

구름 베어링의 퍼지 결함진단에 관한 연구

양 보 석* · 전 순 기**

Fuzzy Defects Diagnosis of Rolling Element Bearings

B. S. Yang · S. K. Jeon

Key words : Rolling element bearing(구름베어링), Vibration(진동), Diagnosis(진단), Fuzzy theory(퍼지이론), Defect(결함)

Abstract

A new diagnosis method is developed in this paper, in which the fuzzy set theory is introduced to diagnose the defects of rolling element bearings. 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 rolling element bearings.

1. 서 론

구름베어링(rolling element bearing)은 전동기, 가스터빈, 펌프 등의 여러 회전기계에 널리 사용되고 있다. 구름베어링이 널리 사용되는 이유는 기동 및 운전시의 낮은 마모, 저속시 하중(load)의 지지 능력, 윤활의 용이, 하나의 베어링으로 반경 및 축 방향의 하중을 동시에 지지할 수 있는 능력 등의 잇점이 있기 때문이다. 하지만, 구름베어링은 유막 베어링 보다 대단히 미소한 감쇠(damping)를 갖고 있기 때문에 회전축계에 공진(resonance)이 발생하였을 경우에는 과도한 동하중으로 인하여 큰 문제를 발생시킬 수 있고 또한, 베어링에서는 결함에 따른 주기적인 응력(stress)을 받고, 결국에는

피로(fatigue)에 의해서 파손된다. 이러한 이유 때문에, 구름베어링의 진동특성을 이용한 감시 및 진단 시스템이 여러해 동안 많은 연구가 되어 왔고, 산업현장에서는 이러한 시스템의 중요성을 충분히 인식하고 있다.¹⁾²⁾

진단 및 감시 시스템은 일반적으로 구름베어링의 국부적인 결함(localized defects)에 따른 진동 주파수성분과 진동의 크기를 분석하므로서 베어링의 이상 유무를 미리 예측하는 것이다. 구름베어링의 감시 및 진단 시스템으로 두가지의 방법이 이용된다. 하나는, 대단히 큰 재해를 방지하기 위한 적당한 경고를 알려주는 감시 시스템(monitors system)이고, 다른 하나는 경고가 주어졌을 때, 원인 분석을 하여 계속되는 베어링의 파손을 방지할

* 정회원, 부산수산대학교 공과대학

** 정회원, 부산수산대학교 대학원

수 있는 진단 시스템(diagnosis system)이다.

이러한 진단 및 감시방법은 rms치에 대한 피크 값의 비율로서 평가하는 crest factor 분석³⁾, 시간 영역하에서 kurtosis값으로서 평가하는 kurtosis 분석⁴⁾, 마이크로폰(microphone)을 이용한 음향 분석⁵⁾ 및 spike 에너지법⁶⁾, spectral 분석, cepstrum 분석 등이 있다. Crest factor 분석과 kurtosis 분석은 자료에 의하면, 효율면에서 다소 떨어지는 경향을 보이며, spike 에너지법은 양호한 베어링(good bearing)과 결함 베어링(damaged bearing) 사이의 뚜렷한 구별이 어렵다. 그리고 spectral 분석은 많은 경험과 시행오차가 필요하며, 음향 intensity 측정결과와의 적용은 반사파의 영향이 적은 환경에서 신뢰성이 있는 결과를 주는 등의 단점이 있다.

본 연구에서는 외륜(outer race)과 내륜(inner race), 전동체에 결함이 생기는 경우 발생하는 진동 주파수의 이론치와 실제 구름베어링에서 발생하는 진동을 FFT 연산으로 주파수 분석을 한 스펙트럼 성분분에 대해 fuzzy 기법을 이용한 진단방법에 대해 보고하고자 한다. 실험으로 볼베어링의 내륜과 외륜에 각각 인공적으로 결함을 만들고, 베어링 하우징에 부착된 비접촉식 변위센서로 부터의 진동신호를 주파수 분석과 fuzzy 추론을 하여 그 진동현상의 특징으로 부터 이상진단의 결과를 출력하고 그 원인을 판정한다. 그리고 기존의 구름베어링에서의 결함시의 계측자료에 본 방법을 이용하여 이상진단을 검토하고 그 유용성을 검증하였다.

