

## 수직축풍력발전기 하부베어링용 테이퍼롤러베어링의 결합진단시스템 개발

### Study on the Diagnosis System of Taper Roller Bearing used on the Lower Bearing of V. A. W. T.

이 성 근\* · 박 영 일\*\* · 이 회 원\*\* · 김 영 석\*\*  
S. K. Lee · Y. I. Park · H. W. Lee · Y. S. Kim

#### ABSTRACT

Taper roller bearing is used on rotating shaft where radial and thrust loads are attended. To avoid the sudden failure and maintain the good condition of rotating machinery it is necessary to monitor the condition of bearing and diagnose the defect of bearing.

In this study the diagnosis program of taper roller bearing which is used on the lower bearing of V. A. W. T. (Vertical Axis Wind Turbine) is developed. By plenty of test the database is constructed and by Gaussian distribution obtained from database the defect probability of bearing is calculated.

#### 1. 서 론

최근 국내에서도 청정에너지로서의 풍력발전에 대한 관심이 높아지고 풍력발전을 위한 설계 및 설치를 위한 연구가 수행<sup>1)</sup>되고 있다. 특히 돌풍이 많은 해안 또는 산악지대가 많은 국내 실정에서는 바람의 방향의 영향을 받지 않고 구조적으로 안정성을 갖는 수직축 풍력발전기(Vertical Axis Wind Turbine)가 유리한 점이 많다 하겠다.

수직축 풍력발전기의 동력을 발전기로 전달하는

동력전달계는 중앙 회전축(Torque tube), 회전자(Turbineblade), 지주(Strut), 변속기어, 상하부 베어링, 브레이크, 플렉시블커플링 등으로 구성된다. 특히 하부베어링(lower bearing)은 회전자 당김줄(guy cable)장력의 수직분력, 바람의 수평분력 및 회전자의 자중을 견딜 수 있어야 하므로, 복합하중에 견딜 수 있는 테이퍼롤러베어링이 사용되며, 테이퍼 로울러 베어링은 하부베어링외에도 회전축의 축방향, 반경방향의 복합하중이 작용되는 각종 공작기계나 자동차 등에서도 널리 쓰인다.

\* 한국산업인력관리공단 지도부

\*\* 서울산업대학교 기계설계학과

수직축 풍력발전기의 하부베어링은 회전자의 회전에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소로서, 불의의 파손시 사고위험과 함께 운전이 정지되어 경제적인 손실을 초래하게 된다. 그러므로 수직축 풍력발전기 및 각종 기계장치에 사용되는 테이퍼롤러베어링의 이상 유무를 운전 중에 알 수 있도록 결합진단을 하여 기계의 파손 및 운전의 중단을 사전에 막는 방법이 가장 좋은 방법이라 할 수 있다. 그러나 결합진단에 있어서도 과거와 같이 운용시간의 단축을 가져오는 정기적인 분해점검 보수보다는 기계의 결합을 조기에 감지하기 위하여 기계 운전상태에서의 예방보전의 필요성이 증대되고 있다. 결합진단의 방법중에서도 여러 종류의 센서를 이용한 신호분석기로 기계장치에서 나오는 각종 신호를 운전 중에 직접 측정하여 진단하는 가동중 점검(on-condition monitoring)방법이 각광을 받고 있으며 진동신호를 이용하여 베어링의 결합여부를 검출하기 위한 많은 연구가 행하여져 왔다.

본 연구에서는 수직축 풍력발전기와 같이 대규모의 수직하중을 받고있는 테이퍼롤러베어링(KBC 30312J)를 대상으로 가속도계를 통해 진동신호를 검출하는 방법을 이용하여 운전중의 베어링의 결합진단을 하고자 베어링 결합 진단 프로그램을 개발하고자 한다.

## 2. 데이터베이스의 구축

### 2.1 진동 생성 모델

저속으로 회전하거나 작용하중이 큰 경우에는 동적인 영향을 무시할 수 있으며 테이퍼롤러베어링의 운동학적 거동<sup>2)</sup>이 해석될 수 있다. Fig. 1에서 나타난 바와 같이 내외륜의 공통 접촉각  $\alpha$ 를 갖는 베어링이 N rpm으로 회전하고 있다고 할 때, 내륜과 롤러 접점에서 선속도  $v_i$ 와 외륜과 롤러 접점에서의 선속도  $v_o$ 는

$$v_i = \frac{\pi N d_p}{60} \left( 1 - \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$v_o = \frac{\pi N_0 d_p}{60} \left( 1 + \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \dots\dots\dots (2)$$

