

퍼지추론을 이용한 회전기계의 정밀진단법

· 전순기*, 양보석**

Vibration Diagnosis of Rotating Machinery Using Fuzzy Inference

(Soon-Ki Jun and Bo-Suk Yang)

1. 서론

최근 애매성이 수반되는 정보를 Zadeh⁽¹⁾는 멤버쉽 수(membership function)를 이용하여 새로운 정보처리 방식으로서 퍼지이론을 제안하였고, 그후 의료계⁽²⁾에서도 퍼지이론을 도입한 진단법들이 제안되었다. 회전기계의 이상진단법으로는 주파수특점법(Point counting method)⁽³⁾, 퍼지역연산법(Inverse method of fuzzy theory)⁽⁴⁾ 등이 보고되고 있으며, 저자들도 퍼지이론을 이용하여 구름베어링의 결합진단⁽⁵⁾, 회전기계의 간이 이상진단법⁽⁶⁾ 등을 보고 하였다. 이들은 주로 진동주파수의 스펙트럼 데이터만을 이용하고 있고, 다른 많은 데이터를 복합적으로 이용할 수 없다. 이 때문에 주로 소규모 문제의 간이진단에서는 효과적이거나 진단대상이 복잡하고 대규모로 되면 보다 정확한 원인 추정이 곤란하게 된다. 또한 수치데이터만을 취급할 수 있으므로 진동전문가가 진단에 이용하는 각종의 수치화 될 수 없는 데이터(언어적 인 정보)가 취급될 수 없다. 따라서 이들의 진단법은 개략적인 진단은 가능하나 상세한 원인까지는 진단할 수 없는 단점이 있다.

회전기계의 이상판단시 참고가 되는 각종 정보로는 주로 진동진폭의 크기, 진폭과 위상의 변화, 진폭의 변화, 진동파형, 진동벡터의 시간변화 등이 있고, 이들은 수치적으로 표현할 수 있는 측정데이터와 판단의 경계가 불명확한 언어정보(범위데이터)로 나눌 수 있다. 후자는 애매성(fuzziness)을 많이 포함하고 있으며, 엄밀히 측정되는 수치데이터에서도 퍼지성을 가지고 있다. 이러한 언어적인 정보의 애매성을 퍼지추론에서는 「수치적 진리치」(numeric truth)와 「언어적 진리치」(linguistic truth)의 개념으로 표현하게 되었다. 수치적 진리치는 확실함의 척도를 [0, 1]사이의 수치를 이용하여 표현하고 있으며, 이 수치는 소건의 확실도로서 가능성을 표현한 것이다. 예를들면, 진동진폭 스펙트럼상에 2X 성분이 상당히 크게 나타나 정렬불량의 가능성이 0.7 정도라고 판정하는 것 등은 이러한 수치적진리치를 이용하는 방법이다.

그러나 상기의 수치적 표현만으로는 확실도를 한개의 수치로서 대표하게 하는 것은 진단의 정밀도에 문제가 있을 것으로 생각된다. 따라서 언어적진리치도

입되어 「상당히 확실」, 「확실」, 「약간 확실」 등의 언어적인 표현을 이용하여 애매성을 표현하게 되었다.

본 논문에서는 간이진단 결과로부터 추출된 애매한 진단결과중에서 가장 가능성이 높은 이상원인을 복수로 선정하고, 여러종류의 수치화할 수 없는 언어적(linguistic)인 정보들을 if-then형식의 퍼지추론으로 종합하는 회전기계의 이상진단을 위한 정밀진단 알고리즘을 제안하고 그 유용성을 검토한다.

2. 이상진단시스템의 구성

본 진단시스템 과정은 관찰항목군(X)으로 부터 정상인가 또는 아닌가를 진단결과(Y)에 대응시키는 것으로, 퍼지추론으로서 관찰소건(입력)의 개념정보를 진단결과(출력)의 개념정보에 대응시키는 추론방식이다. 이 추론방식을 관찰항목 [특정적인 주파수가 회전주파수이다]로 설명하면 입력측에 대한 관찰항목이 [긍정], [약간 부정], [아주 부정]이라는 소견평가의 언어(summarized된 개념 정보)를, 출력측에 있어서 [정렬불량의 의심이 강하다], [약간 정렬불량 의심이 있다], [정렬불량 의심이 적다] 라는 진단언어(summarized된 개념정보)에 대응시킨다. 이 추론 방식을 if-then 규칙이라 부르며, 예를들면 if [특정적인 주파수가 회전주파수이다]가 긍정, then [정렬불량 일 가능성이 크다] 처럼 소견평가가 정렬불량 진단의 언어와 연결된다.

