

〈論 文〉

회전기계 볼베어링의 자동진단 시스템에 관한 연구

윤종호* · 김성걸** · 김종현*** · 유정훈** · 이장무****

(1994년 1월 29일 접수)

A Study on the Automatic Diagnosis System of Ball Bearings for Rotating Machinery

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

Key Words : Rotating Machinery(회전기계), Automatic Diagnosis(자동진단), Ball Bearings(볼베어링), Database(데이터베이스), Signal Processing(신호처리), Probability(확률), Expert System(전문가시스템)

Abstract

Monitoring and diagnosis of the operating machine mean evaluating the condition of a machine such as the detection of the defects and the prediction of the time to failure in the machine elements, while it is running. In this study, a technique of automatic diagnosis using probability concept is studied and the analyses of the pattern comparison are introduced. An expert system, which is able to analyze the automatic identification of the multiple defects in the ball bearings, is also developed. Finally, to confirm the effectiveness of the programmed algorithms, some tests were made with specimens of the ball bearings involving the multiple defects. The proposed system reasonably predicts the defects.

1. 서 론

자동화된 생산라인에서 현대의 기계에 이상이 발생하면, 시스템 전체에 미치는 영향이 매우 크며 그 고장 및 파손은 큰 손실을 초래하게 된다. 그러므로 예방보전(preventive maintenance) 계획을 이용하여 기계의 파손부위 및 상태를 조기에 판정하고 그 대책을 수립해야 한다.^(1~3) 그러나 이상진단에 있어서 과거와 같이 기계를 정지시킨 상태에서 분해, 검사하는 방법은 운영시간의 단축과 그에 따른 손실을 요구하게 된다. 따라서 최근에는 여러

종류의 센서를 이용하여 운전상태의 기계장치에서 나오는 신호를 직접 측정하여 이상을 진단하는 추세에 있다. 그러나 이러한 방법은 이상유무의 판정에 있어서 전문가의 경험과 지식에 의존하여 직접 판단을 내리는 과정을 필요로 한다.

본 논문에서는 회전기계에서 가장 중요한 기계요소 중의 하나인 볼베어링에 대해, 베어링의 결합여부와 결합부위를 자동진단하는 새로운 방법을 제시하고, 볼베어링의 각종의 결합형태에 대한 데이터베이스를 구축하기 위하여, 여러가지 형태의 결합을 가진 표본 베어링시편을 제작하고, 제작된 시편의 실험수행을 위해 회전기계 베어링의 시험장치를 구성하였다. 또한, 볼베어링에 대한 자동진단 프로그램 개발하기 위해 신호처리와 확률이론을 도입하고, 패턴 비교해석 연구를 수행하였다. 선행된 해석이론을 적용하여 다양한 결합형태와 결합부위

*경북산업대학교 기계설계학과

**서울대학교 정밀기계설계공동연구소

***서울대학교 대학원 기계설계학과

****정회원, 서울대학교 기계설계학과

를 갖는 볼베어링의 자동진단을 위해 베어링의 이상진단 전문가시스템을 개발하였다.

2. 이론적 배경

베어링의 결함여부와 결함부위를 자동으로 진단하기 위한 여러가지 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 결함이 있는 볼베어링의 진동신호 특성, 특히 진폭의 분포, 스펙트럼 특성 및 캡스트럼 특성에 의하여 진단 기준을 만들고 확률이론을 이용한 전문가시스템을 구축하였다. 이와 관련된 이론을 간단하게 고찰하면 아래와 같다.

2.1 볼베어링 요소의 결함형태에 따른 진동신호의 특성

회전기계의 회전속도가 저속이고, 볼베어링에 작용하는 하중이 큰 경우에 동적인 영향을 배제한 상태에서 볼베어링의 운동학적 거동이 해석될 수 있다. 볼베어링의 결함부위에 따른 특성주파수 식은 Table 1과 같다. (4~7)

2.2 볼베어링에 대한 진동생성 모델

다양한 결함과 결함부위를 갖는 볼베어링을 해석하기 위해서 세가지 진동모델을 선정한다. 첫째, 국부적인 결함에 의한 모델이다. 베어링과 같은 기

계요소에 결함이 발생되면 회전수에 따른 반복하중이 기계를 가진시켜 주기적인 신호가 발생하므로 회전기계의 국부결함 검출방법으로 이러한 응답신호의 반복주기 특성을 이용한다. (8,9) 둘째, 부하(load)를 고려한 경우의 신호모델이다. (4) 국부적인 결함에 의하여 발생하는 충격의 크기는 진동체에 작용하는 충격하중에 비례한다고 가정하여 해석한다. 셋째, 분포결함에 의한 진동모델이다. (10) 앞에서 언급된 국부적인 결함의 존재는 볼베어링에 손상이 진행되고 있다는 것을 뜻한다. 이에 비해, 분포결함은 베어링의 생산과정 또는 설치시 발생하는 결함으로 운전수명에 영향을 준다. 분포결함에는 케도륜의 진원도 불량이나 크기가 다른 전동체들로 조립되는 경우 등이 있다.

