 심각도 진단부에서는 회전 속도가 변화하는 환경에서 고장의 가능성이나 심각도를 진단하고 정밀진단이 필요한 것인지의 여부를 결정한다. 고장의 가능성 및 심각도가 높은 경우에 한하여 수행되는 2차 원인 진단부에서는 고장 원인에 대하여 진단한다. 만약 정밀 진단부에 해당하는 원인 진단부에서 인위적으로 일정속도로 회전체를 구동하고 진단을 수행한다면, 진단 시스템에 등록된 여러 가지 원인 항목에 대한 진단 기준 데이터는 한가지 속도 조건에 대해서만 주어지므로 데이터 베이스가 간소화된다. 그러므로, 고장의 원인 진단에서는 일정속도로 회전체를 구동하는 방법을 적용한다. 가변속도 회전체의 고장 진단에 필요한 데이터 베이스를 간소화하는 두번째 방안은 회전기계의 속도 영역을 대표할 수 있는 소수의 속도조건에 대한 진단 기준 데이터를 이용하여서 임의의 속도에 대한 진단의 기준을 결정하고 측정된

신호를 기준 데이터에 대하여 정규화하여 사용하는 것이다.

1차의 심각도 진단부에만 적용되어지는 이러한 방법은 소수의 속도 조건에 대한 진단 기준 데이터만으로써 심각도 진단부의 데이터 베이스가 구성되어지는 장점을 가지며, 정규화된 한가지 진단 파라미터에 대하여 한가지 종류의 진단 규칙만으로 가변속도 회전체의 고장진단 시스템을 구현할 수 있는 장점을 가진다.

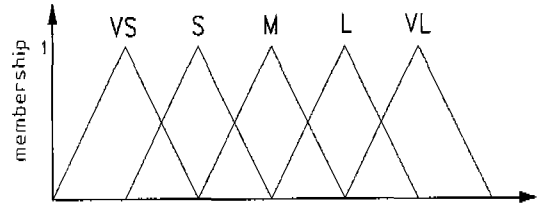


Fig. 3 Triangular Membership Functions

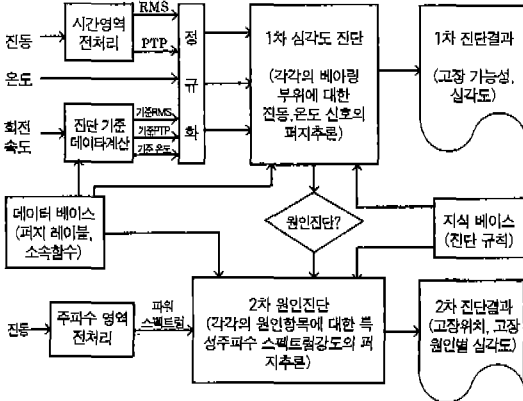


Fig. 2 Configuration of the Fuzzy Fault Diagnosis System for a Variable Speed Rotating Shaft

여기서 임의의 속도에 대한 진단 기준의 데이터는 정상 상태로 판정될 수 있는 진단 파라미터의 최대값을 의미하며, 2장에서 설명하였던 퍼지 추론법을 적용하여서 계산한다. 추론 규칙의 전진부의 변수인 회전속도에 대하여 Fig. 3에서 보여주는 5가지 퍼지 집합으로 구성하였으며, 후진부의 변수인 진단 기준에 대해서도 동일한 형태의 퍼지 집합으로 구성한다. Fig. 3의 퍼지 레이블의 의미는 Table 1과 같이 표현되어지며, 퍼지 추론의 규칙은 Table 2와 같이 표현된다.

Table 1. Fuzzy Labels and Their Meanings

퍼지 레이블	의미
VS	매우 작음 (Very Small)
S	작음 (Small)
M	중간 (Medium)
L	큼 (Large)
VL	매우 큼 (Very Large)

Table 2. Fuzzy Rules for Calculation of Diagnosis Standard

전진부	회전속도	VS	S	M	L	VL
후진부	진단기준	VS	S	M	L	VL

Fig. 3의 삼각형 퍼지 집합을 사용하면, 삼각형의 각 꼭지점에 해당하는 변수값과 소속값만을 데이터 베이스에 제공하면 된다.