이다. 또한 궤도와의 접촉에서 전체적인 미끄럼이 없다고 할 때 전체적 전체의 속도는 내외륜 속도의 중간값이므로 리테이너속도  $v_r$ 는

$$v_r = \frac{\pi d_p}{120} \left[ N_i \left( 1 - \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) + N_o \left( 1 + \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) \right] \dots\dots\dots (3)$$

내륜과 롤러 접촉에서 미끄럼이 없다고 가정하면 롤러의 속도는 접촉점에서 궤도속도에 일치한다. 따라서 롤러의 자전 각속도를  $\omega_R$ 이라 하면

$$\frac{1}{2} \omega_R d_p \left( 1 - \frac{d_r}{d_p} \cos \alpha \right) = \frac{1}{2} \omega_R d_r \dots\dots\dots (4)$$

이다.

$n$ 를 로울러의 개수,  $\Omega = (d_r/d_p) \cos \alpha$ ,  $\gamma_d = d_p/d_r$ 라 할때 테이퍼롤러베어링의 결합부위에 따른 특성주파수 계산식들은 Table 1과 같다.

Table 1 Defect frequencies of rolling element

Component	Symbol	Frequency
Shaft rotation	$f$	$N/60$
Inner race defect	$f_i$	$\frac{n}{2} f(1+\Omega)$
Outer race defect	$f_o$	$\frac{n}{2} f(1-\Omega)$
Roller defect	$f_R$	$f \gamma_d (1-\Omega^2)$
Roller spin	$f_{RS}$	$\frac{1}{2} f \gamma_d (1-\Omega^2)$
Retainer	$f_r$	$\frac{1}{2} f(1-\Omega)$

### 2.2 데이터베이스 구축 실험

#### 2.2.1 시험장치

데이터 베이스 구축을 위한 베어링 시험장치는 DC모터로 구동되며 진동 및 소음의 영향을 줄이기 위하여 플렉시블커플링을 사용하여 시험베어링 스피들에 연결하였으며, 시험베어링을 쉽게 착탈할 수 있도록 베어링하우징을 제작하였다. 추력기(thrust loader)는 에어콤프레셔에서 공급된 압축공기를 유량제어밸브를 통해 시험하중을 2500N으로 조정하여 베어링에 수직하중을 가할 수 있도록 하였고 공압 실린더측에는 스톱스트 볼베어링(KBC 51308)을 장착하여 시험베어링에 수직하중을 가하면서 같이 회전한다. 또한 시험베어링과 추력기 사이에 오정렬(misalignment)방지와 방진을 위하여 방진재(rubber sheet)를 부착하였다.