지금 n개의 관찰항목 x_1, x_2, \dots, x_n 이 선택되고 항목군과 진단결과 Y와의 관계가 확립되어 있다고 하면 진단과정은 크게 나누어 다음 3가지 부분으로 된다. 즉 각 항목에서 소견평가에 의한 입력부분과, 이들 입력데이터에 기초한 진단 logic을 기동시키는 추론부분 및 추론결과를 표시하는 출력부분으로 구성된다.

3. 퍼지 입력

종래의 2치 논리에서의 진단평가는 예를들면, 주로 축방향의 진동이 증가한다에 대하여 그렇다, 아니다 등과 같이 2치 만의 평가로 한정되었다. 이에 대하여 본 시스템에서는 그렇다(1)로 부터 아니다(0) 까지를 연속된 척도를 도입하여, 검사자가 적소라 생각하는 점을 포인트로 입력하므로써, 각 항목에서의 소견평가는 종래의 2치 평가로 부터 아나로그적으로 평가할 수 있다.

* 정희원, 인천기능대학 기계설계과

** 정희원, 부산수산대학교 기계공학과

이 0 으로부터 1까지의 아나로그 스케일을 퍼지 스케일^{m)}이라고 부른다.

관찰항목 [특징적인 주파수가 회전주파수이다]를 예로 설명하면, 특징적 주파수가 회전주파수이다 를 미리 [긍정], [약간 부정], [부정]의 3가지 레벨(혹은 범위)로 나누고, 또한 이 3개의 레벨에 대한 정도(grade)를 결정하기 위하여 입력 멤버쉽함수를 설정하고, 이 항에 대한 소견평가를 Fig. 1과 같이 점으로 표시한다.

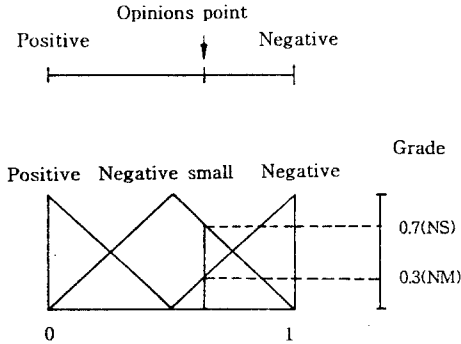


Fig. 1 Input Membership function and grade

4. 이상진단 추론 순서

예를들어, 관찰항목을 [특징적인 주파수], [회전수와 진폭의 관계], [위상 변화], [증가하는 진동의 방향]의 4개 관찰항목으로 아래와 같이 선정하고, 이것을 퍼지추론의 if-then 규칙으로 구성하는 방식을 설명한다.

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

4.1 입력 및 조건부의 멤버쉽함수

주어진 각 관찰항목에 대하여 진단자는 주관적 소견이 0으로 부터 1까지의 직선상에 적당하다고 생각되는 점을 표시(아나로그적 평가)한다.

예를들면, 정렬불량의 관찰항목 x_1 이 관찰자의 소견으로는 특징적인 주파수가 거의 회전주파수인 것 같으므로 긍정쪽으로 x_1 은 0.1에 표시를 한다. 같은 방법으로 x_2, x_3, x_4 에 표시를 다음과 같이 [$x_1=0.1$], [$x_2=0$], [$x_3=0$], [$x_4=0.2$] 로 소견평가를 한다.

조건부(condition part)의 멤버쉽함수에 대한 관찰항목 레벨(범위)을 다음과 같이 설정한다. 즉 (긍정, 약간 부정, 부정)의 3가지 레벨로, 이들 레벨을 다음과 같이 기호로 표시한다.

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

또한 이들 레벨에 대응하는 멤버쉽함수를 미리 설정하여 놓는다. 이것을 소견평가에 있어서 입력 멤버쉽함수로 부른다.

i번째 항목 x_i 에 있어서 j번째의 레벨 정도를 $W_j(i)$ 로 표시한다. 관찰항목 x_1 에 있어서 레벨 긍정(-), 약간 부정(+), 부정(++의 정도는

$$W_1(-)=0.8, W_2(+)=0.2, W_3(++)=0$$

로 된다. n개의 관찰항목에 대한 각 레벨의 정도를 정리 한것을 Table 1에 표시한다.