2.3 전문가시스템의 구성

전문가시스템이란 어떤 영역의 문제를 풀기위해 특정한 분야의 고도화된 지식과 추론시스템(inference system)을 이용하는 지적인 컴퓨터프로그램을 말한다. (11,12) 구조적으로는 인간이 사고하는 과정을 모방한 지식베이스와 추론기관으로 분리되며, 기능적으로는 전문가와 같이 높은 결정능력(high decision quality)을 갖는 것이 특징이다. 전문가시스템은 지식베이스, 추론기관(engine), 이용자 인터페이스, 지식습득 부시스템, 추론설명 부시스템,

Table 1 Rolling element bearing defect frequencies

Component	Symbol	Frequency
Shaft rotation	f_r	$N/60$
Inner race defect	f_{ir}	$\frac{n}{2}f_r(1+\Omega)$
Outer race defect	f_{or}	$\frac{n}{2}f_r(1-\Omega)$
Rolling-element defect	f_{br}	$f_r r_d(1-\Omega^2)$
Rolling-element spin	f_{bs}	$\frac{1}{2}f_r r_d(1-\Omega^2)$
Rolling-element train(cage)	f_c	$\frac{1}{2}f_r(1-\Omega)$

d_r = Rolling element diameter
 N = Shaft speed (r. p. m)
 d_p = Bearing pitch diameter
 n = Number of rolling elements

$r_d = d_p/d_r$
 α = Contact angle
 $\Omega = (d_r/d_p) \cos \alpha$

작업메모리 등으로 구성된다.

3. 데이터베이스 구축을 위한 실험

다양한 베어링결함의 특성화 및 정량화를 위해 단일점결함, 다중점결함, 가공불량, 마모시험편 등을 Table 2와 같이 제작하여 실험하였다. 또한, 추력(thrust) 부하의 크기에 따른 영향도 함께 조사하였다.

제1단계 실험으로 안데론미터(Andersonmeter-H

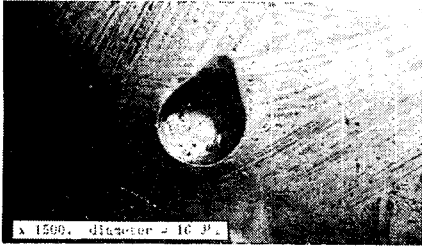
종합기계(주)에 소재)를 이용하여 베어링진동을 측정하고, 각종 결함에 의한 신호패턴을 분석하였다. 측정된 진동신호로부터 결함들의 특성을 찾아내기 위한 시험과정과 진단을 위한 정량화는 다음과 같다.

3.1 시험 베어링의 제작 및 시험장치

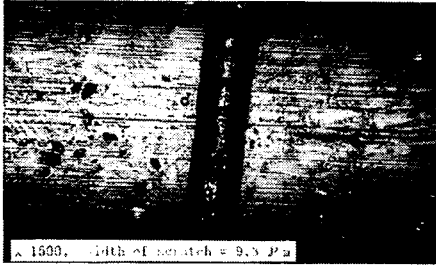
다양한 결함을 갖고 있는 베어링 시험을 위하여 내, 외륜의 점결함은 스크래치를 궤도면에 주었으며, 볼의 점결함은 로크웰 경도계(C 스케일)로 압

Table 2 Specimens of test bearing

No.	Faults	No.	Faults
1-1	A ball of different diameter	2-1	Different ball dimension(#1)
1-2	Two balls of different diameters	2-2	Different ball dimension(#1+#5)
1-3	Roundness fault of inner race	2-3	Ball defect(#1)
1-4	Roundness fault of outer race	2-4	Ball defect(#1+#2)
1-5	A defect in outer race	2-5	Ball defect(#1+#3)
1-6	A defect in inner race	2-6	Ball defect(#1+#4)
1-7	Two defects in outer race	2-7	Ball defect(#1+#5)
1-8	Two defects in inner race	2-8	Ball defect(#1+#4+#7)
1-9	Outer race 1, inner race 1	2-9	Two defects in a ball
1-10	Outer race 2, inner race 2	2-10	Bad lapped ball(#1)
1-11	Faults of outer race roughness	2-11	Bad lapped ball(#1+#5)
1-12	Faults of inner race roughness	2-12	Ball 1+defect of inner race (small)
1-13	A defect of a ball	2-13	Ball 1+defect of inner race (large)
1-14	Two defects of a ball	2-14	Outer race 1+ball defect (small)
1-15	Ball 1+inner race 1	2-15	Outer race 1+ball defect (large)
1-16	Ball 1+outer race 1	2-16	Ball 1+cage 1
1-17	Normal (domestic)	2-17	Ball 1+inner 1+outer 1
1-18	Abnormal (Japanese)	2-18	Exclusion of a ball
1-19	Normal thrust (5 lb)	2-19	A defect of retainer
1-20	Normal thrust (10 lb)	2-20	Two defects of retainer
1-21	Normal thrust (15 lb)	2-21	Faults of outer race roundness
1-22	Normal thrust (20 lb)	2-22	Normal thrust (15 lb)
1-23	Normal thrust (25 lb)	2-23	Normal thrust (15 lb)
1-24	Normal thrust (30 lb)	2-24	Normal thrust (15 lb)



