한국소음진동공학회지 제 6 권 제 5 호, pp. 547~554, 1996.

〈論 文〉

퍼지추론을 응용한 회전기계의 진동 진단법

Vibration Diagnosis Method of Rotating Machinery Using Fuzzy Reasoning

전 순 기* · 양 보 석**
Soon Ki Jun and Bo Suk Yang

(1996년 2월 22일 접수 ; 1996년 9월 9일 심사완료)

Key Words : Vibration(진동), Rotating Machinery(회전기계), Diagnosis(진단), Fuzzy Reasoning(퍼지추론), Membership Function(멤버쉽함수)

ABSTRACT

Diagnosis is one of the dominant applications of expert systems technology today. Most diagnosis system is apply to if-then rule, and it is called production systems which consist of linguistic data. A new diagnosis method is suggested in this paper, in which the fuzzy reasoning theory is used to diagnosis the rotating machinery. Diagnosis algorithm is made fuzzy reasoned by using linguistic data of fuzziness. Linguistic data for fuzziness was described in fuzzy scale and fuzzy membership function. Then, those lingnistic data have been synthesized and defuzzificated according to every item observed. This system is successfully used for linguistic data in fuzziness of rotating machinery. The results indicate that the realistic application can be built in precision diagnosis system.

1. 서 론

회전기계의 진단에 있어서 진동은 가장 유력한 정보의 하나로서 폭넓게 이용되고 있다. 이러한 진동에 의한 이상판별법에는 주로 진동의 overall진폭 또는 주파수 성분을 이용하여 한계값과 비교하여 이상·정상을 판별하는 진단법과 진동진폭의 변화율에 의한 이상판별법, 이상진동들의 특징을 정리한 인과행렬을 이용하는 방법, 결정목(decision tree)을 이용하는 방법, 진동벡터의 시간적 변화율을 이용하는 방법, 또는 크랙의 위치표정을 하기 위한 AE의 응용 등의 많은 연구가 수행되어 왔다[1].

통상 진동진단에 이용되는 이들의 진단정보들은 크게 구분하면 수치적으로 표현할 수 있는 계량정보(measured information)와 언어정보(linguistic information)로 나눌 수 있다. 특히 정밀진단에 있어서는 수치적인 데이터는 물론 언어적인 정보를 다양하게 이용하여야 한다. 그러나 엄밀히 측정되는 수치데이터에서도 애매성(fuzziness)을 가지고 있으며, 언어적 정보는 수학기호 등과 달라서 더욱 더 애매성을 많이 포함하고 있다. 그럼에도 불구하고 여러형태의 전문가시스템(expert system)에서는 if-then법칙을 이용하여 언어적 정보들에 논리적인 추론이 가능하였다. 예를들면 전문가의 지식을 베이스화 한 Fault tree 방법[2]에 의한 추론 등이 있으나, 여기에서도 통상 Yes와 No의 2치 문제로 실제의 진단문제에서 나타나는 현상·사상을 추론하는 데는 대단히 애매하였다. 이것은 종래의 진단법들에 나타나는 문제이며, 전문가시스템에서도 이러한 애매성을 취급할 필요가 있다. 전문가시스템에서의 애매성을 취급하는 방법이 몇 종류 제안되고 있고, 특히 유명한 것은 EMYCIN의 방법[3]으로서 이론적인 근

*정회원, 인천기능대학 기계설계과
**정회원, 부경대학교 공과대학 기계공학과

거는 빈약하지만 전문가시스템의 선두로서 널리 이용되고 있다. 그외는 주관적인 Bayes법과 Fuzzy논리법[4] 등이 보고되고 있다.

특히 퍼지논리법에서는 이러한 언어적인 애매성을 다루기 위하여, 1973年 Zadeh는 시스템의 언어적 분석에 대한 논문[5]에서 퍼지추론(fuzzy reasoning, approximate reasoning)시스템을 발표하였다. 이 논문에서는 애매성을 포함한 언어를 이용하여 시스템을 기술하는 방법론을 제시하였고, 1974年 Mamdani[6]가 최초로 퍼지제어에 응용하였다. 퍼지추론은 퍼지 production system 법칙[7]을 응용한 것이 대부분으로 수치가 아니라 언어적으로 애매한 변수를 조건부 명제에 의해 애매한 변수간의 관계를 기술하는 형식으로 되어있다[8].

본 논문에서는 상기의 퍼지추론을 도입, 진단에 응용하기 위하여 전문가의 지식을 참고로 관찰항목을 선정하였고, 정밀진단에 필요한 각종의 진단정보(언어적)를 이용할 수 있는 추론과정을 제안하였다. 적용에는 저자들이 보고한 퍼지이론을 이용한 회전기계의 이상진단법[9]을 간이진단용으로 사용하여 고속으로 자동 진단한 후, 상기의 퍼지추론 진동진단법과 연결시키는 진단법을 제안하고 그 유용성을 검토하였다.