퍼지 추론의 최종적인 결과값은 관계식⁽⁶⁾의 무게 중심 법으로부터 결정되며, Table 2의 일차원적인 퍼지 규칙에 대하여 비퍼지화된 값은 기존의 보간법의 결과와 유사하다고 할 수 있다. 만약에 더욱 정확한 계산 결과를 얻고자 한다면 더욱 더 세분화된 퍼지 레이블을 사용하는 것으로 가능하며, 회전속도와 진단 기준 데이터 사이에 비선형성이 존재한다면 Fig. 3의 퍼지 집합들의 간격이 균일하지 않게 분포시키는 것으로 가능하다.

진단의 추론부에 입력되어지는 정보는 다음의 식과 같이 진단 기준의 데이터에 대하여 정규화하여 사용한다.

$$x_n = \frac{x}{x_r} \quad (9)$$

여기서는 x 는 신호의 측정값을 의미하며, x_r 은 진단 기준이며, x_n 은 정규화된 값을 의미한다. 이와 같이 정규화된 진단 파라미터는 무차원의 물리량이므로 진단에 사용되는 퍼지값들은 진단 기준 데이터의 크기에 관계하지 않고 항상 일정한 형태로 주어진다.

3.2 측정 신호 및 전처리

일반적인 회전체의 고장을 감지하는 신호로서 진동, 소음, 베어링 부위의 온도 등을 생각할 수 있는데, 가장 효과적으로 고장 증상을 관측할 수 있는 신호로써 진동 신호가 널리 이용되어 왔다. 진동신호를 전처리한 진단용 파라미터로써는 신호 처리 방법이 간단하면서도 진동에너지의 양과 가장 밀접한 파라미터인 제곱평균근(RMS)이 널리 이용되었다. 하지만 본 연구에서 고려하는 고장진단 시스템에 실제의 진동 신호를 적용하기 위한 목적으로 제작된 간이 회전 장치의 실험 결과에 의하면 제곱평균근과 함께 양진폭(PTP)도 중요한 것으로 조사되었다.

실험으로부터 얻어진 진동신호를 보여주는 Fig. 4의 관측에 의하면, 결합 인자가 진동센서를 가진할 때마다 충격적으로 진폭이 증가함을 할 수 있다. 이러한 경우에는 결합상태의 진동신호의 제곱평균근이 증가하는 정도보다 양진폭이 증가하는 정도가 훨씬 크게 나타났다. 그러므로, 본 연구에서는 고장의 심각도를 진단하기 위한 입력 정보의 파라미터로서 진동신호의 평균제곱근과 양진폭을 선택한다.

진동신호 외에 다른 진단 신호를 고려한다면, 회전체 베어링 부위의 온도를 생각할 수 있다. 회전체에서 베어링은 핵심요소 중의 하나이며, 베어링의 결합은 그 부위의 온도와 밀접한 관계를 가진다. 하지만, 베어링 부위의 온도는 단순히 윤활 조건이 나쁜 경우에도 상승하는 경향이 있다. 예를 들어서, 만약 온도가 높고 진동이 작으면 단순히 윤활 조건이 이상인 것으로 진단할 수 있으며, 진동이 큰 상태에서 온도가 높으면 측정 센서 부위의 베어링이 이상일 가능성이 매우 높다. 이와 같이 온도 신호는 고장 진단의 보조적인 정보로서 이용될 수 있으므로, 고장의 심각도의 진단에 함께 고려하여서 고장진단 시스템을 구성한다.

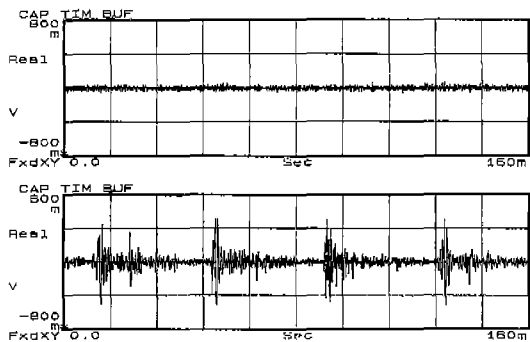


Fig. 4 Comparison of Raw Vibration Signal in Time Domain, upper figure : normal, lower figure : unbalanced shaft.

