

〈論 文〉

# 롤러 베어링에서의 결함의 자동진단

Automatic Diagnosis of Defects in Roller Element Bearings

유정훈\* · 윤종호\*\* · 김성걸\* · 이장무\*\*\*

J.H. Yoo, J.H. Yoon, S.K. Kim and J.M. Lee

〈1995년 4월 28일 접수 ; 1995년 8월 29일 심사완료〉

**Key Words :** Automatic Diagnostic System(자동 진단 시스템), Multiple Defects(다중 결함), Probability(확률), Bearing Defect(베어링 결함), Quality Control(품질 관리)

## ABSTRACT

A new automatic diagnostic system for predicting multiple defects in rolling element bearings is developed by taking probability into account. A database is constructed from the frequency characteristics of tested bearings with various types of defects. The proposed algorithms for the automatic diagnosis of bearing defects are shown to be satisfactory through the experiments. This method can be effectively used for quality control of the rolling bearing in plants.

## 1. 서 론

최근의 산업기계는 급격한 발달로 인하여 점점 고속화, 대용량화, 자동화하는 추세에 있으므로 기계의 고장 및 파손은 엄청난 손실을 초래하게 된다. 따라서 기계요소의 품질관리와 기계의 성능을 감시하고 진단하는 방법들에 대해 다양한 연구가 진행되었다. 이전의 연구에서는, 기계요소의 결함을 탐지하고 손상정도를 예견하기 위해 기초이론의 고찰, 효율적인 신호처리 기술에 대한 연구, 캡스트럼을 이용한 연구, 소음 측정을 이용한 연구<sup>(1-3)</sup> 등이 진행되었다. 이러한 방법들에 의해서, 기계요소중 가

장 많이 사용되는 볼베어링의 손상 검출방법에 대해 연구가 진행되고 있으며, 최근에는 신경망과 같은 인공지능 기술이 이 분야에 적용되고 있다<sup>(4)</sup>. 본 논문에서는 테이퍼 롤러 베어링을 대상으로 하여 진동 신호를 검출한 후, 이상진단을 수행한다. 이러한 진단과정에서 인간이 직접 이상유무를 판정하는 진단 방법 대신에, 여러 가지 결함이 있는 테이퍼 롤러 베어링을 통해 진동신호를 취득하여, 데이터 베이스를 구축하고 이를 판단 알고리즘에 적용시켜 결함의 부위 및 결함정도를 통계적인 방법으로 자동 진단하는 방법을 제안한다.

## 2. 데이터 베이스의 구축

롤러 베어링의 점결함 특성을 나타내는 진동수는 다음과 같이 계산될 수 있다.

\*정회원, 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소

\*\*정회원, 경북산업대학 기계설계학과

\*\*\*정회원, 서울대학교 공과대학 기계설계학과

$$f_{ir} = 0.5K \frac{N}{60} \left[ 1 + \left( \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \right] \quad (1)$$

$$f_{or} = 0.5K \frac{N}{60} \left[ 1 - \left( \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \right] \quad (2)$$

$$f_{br} = \frac{N}{60} \frac{d_r}{d_p} \left[ 1 - \left( \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$f_c = 0.5 \frac{N}{60} \left[ 1 - \left( \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \right] \quad (4)$$

여기서,

- $f_{ir}$  : 내륜결합의 진동수 (Hz)
- $f_{or}$  : 외륜결합의 진동수 (Hz)
- $f_{br}$  : 롤러 결합의 진동수 (Hz)
- $f_c$  : 케이지 결합의 진동수 (Hz)
- $N$  : 회전축의 각속도 (rpm)
- $K$  : 롤러의 개수
- $d_r$  : 롤러의 직경 (mm)
- $d_p$  : 베어링의 피치 직경 (mm)
- $\alpha$  : 접촉각 (radian)