2. 퍼지추론의 형식

퍼지추론에는 2가지의 방법이 있다. 하나는 직접법이라 불리워지며, A′와 A→B로 부터 직접 B′을 추론하는 방법이고, 또 하나는 간접법이라고 불리워지며, 명제의 퍼지진리치를 해석하므로서 추론하는 방법이다. 본 논문에서는 직접법을 이용하며, 구조는 다음과 같은 형식을 이용한다.

if=2X 성분이=높고 and 축방향의 진동이=크면 then 축 정렬불양이=확실

if=2X 성분이=높고 and 진동진폭이 회전수 변화에 따라=일정하면 then 축 정렬불량이=확실

이러한 형은 if-then…으로 표현되며, if~의 부분을 전제조건으로, 전건부 또는 조건부(antecedent, assumption, condition part)라 하고, then이하 부분을 결론 또는 후건부, 조작부(conclusion, consequent, operation part)라고 한다. 추론 방법으로는, 이들 형식에 대하여 실제의 관측데이터를 어떻게 조합하여 결론을 도출하느냐 하는 것이다. 퍼지추론의 대표적인 예로서, 「min-max-중심법」[10]이 가장 많이 이용되며, 그 구조는 다음과 같다.

규칙 1 : A_1 and $B_1 \Rightarrow C_1$
규칙 2 : A_2 and $B_2 \Rightarrow C_2$
.....
규칙 n : A_n and $B_n \Rightarrow C_n$
결론 : C'

관찰정보[x_0 and y_0]와 각 규칙 「A_i and $B_i \Rightarrow C_i$」($i=1, 2, \cdots, n$)으로 부터 얻어지는 추론 결과(퍼지집합 C'_i)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\mu C'_i(z) = \min(\mu A_i(x_0),\ \mu B_i(y_0),\ \mu C_i(z)) \quad (1)$$

각각 결론부가 구해진 후, 최종적인 결론이 되는 C'는

$$C' = \max(C'_1,\ C'_2,\ \cdots,\ C'_n) \quad (2)$$

로 되며, 대표치 z_0을 비퍼지화하여 구한다. 비퍼지화(defuzzification) 방법으로는 다음과 같으며,

$$\text{중심법} : \sum B(y)\, y\, dy / \sum B(y)\, dy \quad (3)$$

$$\text{면적법} : \sum b_i S_i / \sum S_i \quad (4)$$

여기서 b_i는 결론부의 대표점, S_i는 결론부의 면적이다.[10] 그 외의 비퍼지화 방법으로는 최대평균법, 최대중앙점, 높이법, 최대높이법 등이 있다. 본 논문에서는 삼각형의 멤버쉽함수를 이용하므로 연산에 용이한 식 (3)의 중심법을 이용한다.

2.1 애매성의 설정 방법

퍼지추론의 특징은 지식을 간단한 기호로서 표시할 수 있다는 것으로 기호에 멤버쉽함수로 의미를 나타낼 수 있다. 따라서 이러한 멤버쉽함수를 어떻게 정의하느냐는 퍼지추론에 있어서 매우 중요한 작업이 된다. 또한 퍼지멤버쉽함수는 주관적으로 결정할 수 있다는 특징을 갖고 있다. 확률분포는 통계학적 근거를 기초로 결정되지만, 이에 반하여 퍼지추론은 언어(라벨)의 의미로서, 엄밀히 정의할 수 없다. 예를들면, 어떤 검사치에 있어서 「이상」이라는 라벨(label)을 볼때 이상이라는 언어에 포함하고 있는 경계의 애매성을 다룰 필요가 있다. 이러한 애매성을 취급하기 위해서는 주관을 표현할 필요가 있으며 퍼지멤버쉽함수는 그 주관과 취미(기호)를 표현하는 것이 된다. 연속량에 대한 퍼지라벨의 멤버쉽함수로서 Fig. 1과 같은 종형(bell)과 삼각형(triangular)이 널리 이용되고 있다[11]. 여기서 멤버쉽함수를 $W_i(x)$ ($i=1\sim n$)로 하면, 종형은

$$W_i(x) = \exp\left[-\frac{(x-b_i)}{a^2}\right] \quad (5)$$

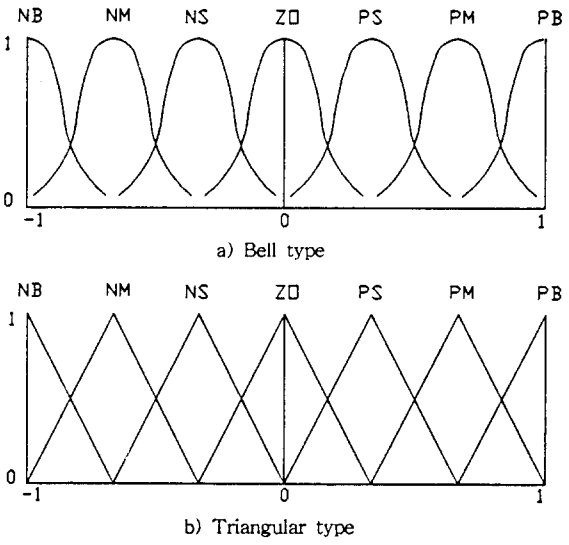

Fig. 1 Fuzzy membership function

로 되며, 삼각형은

$$W_i(x)=\max\left[\frac{-|x-b_i|+a}{a},\ 0\right],\quad (a>0) \qquad (6)$$

으로 표현된다. 여기서 n은 퍼지라벨수, b_i는 멤버쉽함수의 정도가 1이 되는 x의 값, a는 그의 넓이를 표시한다. 본 논문에서는 식 (6)의 삼각형의 멤버쉽 함수를 이용한다.