진동신호의 제곱평균근과 양진폭은 시간 영역에서의 처리 결과로서 고장의 원인을 진단하는 목적으로 사용함이 어렵다. 일반적으로 회전기계는 기어, 베어링, 회전질량체 등의 요소들이 조합되어서 회전하는 상태에서 각각의 회전요소들에 대응하는 특성주파수를 가지며, 한가지 특성 주파수 성분의 진동이 증가한다면, 그 특성주파수에 대응하는 요소가 결합인 것으로 진단할 수 있다고 종래의

연구^(3,4,5)에서 조사되었다. 실험으로부터 얻어진 진동신호의 파워 스펙트럼인 Fig. 5에서, 1500 RPM으로 회전하는 불균형된 회전질량체의 특성주파수는 25 Hz인데, 25 Hz 성분의 파워가 정상상태보다 증가하였음을 알 수 있다. 본 연구에서 회전체의 고장원인을 진단하기 위한 입력정보로서 진동신호를 주파수 영역으로 처리한 파워 스펙트럼을 이용한다.

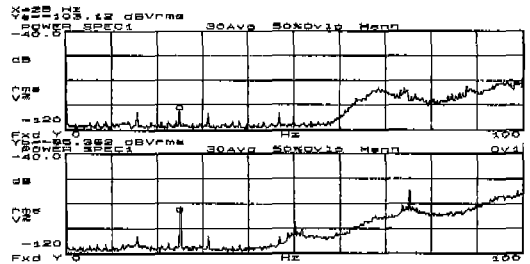


Fig. 5 Comparison of Power Spectrum at the Rotating Speed of 1500 RPM, upper figure : normal, lower figure : unbalanced shaft

3.3 고장의 심각도 진단부

고장의 심각도 혹은 고장 가능성의 정도를 진단하는 진단규칙의 전건부를 구성하게 되는 진동신호의 제곱평균근과 양진폭, 베어링의 온도에 대해서 Table 1의 5가지 퍼지 레이블로써 세분화였다. 퍼지 레이블에 대한 퍼지집합의 소속함수는 Fig. 6과 같이 선정한다.

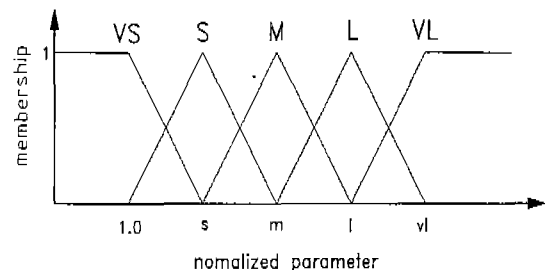


Fig. 6 Membership Functions of Fuzzy Labels for the 'If' part of Rules

Fig. 6에서 수평축의 좌표가 1인 점은 측정신호가 진단 기준의 데이터와 일치하는 점이며, 수평축의 좌표가 s, m, l, vl의 점은 진단신호의 종류, 회전기계의 종류 등에 따라서 진단시스템의 설계자가 결정해야 한다.

퍼지 진단규칙의 결론부에 대한 고장 상태의 심각도 혹

은 고장의 가능성에 대해서도 Table 3의 5가지 퍼지 레이블로서 표현하였으며, 그것의 소속함수는 Fig. 7과 같이 선정한다.

Table 3. Fuzzy Labels and Their Meaning

퍼지 레이블	의 미
NOR	정상 (normal)
SUS	고장이 의심됨 (suspiciously failure)
POS	고장 가능성 존재 (possibly failure)
PRO	아마 고장일 것임 (probably failure)
DEF	고장이 확실함 (definitely failure)

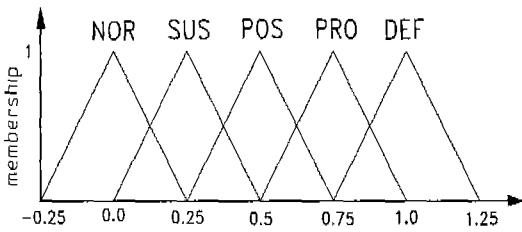


Fig. 7 Membership Functions of Linguistic Truth Values

Fig. 7에서 수평축의 좌표가 0인 점은 완전한 정상 상태를 의미하며 1인 점은 완전한 고장 상태를 의미하는데, 진단 결과를 비퍼지화한 값은 0과 1 사이에서 고장의 심각도를 정량적으로 표현하게 된다.

고장 상태의 심각도의 진단에서 진동신호를 주된 진단 파라미터로 사용하고, 베어링 온도는 보조적인 진단 신호로서 사용한다는 관점에서 먼저 진동신호의 제공평균근과 양진폭을 이용하여서 진단을 수행하고, 그 진단 결과에 베어링 온도를 반영하여서 최종적인 진단 결과를 얻은 방법으로 진단 시스템을 구성한다.