점결함을 갖는 베어링의 스펙트럼 신호는 Fig. 1과

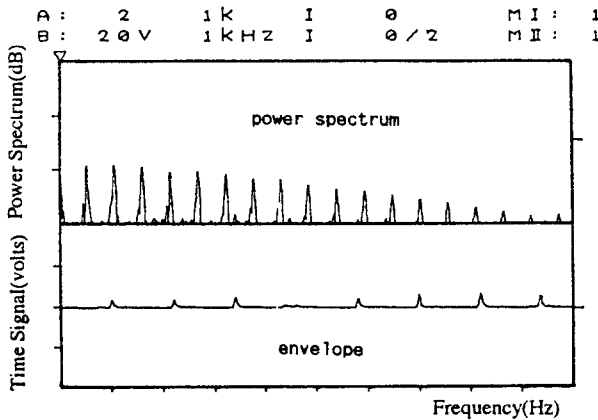


Fig. 1 Power spectrum of bearing with point defect

같이 주기적인 분포를 나타내며 그 진동수는 결합 부위에 따라 앞의 식 (1)~(4)에 의하여 결정된다. 각 결함을 나타내는 특성 진동수 방정식을 이용하여 다양한 부위의 결함에 대한 데이터 베이스를 구축하기 위하여 동일한 부위에 결함을 갖는 여러개의 시험 베어링의 스펙트럼을 측정한다. 즉, 결함이 있는 베어링들과 결함이 없는 베어링들에서, 피크를 나타내는 각 특성진동수 값에서의 진동신호(가속도)를 취득하여, 그 피크치의 진동레벨 (dB)로써, 정상인 경우와 결함이 있는 경우에 해당하는 데이터 베이스를 구축한다. 구축된 데이터 베이스는 Fig. 2와 같은 분포를 나타낸다. 그림에서  $x$  축은 피크치의 크기를 나타내고  $y$  축은 피크치의 크기에 따라 측정된 가속도신호 피크치들의 측정 빈도수를 나타낸다. 왼쪽의 그래프는 정상인 베어링의 피크치의 분포이고 오른쪽은 외륜에 결함을 갖는 베어링의 피크치의 분포이다. 막대 그래프로 표시된 바와 같은 피크치의 분포를 정규 분포화하여 데이터 베이스를 구축한다. 이 데이터들의 정규성의 여부는 카이제곱 검정 (chi-square test)을 이용하여 판정될 수 있다<sup>(5)</sup>. 이러한 방법으로 기타의 결함(예 : 롤러 결함, 내륜 결함 및 베어링 케이지의 결함 등)에 대한 데이터 베이스를 각각 구축한다.

### 3. 결함인식 진단 알고리즘

본 논문에서 롤러 베어링 결함의 자동인식을 위해 아래와 같이 3개의 알고리즘을 제안하였다. 이들 알고리즘에서 측정된 진동신호(가속도)는 고주파수 영역의 신호들을 감쇠시키고 결함들의 주기성을 나타내는 저주파수 영역의 스펙트럼을 부각시키기 위하여 포락선 검파기(envelope detector)에 의해 전처리

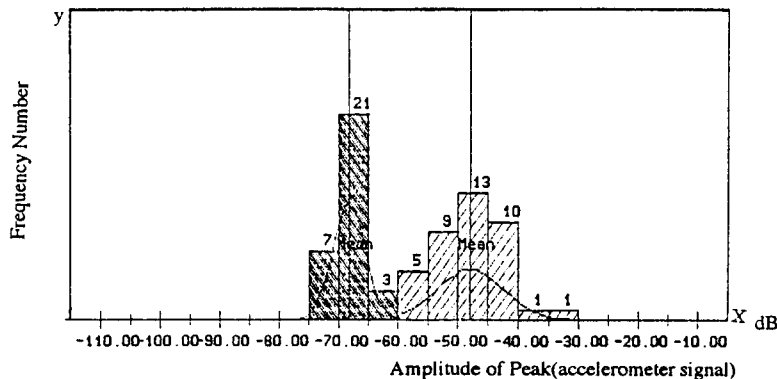


Fig. 2 Probability distributions of bearing vibrations with non-defect(left side) and defect(right side).

