

퍼지이론을 이용한 회전기계의 이상진단법

° 전순기*, 양보석*, 김호중**

(Vibration Diagnosis Method for Rotating Machinery Using Fuzzy Theory)

(S.K.Jun, B.S.Yang, H.J.Kim)

1. 서론

최근의 회전기계는 기술혁신으로 복잡화 대형화 되어감에 따라 상태감시(condition monitoring)와 초기 결함진단법이 최근에 주목되고 있다. 이것은 maintenance비용의 절감과 치명적인 사고의 회피, plant의 이용증가 등의 경제적인 이익을 얻을 수 있기 때문에 회전기계의 이상진단 시스템에 대한 많은 연구가 되어 왔으며, 산업현장에서는 이러한 시스템의 중요성을 충분히 인식하고 있다⁽¹⁾.

회전기계의 진단법은 주로 측정된 주파수스펙트럼의 성분분포와 진동진폭의 한계값(threshold value)을 비교하여 이상/정상을 판별하고 있다. 그러나 실제의 진동진폭 등이 한계값 이하라도 회전기계 내부에는 이상원인인 결함이 발생하고 있는 것이다. 이와같은 경우, 종래의 2차논리 만으로는 정상과 이상의 중간단계에 대한 중요한 정보를 놓칠 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 정상과 이상 중간단계의 정보까지 정량적으로 기술하기 위하여 퍼지논리가 도입되어 진단에 응용되고 있다. 퍼지논리를 도입한 회전기계의 진단법으로서 주파수독점법(Point counting method)⁽²⁾, 퍼지역연산법(Inverse method of fuzzy theory)⁽³⁾, 주파수스펙트럼의 피크값을 고려하는 방법⁽⁴⁾ 등이 보고되고 있으며, 결함의 징후를 비교적 잘 진단하고 있다. 그러나 상기의 방법은 간의진단 정도의 진단법으로서 회전기계의 진동 특성상 정상과 이상 사이의 중간단계의 징후를 높은 정밀도로 판단하기에는 부족함이 있다. 따라서 중간단계의 징후를 정밀하게 판단할 수 있는 발전된 진단법이 요구된다.

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

2. 퍼지 연산

* 부산수산대학교 기계공학과

** 한국중공업(주) 기술연구소

고전적인 집합이론에서는 집합의 경계와 영역은 확정론적(deterministic)으로 표시되며, 이것은 0과 1사이로만 설명되므로 중간단계에 대한 중요한 정보를 놓칠 수 있음을 의미한다. 그러나 비결정론적 경계를 갖는 퍼지집합은 구간 [0 1]에서 A가 속하는 변수 x_i 의 정도를 나타내는 수많은 구간으로 Fig. 1과 같이 나누어 진다. 멤버십함수 $\mu_A(x)$ 는 변수 x_i 와 A의 결과를 나타낸다. 그러므로 퍼지 집합은 멤버십함수에 의해 중간단계의 중요한 정보까지도 기술할 수 있다.

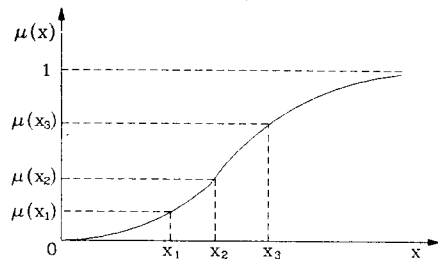


Fig. 1 Fuzzy logic scheme

퍼지관계 기본연산으로서 본 논문에서 사용되는 대수곱, 대수합 연산을 정의하면 다음과 같다.

(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 $R \hat{S}$ 라 쓰며

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

3. 결함진단의 실험

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 실험장치를 보이고 있다. 실험장치는 직경 20mm의 축을 4개의 볼베어링(#6204)으로 지지 하며, 스펜 중간에 직경 160mm, 폭 17mm인 원판을 장착하였다. 5마력(1800rpm)의 전동기를 이용하여 120rpm에서 최대 3600rpm까지 구동시키면서 비접촉식 변위계(Bently 7200)의 출력신호를 주파수분석기(CF-500, ONO SOKKI)에서 분석하고 이 결과를 각종의 이상진단을 위한 자료로 사용하였다.