3. 이상진단 시스템의 구성

본 연구의 퍼지추론은 관찰소견(입력)이 개념정보를 이용하여 진단결과(출력)의 개념정보에 대응시키는 추론방식이다. 예를들어 이 추론방식을 관찰항목 「특징적인 주파수가 회전주파수이다」로 설명하면 입력측에 대한 관찰항목이 [긍정], [약간 부정], [아주 부정]이라는 소견평가의 언어(summarized된 개념정보)를, 출력측에 있어서 [정렬불량의 의심이 강하다], [약간 정렬불량 의심이 있다], [정렬불량 의심이 적다]라는 진단언어에 대응된다. 따라서 고정도의 진단시스템을 구성하기 위해서는 관찰항목의 선정과, 이들 항목간의 조합과 진단결과의 관계(진단 logic) 및 각 항목에 있어서 진단의 기여정도(가중치)가 중요하게 된다.

Fig. 2는 진단추론과정으로서, 소견평가에 의한 입력부문과 이들 입력데이터에 기초한 진단 로직을 기동시키는 추론부분 및 추론결과를 표시하는 출력부분으로 구성된다.

3.1 퍼지 입력 및 멤버쉽함수

종래의 2치 논리에서의 진단평가는 예를들면, 주로 축방향의 진동이 증가한다에 대하여 그렇다, 아니다 등과 같이 2치만의 평가로 한정되었다. 이에 대하여 본 시스템에서는 아니다(0)로 부터 그렇다(1) 까지를 연속된 척도를 도입하여, 검사자가 적소라 생각하는 점을 포인트로 입력하므로서, 각 항목에서의 소견평가는 종래의 2치 평가로 부터 아날로그적으로 평가할 수 있다. 이 0으로부터 1까지의 아날로그 스케일을 퍼지 스케일[12]이라고 부르며, Fig. 3(a)와 같이 점으로 표시한다.

예를들면, 관찰항목 x_1이 관찰자의 소견으로는 특징적인 주파수가 거의 회전주파수와 같으므로 긍정쪽으로 x_1은 0.1에 표시를 한다. 같은 방법으로 x_2, x_3, x_4에 표시를 다음과 같이 [$x_1=0.1$], [$x_2=0$], [$x_3=0$], [$x_4=0.2$]로 소견평가를 한다.

소견평가에 의한 입력 멤버쉽함수를 구성을 하기 위하여 관찰항목 라벨(범위)을 다음과 같이 설정한다. 즉 크게 긍정, 약간 부정, 부정의 3가지 라벨로

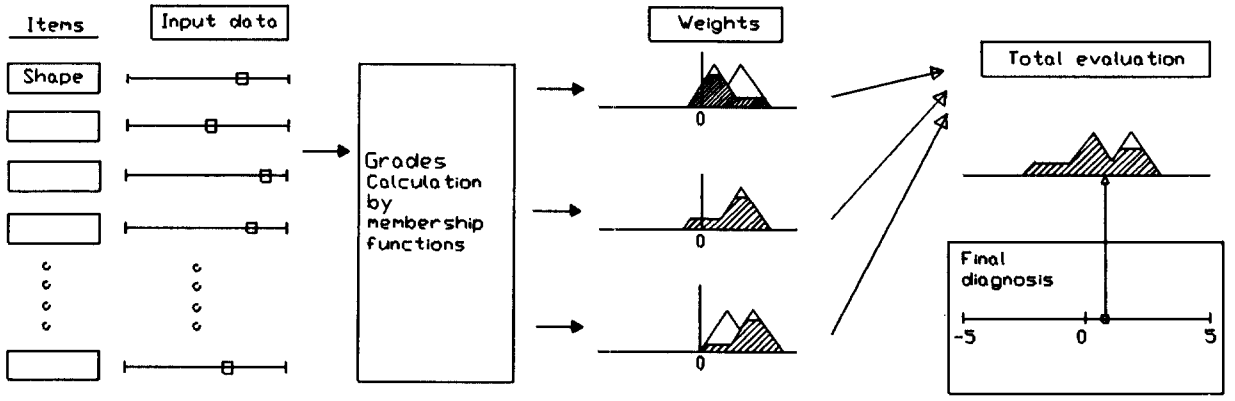

Fig. 2 Fuzzy reasoning process for diagnosis

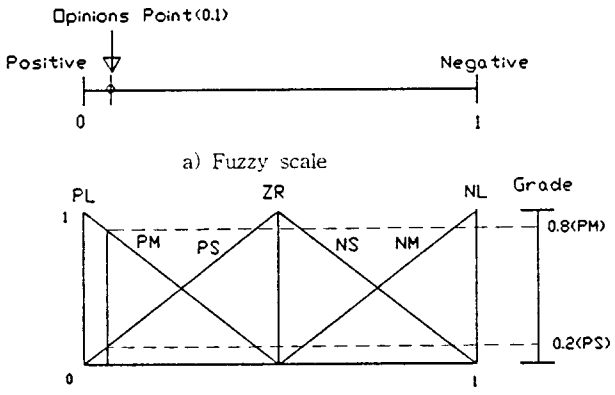

Fig. 3 Fuzzy scale and input membership function

구분하고, 이들 선형의 라벨을 세분해서 다음과 같이 기호로 표시한다(Fig. 3(b)).