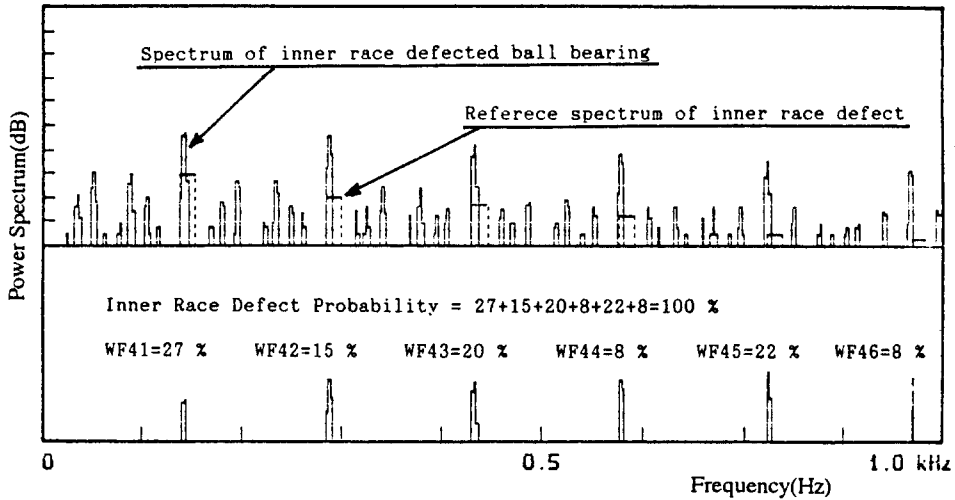


Fig. 3 Comparison of test spectrum with reference spectrum.

과정으로 처리된 다음 파워 스펙트럼으로 변환되었다<sup>(10)</sup>.

(1) 기준 스펙트럼에 의한 진단(algorithm I)

각 특성 부위의 결함에 따른 주파수 대역에서, 피크치의 분포를 측정 한 후, 기준 스펙트럼의 주파수 대역폭과 크기를 결정하였다. Fig.3와 같이 진단하고자 하는 베어링의 파워스펙트럼이 주어졌을 때, 이를 기준 스펙트럼과 비교하여 피크치가 기준 레벨을 초과하는 경우에, 결함 부위와 피크치에 따라 Table 1에 주어진 주파수 대역폭별 가중치(weight factor)를 가산하여 각 부위에 따른 결함 확률을 결정하였다. 이러한 가중치들은 결함이 있는 베어링의 실험을 통해 결정된다. Fig.3에서 기준 스펙트럼의 주파수 대역폭과 크기가 점선으로 표시되어 있고, 아래의 그림에서 이 기준치를 초과하는 크기의 스펙트럼을 표시하고 있다.

(2) 제 1종과 제 2종 오류에 의한 진단(algorithm II)

이론 해석으로 계산된 주파수 대역에서, 정상인 베어링과 결함이 있는 베어링을 실험하여 Fig.4에서와 같이 결함이 있는 경우와 정상인 경우의 각 진동 레벨에 대한 가우스 분포를 구하여 데이터 베이스화 하였다. 진단하고자 하는 베어링의 주파수 대역에서

Table 1 Decision table

Freq. band Defect	FB 1	FB 2	FB 3	total (%)
Outer race	WF1O	WF2O	WF3O	100
Inner race	WF1I	WF2I	WF3I	100
Roller	WF1R	WF2R	WF3R	100

의 피크치  $X$ 가 주어지면, 제 1종 오류를 범할 확률  $\alpha$ 와 제 2종 오류를 범할 확률  $\beta$ 를 구할 수 있다. 따라서, 결함 확률은 전체의 판단오류 확률 중에서 제 2종 오류를 범할 확률의 비율로써 나타낼 수 있다. 그 결함 확률을 식으로 나타내면  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 비율로 표시된다.

$$P_r = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \times 100(\%) \quad (5)$$

Fig.4에서 피크치  $X$ 가 상한값( $UL$ )보다 크게 되면 결함 확률은 100%가 되며,  $X$ 가 하한값( $LL$ )보다 작게 되면 결함확률은 0%가 된다.

(3) 확률 밀도함수에 의한 진단(algorithm III)

신뢰성 이론의 개념과 유사한 방법을 사용하여, 정상상태에서의 확률 밀도함수  $B$ 와 결함상태에서의

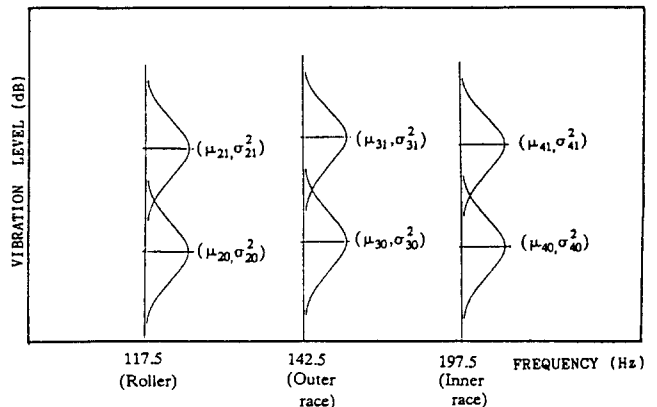


Fig. 4 Probability density functions of bearing signals with non-defect and defect at characteristic frequencies.