2. 볼 베어링의 결함에 의한 발생진동수

구름베어링에서 외륜, 내륜 및 전동체의 어느 것에 손상이 발생하면, 외륜, 내륜과 전동체의 접촉에 의해 충격진동이 발생한다. 즉 전동체에 손상이 발생한 경우 그 손상이 회전중에 외륜 또는 내륜의 전주면에 접촉이 발생하고, 또 내륜 혹은 외륜의 전주면에 손상이 있는 경우에는 회전중에 복수의 전동체가 차례로 그 손상에 접촉하므로서 진동이 발생하게 된다. 따라서 이들 진동주파수는 베어링의 회전수에 따라 변화하고, 다음식과 같이 각각 이론계산에 의해 구할 수 있다.⁶⁾

외륜에 결함이 있는 경우의 발생진동수

$$f_o = \frac{f}{2} Z \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (1)$$

내륜에 결함이 있는 경우의 발생진동수

$$f_i = \frac{f}{2} Z \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2)$$

전동체(ball)에 결함이 있는 경우의 발생진동수

$$f_b = f \frac{D}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right] \quad (3)$$

여기서 본 실험에 사용된 볼베어링(#6204)의 data를 참고로 함께 기재하면

f : 베어링의 회전 주파수(=30Hz)

D : 베어링의 피치원 직경

$$\left(= \frac{D_i + D_o}{2} = 33.5\text{mm} \right)$$

D_i : 베어링의 내경(=20mm)

D_o : 베어링의 외경(=47mm)

d : 전동체의 직경(=7.938mm)

α : 접촉각(=0°)

Z : 전동체의 수(=8개)

Table 1은 본 연구에서 사용된 깊은 홈 단열 볼베어링(KBC 6204)의 외륜과 내륜에 결함이 있는 경우에 대한 실험에서 얻어진 발생주파수와 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 결과를 비교한 것이다. 비교적 잘 일치하고 있고, 따라서 결함 발생주파수 식 (1)~(3)으로 계산하여도 무방함을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of theoretical with experimental results

Order	Frequency(Hz)			
	Outer race		Inner race	
	Theory	Experiment	Theory	Experiment
1	91.57	92	148.43	148
2	183.13	184	296.87	294
3	274.69	277	445.30	444
4	366.26	370	593.74	592
5	457.83	462	742.17	743

3. Fuzzy 관계의 기본 연산

종래의 집합이론에서는 집합의 경계와 영역은

확정론적(deterministic)으로 표시되며, 요소 x 와 집합 A 의 관계는 $x \in A$ 또는 $x \notin A$ 중 단지 하나로 표현되는 2치논리로 다음과 같이 특정화된 함수로 기술된다.

$$C_A(x) = \begin{cases} 1 & (x \in A) \\ 0 & (x \notin A) \end{cases} \quad (4)$$

그러나 비결정론적 경계를 갖는 퍼지집합의 경우, 요소 x 는 동일한 집합에 소속될 수 있거나 또는 소속되지 않을 수 있는 두가지의 경향을 동시에 갖을 수 있다. 예로 A 가 “강한 진동”의 퍼지집합이라고 하면, 진폭 $50\mu\text{m}$ 의 진동 x 는 이 집합에 소속되는지가 분명하지 않다. 그러므로 퍼지집합 이론에서는 2치논리의 특성함수 $C_A(x)$ 는 폐구간 $[0, 1]$ 에서 아래의 조건을 만족하는 membership함수 $\mu_A(x)$ 라 불리우는 연속논리로 확장된다.

$$0 < \mu_A(x) < 1 \quad (5)$$

그러므로 퍼지집합은 membership함수에 의해 설명될 수 있다. 특정값 x_i 의 membership함수의 값은 요소 x_i 의 membership의 정도(grade)라 불리우며, $\mu_A(x_i)$ 로 표시된다.

퍼지관계에 대한 기본연산으로 본 논문에서 사용되는 대수곱, 대수합 및 min-max 합성에 대해 정의하면 아래와 같다.⁷⁾

1) 대수곱

Fuzzy관계 R, S 의 대수곱 RS 는

$$RS \Leftrightarrow \mu_{RS}(x, y) = \mu_R(x, y) \mu_S(x, y) \quad (6)$$

2) 대수합

Fuzzy관계 R, S 의 대수합은 $R+S$ 라 쓰며

$$\begin{aligned} R \hat{+} S &\Leftrightarrow \mu_{R \hat{+} S}(x, y) \\ &= \mu_R(x, y) + \mu_S(x, y) - \mu_R(x, y) \mu_S(x, y) \end{aligned} \quad (7)$$

3) min-max 합성

Fuzzy관계 R, S 의 합성은 $R \cdot S$ 라 쓰며

$$\begin{aligned} R \cdot S &\Leftrightarrow \mu_{R \cdot S}(x, z) \\ &= \min_y \max\{\mu_R(x, y), \mu_S(y, z)\} \end{aligned}$$

$$= \hat{y}(\mu_R(x, y) \vee \mu_S(y, z)) \quad (8)$$

여기서 \wedge 와 \vee 는 각각 min과 max를 나타낸다.