(a) Point defect on a ball



(b) Scratch on inner race

Photo 1 Simulation ball bearing defects

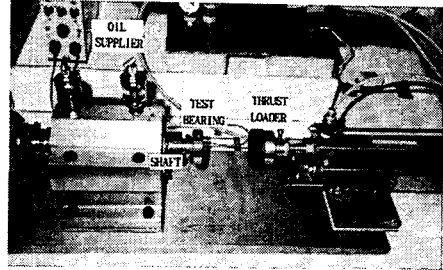
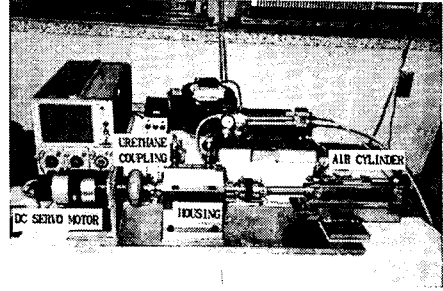
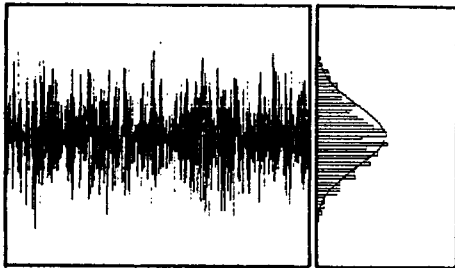


Photo 2 Bearing test ring

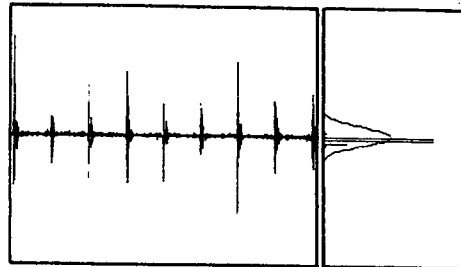
입자국을 주거나(Photo 1), 전기연필(electric pencil)로 방전시켜 제작하였고, 내·외륜 및 볼의 연마부족 시편은 생산라인에서 선택하여 이용하였다. 본 논문에서 시험 베어링으로 사용한 볼베어링은 단열 깊은홈 볼베어링 6205(개방형)이다.

또한 제1단계 실험에서 안테나미터로 측정된 베

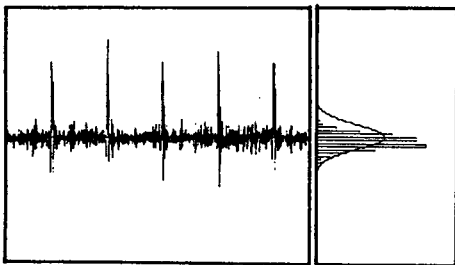
어링진동을 해석하여 각 결함들의 특성이 파악되면, 제2단계에서는 반복실험을 수행하여 결함들의 패턴을 찾아낸 후, 컴퓨터에 데이터베이스로 저장한다. 제3단계에서는 개발된 시스템을 적용하기 위한 시험장치 제작이 필요하다. 본 논문에서는 DC 모터, 커플링, 시험베어링 어댑터, 공기실린더를



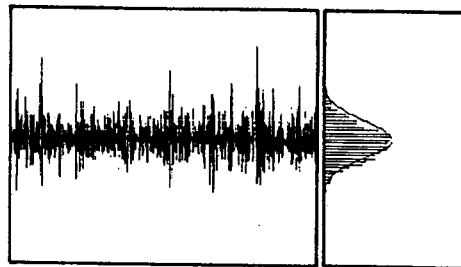
(a) Normal bearing



(b) Inner race defect



(c) Outer race defect



(d) Ball defect

Fig. 1 Time signals, Gaussian probability density functions and histogram of amplitude

이용한 로터를 사용하여 Photo 2와 같은 시험장치를 제작하였고 관련 신호처리장치 및 컴퓨터를 이용하여 실험을 수행하였다.