시험베어링의 외륜에 가깝게 부착된 가속도계를 통해 나온 신호는 전하증폭기를 거쳐 ADAM(An-

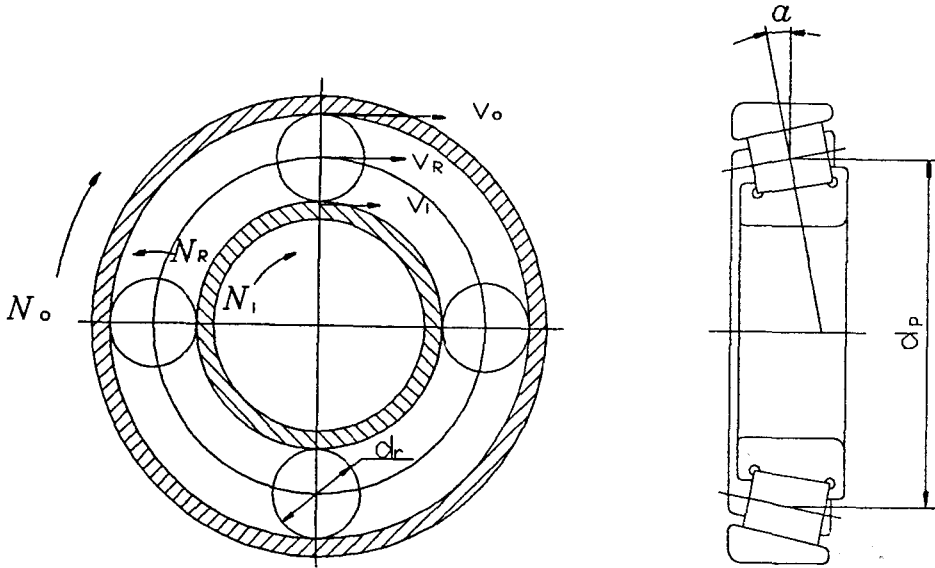


Fig. 1 Rolling velocities

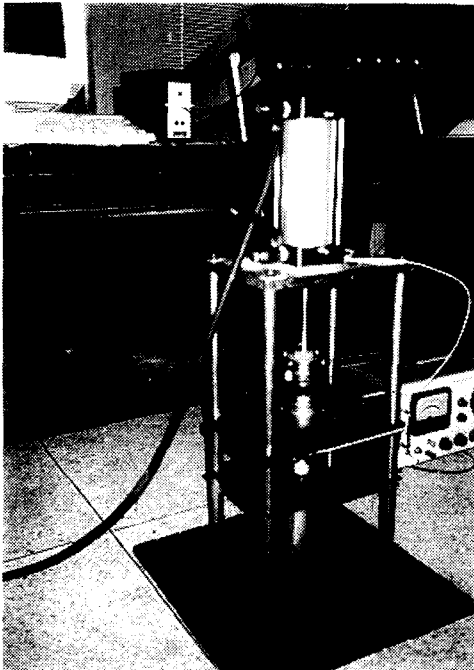


Fig. 2 Photograph of test set-up

alog Data Acquisition Memory)으로 보내진다. ADAM에서 아날로그 신호를 디지털 신호로 처리한 후 자체의 메모리에 저장시키고, PC로 인터페

이스(interface)하여 플로피디스크에 저장하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 장비들의 사진이다.

### 2.2.2 시편

베어링의 대표적인 결함으로는 결함부위에 따라 외륜결함, 내륜결함, 롤러결함으로 나누어지며, 결함상태에 따라 스크래치결함, 점결함, 분포결함, 마모결함, 진원도불량 등으로 나눌 수 있다. 베어링의 결함형태는 작용하중에 따라 반경방향 하중 및 굽힘 모멘트를 받는 경우는 플레이킹(flaking)이, 축방향 하중을 받을 때는 스크래치(scratch)가 주로 나타난다<sup>4,6)</sup>.

본 논문에서는 수직하중을 받는 베어링에서 자주 발생하는 결함패턴을 만들기 위해, 베어링시편에 초경합금 스크라이버(scriber)로 스크래치 결함을 주는 방법으로 테이프 롤러베어링(KBC 30312J)를 대상으로 베어링시편을 만들었다.

Fig. 3는 테이프롤러베어링의 구성부품과 스크라이빙하는 모습을 나타내며, Fig. 4는 스크라이빙 횟수에 따른 결함의 확대사진이다.

### 2.2.3 실험방법

테이프 롤러베어링의 결함을 진단하기 위한 실험은 먼저 스프루스트 하중이 시험하중인 2500N이 되도록 압력계를 조절하며 에어 실린더를 작동 추



Fig. 3 Shape of taper roller bearing component, scriber and scribing

력을 전진시켜 추력을 가하며 DC모터를 70rpm의 일정한 회전속도를 유지하도록 조정한다. 가속도계를 외륜에 가깝게 위치하도록 고정하고 안정상태가 될 때 까지 구동시킨 후 매 100Hz마다 1024개의 타임 레코드를 화일 5개로 저장하며 전용 프로그램에 의해 PC로 인터페이스하여 디스켓에 저장하여 처리한다. 저장된 타임 레코드 화일 5개를 파워스펙트럼의 평균치를 계산하여 각 요소별로 특성주파수에서 레벨값을 읽어 기록하며 반복실험한다.

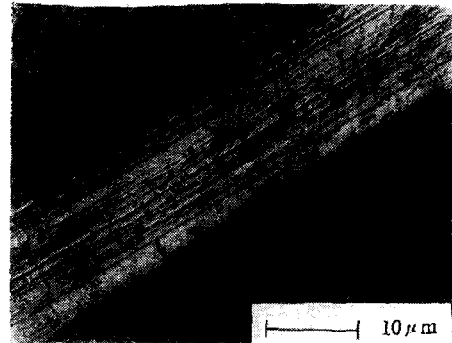
### 3. 진단 알고리즘 및 결함진단 프로그램

#### 3.1 진단 알고리즘

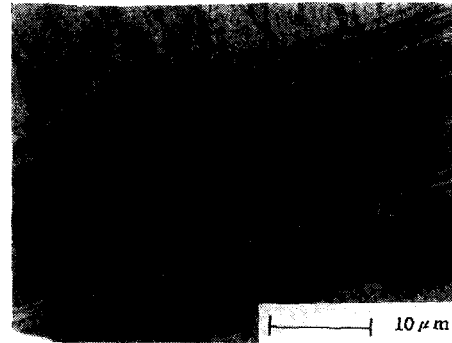
데이터베이스가 형성되면 진단하고자 하는 베어링의 주파수대역에서 진동레벨  $x$ 가 주어질 때 제1종 오류를 범할 확률  $\alpha$ 와 제2종 오류를 범할 확률  $\beta$ 의 비율로써 나타낼 수 있다<sup>6-8)</sup>. 여기서 제1종 오류란 무결함상태에서 결함상태로 판정되는 경우



(10 times)



(20 times)



(30 times)

Fig. 4 Simulated bearing defect

를 말하고 제2종 오류는 결함이 있는데도 정상상태로 판정하는 경우를 일컫는다.