확률 밀도함수  $C$ 로부터 Fig. 5에서와 같은 새로운 공유 확률 밀도함수(joint probability function)  $A$ 를 유도할 수 있다.

이 새로운 확률 밀도 함수의 평균을  $\mu_z$ , 표준 편차를  $\sigma_z$ 라 하면

$$\mu_z = \mu_D - \mu_N \quad (6)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_N^2} \quad (7)$$

$\mu_D$ : 결함을 갖는 베어링의 진동 피크치의 평균값

$\mu_N$ : 정상상태의 베어링의 진동 피크치의 평균값

$\sigma_D$ : 결함을 갖는 베어링의 진동 피크치의 표준편차

$\sigma_N$ : 정상상태 베어링의 진동 피크치의 표준편차

으로 나타난다. 따라서 확률 분포  $u_z$ 는

$$u_z = \frac{X_z - \mu_z}{\sigma_z} \quad (8)$$

여기서,  $X_z = \mu_z - X$

만약  $X_z = 0$ 인 경우에는 신뢰성 확률과 일치하게

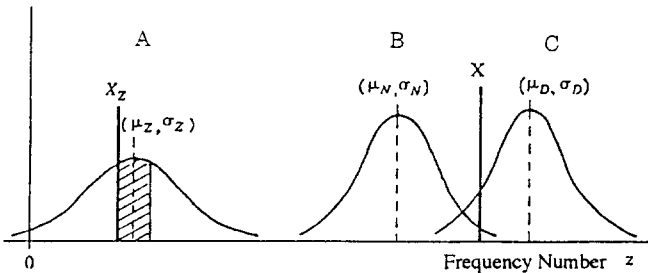


Fig. 5 Joint probability density function(assuming normal distribution).

된다. 식 (8)을 다시 쓰면,

$$u_z = \frac{(\mu_D - X) - (\mu_D - \mu_N)}{\sigma_z} = \frac{\mu_N - X}{\sigma_z} \quad (9)$$

이 된다. 신뢰성 확률 하에서, 결함일 확률은 식 (10)과 같다.

$$P_f = P\{u_z < Z < 0\} \times 2 \quad (10)$$

이 확률은 Fig. 5에서 빗금친 부분으로 나타난다.

피크 스펙트럼의 값  $X$ 가  $\mu_D$ 보다 크게 되면,  $u_z$ 는  $\frac{-\mu_z}{\sigma_z}$ 이 되고,  $X$ 가  $\mu_N$ 보다 작게 되면  $u_z$ 는 0으로 간주된다.

#### 4. 실험

앞에서 설명한 각 알고리즘을 적용하여 데이터 베이스를 구축하기 위해서는 많은 베어링 시편에 대한 반복 시험이 필요하므로, 테이퍼 롤러 베어링(KBC 30205J)를 대상으로 Table 2와 같이 베어링 시편들을 제작하였다. Table 3은 본 논문에서 사용된 베어링(KBC 30205J)의 재원을 나타낸다. 또한, 본 논문에서는 베어링 시험 장치를 제작하여 실험을 수행한 후 각 결함 형태에 대한 데이터 베이스를 구축하였다. Fig. 6은 베어링 시험장치의 사진을 보여주고 있다. 본 베어링 실험 장치에서는 방진 및 소음 감소를 위하여 DC서보 모터와 우레탄 커플링을 사용하였고, 베어링에 축방향의 예하중을 작용시키기 위해 공압 실린더를 사용하였다. 신호처리와 장비등을 포함한 전체 실험 장치는 Fig. 7에 도시하였다.