Table 1 Grade for observation item

No.	Observation item	Opinions	Grade of level
1	x_1	$x_1 = 0.1$	$W_1=0.8 W_2=0.2 W_3=0$
2	x_2	$x_2 = 0$	$W_1=1.0 W_2=0.0 W_3=0$
3	x_3	$x_3 = 0$	$W_1=1.0 W_2=0.0 W_3=0$
4	x_4	$x_4 = 0.2$	$W_1=0.6 W_2=0.4 W_3=0$

4.2 퍼지 규칙

회전기계의 이상진단 추론은 1항목 또는 복수개 항목의 조합에 의한 퍼지규칙으로 부터 출발하지만, 여기서는 관찰항목이 1항목인 경우(x_1)와 2항목의 경우(x_1 과 x_2)를 예로들어 설명한다.

(i) 1 항목의 경우

항목이 [아주 부정] 이라면, 정렬불량이 아닐 의심이 강하다. 또 관찰항목 x_1 이 약간 부정이라면, 이상 진단은 불명, 수치가 긍정에 가까우면, 정렬불량일 가능성이 크게 된다.

이것을 if-then 규칙으로 표시하면, 다음과 같이 기술된다.

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

여기서 x_1 은 항목의 소견평가, Y는 이상에 대한 진단결과(가중치) 이다. [특징적인 주파수가 회전주파수 이다]라는 항목에서 [긍정], [약간 부정], [부정]이라는

레벨은 하나의 개념정보이다. 퍼지규칙은 이 소견결과 X와 진단 Y를 관계지우는 것이 된다.

(ii) 2 항목의 경우

특징적 주파수가 회전주파수이고, 변위진폭이 회전수 저하와 관계없이 일정하다고 하면, 정렬불량 이상의 가능성은 아주 크다. 이것을 if-then 규칙으로 기술하면,

if x_1 is PL and x_2 is PL, then Y is PL

상기의 2개 항목의 종류를 조합하는 퍼지규칙을 Table 2에 정리한다.

Table 2 Two observation item with fuzzy rule

		x1		
		N(-)	P(+)	PL(++)
x2	N(-)	NL	PS	PM
	PS(±)	ZR	PM	PL
	PM(+)	PM	PL	PL
	PL(++)	PL	PL	PL

관찰항목 x_1 과 관찰항목 x_2 의 2항목에 의한 퍼지규칙인 Table 2의 각 cell에서 정도는 각 cell에서의 항목 사이의 최소 정도(min 방식)를 채용하였다. 즉 일반적인 i번째의 항목과 j번째의 항목에 대한 cell(m,n)에 대한 정도들을 $W(m, n) = \min \{ W_i(m), W_j(n) \}$ 으로 한다.

4.3 조작부(operation part)의 멤버쉽함수

관찰항목(1항목 또는 다항목)에 의한 진단을 위한 가중치를 표시하는 멤버쉽함수를 진단의 가중멤버쉽함수(출력 멤버쉽함수)라 하고, Fig. 2와 같이 설정한다. 이 출력멤버쉽함수는 1항목 또는 다항목의 조합에 의한 퍼지규칙에 의하여 작성된다.

출력 멤버쉽함수는 2등변 삼각형으로 구성되며, ZR, PS, PM, PL, NS, NM, NL 의 중심점을 $a_0, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$, 그리고 그들의 밑변의 1/2폭을 $h_0, h_1, h_2, h_3, k_1, k_2, k_3$ 로 놓고 이것들을 가중계수라 한다.

다음 1항목의 경우에 대해 관찰항목 x_1 이 정렬불량 진단의 종합평가를 출력 멤버쉽함수를 이용하여 그림에 표시하자. 관찰항목 x_1 의 1항목에 대한 가중계수는

$$a_0 = 0, a_1 = 2, a_3 = 6$$

로 한다.

또한 입력레벨 수는 3개(공정, 약간부정, 부정), 구별점은 $t=0.5$ 로 한다.

이 경우 관찰항목 x_1 의 소견평가($x_1=0.1$)에 의하

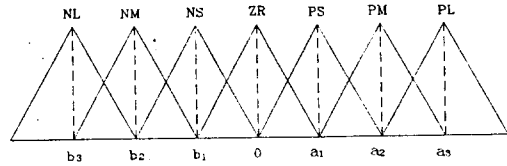


Fig. 2 Output membership function for wighed factor

여 각 레벨의 정도는

$$W_1(-) = 0.8, W_2(+) = 0.2, W_3(++) = 0$$

으로 되기 때문에, 정도에 의하여 출력멤버쉽함수의 머리 부분을 자르고, 그 max집합의 중심을 진단 종합판정으로 한다.