제1종 오류의 경우에는 불필요한 정지, 분해 및 조립비용을 초래하고 제2종 오류의 경우에는 공정

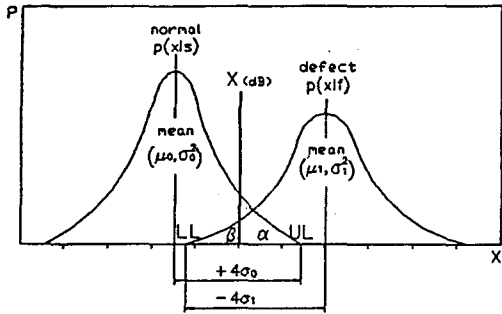


Fig. 5 Probability density functions of X(dB) at characteristic frequencies of defect

이 정지될 때 초래되는 비용과 기계나 구조물의 파손 가능성이 있다. Fig. 5와 같이 피크치  $X_{(dB)}$ 가 상한값 UL(정상 베어링의  $+4\sigma_0$ )과 하한값 LL(결함 베어링의  $-4\sigma_1$ ) 사이에 주어진다면 결함확률  $p_f$ 는 다음의 식 (5)와 같다.

$$p_f = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

진단신호 X는 충격사상(impact event)의 진폭 또는 어떤 주파수 폭내의 에너지가 될 수 있다.

### 3.2 진단 프로그램

결함진단 프로그램은 베어링 시험장치에서 부착되어 있는 가속도계로부터 베어링 외륜의 진동신호를 받아 통계해석 및 디지털 신호처리 등을 이용한 결함패턴 비교를 통해서 베어링의 결함을 진단하고 그 결함의 발생장소를 알 수 있도록 구성되어 있다.

베어링 시험장치에 부착된 가속도계에서 나오는 아나로그신호를 디지털신호로 변환시킨 시간축의 data를 Hilbert 변환시켜 타임 레코드의 주기성을 검정한다. 즉 포락선(envelope)을 검출하여 이용한다. 그리고 이산 후리에 변환하여 타임 레코드를 frequency data로 변환시킨다. 이때 leakage의 발생을 막기 위하여 Hanning window를 사용하여 파워스펙트럼 데이터를 만들고 noise에 의한 영향을 줄이기 위하여 5번의 Averaging 과정을 통하여 랜덤한 주파수성분의 노이즈영향을 줄이고 데이터의 신뢰성을 높여 평균 스펙트럼데이터를 구한다. 구해진 파워스펙트럼 데이터를 주파수대역에 따라 디스플레이할 수 있도록 주파수대역의 크기에 따라 파워스펙트럼 데이터를 재구성하여 디스플레이

시켜주며 특성주파수와 진동레벨을 측정할 수 있도록 한다. 이미 구축된 데이터베이스와 진동레벨 평균치와 분산으로 가우스분포를 표기함으로써 베어링 시험의 결함부위를 진단하고 결함확률을 제시한다. 실험결과로서 결함부위의 가진 진동수 중심으로 발생하는 진동의 크기 레벨을 정상상태 베어링에서의 발생진동레벨과 결함상태의 진동레벨의 가우스 분포 사이에서 확률적으로 비교함으로써 결함을 진단하게 된다. 이때 가진 진동수의 크기에 의하여 결함발생위치를 결정하고 진동레벨의 치우침 정도로서 결함의 확률의 크기를 결정한다. Fig. 6은 베어링 결함진단 프로그램의 흐름도이다.