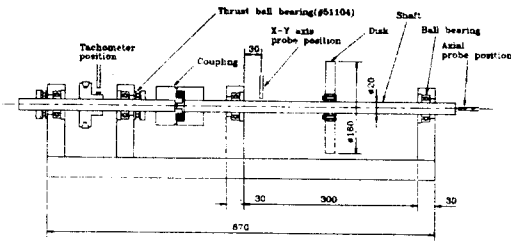


Fig. 2 Experimental apparatus

4. 퍼지수법에 의한 진단

본 연구에서 제안하는 퍼지결합진단 시스템은 Fig. 3과 같이 1차 및 2차 진단으로 구성된다. 1차 진단에서는 동기

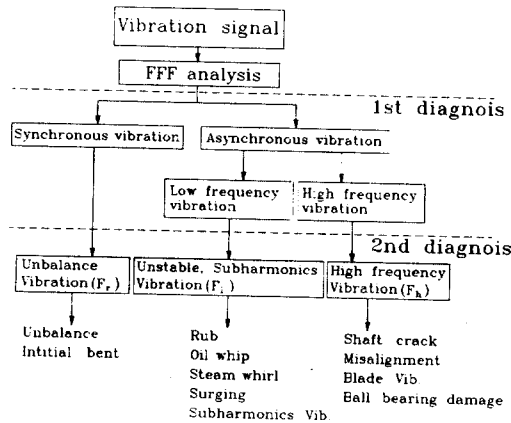


Fig. 3 Flow chart of diagnosis method

진동과 저주파 및 고주파의 비동기진동을 진단한다. 그리고 1차 진단결과에 따라 그 영역 내에 존재하는 이상원인을 세분하여 최종진단을 하게 된다. 이하에 각 단계별로 본 실험에서 얻어진 misalignment 데이터를 이용하여 본 진단법을 설명한다.

4.1 진동진폭의 membership 함수

진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 진동치 라는 것을 나타내기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 semi-Cauchy 형의 멤버십함수를 식 (3)과 같이 채용하였다.

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

Fig. 4는 식(3)의 멤버십함수로서, 회전수동기(1X)성분의 계수로는 $a=0$, $k=1/625$ 를, 그 외의 주파수대역에 대해서는 $a=0$, $k=1/156$, $k=1/100$ 등으로 가중치를 고려한 계수를 이용한다. 이는 1X 성분의 진동진폭이 $25\mu\text{m}$ 일때를 한계치(threshold value)로 설정하여 멤버십함수의 정도가 0.5로 되도록 기울기 k 를 정하고, 그 외의 진동진폭은 $12.5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$ 일 때를 한계치로 하였다. 이 멤버십함수에 의해 진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 주파수인 것을 판정하는 퍼지 정도치를 구하면 Table 1과 같다.

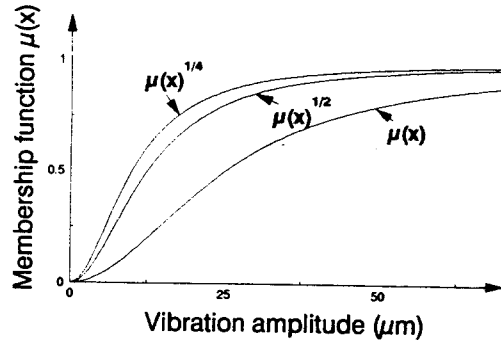


Fig. 4 Membership function for vibration amplitude

4.2 발생 주파수의 membership 함수

Table 1의 주파수에 대하여 회전동기성분과 저주파성분, 고주파성분을 구별하기 위하여 Fig. 5의 선형 멤버십함수를 제안한다. 이 함수는 1X 성분의 정점과 저주파성분과 고주파성분의 정점을 1로 놓고 그 주파수와 인접하는 다른 주파수에서의 정도 0의 점을 연결하는 3각형으로 만든 형이다. 이 membership 함수를 이용하여 Table 2에 각 주파수 마다의 퍼지정도치를 구하였다.