Table 2 Specimens of test bearing

No.	Location of faults	No.	Location of faults
1	Roller 1 (point defect)	15	Outer race 1
2	Roller 1 (small scratch)	16	Outer race 2
3	Roller 1 (large scratch)	17	Inner race 1
4	Roller 1 (wear)	18	Inner race 2
5	Roller 2 (point defect)	19	Cage 1
6	Roller 2 (small scratch)	20	Cage 2
7	Roller 2 (large scratch)	21	Inner 1+Outer 1
8	Roller 2 (wear)	22	Inner 1+Roller 1(point)
9	Roller 2 (#1+#3)	23	Outer 1+Roller 1(point)
10	Roller 2 (#1+#4)	24	Outer 1+Inner 1+Roller 1
11	Roller 2 (#1+#5)	25	Outer 1+Roller 1(small)
12	Roller 2 (#1+#6)	26	Outer 1+Roller 1(large)
13	Roller 2 (#1+#7)	27	Normal
14	Roller 3 (#1+#7+#13)	28	Normal

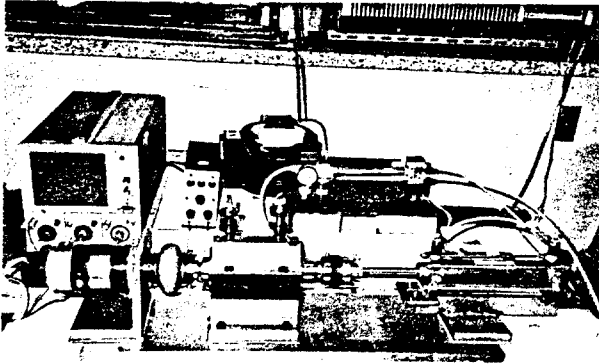


Fig. 6 Experimental set-up of bearing test.

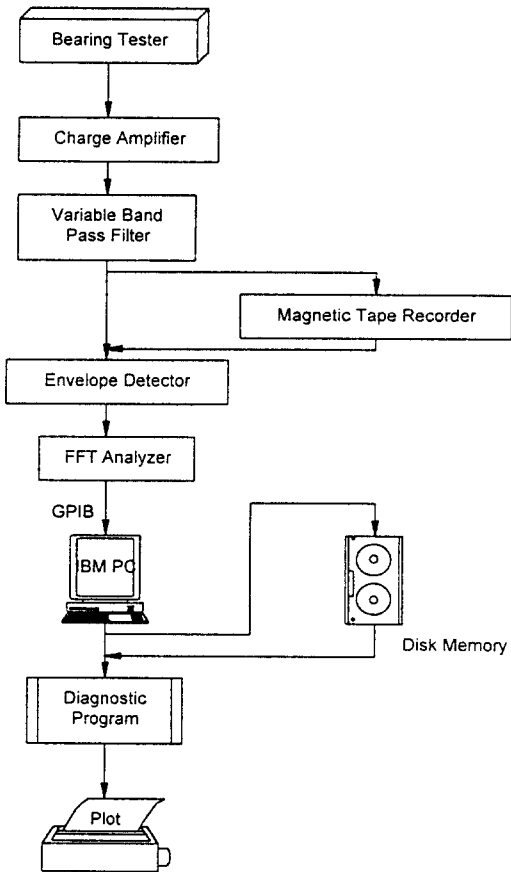
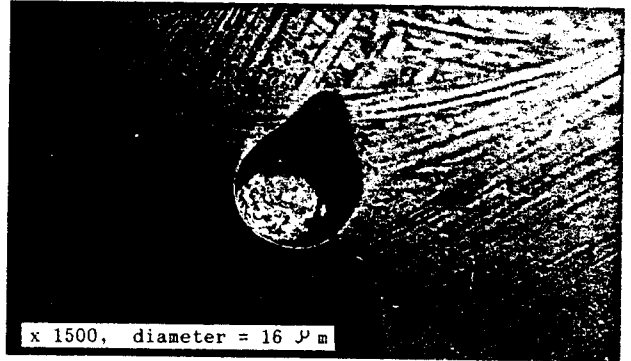


Fig. 7 Schematic diagram of bearing tester and automatic diagnosis system.