3.2 결함신호 패턴과 결함의 특성화
베어링의 결함과 결함부위에 따른 특성을 알아보기 위하여 본 논문에서는 모든 시험 베어링에 대한

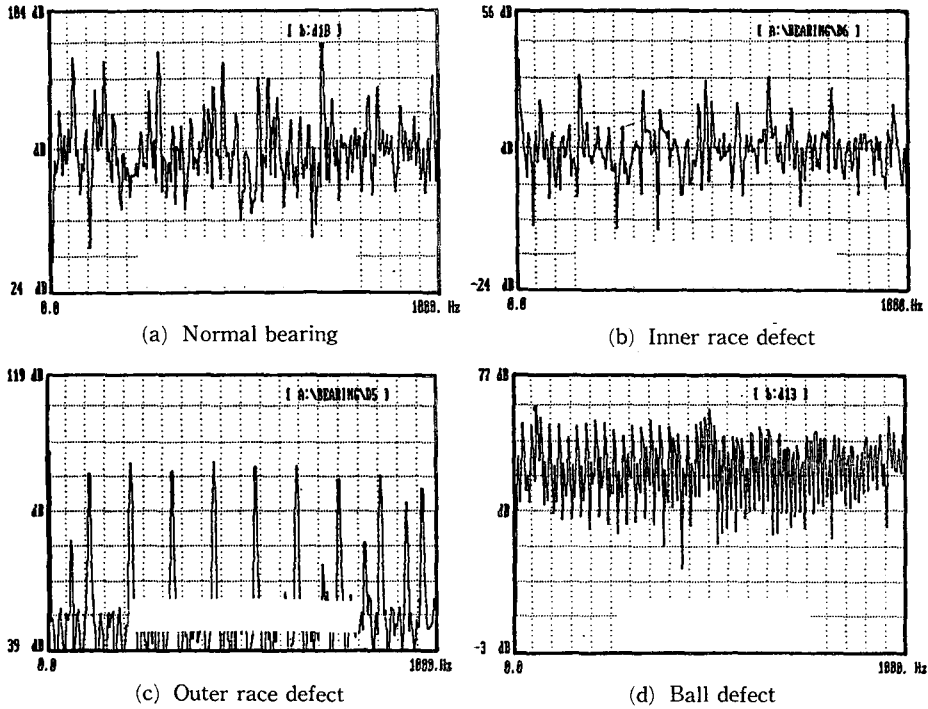


Fig. 2 Characteristics of power spectra

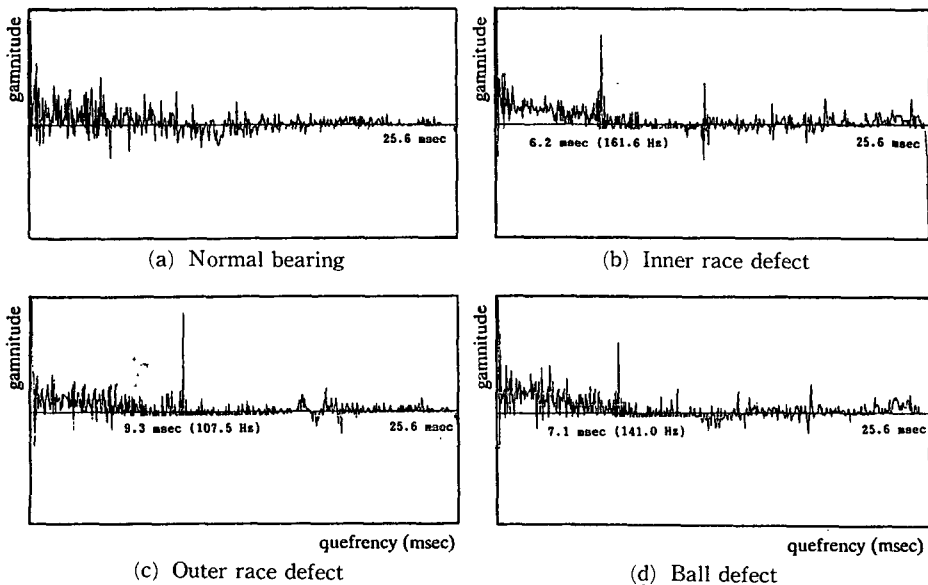


Fig. 3 Characteristics of cepstrum

여 다음과 같이 다양한 신호분석을 수행하였다. 첫째, 시간 영역에서의 파형을 관찰함과 동시에 진동 진폭들의 가우스분포와 히스토그램을 비교, 분석하였다. 둘째, 스펙트럼해석을 수행하여 각 결함들의 스펙트럼특성을 고찰하였다. 셋째, 스펙트럼해석만으로는 결함판정을 정확하게 할 수 없는 경우에는 캡스트럼해석을 수행하였다.

Fig. 1에서는 시간영역에서의 파형패턴, 가우스 확률밀도함수 및 진폭 히스토그램의 특성을 보여주고 있다. 정상인 베어링의 경우(그림 (a))에 가우스 확률밀도함수와 진폭 히스토그램이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 점결합있는 베어링의 경우(그림 (b), (c), (d))에는 피크치들로 인하여 확률밀도 곡선과 진폭 히스토그램이 현저하게 차이를 나타내고 있어 결함신호를 쉽게 관찰할 수 있다. Fig. 2는 정상 및 각종 결함이 있는 신호에서 도출한 스펙트럼 해석결과를 보여준다. 그림에서 (a), (b), (c), (d)는 각각 정상, 내륜결합, 외륜결합, 불결합 등에 대한 해석결과를 나타내고 있다. Fig. 3은 정상상태 및 각종 결함이 있는 불베

어링의 캡스트럼을 도시하고 있다. 그림에서 (a)는 정상상태 베어링의 진동신호에 대한 캡스트럼을 나타내고, 그림 (b), (c), (d)는 각 결함특성들의 퀘프런시(quefrequency)가 6.2 msec(내륜결합), 9.3 msec(외륜결합), 7.1 msec(불결합)에서 뚜렷한 피크를 나타내었다. 특히, 그림 (d)에서 알 수 있듯이 불결합의 스펙트럼해석에서는 특성주파수가 분명하게 나타나지 않는 것에 비해, 결함에 따른 퀘프런시는 7.1 msec(140 Hz)에서 뚜렷하게 도시되고 있어, 불결합 탐지의 정밀분석방법으로 캡스트럼이 유용함을 확인할 수 있다.

3.3 기준스펙트럼과 정량화

본 논문에서는 점결합을 갖고 있는 베어링의 작동진단을 위해서, 기준스펙트럼 데이터는 포락선 스펙트럼해석을 수행하여 데이터베이스화하였고 그 결과는 Table 3와 같다. Table 3는 국부적인 결함을 갖는 베어링에서, 각 결함에 대한 특성주파수 대역별 주파수와 대수 레벨측정치의 평균값, 그리고 표준편차에 대한 데이터베이스를 보여주고 있다.