4. 결함진단의 실험

4.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험장치를 보이고 있다. 실험장치는 전동기(5HP, 1800rpm)와 시험베어링(test bearing)을 조사하기 위한 실험장치 사이의 동력전달을 V벨트로 연결하여 동력을 전달시키고 있으며, 길이 500mm, 직경 45mm의 축은 두개의 원통롤러베어링(NU 209)에 의해 지지되어 있다. 그리고, 시험베어링은 단열 깊은 홈 볼 베어링(#6204)을, 폴리의 반대측 축 끝단에 설치하여 진동특성을 조사하였다.

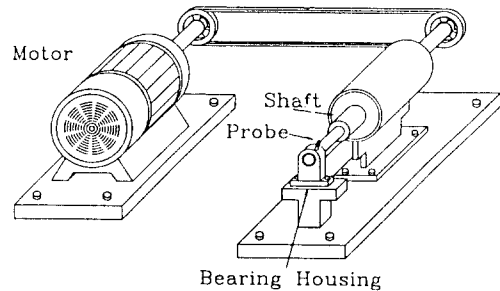


Fig. 1 Experimental apparatus

4.2 실험방법

베어링의 진동특성을 측정하기 위해 각각 직경과 깊이가 2mm, 0.5mm 정도인 인공적인 결함을 외륜내측에 가공한 베어링과 내륜외측에 가공한 베어링을 사용하였다. 그리고 베어링에 대한 하중은 베어링하우징의 볼트를 죄는 방식을 채택하였다. 시험베어링의 측정은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 베어링의 정상 수명에 영향을 주지 않는 범위의 탭(tap)을 베어링의 하우징에 만들어 비접촉식 변위계(Bently 7200)를 설치하고 변위계의 출력신호를 주파수 분석기(CF-500, ONO SOKKI)에서 진동진폭을 계측하였고, 이를 주파수 분석하여 그 결과를 X-Y기록기(recorder)에 기록하였다. 또한 변위계의 출력신호를 A/D변환기를 통하여 퍼스날

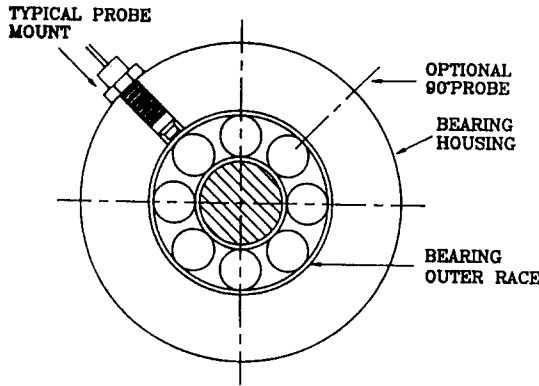
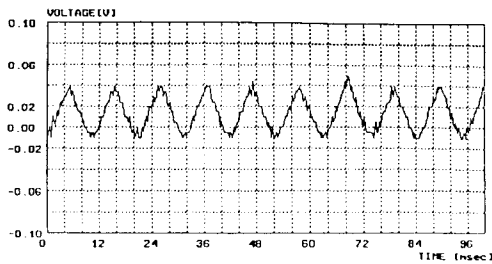


Fig. 2 Typical probe mount

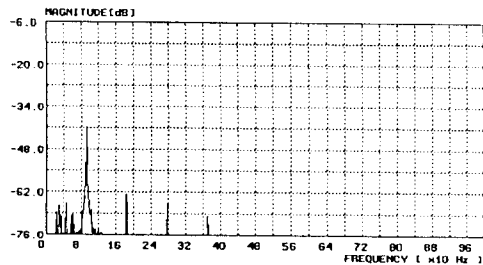
컴퓨터에서 FFT연산으로 주파수 분석을 한 스펙트럼 성분에 대해 fuzzy수법을 이용하여 베어링의 이상진단 결과를 출력하도록 하였다.