진동신호의 제공평균근과 양진폭에 관한 진단규칙은 두 가지의 형태로 생각할 수 있는데, 첫째는 Table 4와 같이 제공평균근과 양진폭에 대해서 각각 독립적으로 구성되어지는 형태이며, 둘째는 Table 5와 같이 제공평균근과 양진폭이 진단규칙의 전진부에서 AND 연산으로 2차원적으로 구성되어지는 형태이다. Table 4의 진단 규칙은 서로 다른 종류의 진단 파라미터에 대해서 OR 연산으로 구성된 형태로서 비퍼지화된 진단 결과는 각각의 파라미터에 대한 진단의 결과를 산술평균한 결과와 유사하며, 의미상으로는 각각의 진단결과에 대한 중간 결과를 취하게 된다. Table 5의 진단 규칙은 서로 다른 종류의 진단 파라미터들로 구성되는 다차원 공간에 대해서 설계자 임

의로 진단규칙을 결정할 수 있는 유연성을 가지지만 진단 규칙의 수가 많아진다. 이와 같이 진단규칙의 결정은 설계자의 주관에 크게 의존한다고 할 수 있는데, 본 연구에서는 Table 4의 진단 규칙을 적용하여서 모델 프로그램을 개발한다.

Table 4. Fuzzy Rules of OR Operation between RMS and Peak-To-Peak

전진부	RMS/RMS _s	VS	S	M	L	VL
후진부	고장 심각도	NOR	SUS	POS	PRO	DEF

OR

전진부	PTP/PTP _s	VS	S	M	L	VL
후진부	고장 심각도	NOR	SUS	POS	PRO	DEF

RMS PTP : 제공평균근과 양진폭의 측정값
RMS_s, PTP_s : 제공평균근과 양진폭의 진단기준

Table 5. Fuzzy Rules of AND Operation between RMS and Peak-To-Peak

		RMS/RMS _s					
		VS	S	M	L	VL	
PTP/PTP _s	VS	NOR	SUS	POS	PRO	DEF	
	S	SUS	POS	PRO	DEF	DEF	
	M	POS	PRO	PRO	DEF	DEF	
	L	PRO	PRO	DEF	DEF	DEF	
	VL	DEF	DEF	DEF	DEF	DEF	

RMS PTP : 제공평균근과 양진폭의 측정값
RMS_s, PTP_s : 제공평균근과 양진폭의 진단기준

보조적인 진단신호로서 베어링 온도는 회전기계의 고장 상태와 관련이 있지만 윤활상태와도 연관이 되므로, 고장의 가능성과 윤활 상태에 대해서 Table 6과 Table 7의 진단 규칙을 고려한다. Table 6의 진단법칙의 의미는 진동신호의 제공평균근과 양진폭에 대한 중간 진단 결과에 대하여 베어링 온도가 '중간(M)' 정도 이상이면 고장의 가능성을 한 단계만큼 더 높게 판정하는 것이다. Table 7의 진단법칙은 진동신호의 제공평균근과 양진폭이 모두 '매우 작음(VS)'의 상태에서 베어링의 온도가 증가하면 윤활상태의 결함으로 판정하는 의미이다.

최종적인 진단 결과는 Table 3의 퍼지 레이블에 대한 적합도로서 출력하여서 고장 상태의 정성적 파악이 가능

Table 6. Fault Diagnosis Rules to Consider the Effect of Bearing Temperature

		T/T _s					
		VS	S	M	L	VL	
RMS와 PTP를 이용한 중간진단 결과	NOR	-	-	-	-	-	
	SUS	-	-	POS	POS	POS	
	POS	-	-	PRO	PRO	PRO	
	PRO	-	-	DEF	DEF	DEF	
	DEF	-	-	DEF	DEF	DEF	

T/T_s : 베어링의 온도파 진단 기준
: 고려하지 않는 값

하며, 관계식⁽⁶⁾의 비퍼지화법을 적용하여서 고장의 심각도를 정량화된 상수값으로 파악할 수 있다. 만약, 고장의 심각도가 '고장 가능성 존재(POS)'에 해당하는 0.5를 초과할 경우에는 2차 단계의 고장 원인의 진단을 수행한다.