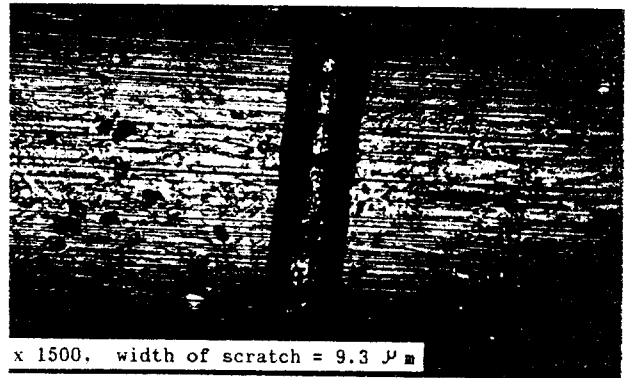
진동신호는 베어링 외륜에 부착된 가속도계에 의해 측정되며, 이 신호는 신호 분석기에서 스펙트럼 분석을 수행하고, 그 결과는 GPIB를 통해 디지털 신호로 IBM-PC에 입력된다. 입력된 신호를 개발된 진단 프로그램에 적용시켜 결함형태를 판별한다. 롤러 베어링의 대표적인 결함으로는 결함부위에 따라

Table 3 Specifications of test roller bearing

Specification	Size(mm)
Pitch diameter	39
Roller diameter	6.44
Inner diameter	25
Outer diameter	52
Contact angle(degree)	17
Number of rollers(e. a)	17



(a) point defect on a ball



(b) scratch on inner race

Fig. 8 Photograph of scratch defects on inner race.

외륜 결함, 내륜 결함, 롤러 결함, 케이지 결함 등으로 나누어지며, 또한, 결함의 상태에 따라 점결함, 스크래치 결함, 분포 결함, 마모 결함, 진원도 불량, 치수의 상이 등으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 결함 부위에 따른 베어링 시편에 로크웰 경도계로 점결함을 주거나, 전기 연필(electric pencil)로 스크래치 결함을 주는 방법으로 시편을 제작하였다.

### 5. 결과 및 토의

Table 1에서 제시된 베어링의 결함부위에 따른 특

성 주파수 식과 Table 3에서 제시된 베어링 시편의 제원을 이용하면, 테이퍼 롤러 베어링의 결함 부위에 따른 특성 주파수를 계산할 수 있으며, 시험 장치를 통해 측정된 결과와도 비교할 수 있다. Table 4의 결과로부터 이론치와 측정치가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 자동진단 프로그램의 데이터 베이스는 이미 결함의 부위를 알고있는 표본 베어링의 실험을 통해 구축되었고, 개발된 자동진단 시스템의 검증을 위해 앞의 언급된 3가지 알고리즘을, 다양한 결함을 가진 베어링에 적용하여 그 방법의 유효성을 조사하였다. Fig. 9는 내륜과 롤러에 결함이 있는 복

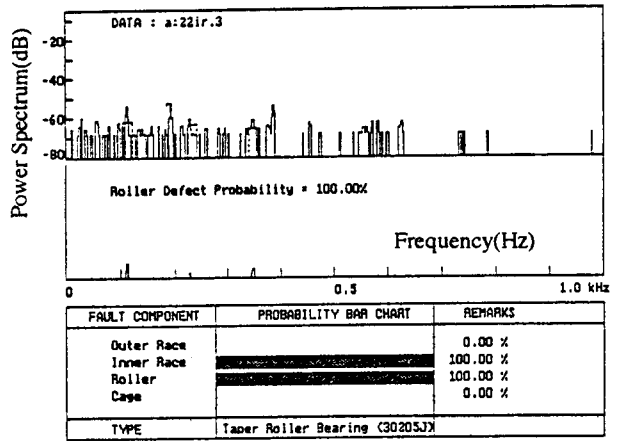
**Table 4** Characteristic frequencies of test bearings(Computed/Experimental).