Table 3 Data of reference spectrum

Defects		Frequency band		FB1	FB2	FB3	FB4	FB5	FB6
		Avg.	Var.						
Cage	Freq.	Avg.		11.75	23.75	35.75	47.5	59.5	70.25
		Var.		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Level	Avg.		-65.1	-66.0	-68.2	-69.4	-72.4	-74.9
		Var.		19.5	21.7	18.9	22.3	19.8	20.3
Outer race	Freq.	Avg.		107.5	215.7	322.1	428.0	537.2	644.8
		Var.		3.65	7.48	3.35	11.22	8.62	6.58
	Level	Avg.		-27.9	-27.8	-24.5	-34.7	-34.3	-33.5
		Var.		29.1	18.9	16.1	32.2	31.9	42.8
Ball	Freq.	Avg.		141.0	281.8	423.3	523.9	704.7	845.4
		Var.		4.37	3.31	3.86	1.54	0.62	2.56
	Level	Avg.		-35.3	-43.4	-45.2	-51.5	-47.6	-46.1
		Var.		43.8	53.0	52.7	25.2	24.6	15.5
Inner race	Freq.	Avg.		161.6	322.5	484.5	646.1	808.6	967.7
		Var.		5.38	2.62	3.61	13.3	30.5	2.56
	Level	Avg.		-29.0	-33.0	-34.3	-38.3	-39.2	-41.6
		Var.		31.4	12.6	41.2	52.7	39.4	8.88

며, 베어링 회전시험장치의 속도를 1800 rpm으로 하여 각 결함별 특성주파수 대역들을 계산하였다. 베어링 6205의 케이징, 외륜, 내륜, 볼 등에서 첫 번째 주파수 대역(FB1)은 각각 11.95, 107.5, 141.3, 162.5 Hz이며, FB2에서 FB6까지는 각 결함 특성주파수들의 고조파를 의미한다.

4. 자동진단 전문가시스템의 구성 및 진단 해석결과

일반적인 베어링 결함 판정에서는 일정한 시간 동안에 기준치를 초과하는 피크치의 개수나, 진동의 유효치가 기준레벨 이상이 되면, 자동생산라인에서 제품을 불량품으로 판정하는 방법이 널리 사용된다. 그러나, 이러한 방법으로는 결함의 부위를 알 수 없고, 진단의 기준이 되는 진동레벨에 대해서도 확률적 특성해석이 결여되어 있어 판단의 오류가 크게 된다. 본 논문에서는 베어링의 결함을 자동으로 검출하고 진단하기 위하여 아래와 같은 구체적인 방법을 제시하였다.

4.1 결함패턴 해석

베어링 진동신호의 스펙트럼을 측정하여 정상인 것과 불량인 것을 비교, 판정하기 위해서는 기준 스펙트럼의 주파수 대역폭을 결정해야 한다. 이것은 회전기계의 불규칙한 회전수와 계측기들의 주파수 해상도를 보상하기 위해 필요한 기법으로, 선정된 주파수 대역폭 내에서 검출된 피크치의 레벨이 일정 기준치 이상일 경우에만 결함으로 판정된다. Fig. 4는 일반적인 기계진단에서 사용되는 기준 스펙트럼을 나타낸다. 본 논문에서는 베어링의 결함 해석을 위하여 특정주파수 대역에서 Fig. 4 (c)와 같은 일정 대역폭 기준스펙트럼을 Fig. 4 (d)와 같이 이산화된 형태로 사용하였다. 제작된 베어링 시편의 진동신호 피크치를 측정하고, 피크치들의 주파수 분포에서 계산된 표준편차의 정수배로 주파수 대역폭을 선택하여 사용하였다.

4.2 진단 알고리즘

일반적으로 결함판정 모델은 Bayes의 추정이론을 기초로 한 최대우도법(maximum likelihood method)을 사용한다. 최대우도법에서는 시스템의 출력분포가 정상모드인지 또는 손상모드인지에 따라 그 분포를 고려하며, 시스템 출력의 특성치는

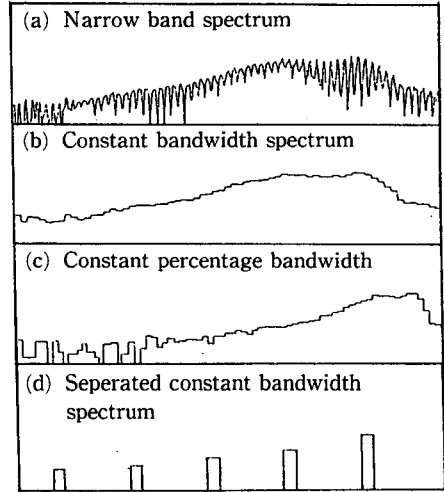


Fig. 4 Reference spectrum bandwidth for diagnosis

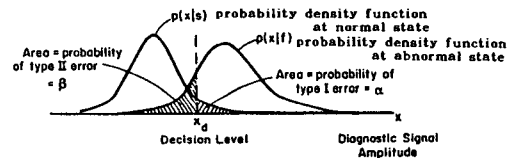


Fig. 5 Probabilistic densities of normal and abnormal machine in terms of diagnostic signal

데이터가 정상집단인지 또는 손상집단인지에 따른 우도(likelihood)의 향으로 평가된다. 본 판정기준 해석을 위해서 확률이론에 사용되는 제1종 오류와 제2종 오류를 도입하였다. 여기서, 제1종 오류는 결함이 없는 상태에서 결함이 있다고 판정하는 경우이고, 제2종 오류는 결함이 존재해도 정상상태로 판정하는 경우를 뜻한다. Fig. 5는 진단신호를 사용하여 정상상태와 손상상태의 확률밀도를 도시한 것이다.