Table 7. Fuzzy Rules for Lubrication Diagnosis

RMS와 PTP를 이용한 중간 진단 결과	T/T _r				
	VS	S	M	L	VL
	NOR	SUS	POS	PRO	DEF

3.4 고장의 원인 진단부

제 2차 단계의 고장 원인의 진단부에서는 원인 진단을 위하여 설정된 일정한 회전 속도로 회전기계를 구동하게 되며, 일정한 회전속도에서 얻어진 진동신호의 파워 스펙트럼을 이용하여서 진단한다. 회전 속도가 일정하면, 각각의 고장 원인의 특성주파수도 일정하게 된다.

고장의 원인 진단부에 등록된 각각의 고장 원인에 대하여 측정된 파워 스펙트럼의 특성 주파수 성분의 파워에 대해서 퍼지 추론함으로써 각각의 고장 원인의 심각도를 진단한다. 고장 원인의 진단에 적용된 퍼지 레이블과 비퍼지화 방법등은 제 1차 단계의 고장심각도 진단에서 적용된 것들과 동일하며, 진단규칙은 Table 8과 같다.

Table 8. Fuzzy Rules for Diagnosis of Fault Causes

전진부	I(A _i)/I(A _j)	VS	S	M	L	VL
후진부		NOR	SUS	POS	PRO	DEF

이레벨과 I: 1번째 고장 원인
 I: 1번째 고장 원인의 특정 주파수
 I, I_r: 파워 스펙트럼의 특성주파수 강도와 진단기준

4. 진단 프로그램과 데이터베이스

제 3 장에서 설명한 가변속도 회전체의 퍼지 고장진단 방법의 모형을 보여줄 수 있는 진단 프로그램을 개발하였는데, 프로그램의 흐름도는 Fig. 8과 같다. 측정 신호의 전처리 과정은 오프-라인(off-line)으로 수행되었으며, 진단 프로그램의 구성으로부터 생략되었다.

Fig. 8의 1번 단계에서 진단에 필요한 퍼지 레이블 및 소속함수의 데이터를 간직하고 있는 파일의 이름, 진단 규칙을 간직하고 있는 파일의 이름, 고장의 원인 진단을 위하여 설정되어질 회전속도, 원인 진단부에 등록될 항목의 갯수, 각각의 고장 원인에 대한 데이터 파일의 이름 등을 입력한다. 이와 같이 데이터와 진단 규칙들을 종류에 따라서 독립된 파일로 모듈화함으로써 데이터와 진단규칙의 추가, 삭제, 변경 등이 용이하다.

데이터 파일의 한가지 예로서, Table 9는 진동신호의 제곱평균근을 관계식⁽⁶⁾에 의하여 정규화한 무차원 데이터에 관한 퍼지집합 레이블 및 소속함수의 데이터를 보여준다. 퍼지 레이블 아래의 숫자 값은 Fig. 6의 삼각형 퍼지 함수의 세 꼭지점의 수평좌표와 수직좌표를 의미하는데, 레이블 'VS'의 수평 좌표가 1인 점은 측정된 제곱평균근이 진단 기준의 데이터와 일치하는 경우이며, 퍼지 레이블 'VL'의 수평 좌표가 5인 점은 측정된 제곱평균근