Table 1 Fuzzy grade of vibration amplitude

No	Frequency	Amplitude	Grade of membership
1	1 X	14.224 μm	0.245
2	2 X	13.716 μm	0.995
3	3 X	2.54 μm	0.866

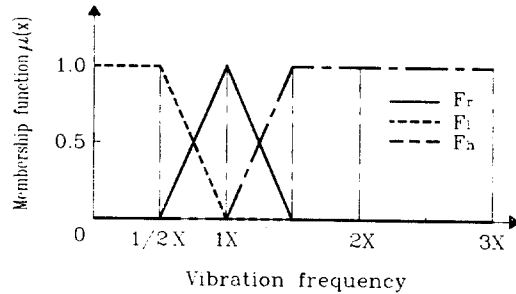


Fig. 5 Triangular membership function for frequency

Table 2 Fuzzy grade of vibration frequency

No	Frequency	F ₁	F _r	F _h
1	1 X	0	1.0	0
2	2 X	0	0	1.0
3	3 X	0	0	1.0

4.3 퍼지 결합진단

Table 1의 진동진폭 멤버십정도를 Table 2의 각 주파수 마다의 퍼지 정도값과 식(2)의 퍼지 대수곱연산을 수행한 후, 각 주파수 마다 퍼지 대수합연산을 수행하면 Table 3 의 하단의 값이 얻어진다. 즉 1차 진단결과, 동기진동일 가능성의 정도는 0.245이고, 고주파진동일 가능성의 정도는 0.999이므로 이 결과로부터 고주파진동(F_h)으로 진단할 수 있다.

Table 3 Fuzzy grade value of flow appering

No	F _l	F _r	F _h
1	0	0.245	0
2	0	0	0.995
3	0	0	0.866
sum	0	0.245	0.999

다음에 2차 진단을 위해 Table 4, 5는 본 연구에서 제안하는 decision table로서 회전기계에 관한 많은 data를 집약한 결과로부터 얻어진 각 주파수 성분의 percentage possibility가 표시되고 있고 이것을 판정의 가중치로 이용한다. 또한 판정의 정밀도를 위하여 불안정, 분수조화진동은 Table 4로, 고주파 진동은 Table 5로 구분하여 2차 진단을 한다.

Table 4 Decision table for low frequency vibrations

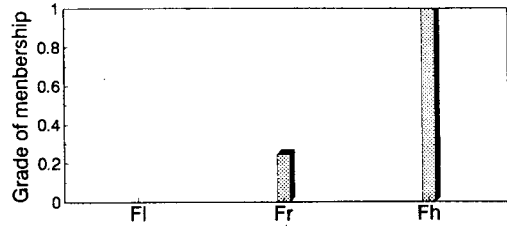
Cause	0~40%	1/2X	1/4X	40~50%	50~100%	1X	2X	nX	etc.
Seal rub	0.2			0.2	0.2	0.4			
Rotor rub	0.1			0.1	0.1	0.6			0.1
Insufficient shrink	0.4			0.4	0.1				
Friction whirl	0.8			0.1	0.1				
Oil whirl, whip				1.0					
Subharmonics		0.5	0.5						