본 논문에서는, 제1종 및 제2종 오류에서 손실 비용과 오류발생 확률이 같다고 가정하여 전체 오류가 최소치가 되도록 판단레벨을 계산하여 사용하였다. 표준형의 확률밀도변수 z_0 와 z_1 은,

$$z_0 = \frac{(x - \mu_0)}{\sigma_0}, \quad z_1 = \frac{(x - \mu_1)}{\sigma_1} \quad (1)$$

즉, 주어진 가정에 의해,

$$z_0 = z_1 = \frac{(x - \mu_0)}{\sigma_0} = \frac{(x - \mu_1)}{\sigma_1} = z \quad (2)$$

이 된다. 그러므로 판정레벨 x_d 를 구하면 식(3)이

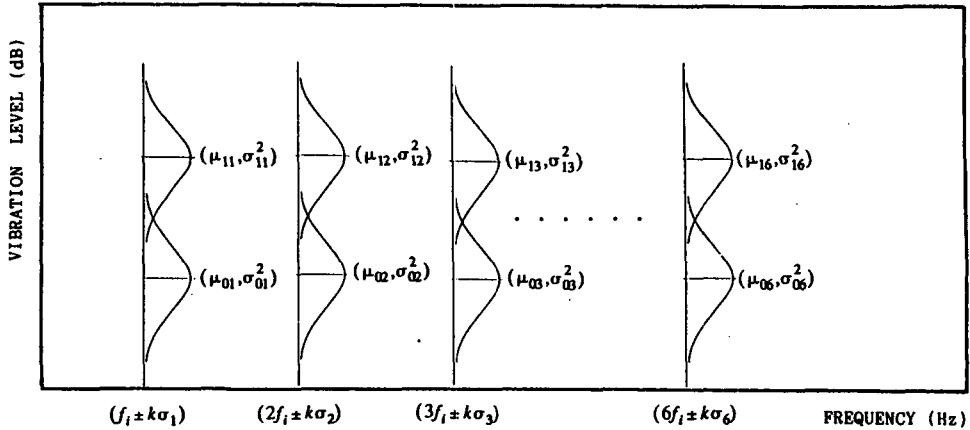


Fig. 6 Data of reference spectrum (for algorithm I)

된다.

$$x_d = \mu_0 + z\sigma_0 = \mu_1 + z\sigma_1 \quad (3)$$

여기서,

μ_0, σ_0 : 정상상태 베어링의 진동데이터에서 구한 표준편차와 평균

μ_1, σ_1 : 비정상상태 베어링의 진동데이터에서 구한 표준편차와 평균

제1종 및 제2종 오류들의 확률 α 와 β 는 정규 확률밀도함수 표를 컴퓨터에 데이터베이스로 저장하여 활용하였다. 자동진단을 위한 국부적인 결합의 기준스펙트럼 데이터는, 주파수 대역을 통과한 진동신호를 포락선신호로 구현하고, 이 포락선신호의 스펙트럼해석을 수행하여 획득하였다. 이와 같은

방법으로 습득된 기준스펙트럼 데이터를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 본 논문에서 사용된 기준스펙트럼의 주파수 대역폭은 FFT분석기의 주파수 분해능을 고려하여 결정하였다. 즉, 내륜결합, 외륜결합, 불결합 등의 기준스펙트럼은 1 kHz 영역에서, 그리고 케이지결합에 대한 기준스펙트럼은 100 kHz 이내에서 주파수 대역폭을 결정하였다. Fig. 6과 Fig. 7에서 제시된 기준 스펙트럼을 사용하여 산출 알고리즘 I, II를 작성하였으며, 그 기본 내용은 다음과 같다.

4.2.1 알고리즘 I

Fig. 6과 같은 데이터베이스를 특성주파수 스펙트럼의 기본 및 고조파 대역들을 이용하여 각 결합

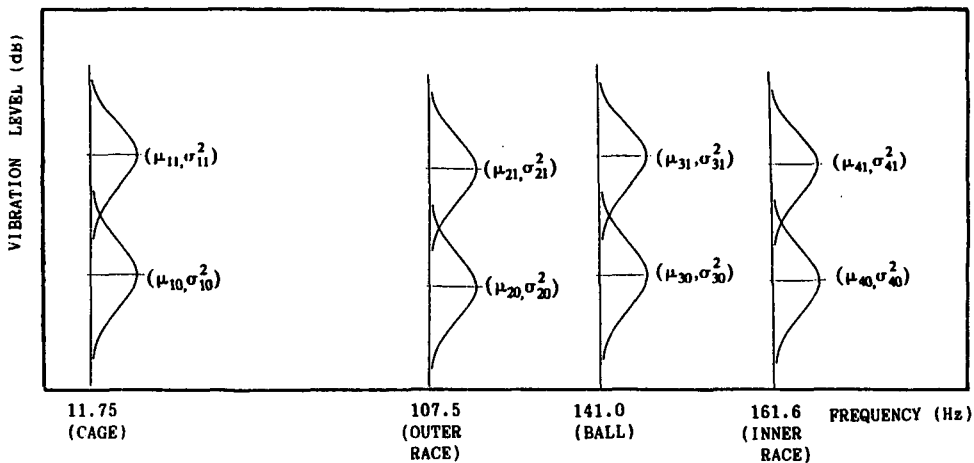


Fig. 7 Data of reference spectrum (for algorithm II)

의 패턴을 만들고, 구성된 패턴과 피진단신호의 스펙트럼을 비교하여 기준스펙트럼보다 높은 피크치를 나타내는 빈도수를 주파수 대역별로 측정한다. 이렇게 측정한 빈도수를 기본으로 하여 Table 4과 같은 가중치 표를 구성하고, 기준스펙트럼보다 피크치가 큰 주파수 대역들에서만 가중치를 고려하여 그 가중치들을 합한다. 알고리즘 I에서는 가중치들의 합으로 결함의 존재여부를 판정하여 출력한다.