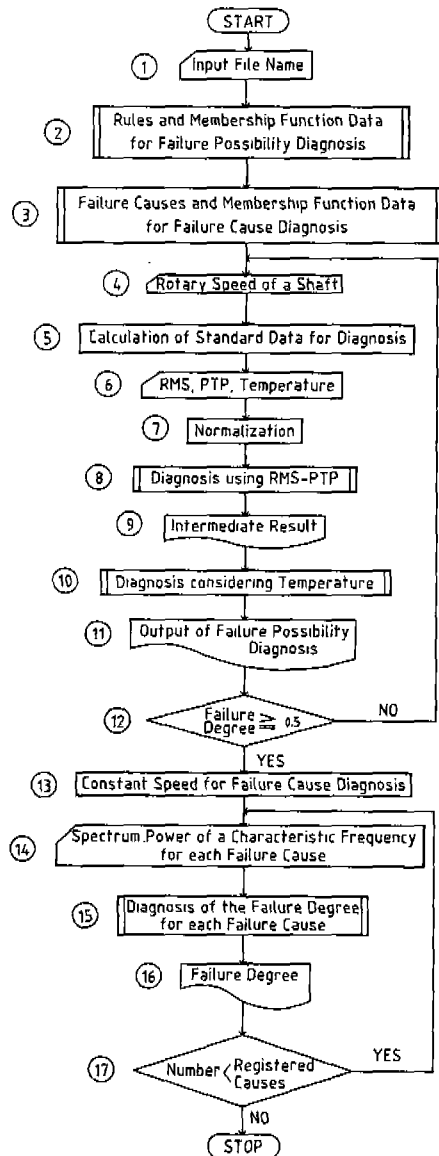


Fig. 8 Flowchart of the Diagnosis Program

이 진단기준 데이터의 5배인 경우이다. 이와 같은 방법으로 진동신호의 양진폭과 베어링의 온도에 대해서도 데이터 파일이 작성된다. Fig. 8의 1번 단계에서 입력 받은 파일 이름을 이용하여서, 2번 단계에서 해당 파일로부터 삼각형 퍼지 함수의 꼭지점 좌표를 입력하고, 꼭지점의 좌표로부터 양의 기울기와 음의 기울기를 가진 2개의 직선식으로 구성되어지는 퍼지함수를 구한다. 진단 파라미터들을 정규화하고, 소속함수들의 특징점에 관한 데이터만으로써 데이터 파일을 구성함으로써 데이터 베이스의 크기를 최소화할 수 있다.

이상에서 설명한 방법과 유사한 방법으로 진단결과를 표현하는 퍼지 레이블과 관련 데이터, 가변속도의 환경에서 진단기준의 데이터를 계산하는데 필요한 데이터 등을 입력하게 된다. Fig. 8의 3번 단계에서는 고장 원인의 진단에 필요한 데이터들을 입력하게 되는데, 고장원인의 진단 단계에서는 일정 속도로 회전하는 조건이므로 데이터의 정규화 과정이 필요하지 않다. 진단 결과의 표현을 위한 퍼지 레이블과 관련 데이터는 Fig. 7과 동일한 형태를 취하게 되며, 진단 규칙들은 Table 4로부터 Table 8까지에서 보여주는 형태를 취한다.

Fig. 8의 4번 단계로부터 12번 단계까지는 2장에서 설명한 고장 심각도 진단부에 해당하며, 13번 단계부터 17번 단계까지는 고장 원인의 진단부에 해당한다.

Table 9. Example Data of Membership Functions

Label	VS	S	M	L	VL	
	node 1	0, 1	1, 0	2, 0	3, 0	4, 0
	node 2	1, 1	2, 1	3, 1	4, 1	5, 1
	node 3	2, 0	3, 0	4, 0	5, 0	6, 1

5. 적용 사례

본 연구에서 제시한 진단방법의 효율성을 검증하기 위하여 Fig. 9의 회전체 장치를 구성하였으며, 회전체 장치로부터 측정된 신호를 오프-라인(off-line)으로 전처리하여 진단 파라미터를 얻고, 이러한 진단 파라미터를 진단 프로그램에 적용한다.

회전체 장치에서 고려한 고장 원인은 회전축의 불균형과 베어링 구성요소의 결함으로써 외륜의 결함, 회전요소(ball)의 결함, 내륜의 결함이었다. 베어링에 대한 윤활

상태는 항상 최적의 상태로 유지하였으며, 베어링의 온도도 정상상태로 유지하였다. 현장에서 사용되고 있는 기계의 고장 진단을 위한 데이터베이스는 절대판정, 상대판정, 상호판정 등의 방법⁽⁴⁾이 있지만, 본 연구에서는 본 연구의 진단 방법의 효율성을 검증하기 위하여 각각의 고장 원인에 대하여 Fig. 7의 5가지 등급에 대한 고장 상태를 인위적으로 만들어 주고, 각각의 고장 상태에 실험한 결과로부터 데이터 베이스를 구축한다.

앞에서 설명한 4가지 고장원인에 대하여 각각 30회의 진단실험이 수행되었는데, 진단결과의 한가지 예를 Fig. 10에서 보여주고 있다. Fig. 10의 결과는 회전축의 불균형 결함에 대한 진단 결과로서, 1단계의 고장 심각도의 진단 결과는 회전축의 속도가 1500 RPM에서 측정된 Fig. 4의 아래쪽 진동신호에 대한 결과이다. 2단계의 고장 원인의 진단 결과는 고장원인의 진단을 1000 RPM의 회전속도에서 이루어지도록 진단시스템의 설계자가 결정하였다는 가정된 상태에서 회전 장치를 1000 RPM의 속도로 구동하여서 얻어진 파워 스펙트럼인 Fig. 11에 대한 진단 결과이다.