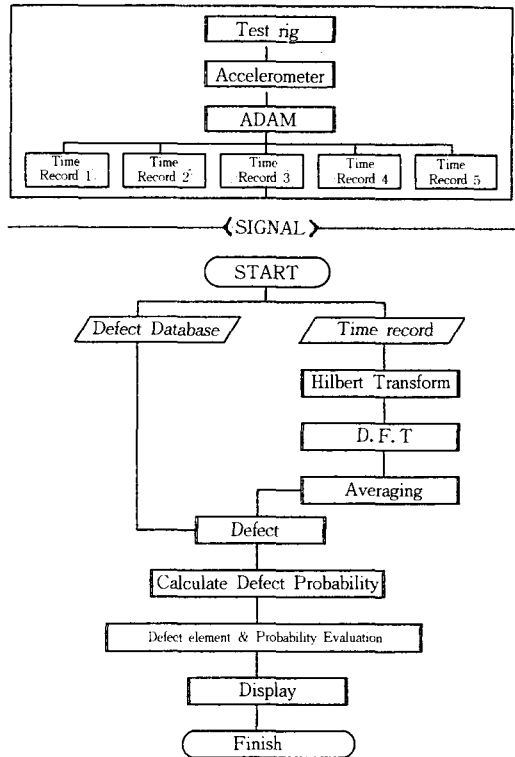


Fig. 6 Flow chart of bearing diagnosis program

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 베어링 발생 스펙트럼 레벨

스크래치결함의 크기에 따른 진동레벨의 변화를 알아보기 위해 롤러, 내륜과 외륜의 각 요소별로 3

개씩 총 9개의 베어링시편에 초경합금 스크라이버로 10회(폭  $25\mu\text{m}$ : 이하 s10), 20회(폭  $32\mu\text{m}$ : 이하 s20), 30회(폭  $40\mu\text{m}$ : 이하 s30)로 스크라이빙 횟수를 늘려 스크래치 결함의 크기를 증대시키며

스펙트럼 레벨의 변화를 관찰하였고 Fig. 7은 로울러에 결함이 있는 경우의 스펙트럼의 한 예를 보여 주고 Fig. 8은 스크래치 횟수에 대한 결함을 준 각 부위에서 발생하는 스펙트럼 레벨이다.