4.2.2 알고리즘 II

Fig. 7은 각 결함들의 기본 특성주파수 대역에서 측정된 진동레벨의 분포도를 나타낸다. 이렇게 작성된 데이터베이스를 기준으로 하여, 해당주파수 대역에서 피진단신호의 레벨 x 가 주어지면, 제1종 판단오류를 범할 확률 α 와 제2종 오류를 범할 확률 β 가 계산될 수 있으므로 불확실한 판단을 행하게 될 전체확률은 $\alpha + \beta$ 가 된다. 따라서, 전체의

불확실한 판단 중에서 제1종 오류를 범할 확률이 정상일 확률이고 제 2종 오류를 범할 확률이 결함일 확률임을 알 수 있다. 이 알고리즘을 이용하면, 진단신호가 불확실성 영역내에 존재할 때, 결함의 상대적인 크기도 비교할 수 있다. Fig. 8와 Table 5에서 본 진단의 출력의 원리를 나타내었다.

4.3 전문가시스템의 구성

베어링 구동장치에서 베어링 진동신호를 측정하고 디지털 신호처리를 이용하여 패턴 비교를 수행한 후, 베어링의 결함유무, 결함의 종류, 원인과 대책 등을 제시할 수 있는 베어링 전문가시스템을 구현하였다. Fig. 9은 베어링 결함진단의 전문가시스템을 도시한다. 또한, 회전하는 볼베어링의 자동 진단을 위해 구성된 시스템의 하드웨어 구성도는 Fig. 10과 같다. 장착된 베어링의 이상 여부를 판단하기 위해 베어링의 진동신호를 가속도계로 측정

Table 4 Decision table(for algorithm I)

Freq. band defect	FB1	FB2	FB3	FB4	FB5	FB6	(%)
Cage	WF11	WF12	WF13	WF14	WF15	WF16	100
Outer race	WF21	WF22	WF23	WF24	WF25	WF26	100
Ball	WF31	WF32	WF33	WF34	WF35	WF36	100
Inner race	WF41	WF42	WF43	WF44	WF45	WF46	100

*FB : Frequency band, WF : Weight factor

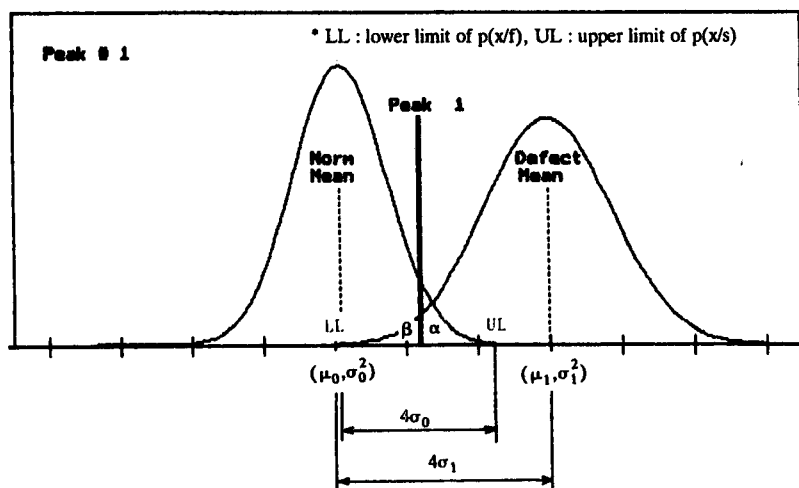


Fig. 8 Probability density functions of x (dB) at characteristic frequencies of faults

Table 5 Algorithm II for fault probability

Range of X	Probability of abnormal condition	Probability of normal condition
$0 < X < LL$	0%	100%
$LL < X < UL$	$\frac{\beta}{(\alpha + \beta)} \times 100\%$	$\frac{\alpha}{(\alpha + \beta)} \times 100\%$
$X > UL$	100%	0%

*LL : Lower limit of p(x/f) UI : Upper limit of p(x/s)

하여 증폭기로 증폭한 후, 가변필터를 사용하여 베어링내, 외륜의 공진주파수 대역만을 통과시켜 율림파형을 측정한다. 여기서 측정된 신호의 주기성을 쉽게 검출하고 잡음을 제거하기 위하여 포락선 검파기(envelope detector)를 사용한다. 이 신호를 FFT분석기나 A/D변환기를 사용하여 아날로그신호의 이산화된 신호를 습득하고, 이산화된 신호들을 IBM-PC에서 신호처리한다. 전술한 볼베어링의 특성해석, 패턴해석, 전문가시스템 등을 적용하여 다양화된 결함을 갖는 볼베어링의 자동진단을 위한 프로그램을 작성한다. 이 프로그램은 시간영역에서의 간이진단과 주파수영역에서의 정밀진단으로 구성된다. 정밀진단해석에서는 앞에서 기술한 알고리즘 I과 II중 한개를 선택한 후, 주파수 대역폭을 결정한다. IBM-PC를 이용하여 신호처리된 신호를 데이터베이스에 있는 결함패턴과의 상호 비교를 하여 결함이 존재할 확률을 계산하여 출력한다. 이때, 스펙트럼해석을 이용한 결함검출 결과가 불확

실한 경우에는 케스트럼해석 등을 수행하여 진단 결과를 보완한다.