PL : Positive Large
PM : Positive Medium
PS : Positive Small
ZR : Zero
NS : Negative Small
NM : Negative Medium
NL : Negative Large

또한 이들 라벨에 대응하는 멤버쉽정도(membership grade)는 Fig. 3(b)와 같이 소견평가 위치와 일치하는 선형의 라벨값을 우측으로 연결하여 계산된 값을 소견평가에 대한 입력 멤버쉽정도로 부른다.

i번째 항목 x_i에 있어서 j번째의 입력 멤버쉽함수를 $W_i(j)$로 표시한다. 관찰항목 x_1의 라벨정도는

W_{11}(긍정)=0.8, W_{12}(약간부정)=0.2, W_{13}(부정)=0

로 된다. n개의 관찰항목을 [특징적인 주파수], [회전수와 진폭의 관계], [위상 변화], [증가하는 진동의 방향]의 4개 관찰항목으로 아래와 같이 선정하고, 각 라벨정도를 정리한 것을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Grade for observation items

No.	Observation items	Opinions	Label grade
1	x_1	$x_1=0.1$	$W_{11}=0.8\,W_{12}=0.2\,W_{13}=0$
2	x_2	$x_2=0$	$W_{21}=1.0\,W_{22}=0.0\,W_{23}=0$
3	x_3	$x_3=0$	$W_{31}=1.0\,W_{32}=0.0\,W_{33}=0$
4	x_4	$x_4=0.2$	$W_{41}=0.6\,W_{42}=0.4\,W_{43}=0$

x_1 : 특징적인 주파수가 회전주파수이다.
x_2 : 변위진폭이 회전수 저하에 따라서 0에 접근하지 않는다.
x_3 : 위상의 변화는 없다(회전에 동기한다).
x_4 : 주로 축방향의 진동이 증가한다.

3.2 퍼지 규칙

회전기계의 이상진단 추론은 1항목 또는 복수개 항목의 조합에 의한다. 예를들면 항목이 [아주 부정]이라면, 정렬불양이 아닐 의심이 강하다. 또 관찰항목 x_1이 약간 부정이라면, 이상 진단은 불명, 수치가 긍정에 가까우면, 정렬불량일 가능성이 크게 된다.

이것을 if-then 규칙으로 표시하면, 다음과 같이 기술할 수 있다.

if x_1 is PL, then Y is PL
if x_1 is PM, then Y is PM
if x_1 is PS, then Y is PS
if x_1 is ZR, then Y is ZR
if x_1 is NS, then Y is NS
if x_1 is NM, then Y is NM
if x_1 is NL, then Y is NL

여기서 x_1은 항목의 소견평가, Y는 이상에 대한 진단결과(가중치)이다. [측정적인 주파수가 회전주파수이다]라는 항목에서 [긍정], [약간 부정], [부정]이라는 라벨은 하나의 개념정보로 퍼지규칙은 이 소견결과 X와 진단 Y를 관계지우는 것이 된다.

3.3 조작부의 멤버쉽함수

관찰항목(1항목 또는 다항목)에 의한 가중치를 표시하는 멤버쉽함수를 진단 가중멤버쉽함수(출력 멤버쉽함수)라 하고, Fig. 4와 같이 설정한다. 이 출력 멤버쉽함수는 1항목 또는 다항목의 조합에 의한 퍼지규칙에 의하여 작성되며, *ZR*, *PS*, *PM*, *PL*, *NS*, *NM*, *NL*의 7개 2등변 삼각형으로 구성된다.

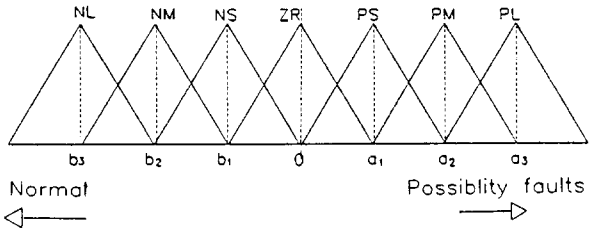

Fig. 4 Output membership function

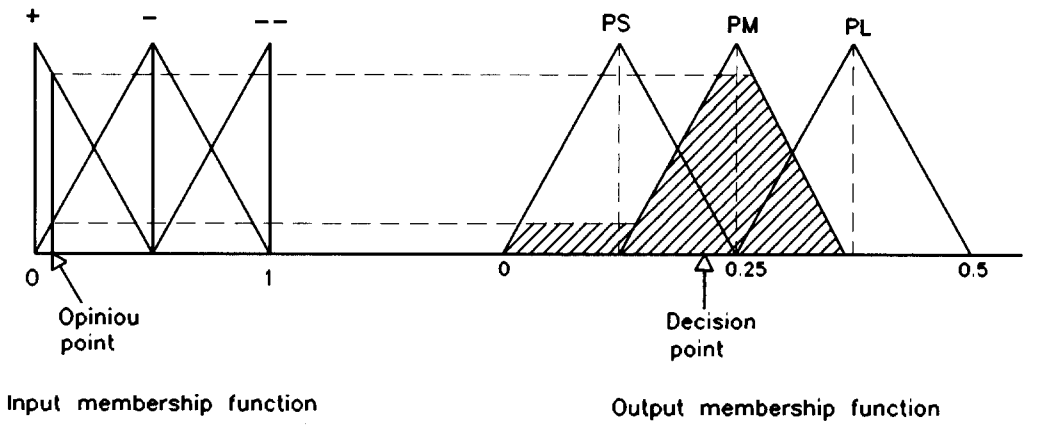

Fig. 5 Fuzzy reasoning for input and output membership functions

예를들어, 관찰항목 x_1의 소견평가 ($x_1=0.1$)에 의한 입력멤버쉽정도는 W_1(긍정)=0.8, W_2(약간부정)=0.2, W_3(부정)=0이 되며, 이것을 이용한 출력멤버쉽함수는 각 라벨정도에 해당하는 머리 부분을 자르고, 그 max집합의 중심을 진단 종합판정으로 한다. 입·출력 멤버쉽함수의 관계는 Fig. 5와 같이 된다.