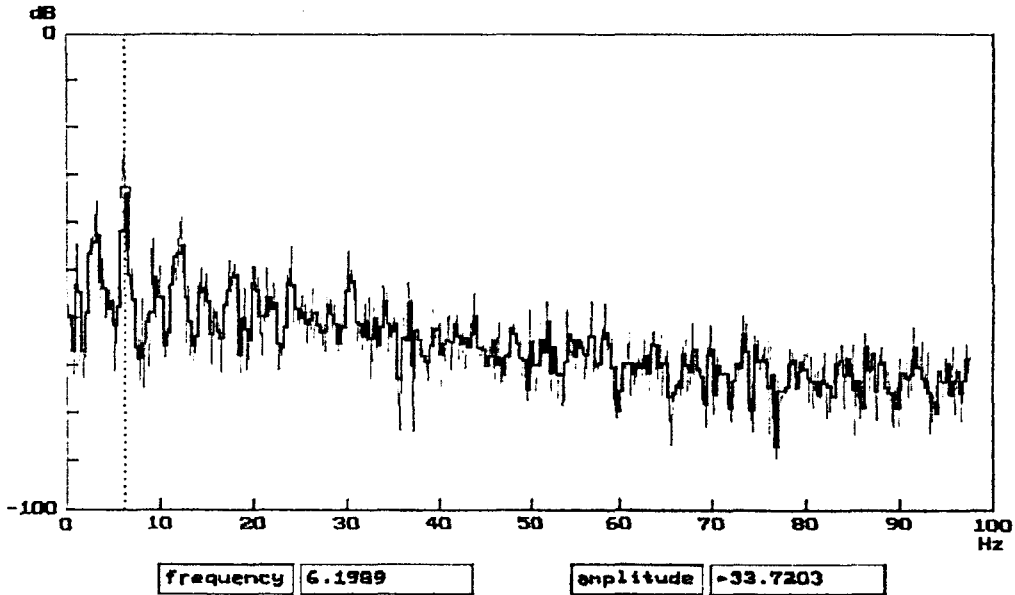


Fig. 7 Power spectrum of roller defect bearing

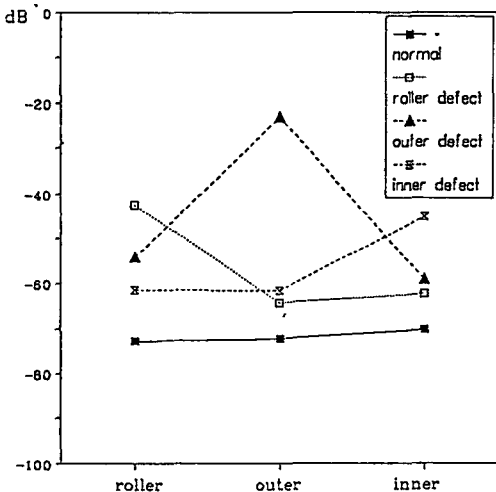


Fig. 8 Spectrum peak level of each component with scribing times

롤러에 결함을 준 경우 결함의 크기가 커짐에 따라 스펙트럼레벨은 롤러가  $-75\text{dB}$ 에서  $-38\text{dB}$ 까

지 스크라이빙 s10에  $14\text{dB}$ , s20에  $16\text{dB}$ , s30에  $7\text{dB}$ 씩 상승하여 s10에서 s20 사이에서는 거의 일정하게 상승하나 s20에서 s30 사이에는 반감된 상승을 하고 있다. 외륜에 결함을 준 경우에 외륜은 스크라이빙 s10에  $-25\text{dB}$ 까지 급상승하고, s20에 미미한 상승세를 나타내다가 s30에서  $-15\text{dB}$ 까지 완만한 상승하였다. 내륜에 결함을 준 경우에 스크라이빙 횟수가 증가함에 따라 내륜은  $-50\text{dB}$ 까지 완만한 상승을 하고 있다. 이 때 결함이 없는 부분도 정상일 때의 진동레벨을 나타내는 것이 아니라 결함부위의 진동레벨보다는 작지만 동반상승을 하고 있음도 관찰 할 수 있었다. 이처럼 외륜이 작은 결함에 민감하고 스펙트럼레벨이 가장 크면 서도 작은 표준편차를 보여 결함발생에 대해 선행 지표와 같은 역할을 수행하는 것은 가속도계를 외륜에 고정하여 결함에 의한 진동의 전달경로가 내륜 → 롤러 → 외륜이기 때문인 것으로 생각되며, 따라서 가속도계를 이용한 진동레벨 측정실험은 가속도계의 고정위치를 고려하여야 한다.

정상인 베어링 10개와 로울러, 외륜, 내륜에 결함을 준 베어링 각 10개를 대상으로 실험한 결과 부품별 특성주파수에서의 스펙트럼 레벨값, 평균과 표준편차는 Table 2와 같다.

Table 2 Spectrum level of defect element in normal bearing (unit : dB)

roller	level	outer race	level	inner race	level
Average	-42.63 (-72.74)	Average	-23.17 (72.38)	Average	-45.25 (70.11)
SD	6.31 (3.70)	S. T. D	3.66 (4.87)	S. T. D	6.38 (4.14)

위의 결과를 근거로 하여 완성된 롤러, 외륜, 내륜에 대한 정상일 때와 결함일 때의 가우스 분포는 각각 Fig. 9와 같다.

#### 4.2 적용실험 및 고찰

앞에서 정상베어링과 결함베어링을 대상으로 실험을 통하여 데이터베이스를 구축하고 판단 알고리즘을 적용하고 실험하여 구축된 데이터베이스와 알고리즘이 결함발생시 실제 적용이 가능한 지를 검증하는 적용실험을 실시하였다.

Fig. 10~Fig. 12는 결함진단 프로그램에 적용 실험한 결과이다. 이들 그림에서 위 부분은 시험 베어링의 파워스펙트럼이며 가운데 부분은 구축된 데이터베이스에 따른 외륜, 내륜과 롤러의 가우스 분포이다. 각 가우스분포에서 왼쪽의 것이 정상인 것을 오른쪽이 결함시의 가우스 분포이며 표시된 직선이 각 특성주파수에서의 진동레벨이다. 아랫 부분은 판단 알고리즘에 적용시켜 각 부위의 결함 확률을 바 차트(bar chart)와 함께 보여주고 있다. 각 적용실험은 무작위로 추출된 미소결함이 있는 베어링시편이다.

판단결과가 외륜, 내륜과 롤러의 결함확률이 각각 100%, 7.14%, 0%로 진단되었으므로 외륜에 결함이 있는 것으로 판단되었으며 실험후 분해하여 확인한 결과 외륜에만 결함이 있는 것으로 확인되었다. 판단 알고리즘에 내륜의 결함이 미소하게나마 나타난 것은 내륜이 결함시 분산이 제일 크고 상승폭이 제일 작아 가우스 분포곡선이 교차되는 구간이 제일 크므로 상대적으로 작은 진동레벨의 상승도 정상임에도 불구하고 결함으로 판정하는

제1종 오류구간을 크게하는 데서 비롯된다.