4.4 정밀진단 해석결과

베어링의 결함부위에 따른 기준스펙트럼의 패턴이 실험과 해석에 의해 결정되었으므로 새롭게 입력되어 신호처리된 신호들과 이 기준패턴을 비교하여 결함을 판정할 수 있다. 본 논문에서 개발된 볼베어링의 자동진단 시스템에서는, 시험측정치들의 데이터베이스와 이론계산으로부터 구한 주파수에서 기준스펙트럼의 폭과 레벨을 결정한 후, 이를 실제 판정하고자 하는 베어링의 스펙트럼과 비교, 분석

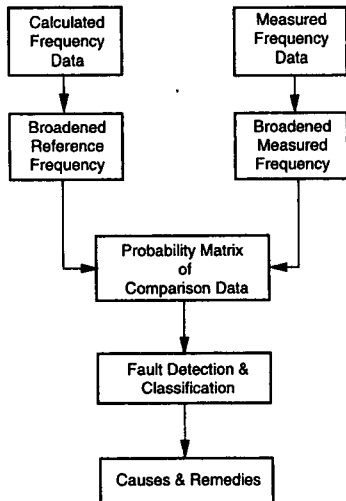


Fig. 9 Expert system for bearing diagnosis

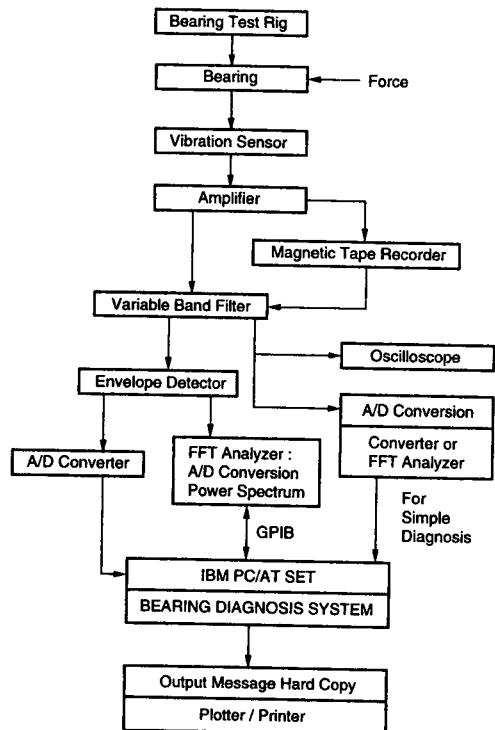


Fig. 10 Hardware system for bearing diagnosis

표본 베어링에 대해 결함의 특성주파수 대역을 결정하고, 이 주파수 대역에서 피크치의 확률분포를 데이터베이스화하였다. 그리고, 검사하고자 하는 베어링의 진동 스펙트럼 레벨과 비교하여 추정된 제1종 오류와 제2종 오류를 이용하여 베어링의 상태를 판단하는 알고리즘 II를 제시하였다. 결함을 진단하기 위한 베어링 진동신호의 전처리작업으로 주파수 대역폭과 필터링, 포락선검파 등의 연구를 수행하였으며, 각종 결함을 가진 베어링 시편과 회전 볼베어링의 시험장치를 제작하여 이론해석에 필요한 데이터 베이스를 구축하였다. 또한 결함부위의 명확한 판정을 위해 파워스펙트럼, 캡스트럼 등의 해석을 실시하였다. 이상의 결과를 종합하여 볼베어링의 결함탐지 및 그 원인과 대책을 지식베이스로 구현하여 베어링 이상진단을 위한 전문가시스템을 개발하고 실험을 통하여 방법의 유용성을 보였다.

참고문헌

- (1) Collacott, R. A., 1977 *Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring*, Chapman and Hall, London.
- (2) Lyon, R. H., 1987 *Machinery Noise and Diagnostics*, Butterworths.
- (3) Elsayed, A. E., 1988, "Knowledge Based Systems for Machinery Fault Diagnosis," *6th IMAC*, pp. 1230~1238.
- (4) Brunn, P., 1981, *Machine Condition Monitoring, Noise & Vibration Control Worldwide*, Sept. pp. 249~251.
- (5) McFadden, P. D. and Smith, J.D., 1984, "Model for the Vibration Produced by a Single Point Defect in a Rolling Element Bearing," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 96, No. 1, pp. 69~82.
- (6) Harris, T. A., 1981, *Rolling Bearing Analysis*, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- (7) Igarashi, T. and Hamada, H., "결함이 있는 베어링의 진동음향에 관한 연구(제1~5보)," *일본기계학회논문집(C편)*, 47권 422호(1981. 10); 49권 438호(1983. 2); 50권 455호(1984. 7); 51권 467호(1985. 7); 52권 473호(1986. 1).
- (8) Baines, N., 1987, "Modern Vibration Analysis in Condition Monitoring," *Noise & Vibration Control Worldwide*, May pp. 148~151.
- (9) Price, M. H., 1977, *Computer Assisted Vibration Monitoring Successfulness*, Hydrocarbon Processing, Dec. pp. 85~90.
- (10) Radall, R. B., *Efficient Machine Monitoring Using FFT Analyzer and Calculator*, B&K Application Notes.
- (11) Hayes-roth, F., Waterman, D. A. and Lenat, D. B., 1983, *Building Systems*, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- (12) Wateramm, D. A., 1986, *A Guide to Expert Systems*, Addison-Wesley Publishing Co.