3.4 퍼지추론 시스템

주어진 n개의 관찰항목에 의한 n항목에서의 종합평가는 항목 마다를 합집합으로 하는 진단평가 방식으로 한다 종합평가 항목의 소견평가(x_i)에 의한 진단의 가중멤버쉽함수와 이어서 평가되는 항목의 가중 멤버쉽함수를 서로 합치는 종합과정을 Fig. 6에 나타낸다. 이 방식을 편의상 추론 Ⅰ방식이라고 하고, 항목과 이상원인 판정의 관계를 명확히 할 수 없는 경우에 초기의 단계로서 유효하다고 생각된다. 본 진단시스템의 항목들은 예로 각 항목 모두 정상일 가능성으로 부터 정렬불량일 가능성까지의 판정 스케일을 가지고, 판정을 1차원으로 표시할 수 있다.

한편 관찰항목 중에서 불분명한 데이터, 예를들면 분석된 데이터가 불분명하거나 데이터 측정이 어려운 항목들이 혼재되어 입력 멤버쉽함수의 결정값이 퍼지영역으로 되었을 경우, 종합시 종합된 결과의 감도를 낮추게 된다. 이러한 것을 방지하기 위하여

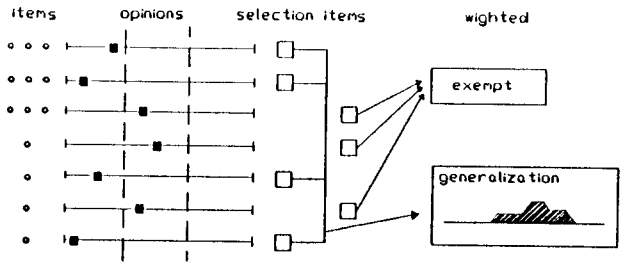

Fig. 7 Summation process of fuzzy reasoning method Ⅱ

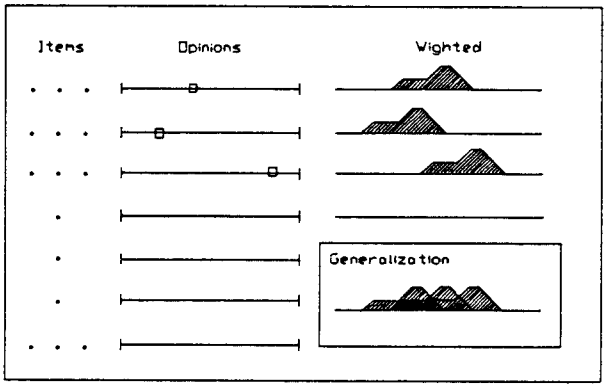

Fig. 6 Summation process of fuzzy reasoning method Ⅰ

Fig. 7과 같이 n개의 관찰항목 중 아니다, 그렇다(0, 1)의 소견을 현저히 표시하는 특정 항목 중 2항목 이상이 $0 \leqq x \leqq 0.25$, $0.75 \leqq x \leqq 1$ 범위에 있으면 그들끼리 새로운 퍼지 규칙을 적용하여 추론을 행하고, $0.25 < x < 0.75$ 부근(fuzzy zone으로 설정)의 불투명한 멤버쉽함수들은 소멸시키는 퍼지추론 방식을 제안하고, 이를 편의상 추론 Ⅱ방식이라 한다. 추론 Ⅱ방식은 관찰항목 전체의 영향을 반영하지 못할 경우가 있으므로 참조정보로서 이용하며, 최종결론은 추론 Ⅰ, Ⅱ를 함께 관찰하여 진단 오류를 최소화 시킨다.

또한 퍼지추론에서 소견평가는 진단자들에 따라서 다른 경우가 많으며, 같은 소견을 재차 평가할 경우일지라도 반드시 같은 소견이 되지 않을 수 있다. 즉 재현성이 불량한 결점이 있다. 따라서 같은 진단항목을 다른 진단자가 평가했을 경우 진단결과가 다르게 될 수 있는 가능성이 있는데, 이 때의 편차를 본 시스템에서는 종합과정과 비퍼지화를 수행하므로서 어느 정도 줄일 수 있으나 개인에 따라 주관이 개재되는 것을 피할 수 없다. 퍼지추론 Ⅱ방식은 이

러한 문제의 해결에 기여하므로서 진단결과의 차를 좁일 수 있다.

3.5 진단 결정을 위한 비퍼지화

이상원인 진단의 종합판정은 다음과 같이 한다. 본 시스템에서는 항목 마다 생성된 멤버쉽함수 N개의 max집합을 취한다. 이 출력 멤버쉽함수의 max 집합의 중심(重心)을 식 (3)을 이용하여 구하고 판정득점 d로 한다.