Component Peak No.	Outer race (Hz)	Inner race (Hz)	Roller (Hz)
1	142.5/142.5	197.5/202.5	117.5/115.0
2	285.0/282.5	395.0/400.0	235.0/240.0
3	427.5/422.5	592.5/597.5	352.5/355.0
4	570.0/565.0	790.0/795.0	470.0/470.0

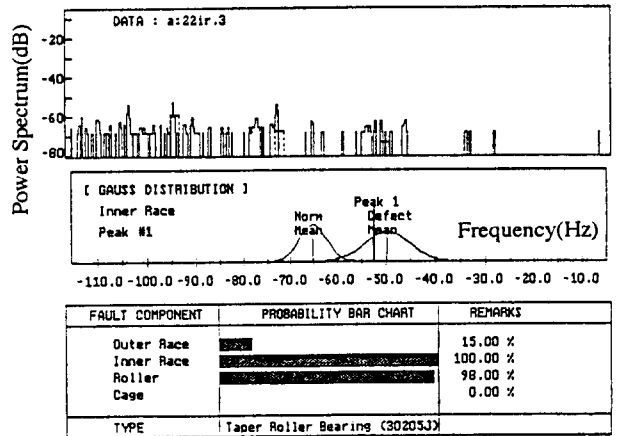
**Table 5** Results of defect detection in roller element bearings

Position Content	Algorithm	Outer race	Innter race	Roller
Outer 1	I	100.0	0.0	20.0
	II	99.76	0.52	15.41
	III	85.30	15.03	30.11
Inner 1	I	0.0	100.0	0.0
	II	25.37	93.74	9.70
	III	30.27	88.51	31.32
Roller 1	I	0.0	20.0	100.0
	II	2.65	20.50	99.26
	III	26.10	24.40	91.24
Outer 1 & inner 1	I	100.0	100.0	20.0
	II	99.94	99.34	41.87
	III	90.26	88.98	66.93
Inter 1 & roller 1	I	0.0	100.0	100.0
	II	12.63	100.0	98.73
	III	36.70	98.99	90.75
Outer 1 & roller 1	I	100.0	20.0	100.0
	II	100.0	28.69	92.04
	III	99.17	46.64	84.80

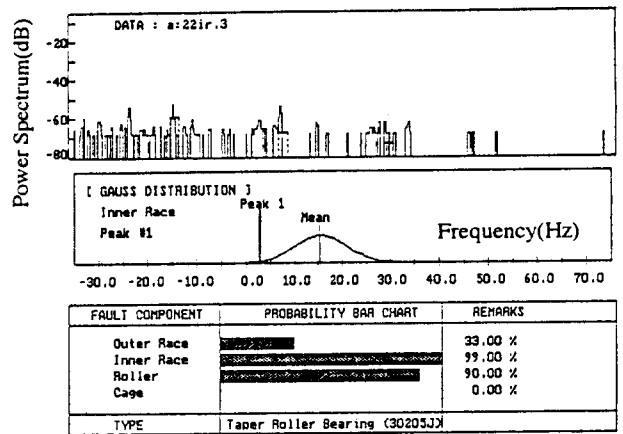
합결함의 경우에 대해 알고리즘 I (a), 알고리즘 II (b), 알고리즘 III (c)를 적용시킨 결과이다. 또한, Table 5는 서로 다른 결함을 갖는 베어링 시편에 대