입력 멤버쉽함수와 출력 멤버쉽함수의 관계는 Fig. 3과 같이 된다.

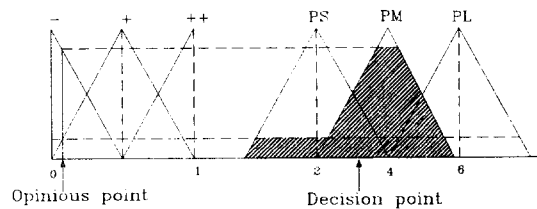


Fig. 3 Fuzzy reasoning for Input and output membership function

5. 퍼지추론 시스템

주어진 n개의 관찰항목에 의한 n항목에서의 종합평가는 항목 마다를 합집합으로 하는 진단평가 방식으로 한다. 종합평가항목의 소견평가(x_i)에 의한 진단의 가중멤버쉽함수와 이어서 평가되는 항목의 가중멤버쉽함수를 서로 합치는 종합과정을 Fig. 4에 표시한다.

본 진단시스템은 항목과 이상원인 판정의 관계를 명확히 할 수 없는 경우에 초기의 단계로서 유효하다고 생각된다. 단 이것은 진동정보의 애매함이나 입력의 변동(흔들림)에 대하여 강인성(robustness)과 안정성(stability)이 있다. 본 진단시스템의 항목은 각 항목 모두 정렬불량일 가능성으로 부터 아닐 가능성까지의 판정 스케일을 가지고, 판정을 1차원으로 표시할 수 있다.

6. 진단 결정을 위한 비퍼지화 (defuzzification)

이상원인 진단의 종합판정은 다음과 같이 한다. 본 시스템에서는 항목 마다 생성된 멤버쉽함수 n개의 max집합을 취한다. 이 출력멤버쉽함수의 max집합의 중심을 판정특점 d로 한다.

예로 정렬불량 진단은 이 구해진 특점과 미리 정한 판정한계값 $S_1, S_2 (S_1 < 0 < S_2)$ 에 의하여 $d > S_2$ 이

면 정렬불량, $d < S_1$ 이면 정렬불량이 아님, $S_1 \leq d \leq S_2$ 이라면 판정불명(fuzzy zone)으로 한다. 응용 예에서는 S_1, S_2 의 값을, $S_1 = -0.5, S_2 = 0.5$ 로 설정하였다.

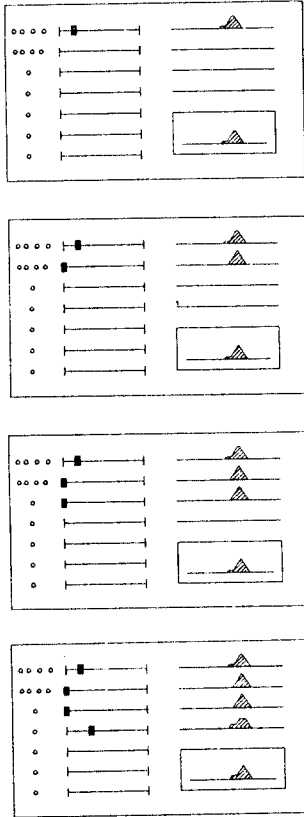


Fig. 4 Summation process of output membership function

7. 응용 예

퍼지 이론을 이용한 회전기계의 이상진단에서 간이 진단한 결과, 정렬불량의 결합이 있는 경우는 축크랙에 대한 의심이 상당히 크게 나타남을 알 수 있다.

우선 본 연구에서 제안한 퍼지추론을 이용한 정밀진단법으로 정렬불량 결합일 가능성에 대하여 추론한다. 이어서 축크랙 결합 일 가능성에 대하여 같은 방법으로 추론하여 그 판정결과를 추출한다. 정렬불량(parallel misalignment)을 진단하기 위하여 실험장치에서 얻은 데이터로부터 관찰항목 x_1 (특정적인 주파수가 회전주파수이다)은 진단자의 주관적인 관찰로는 1X, 2X성분이 탁월하므로 x_1 의 소견평가는 긍정에 거의 가까운 0.1에 표시하였다. 한편 x_2 의 관찰조건을 표시하기 위하여 실험장치의 회전수를 250rpm에서