예로 정렬불량의 이상진단을 판정하기 위하여 미리 정한 판정한계값 S_1, S_2($S_1<0<S_2$)에 의하여 $d>0$이면 정렬불량, $d<0$이면 정렬불량이 아님, 으로 하는 2치논리(가능성이 Yes나 No)의 비퍼지화를 수행한다 적용예에서는 S_1과 S_2의 값을 각각 $S_1=-0.5$, $S_2=0.5$로 설정하였다.

4. 적용예

본 논문에서 제안한 퍼지추론을 응용한 진동진단 알고리즘의 검증을 위하여 참고문헌 9의 간이진단 결과(정렬불량)와 각종 데이터를 이용하여 진단을 수행하였다. 본 적용예에서는 정렬불량 이상진단에 대하여 소개한다. 통상 회전기계의 정렬불량의 결함이 있는 경우에 축크랙에 대한 의심도 크게 나타난다. 따라서 Fig. 8의 진단과정에 의하여 제 1의 결함(정렬불량)에 대하여 먼저 추론하고 이어서 제 2의 결함(크랙)에 대하여 퍼지추론을 수행한다. 추론 I 방식의 결과가 불투명할 경우는 추론 II방식을 실행한 후 최종원인을 판정한다.

Fig. 9의 실험장치는 직경 20mm의 구동축과 피동축을 커플링(disk flexible type)으로 연결했으며, 4개의 볼베어링(#6204)으로 지지하였다 피동축 중간에는 직경 160mm, 폭 17mm인 원판을 장착하였고, 정렬불량 실험을 위하여, 베어링 지지대 밑에 받침