4. 3 실험결과

Fig. 3에 정상적인 볼 베어링(normal bearing)을 시험베어링으로 5시간 운전후 계측한 진동의 시계열 파형과 주파수 스펙트럼을 보이고 있다. Fig. 4와 5는 외륜과 내륜에 각각 직경 2mm, 깊이 0.5mm의 하나의 인공결함을 갖는 볼 베어링에서



a) Timewise trace



b) Frequency spectrum

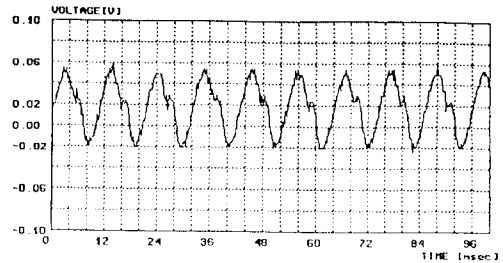
Fig. 3 Typical signal from a normal bearing

발생하는 진동파형과 스펙트럼을 나타내고 있다.

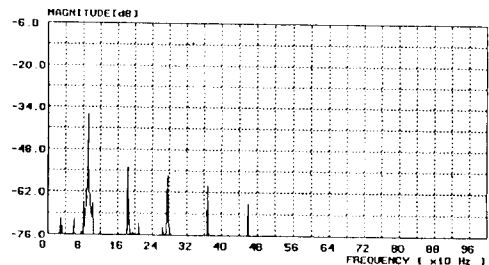
Fig. 3의 정상 베어링의 진동은 결함에 비해 진동진폭이 낮고 전형적인 부드러운 파형을 보이고 있다. 또한 주파수 분석 결과는 베어링의 회전 속도성분(30Hz)과 전동체 통과주파수(92Hz) 및 그 배수성분이 탁월하게 발생하고 있다.

Fig. 4의 외륜 결함 베어링의 경우 시간응답파형에서 주기적인 작은 피크가 발생하고 있고, 이는 모든 전동체들이 외륜의 결함부위를 통과할 때 발생하는 것이다. 스펙트럼 분석 결과도 정상 베어링보다 전동체 통과 주파수와 그 배수성분이 많이 발생하고 있고, 그 크기도 크다.

Fig. 5의 내륜 결함 베어링에서는 시간응답파형이 외륜의 경우와 달리 작은 피크가 항상 반복되지 않고 있다. 이는 내륜은 외륜과 달리 결함부위가 축회전에 따라 회전하고 있고, 따라서 결함부위가 부하영역에 있을 때에만 작은 피크가 발생하고 이 영역을 벗어나면 정상 베어링과 같은 진동신호를 나타내기 때문이다. 발생주파수는 전동체의 통과 주파수와 배수성분 그리고 내륜 결함 주파수(148Hz)가 발생하고 있다. 따라서 각각의 결함에 따라 발생하는 진동의 특징을 나타낼 수 있는 결함



a) Timewise trace



b) Frequency spectrum

Fig. 4 Typical signal from an outer race damaged bearing

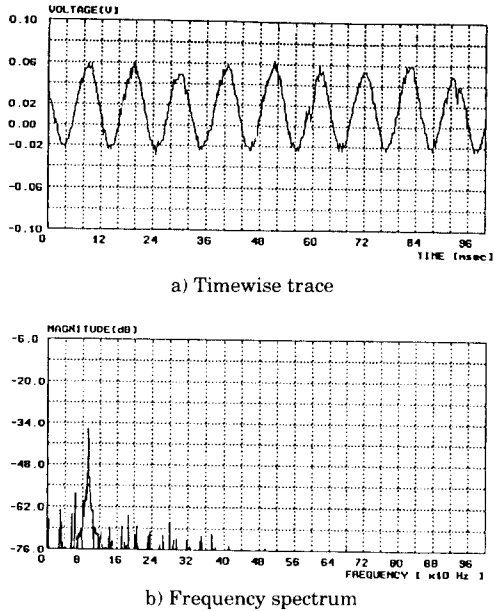


Fig. 5 Typical signal from an inner race damaged bearing

주파수가 발생함을 알 수 있다.

5. 퍼지 수법에 의한 결합 진단

Fig. 6은 본 연구에서 제안하는 퍼지결합진단 시스템의 흐름도(flow chart)를 나타낸다. 이하에 단계별로 본 실험에서 얻어진 외륜결합 data를 이용하여 진단법을 설명한다.