Table 5 Decision table for high frequency vibrations

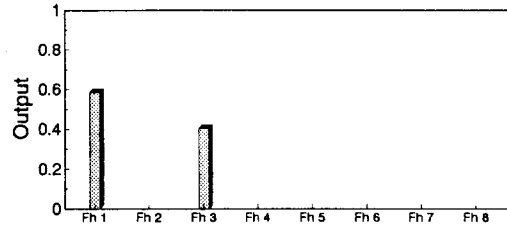
Cause	1X	2X	3X	nX	zX	fg	fi	fo	fb
Misalignment	0.4	0.5	0.1						
Harmonic resonance	0.1	0.3	0.3	0.3					
Shaft crack	0.4	0.2	0.2	0.2					
Vane passing Vibration					1.0				
Gear damage						1.0			
Inner race damage							1.0		
Out race damage								1.0	
Ball damage									1.0

1차 진단 결과 고주파진동 이므로 Table 5를 이용하여 Table 1의 진동진폭 멤버십함수의 퍼지정도값과 퍼지대수곱 연산을 한후 각각의 결합원인항목을 퍼지 대수합 연산을 하면 Fig. 6(b)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서 0.586으로 가장 많은 득점을 한 것은 F_h1(misalignment)

이고, 따라서 misalignment에 의한 진동으로 진단할 수 있다. 이때 F_h3(shaft crack)의 득점값이 0.403으로서 결합 가능성이 있으므로 역시 진단에 고려하여야 한다.



(a) First diagnosis



(b) Second diagnosis

Fig. 6 Diagnosis result in misalignment defects

4.4 결합진단 적용예

본 진단방법의 유용성을 폭넓게 검증하기 위하여 여러가지의 결합이 발생한 진동data를 수집하여 본 진단법에 다음과 같이 적용하였다.

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

Table 6 Fuzzy grade of vibration amplitude

No	Frequency	Amplitude	Grade of membership
1	16.5 Hz	50.2 μm	0.803
2	33.5 Hz	4.1 μm	0.026
3	50.0 Hz	4.1 μm	0.026

상기의 방법으로 1차 진단을 한 결과 Fig. 7과 같이 회전 동기성분의 값이 0.803으로 Fig. 3에 의하여 1차 진단만으로 불평형진동으로 진단할 수 있다.

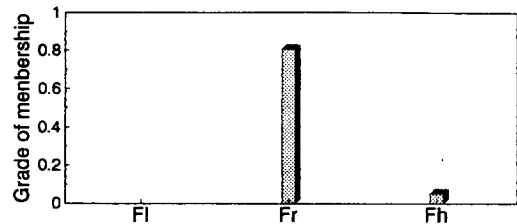
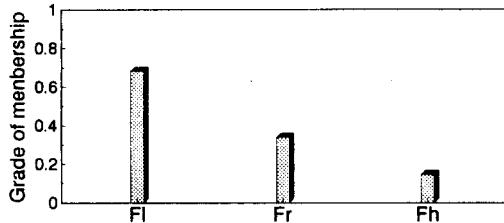


Fig. 7 Diagnosis result in unbalance

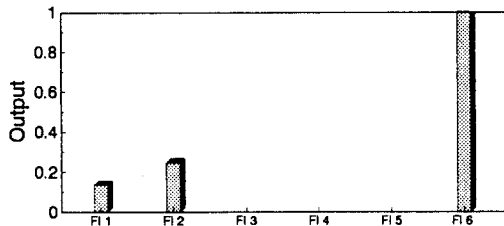
같은 방법으로 Table 7의 data를 진단한 결과 1차 진단의 결과는 Fig. 8(a)에서 저주파성분 이므로 Table 5의 decision table을 이용하여, 2차진단을 한 결과 Fig. 8(b)와 같이 $F_1/6$ (subharmonics)로서 진단할 수 있다.