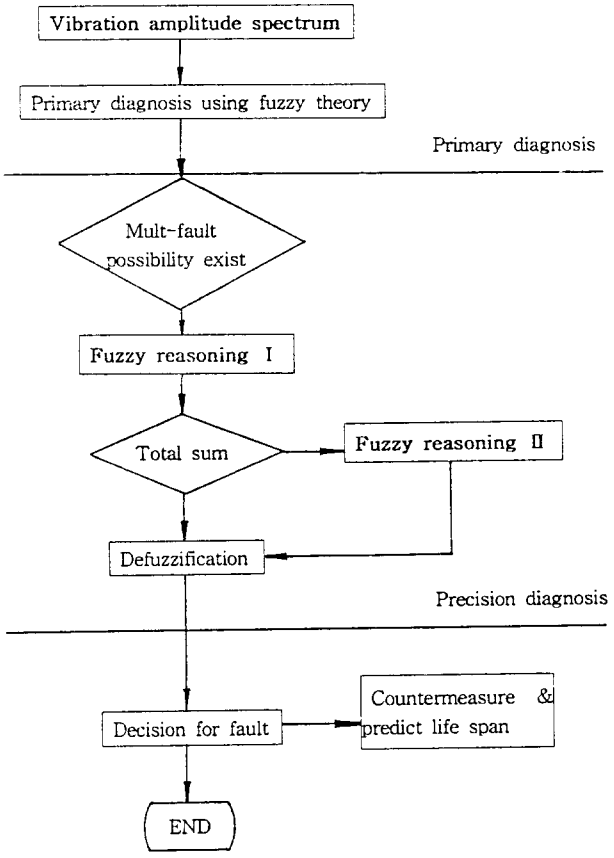

Fig. 8 Diagnosis process

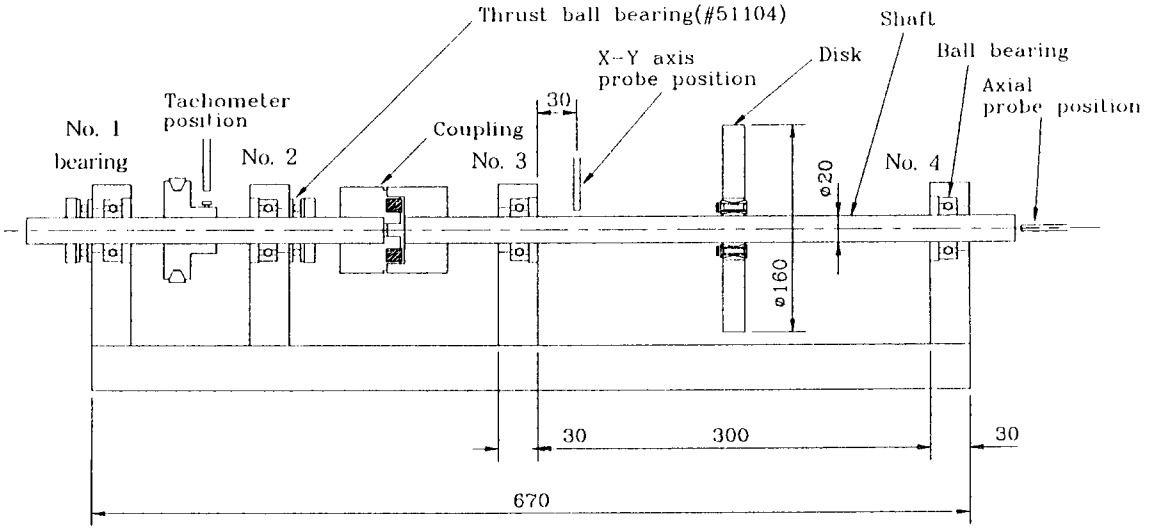

Fig. 9 Experimental apparatus

쇠(shim plate)를 삽입하여 편심정렬불량(parallel misalirnment) 및 편각정렬불량(angualr misalignment)을 발생하도록 하고 받침쇠 두께를 조정하여 편심을 1mm까지, 그리고 편각은 0.164°까지 변화시키며 실험을 수행하였다. 구동축은 5마력(1800rpm)의 전동기를 이용하여 120rpm에서 최대 3600rpm까지 구동시키면서 비접촉식 변위계(Bently 7200)의 출력신호를 주파수 분석기에서 분석하고, 이 결과를 각종의 이상진단을 위한 자료로 사용하였다.

관찰된 데이터로 부터 관찰항목별 진단을 하기 위하여, 우선 관찰항목 x_1(특징적인 주파수가 회전주파수이다)은 진단자의 주관적인 관찰로는 1X, 2X성분이 탁월하므로 x_1의 소견평가는 긍정에 거의 가까운 0.2에 표시하였다. 계속해서 x_2의 관찰소견을 표