(a) algorithm I

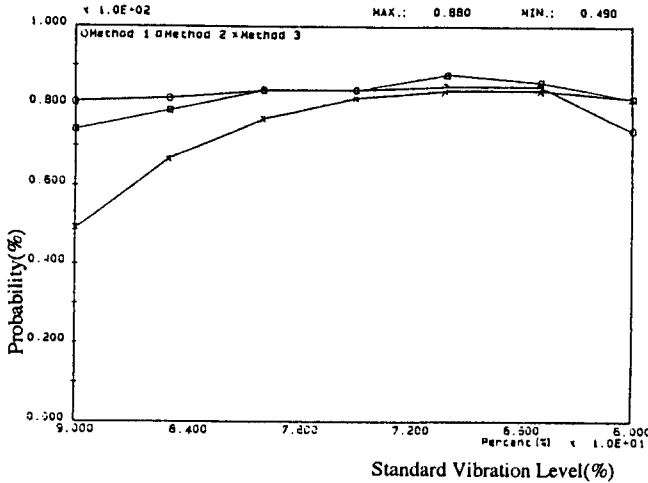


(b) algorithm II



(c) algorithm III

**Fig. 9** Outputs of automatic diagnosis in bearings with multiple defects using 3 algorithms.



## 6. 결 론

본 논문에서는 롤러 베어링의 다양한 결함탐지를 위하여 기준 스펙트럼, 제1종, 제2종 오류확률 및 확률밀도함수에 의한 자동 진단 시스템을 제안하였고, 제시한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해서는 단일 점결함 및 복합 점결함을 갖는 테이퍼 롤러 베어링을 대상으로 실험을 수행하였다. 베어링 결함의 자동 판정을 위하여 결함별, 진동수 대역 폭별의 가중치 및 기준레벨 등을 데이터 베이스로 구축하였고, 이들 알고리즘과 데이터 베이스를 이용하면 단일 및 복합 점결함을 잘 예측할 수 있음을 확인하였다. 이들의 예측 소요시간은 약 3초(IBM PC AT급 기준)였으며 이 시스템은 베어링 제작회사에서 표본 검사에 의한 결함 품질관리에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Brunn, P., 1981, Machine Condition Monitoring, Noise and Vibration Worldwide, pp. 249~251.
- (2) Dyer, D. and Stewart, R.M., 1978, "Detection of Rolling Element Bearing Damage by Vibration Analysis", Trans. ASME, J. of Mechanical Design, Vol. 100, No. 2, pp. 229~235.
- (3) Chaturvedi, G.K. and Thomas, D.W., 1982, "Bearing Fault Detection Using Adaptive Noise Cancelling", J. of Mechanical Design, Vol. 104, pp. 280~289.
- (4) Lee, J. M., 1988, "A Study on the Dynamic Modelling of Structures with Bolted and Bearing Joints.", Annals of CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 343~346.
- (5) Wilson W. Hines, Douglas C. Montgomery, 1980, Probability and Statistics in Engineering and Management Science 2nd ed., John Wiley & Sons.
- (6) Donfeld, D.A. and De Vries, M.F., 1990, "Neutral Network Sensor Fusion for Tool Condition Monitoring", Annals of CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 101~105.
- (7) Scheaffer, R.L. and McClave, J.T., 1980, Probability and Statistics for Engineers, Dukbury Press.
- (8) Baines, N., 1987, "Modern Vibration analysis in Condition Monitoring", Noise and Vibration Con-

Fig. 10 Probability of correct defect prediction with response to different.

하여 진단 프로그램을 적용시켜, 각 부위에 따른 결함 확률을 산출한 결과이다. 왼쪽항은 실제 결함내용이고, 이에 대하여 진단 알고리즘 I, II, III를 차례로 적용시켜 결함 확률을 산출한 결과이다. 이 결과로부터 실제 결함 부위의 결함 확률이 결함이 없는 부위의 결함 확률에 비해 높게 나타남을 알 수 있다.

진단 프로그램을 적용시킨 결과가 외륜결함 90%, 내륜결함 80%, 롤러 결함 60%와 같이 나타났을 경우, 실제 결함 부위를 판정하기 위해서는 몇 %이상의 결함 확률을 결함이라고 판정할 수 있는 기준 레벨(threshold-level)의 결정이 필요하다. 이를 결정하기 위해 기준레벨을 변경하면서 여러번 실험한 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 가로축은 기준레벨이며, 세로축은 각 기준레벨에서 정확한 판정을 한 확률이다. 일반적으로 판정오류에는 결함이 있는 경우에 없다고 판정하는 제 2종 오류와 결함이 없는 경우에 있다고 판정하는 제 1종 오류 등 2가지가 있다. 기준 레벨이 낮아지면 제 2종 오류는 감소하나 제 1종 오류는 증가한다. 따라서 정확한 판정의 확률은 Fig. 10에 도시된 바와 같이, 계산된 판정 확률에서 제 1종 오류의 확률을 뺀 결과이다. Fig. 10에서 기준레벨이 낮아질수록, 정확한 판정을 하는 확률이 증가하다가 알고리즘 I, II, III 모두 기준레벨 70%를 기준으로 다시 정확한 판정을 하는 확률이 감소함을 알 수 있다. 그러므로 3개의 진단 알고리즘 모두 70%를 기준레벨(threshold-level)로 결정할 수 있다.

- trol Worldwide, pp. 148~151.
- (9) Price, M.H., 1977, "Computer Assisted Vibration Monitoring Successful", Hydrocarbon Processing, pp. 85~90.
- (10) Taub, H. and Schilling, D.L., 1986, Principles of Communication Systems, 2nd ed., McGraw-Hill Book Company.