Fig. 10의 실험에 적용된 회전축의 불균형의 정도는 '큼(L)'에 해당하는 것이었는데, 1단계에서 고장 심각도 진단의 '언어적 표현'의 결과는 '고장이 의심됨(SUS)'에 대한 적합도가 0.09이며, '고장 가능성 존재(POS)'에 대한 적합도가 0.47이며 '아마도 고장일 것임(PRO)'에 대한 적합도가 0.76으로서 종합적인 판단의 결과는 적합도가 가장 큰 결과인 '아마도 고장일 것임(PRO)'에 해당된다. 1단계 진단 결과에서 오른쪽 그림은 왼쪽 그림의 진단 결과에 대하여 비퍼지화 과정을 거쳐서 얻어진 하나의 정량값으로서, 정상상태를 0으로 간주하고 절대적인 고장 상태를 1로 표현하였을 경우에 고장으로 판정하는 것에 대한 진리값의 정도가 0.67임을 의미한다. 이러한 고장 심각도의 진단 결과는 회전축의 불균형 결함의 정도가 '큼(L)'에 해당한다는 것과 부합한다고 볼 수 있으며, 비퍼지화된 고장의 심각도가 0.5를 초과하므로 제 2차의 고장 원인의 진단 단계를 수행해야 하는 결과이다.

Fig. 10에서 2단계 고장원인의 진단 결과 그림은 원인 진단부에 등록된 4가지 고장원인 항목에 대하여, 각각의 고장 심각도를 비퍼지화된 정량값으로 표현한 것이다. 실험에 적용된 고장원인의 항목인 회전축의 불균형 결함에 대해서 심각도가 크며, 나머지 항목에 대해서는 심각도가 매우 작음을 알 수 있다. 또한, 이러한 결과는 Fig. 11의 파워 스펙트럼 선도에서 회전축의 불균형 결함에 대한 특

성 주파수인 16.7 Hz 성분의 스펙트럼 파워는 정상상태보다 결합 상태에서 크게 증가하지만, 베어링 회전 요소 결합의 특성 주파수인 66.9 Hz와 외륜 결합의 특성 주파수인 70.2 Hz 등에서는 스펙트럼 파워의 변화가 거의 존재하지 않는다는 사실과 부합되는 결과이다.

1차 심각도 진단의 회전 속도를 달리하면서 이상과 같이 설명한 방법으로 4가지 고장 원인에 대하여 진단한 결과를 Table 10에서 종합적으로 보여주고 있다. 각각의 고장원인에 대하여 '룸(L)'에 해당하는 등급의 결함을 적용하였으며, 1차 심각도 진단에서 비퍼지화된 고장 심각도가 0.5를 초과하면 진단이 성공한 것으로 간주하였다. 1차 심각도의 진단이 성공한 경우에 한하여 수행된 2차의 고장 원인 진단에서 인위적으로 주어진 고장 원인 항목에 대하여 비퍼지화된 심각도가 0.5를 초과하면 2차 진단이 성공한 것으로 간주한 결과이다. Table 10에서 2차의 고장 원인 진단까지의 성공 확률이 50% 보다 적게 나타나는 경우도 존재하지만, 일반적인 고장의 진행이

점진적으로 이루어지며 고장 진단이 짧은 시간의 주기로 연속적으로 이루어지는 경우에는 본 연구의 진단 방법을 적용함이 가능할 것이다.

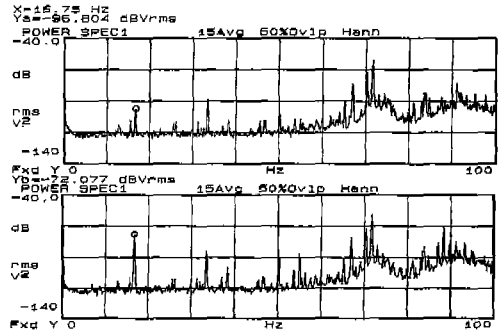


Fig. 11 Comparison of Power Spectrum at the Rotating Speed of 1000 RPM, upper figure : noraml, lower figure : unbalanced shaft



Fig. 9 Rotating Shaft and Measuring Instruments For Experiment

Table 10. Diagnosis Results for each Fault Case

Fault cause	no. of try	1st step success no.	2st step success no.
UNBALANCE	30	24	22
BEARING BALL	30	19	14
BEARING OUTER RACE	30	21	16
BEARING INNER RACE	30	18	13