5.1 진단 data의 수집

외륜결합의 경우(Fig. 4) 스펙트럼의 피크치 중 상위 8개의 주파수와 그 진동진폭의 크기를 추출

Table 2 Measuring results of vibration amplitude

No.	Frequency(Hz)	Amplitude(mV)
1	92	12.442
2	277	1.751
3	370	1.417
4	184	0.808
5	462	0.517
6	30	0.379
7	60	0.302
8	552	0.164

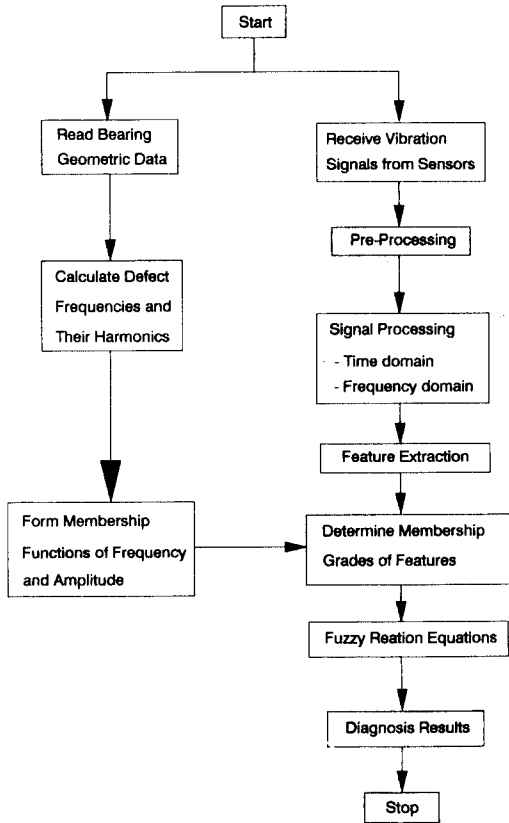


Fig. 6 Diganostic algorithm of fuzzy technique

하여 진폭 크기의 순서로 나타내면 Table 2와 같다.

5.2 진동 진폭의 membership 함수

Membership함수는 최종진단결과에 영향을 미치므로, 이 함수의 선택은 매우 중요하고 따라서 진단시스템의 안전성과 보전비용 등을 포함한 여러 요소를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 Table 2의 진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 진동치라는 것을 나타내기 위해, 일반적으로 널리 사용되는 high pass형(semi - Causch형)의 membership함수를 다음과 같이 채용하였다.

$$\mu_{Amp}(x) = \begin{cases} 0 & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{k(x-a)^2}{1+k(x-a)^2} & (a < x < \infty) \end{cases} \quad (9)$$

여기서 계수로는 $a=0, k=1/4$ 을 사용하였다. 이

Table 3 Fuzzy grade of vibration amplitude

No.	Amplitude(mV)	Grade of membership
1	12.442	0.975
2	1.751	0.434
3	1.417	0.334
4	0.808	0.140
5	0.517	0.063
6	0.379	0.035
7	0.302	0.022
8	0.164	0.007

는 측정치가 정상인가 이상인가를 판정하는 한계치의 기준이 아직 구름베어링에 대하여는 정하여 있지 않으므로, 본 연구에서는 진동진폭(x)이 2mV (0.25 μ m)의 한계치를 초과할 때 membership함수의 정도(grade)가 0.5 보다 크게되고 진동이 강하다(strong)고 판단하도록 slope계수 k를 정하였다. 이 membership함수에 의해 Table 2의 진동진폭의 크기가 이상을 나타내는 주파수인 것을 판정하는 퍼지 정도치를 구한 결과를 Table 3에 나타낸다.

5.3 발생 주파수의 membership함수

Table 2의 주파수에 대해 식 (1)~(3)의 결합주파수가 일치하는가를 판정하기 위해 Fig. 7에 나타내는 선형 membership함수를 제안한다. 이 함수는 각 결합 주파수에서 membership정도가 1인 정점을 갖고 그 주파수와 인접하는 다른 주파수에서의 정도 0의 점을 연결하는 다수의 3각형으로

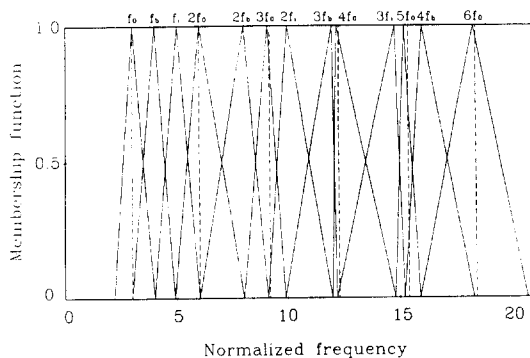


Fig. 7 Triangular membership function for frequency

Table 4 Fuzzy grade of vibration frequency

No.	Frequency(Hz)	Grade of membership		
		f _o	f _i	f _b
1	92	0.985	0	0.015
2	277	0.897	0.103	0
3	370	0.953	0.047	0
4	184	0.985	0	0.015
5	462	0.791	0	0.209
6	30	0	0	0
7	60	0	0	0
8	552	0.962	0	0

이루어지며, 양단의 3각형은 2등변 3각형으로 만든 형이다. 이 membership함수를 이용하여 Table 2에 나타내는 주파수가 식 (1)~(3)의 주파수인 것을 판정하는 퍼지 정도치를 구한 결과를 Table 4에 나타낸다.