Table 7 Fuzzy grade of vibration amplitude

No	Frequency	Amplitude	Grade of membership
1	1/2 X	14.65 μm	0.681
2	1 X	17.82 μm	0.336
3	2 X	5.14 μm	0.145



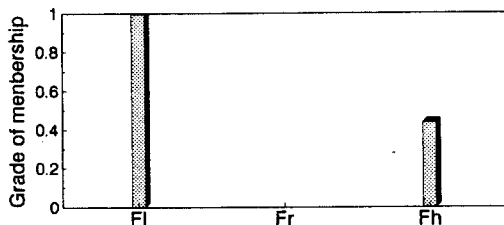
(a) First diagnosis



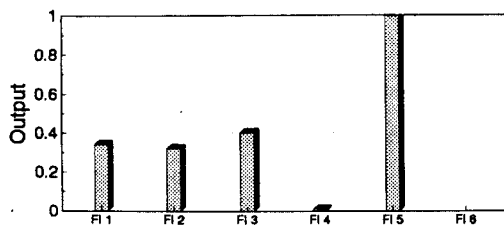
(b) Second diagnosis

Fig. 8 Diagnosis result in subharmonics

Fig. 9(a)는 저어닐베어링으로 지지된 실험장치에서 측정된 데이터로 1차 진단 결과 저주파진동으로 2차 진단을 한 결과 Fig. 9(b)의 $F_1/5$ (oil whip)로 진단되었다.



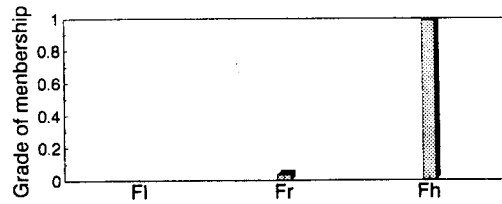
(a) First diagnosis



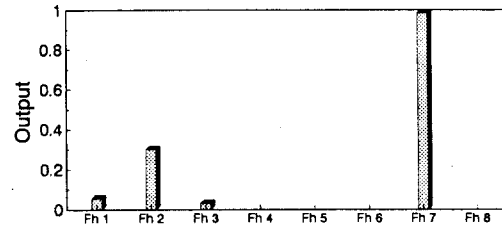
(b) Second diagnosis

Fig. 9 Diagnosis result in oil whip

Fig. 10은 외륜에 결함이 있는 볼베어링에 대한 진단으로서 주파수 분석된 data를 이용하여 1차진단을 한 결과 1X, 2X 성분에 비하여 고주파성분(전동체 통과 주파수)의 진동 진폭이 특히 탁월한 결과를 보이고 있다. 따라서 Table 5를 이용하여 진단한 결과 Fig. 10과 같이 $F_h/7$ (베어링 외륜결함)으로 진단할 수 있다.



(a) First diagnosis



(b) Second diagnosis

Fig. 10 Diagnosis result in ball bearing defects

5. 결론

퍼지기법을 이용한 회전기계의 이상진단 시스템을 제안하고, 실험 및 각종 계측data를 이용하여 본 진단법의 유용성을 검토하였다.

- 1) 본 논문에서 제안한 진동진폭과 진동주파수에 대한 멤버십함수의 퍼지연산을 이용한 2단계 진단법이 다른 진단법보다 타당성 있는 진단결과를 제공하였으며, 그 유용성을 확인하였다.
- 2) 앞으로 본 퍼지 진단법을 발전시키므로서 보다 정밀한 진단법과 전문가시스템(Expert system)의 개발이 용이할 것이다.

참고 문헌

- 1) 豊田利夫, 設備診断の進め方, 日本 maintenance 協会, 1982
- 2) Songbo, X. and Huang, W., A Method in the Fault Diagnosis of Turbomachine and its Application, ASME Conf. on Mechanical Vibration and Noise, Miami 1991
- 3) Yahachiro, T. and Tsutomu, T., Method of Solution to Fuzzy Inverse Problem, 計自論 15-1, 1979
- 4) Iwatsubo, T. and Kawamura, S., Application of Fuzzy Algorithm to the Diagnosis of Rotating Machinery, 日本 機械學會 講演論文集, 1993
- 5) Fumio, F., Vibration Diagnosis Methods for Shaft of Large Rotating Machines, 日本 機械學會, 1993
- 6) 양보석, 전순기, 김남철, 퍼지이론을 이용한 구름베어링의 결함진단, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 pp, 193-197, 1993