6. 결 론

가변속도의 회전체에 대한 퍼지 고장진단의 방법을 제시하였으며 제시된 진단 방법의 모형을 보여주는 진단 프로그램을 개발하였는데, 연구의 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 퍼지 추론의 방법은 다치 논리에 근거하며, 여러 가지 종류의 측정 신호에 대한 다중 분석이 용이하며, 언어적 변수를 사용하므로, 고장진단에 적용하면 예방 진단에 효율적이며, 신뢰성이 높은 진단 결과를 얻을 수 있으며, 진단 결과의 이해가 용이한 고장 진단 시스템의 구현이 가능하다. 또한, 퍼지 진단규칙은 여러 가지 진단정보에 대하여 AND 논리연산과 OR 논리연산의 형태로 단순히 나열되는 형태를 취하므로, 진단규칙을 추가하고, 삭제하

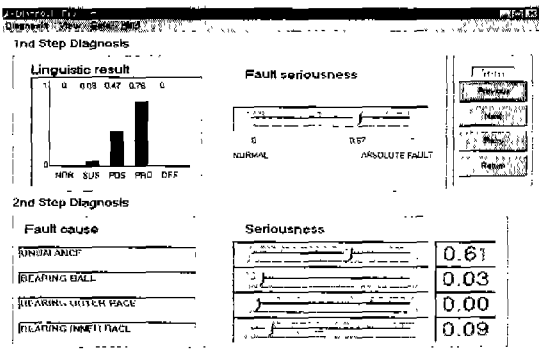


Fig. 10 An Example of the Diagnosis for the Unbalance of Rotating Shaft

고, 수정하는 것이 용이한 장점을 가진다.

2) 가변속도의 환경에서 고장 상태의 심각도를 진단하고, 고장의 심각도가 과도한 경우에 한하여 일정 속도의 조건에서 고장 원인의 진단을 수행하는 단계적 진단 방법을 적용함으로써 고장진단에 필요한 데이터 베이스를 간소화할 수 있다.

3) 고장 상태의 심각도를 진단하는 단계에서 임의의 회전속도에 대한 진단기준을 구하는 효율적 방법의 하나로써 퍼지 추론법의 적용을 제시하였다. 또, 측정된 진단 파라미터를 진단 기준의 데이터에 대해서 정규화하는 방안을 제시하였다. 제시된 방법들을 적용함으로써 진단에 필요한 데이터의 양을 최소화할 수 있었다.

4) 가변속도 회전체 고장진단의 모형 프로그램을 통하여 제시된 방법의 효율성이 확인되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 연구비 지원(과제번호 : 93-0100-04-01-3)으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 양보석, "회전 기계의 이상 진동 이상", 기계기술, Jan., pp. 138-155, 1955.
2. Collacott, R.A., "Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring", Chapman and Hall, London, 1977.
3. Jackson, Charles, "The Practical Vibration Primer", Gulf Publishing Company, 1979.
4. O'Dea, D.M., "Computerised Machinery

- Vibration Analysis Improves Reliability", The Oil and Gas Journal, pp.50-54, DEC., 1975.
5. Randall, R.B., "Efficient Machine Monitoring Using FFT Analyzer and Calculator, B & K Application Notes"
6. 윤종호, 김성길, 김종현, 유정훈, 이장무, "회전기계 불베어링의 자동진단 시스템에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제 19 권, 제 8 호, pp. 1787-1789, 1995.
7. 이안성, 홍성욱, 김호중, 이현, "스팀터빈 발전기 진동진단 시스템 개발", 한국소음진동공학회 지 제 5 권, 제 4호, pp.543-554, 1995.
8. Elsayed, A.E., "Knowledge Based System for Machinery Fault Diagnosis", 6th IMAC, pp. 1230-1238, 1988.
9. Adlassing, K.P., "Fuzzy Set Theory in Medical Diagnosis", IEEE Trans. S.M.C., SMC-16, 2, pp. 260-265, 1986.
10. 전순기, 양보석, "퍼지추론을 이용한 회전기계의 정밀진단법", 한국소음진동공학회, 1995년 추계학술대회 논문집, pp. 284-288, 1995.
11. Zimmermann, H.J., "Fuzzy Set Theory and Its Applications", Kluwer Academic Publishers, 1986.
12. Tsukamoto, Y., "Fuzzy Diagnosis", Operations Research, 26, pp. 698-704, 1981.
13. 신원길, 오길호, 박기호, 김성동, "분산된 고장진단 소프트웨어를 위한 무정지 지원환경의 설계 및 구현", 1996년 한국정보과학회 봄 학술발표논문집 Vol. 23, No. 1, 1996.