5.4 퍼지 결함 진단

Table 3과 4의 각 정도(grade)의 대수곱 연산을 식 (6)을 이용하여 수행하면, 이상을 나타내는 주파수임을 판정하는 정도와 이상을 표시하는 진동진폭을 판정하는 정도를 고려한 퍼지 정도치가 Table 5와 같이 구하여진다.

Table 5의 정도에 대해 이상을 나타내는 주파수 마다의 대수합 연산을 식 (7)을 이용하여 수행하면 Table 5의 하단의 값이 얻어진다. Table에서 알 수 있듯이 외륜 결함 가능성의 정도는 0.986이고, 내

Table 5 Fuzzy grade value of flow appearing

No.	Grade of membership		
	F _o	F _i	F _b
1	0.960	0	0.015
2	0.389	0.045	0
3	0.318	0.016	0
4	0.138	0	0.002
5	0.050	0	0.013
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0.007	0	0
Sum.	0.986	0.060	0.027

Table 6 Fault possibility of diagnosis items

No.	Diagnostic items	Minimum value	Possibility
1	Outer race	$\min\{\mu_{ro}, 1 - \mu_{ri}, 1 - \mu_{rb}\}$	0.940
2	Inner race	$\min\{1 - \mu_{ro}, \mu_{ri}, 1 - \mu_{rb}\}$	0.060
3	Ball	$\min\{\mu_{ro}, \mu_{ri}, 1 - \mu_{rb}\}$	0.014
4	Outer and inner races	$\min\{\mu_{ro}, \mu_{ri}, 1 - \mu_{rb}\}$	0.060
5	Outer race + ball	$\min\{\mu_{ro}, \mu_{ri}, 1 - \mu_{rb}\}$	0.027
6	Inner race + ball	$\min\{1 - \mu_{ro}, \mu_{ri}, 1 - \mu_{rb}\}$	0.014
7	Outer and inner races + ball	$\min\{\mu_{ro}, \mu_{ri}, \mu_{rb}\}$	0.027
8	etc.	$\min\{1 - \mu_{ro}, 1 - \mu_{ri}, 1 - \mu_{rb}\}$	0.014

륜 및 전동체의 결함 가능성의 정도는 각각 0.060 및 0.027이 된다. 따라서 이 결과로부터 볼베어링의 외륜결함일 가능성이 탁월하게 높고 외륜결함으로 진단할 수 있다.

다음에 Table 5에서 얻어진 각 결함의 정도를 Table 6과 같이 3종류의 결함의 조합인 8종류의 진단항목에 대해 각각 최소치를 구한다. 최소치를 구할 때는 3종류의 결함에 대한 퍼지 정도를 배열하고 진단항목에 해당되지 않는 항목에 대해서는 퍼지 정도치를 1로 뺀 값, 즉 보집합(complement) 관계로 나타낸다. Table 6의 결과를 최소치의 큰 값으로 나열하면 외륜 단독결함의 가능성이 0.940으로 가장 높고 나머지 진단항목은 매우 낮은 값이 됨을 알 수 있다. 이 진단결과로부터 복수결함의 가능성을 조사할 수 있다.

5.5 결함진단 적용예

본 진단방법의 유용성을 폭넓게 검증하기 위해 Taylor에 의해 수행된 일련의 베어링결함 실험결과⁸⁾를 이용하였다. Fig. 8은 단열 깊은 홈 볼베어링(SKF 6313)의 내륜에 길이 4.064mm의 적은 하나의 spall이 발생한 경우(내륜결함)와 단열원통형 로울러 베어링(SKF N319)의 외륜에 길이 17.78mm의 큰 하나의 spall이 발생한 경우(외륜결함)에 대한 진단결과이다. 외륜결함 data의 경우, 외륜(Fo), 전동체(Fb) 및 내륜결함(Fi) 가능성의 정도는 각각 0.978, 0.018 및 0.007로서 외륜결함의 가능성이 탁월하게 크고 외륜결함으로 진단할 수 있다. 내륜결함 data의 경우는 각각 0.212, 0.169 및 0.703으로 내륜결함의 가능성 정도가 가장 크