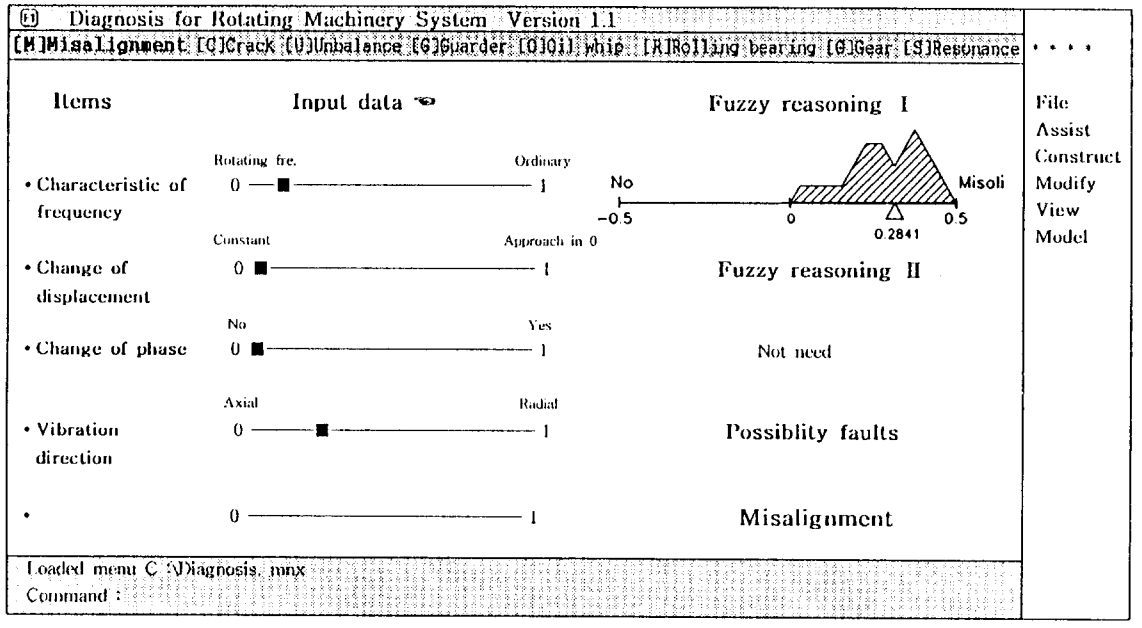

Fig. 10 Diagnosis results in misalignment

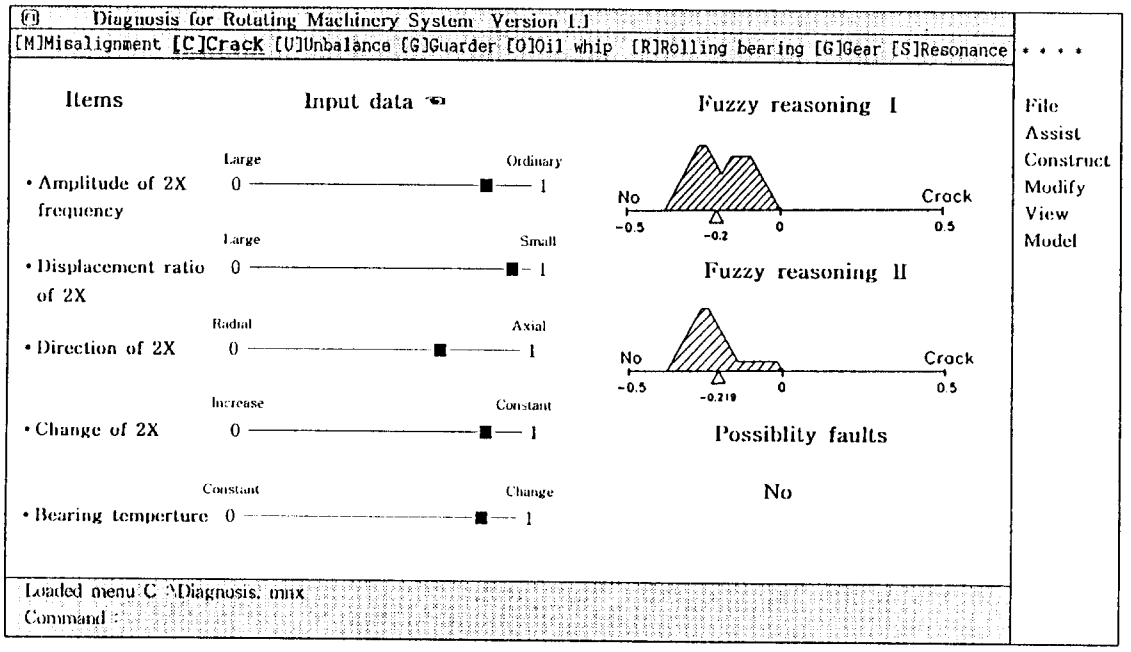

Fig. 11 Diagnosis results in rotor crack

시하기 위하여 실험장치의 회전수를 250rpm에서 3000rpm까지 증가시키며 1X, 2X성분의 변화를 관찰하였다. 관찰결과 진폭의 변위량은 변화가 없어 x_2의 소견평가는 긍정으로 0에 표시하였다. 또한 위상의 변화도 없었고, 축방향과 반경방향의 진동진폭은 거의 비슷한 크기를 갖고 있었으나, 본 실험장치에서는 스러스트볼베어링(#51104)을 양쪽 축에 stopper로 고정시켰으므로 축방향의 진동진폭은 상당히 구속을 받는 상황에서 진단자는 x_4의 소견을 긍정쪽으로 결정하였다. 이와같은 진단자의 소견평가에 의한 정렬불량 결함에 대하여 퍼지추론한 결과는 Fig. 9와 같으며, 비퍼지화 한 최종판정은 정렬불량일 가능성이 0.2841로서 정렬불량일 가능성이 매우 높다.

Fig. 10은 크랙 결함에 대하여 퍼지추론한 결과로 크랙 결함일 가능성이 퍼지추론 Ⅰ방식에서는 −0.2이며, 추론 Ⅱ방식에서는 −0.219로 아닐 가능성이 매우 높다. 따라서 본 정밀진단에서의 추론 결과는 정렬불량 결함으로 판정할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 회전기계의 간이진단 결과로 부터 발생할 수 있는 애매한 진단결과 중에서 가장 가능성이 높은 이상원인을 복수로 선정하고 여러종류의 언어적인 정보들을 if-then 규칙의 퍼지추론으로 이상을 판단하는 진동진단 알고리즘을 제안하고 그 유용성을 검토하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 본 시스템은 전·후건부의 퍼지멤버쉽함수를 언어로 대응시킬 수 있으므로 수치화할 수 없는 언어적인 진동정보를 if-then 규칙에 의하여 퍼지추론을 할 수 있다.

(2) 진단정보의 애매성을 퍼지스케일과 퍼지멤버쉽함수를 이용하여 애매성의 정도를 잘 표현할 수 있다.

(3) 추론과정을 컴퓨터 상에서 그래픽으로 표현할 수 있으므로 추론에 의한 진단과정을 사용자가 쉽게 이해할 수 있다.

(4) 본 시스템은 관찰항목의 추가와 확장이 용이하며, 관찰항목의 선정은 진단대상 기계의 종류 및 크기, 특성에 따라서 변경하기 용이하다. 따라서 다양한 관찰항목을 확장하므로서 고정도의 정밀진단이 가능하다.

(5) 간이진단시 판정에 애매한 결과를 나타내는 축정렬불량과 축크랙의 결함에 본 방법을 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) 藤澤, 1993, "大形回轉機械軸系の振動診斷法," 日本機械學會論文集(C), 第59卷 第568號, pp. 3607～3612.

(2) Collacott, A. R., 1977, "Mechanical Diagonosis and Condition Monitoring," Chapman & Hall.

(3) Shortliffe, E. H., 1976, "Computer-Based Medical Consultation," EMYCIN, Elsevier.

(4) Mizumoto, M., 1991, ファジィ理論とその應用, Science社.

(5) Zadeh, L. A., 1973, "Outline of a New Approach the Analysis of Complex Systems and Decision Processes," IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, No. 1, pp. 28～44.

(6) Mamdani, E. H., 1974, "Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant," Proc, IEE, Vol. 121, No. 12, pp. 1585～1588.

(7) Zadeh, L. A., 1983, "Linguistic variables, approximate reasoning and dispositions," Medical Information, 8(3), pp. 173～186.

(8) Terano, T., and Sugeno, M., 1992, "Fuzzy Systems Theory and Its Application," Academic Press, Boston, MA.

(9) 전순기, 양보석, 김호종, 1996, "퍼지이론을 이용한 회전기계의 이상진단법," 대한기계학회논문집(A) 제20권 제5호, pp. 1411～1418.

(10) 有田靑三郎, 1994, "ファジィ醫療診斷," 日本ファジィ學會, 講座 11, pp. 19～27.

(11) Kenichiro, H., 1994, "Improvement of Control Performances for Low-Dimensional Number of Fuzzy Labelings(Using Fuzzy Control Simulator)," 日本機械學會論文集(C編), 第60卷 第572號, pp. 1315～1322.

(12) 有田靑三郎., 1989, "痛み情報とその數量化-痛みのファジィスケール-," 醫學のあゆみ, 148(4), p. 245.