3000rpm까지 증가시키며 1, 2X성분의 변화를 관찰하였다. 관찰결과 진폭의 변위량은 변화가 없어 x_2 의 소견평가는 긍정으로 0에 표시하였다. 또한 위상의 변화는 없었고, 축방향과 반경방향의 진동진폭은 거의 비슷한 크기를 갖고 있었으나, 본 실험장치에는 스톱퍼 볼 베어링(#51104)을 양쪽 축에 stopper로 고정시켰으므로 축방향의 진동진폭은 상당히 구속을 받는 상황에서 진단자는 x_1 의 소견을 긍정적으로 결정하였다. 이와같은 진단자의 소견평가에 의한 정렬불량 결합에 대하여 퍼지추론한 결과는 Fig. 5와 같으며, 비퍼지화 한 최종판정은 정렬불량 일 가능성이 0.25로서 정렬불량 일 가능성이 매우 높다.

Fig. 6은 크랙 결합에 대하여 퍼지추론한 결과로 크랙 결합일 가능성이 -0.25로서 아닐 가능성이 매우 높다. 따라서 본 정밀진단에서의 추론 결과는 정렬불량 결합으로 판정할 수 있다.

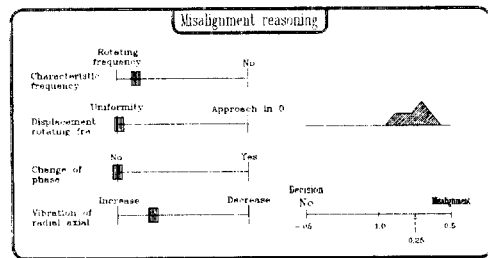


Fig. 5 Diagnosis result in misalignment

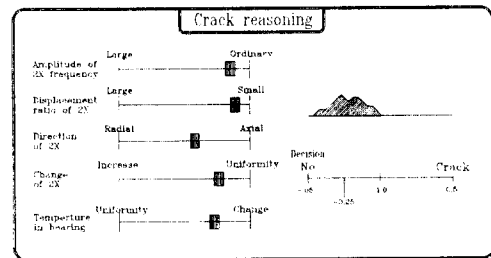


Fig. 6 Diagnosis result in rotor crack

8. 결론

본 연구에서는 회전기계의 이상진단을 위하여 진동 주파수 스펙트럼 정보만을 이용한 간이진단 결과로부터 추출된 애매한 진단결과 중에서 가장 가능성이 높은 이상원인을 복수로 선정하고 여러종류의 수치화할 수 없는 언어적인 정보들을 if-then 규칙의 퍼지추론으로 판단하는 정밀진단 알고리즘을 제안하고 그 유용성을 검토하였다.

- 1) 수치화할 수 없는 언어적인 진동 정보를 if-then 규칙에 의하여 퍼지추론하므로 각종의 진단정보를 제한없이 진단에 이용할 수 있다.

- 2) 진단항목의 추가와 확장이 용이하며, 경우에 따라 선 고장빈도가 높은 결합항목을 가중하는 방법도 고려할 수 있다.
- 3) 경계가 애매한 정보를 퍼지스케일에 의하여 0에서부터 1까지 연속량으로 아나로그적인 입력이 가능하여 진단자의 주관을 쉽게 나타낼 수 있다.
- 4) 간이진단시 판정에 애매한 결과를 나타내는 측정렬불량과 축 크랙의 결합 등의 정밀이상진단에 유용성이 있었다.

참고 문헌

- 1) L. A. Zadeh., Fuzzy Sets, Information and Control, 8, pp. 338-353 1965
- 2) 有田青三郎., ファジィ医療診断, 日本ファジィ學會 pp141-164, 1994
- 3) Songbo, X. and Huang,W., A Method in the Fault Diagnosis of Turbomachine and it's Application, ASME Conf. on Mechanical Vibration and Noise, Miami 1991
- 4) Yahachiro, T. and Tsutomu, T., Method of Solution to Fuzzy Inverse Problem, 計自論 15-1, 1979
- 5) 양보석, 전순기, 김남철, 퍼지이론을 이용한 구름 베어링의 결합진단, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 pp, 193-197, 1993
- 6) 전순기, 양보석, 김호중, 퍼지이론을 이용한 회전 기계의 이상진단법, 대한기계학회 논문집 투고중, 1995
- 7) 有田青三郎., “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), pp.245. (1989)