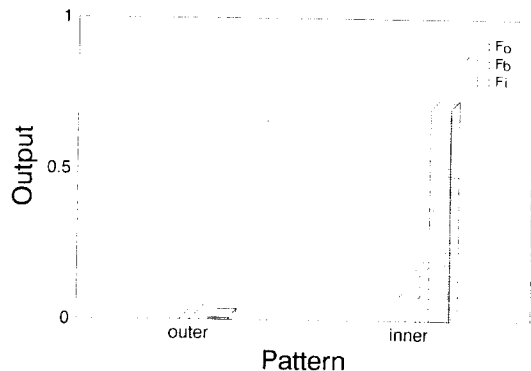


Fig. 8 Diagnostic result to inner and outer race defects

게 진단된다. 여기서 외륜결함의 경우보다 내륜결함에서 가능성이 낮은 것은 결함의 정도가 외륜보다 적고 따라서 이에 기인한다.

Fig. 9는 Taylor의 내륜, 외륜 및 볼의 복수결함에 대한 계측 data를 이용한 진단결과이다. 대상 베어링은 입형수중펌프용 복렬 angular contact 볼베어링(ND 5313)으로, 단계 I에서 외륜전주에 걸쳐 결함이 발생하였고, 13일 후에 측정된 단계 II에서는 내륜과 볼에도 결함이 발생되기 시작하였으며, 단계 III의 경우는 외륜에 길이 10.16mm의 하나의 큰 spall과 두개의 작은 spall(길이 1.524mm)이 발생하였고, 나머지 외륜부위가 거칠어진 상태였으며, 내륜전주에 작은 결함들과 5개의 볼에 spall이 발생하였다. 그림에서 보이듯이 외륜결함의 가능성 정도는 단계별로 0.999, 0.999 및 1.0이고, 내륜과 볼의 결함 가능성이 단계에 따라 급격히 증가하여 단계 III에서는 내륜과 볼의 결함 가능성이 0.933과 0.912로 된다.

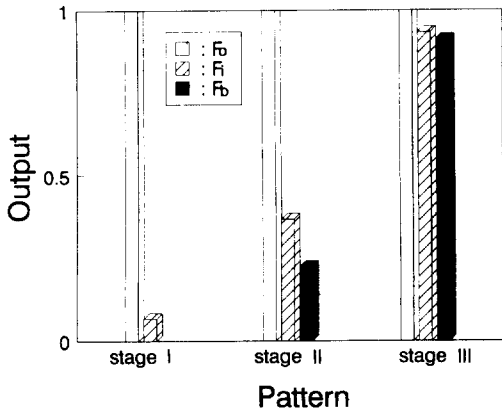


Fig. 9 Diagnostic result to multiple bearing defects for vertical submerged pump

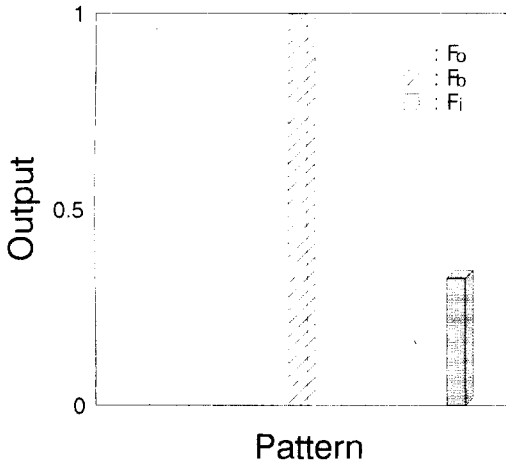


Fig. 10 Diagnostic result to ball and outer race defects for electric motor

Fig. 10은 전동기(60HP)에 사용된 깊은 홈 볼베어링(SKF 6314)에 대한 계측자료를 이용하여 진단한 예이다. 이 경우 3개의 볼에 큰 spall이 발생하였으며, 외륜에 하나의 작은 spall이 발생하였다. 그림에서 보듯이 외륜(F_o), 전동체(F_b) 및 내륜(F_i)의 결함 가능성의 정도는 각각 0.940, 0.998 및 0.324로서 외륜과 전동체에 동시에 결함이 발생하고 있음을 진단하고 있다.

Table 6과 같이 8개의 진단항목에 대해 Fig. 10의 결과를 이용하여 복수결함의 가능성을 조사한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 외륜과 볼의 동시결함의 가능성이 0.676으로 가장 높고, 다음으로 외륜, 내륜 및 볼의 동시 결함가능성이 0.324로 진단

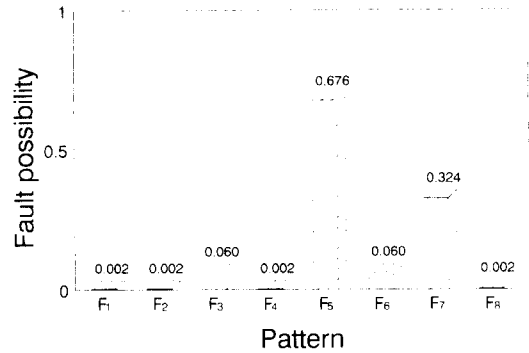


Fig. 11 Fault possibility of diagnostic items for ball and outer race defects

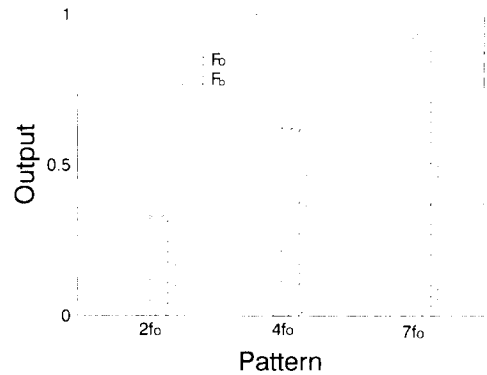


Fig. 12 Effect of frequency range

되었다.

Fig. 12는 Fig. 9의 단계 III의 계측자료를 이용하여 결함발생주파수의 membership 함수 구성시 채용되는 주파수 영역이 진단결과에 미치는 영향을 조사한 결과이다. 여기서는 비교를 위해 각각 외륜결함 발생진동수(f_o)의 2배, 4배 및 7배까지의 진동주파수 영역의 data를 이용하여 membership 함수를 구성하였다. 외륜결함(F_o)의 경우는 채용주파수 영역이 좁아도 비교적 좋은 진단결과를 제공하나, 내륜결함(F_i)의 경우는 채용주파수 영역이 낮을 수록 많은 차이를 보이고 있다. 이는 내륜결함이 발생하는 경우 내륜결함 발생진동수(f_i)의 고차 하모닉스성분진폭이 비교적 크게 발생하는데 기인한다. 따라서 보다 정확한 진단을 위해서는 높은 진동주파수 성분까지 고려해야 할 필요가 있다.

6. 결 론

참고문헌

퍼지기법을 적용하여 구름베어링의 결함을 진단하는 시스템을 새로히 제안하고, 실험 및 각종 계측 data를 이용하여 본 진단법의 유용성을 검토하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 구름베어링의 결합진단을 위하여 퍼지기법에 의한 진단법을 제안하였다.

2) 본 실험 및 각종 계측자료에 의한 진단결과, 결합가능성의 정도는 외륜단독결합에서 0.978, 외륜과 볼의 복수결합에서 각각 0.940 및 0.998, 내륜단독결합에서 0.703 등의 매우 양호한 결과를 얻었고, 본 진단 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

3) 스펙트럼 피크치의 주파수의 약간의 이동이나 진폭측정레벨이 다소 변화하여도 이상징후의 특징을 잃어버리지 않고 진단이 가능하다.

후 기

본 연구에 사용된 인공결합베어링을 제작하여 준 한국종합기계(주) 창원공장 관계자 여러분과 실험에 도움을 준 대학원생 최성필군(현 한국중공업 기술연구소)에게 감사드립니다.

- 1) Hansen, J. S. and Harker, R. G., A New Method for Rolling Element Bearing Monitoring in the Petrochemical Industry, presented at the Vibration Institute Seminar, New Orleans, Louisiana, June 1984.
- 2) Li, C. J. and Wu, S. M., On - Line Detection of Localized Defects in Bearings by Pattern Recognition Analysis, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 331, 1989.
- 3) Weichbrodt, B. and Bowden, J., Instrument for Predicting Bearing Damage. GE Co. Report, S - 70 - 1021 AD 869633, March 1970.
- 4) Dyer, D. and Stewart, R. M., Detection of Rolling Element Bearing Damage By Statistical Vibration Analysis, ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 100, pp. 229, 1978.
- 5) Kim, P. Y., A Review of Rolling Element Bearing Health Monitoring and Analysis, Annual Meeting, New Orleans, Louisiana U.S.A., June 26 - 28, Vibration Institute, 1984.
- 6) 豊田利夫, 設備診断の進め方, 日本 maintenance 協會, 1982.
- 7) Mizumoto, M., Fuzzy Theory and Application, Science Pub. Co., 1991.
- 8) Taylor, J. I., Identification of Bearing Defects by Spectral Analysis, Trans. ASME, J. of Mechanical Design, Vol. 102, pp. 199 - 204, 1980.