Fig. 11의 외륜, 내륜과 롤러의 결함이 각각 0%, 83.4%, 0%로 나타나므로 내륜에만 결함이 있는 것으로 판단되었으며, 실험후 분해하여 확인한 결과 내륜에만 결함이 있는 것으로 확인되었

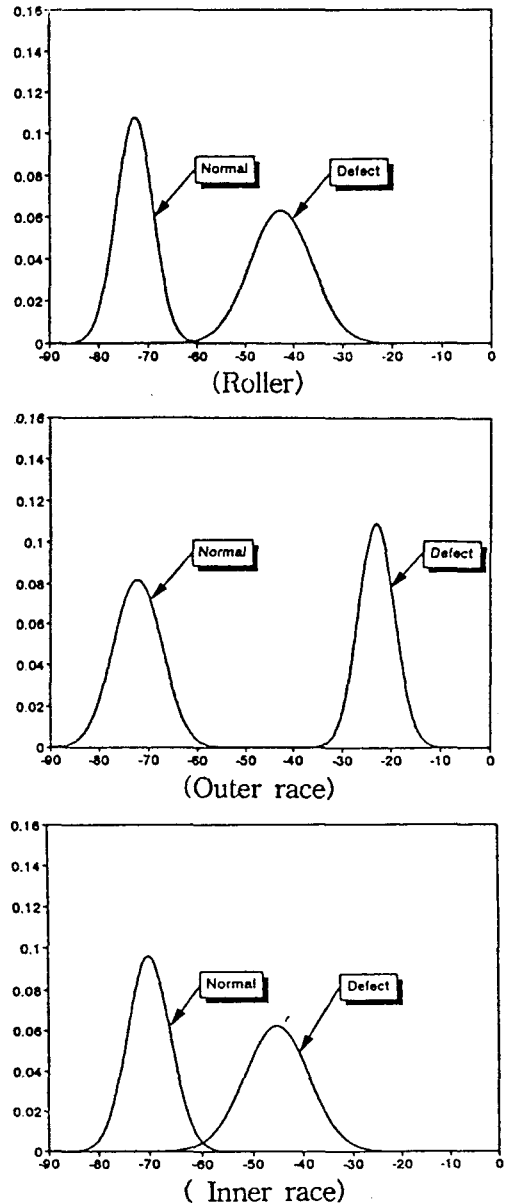


Fig. 9 Gauss distribution of roller, outer race and inner race

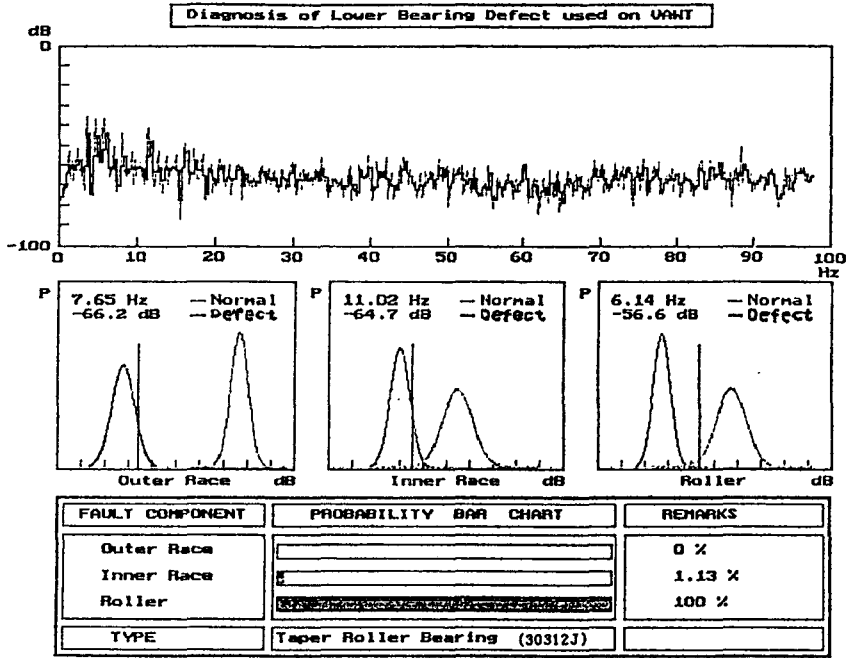


Fig. 10 Application of diagnosis program on outer race defect

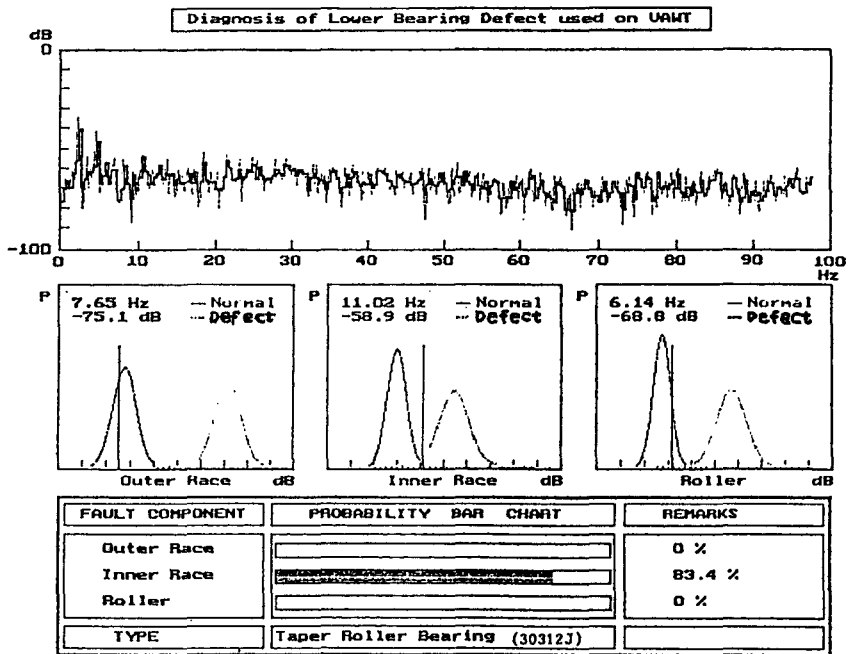


Fig. 11 Application of diagnosis program on inner race defect



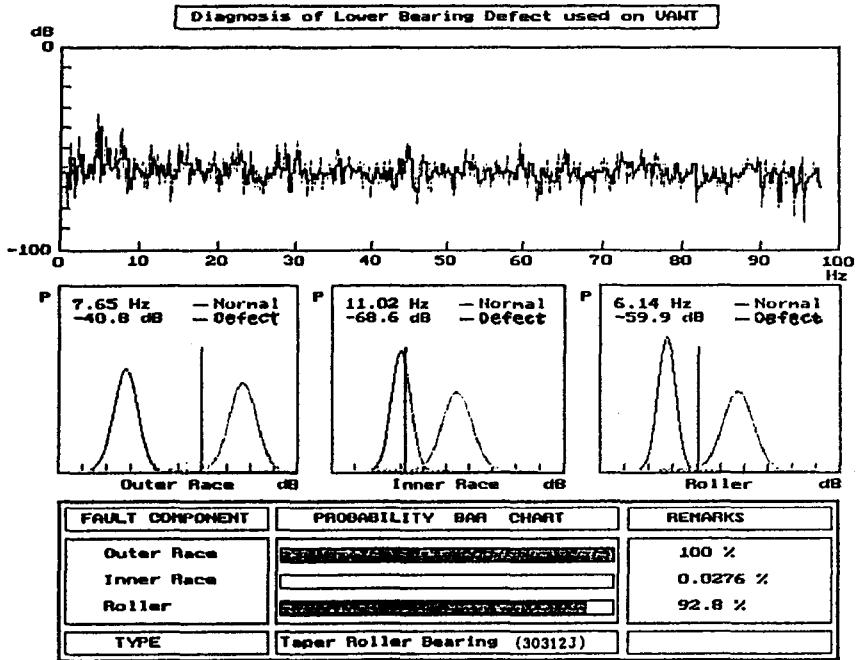


Fig. 12 Application of diagnosis program on combination defect

다. 그러나 내륜의 결함이 83.4%로 나타난 것은 Fig. 10과는 반대로 가우스 분포곡선이 교차하는 구간이 커서 결함임에도 불구하고 정상으로 판단하는 제2종 오류의 구간도 상대적으로 커지는 데서 비롯된다.

Fig. 12는 외륜과 롤러에 각각 스크라이빙 5회 (s5)의 결함을 동시에 주어 복합결함에 대하여 적용실험한 결과이다. 판단결과에서 외륜, 내륜과 롤러의 결함이 각각 100%, 0.0276%, 92.8%로 나타났으며 복합결함에서도 결함유무와 결함부위를 정확히 판단함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 수직축 풍력발전기(VAWT)의 하부 베어링으로 사용되는 테이퍼롤러베어링(KBC 30312J)의 결함진단을 위한 베어링 시험장치를 제작하고 실험을 수행하여 베어링의 결함을 주파수 영역에서 특성화하고 데이터베이스로 정량화하였고 결함판단해석을 진단의 오류가 최소화되도록 제1종 오류와 제2종 오류의 알고리즘을 이용하여

결함부위 및 확률을 판정하였다. 이상의 데이터베이스와 알고리즘을 이용하여 결함을 판단하는 진단 프로그램을 개발한 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주파수영역에서의 스펙트럼 패턴을 이용하면 결함의 유무는 물론 결함 부위의 진단이 가능하다.
- 2) 실험에서 가속도계를 외륜에 고정하여 측정함으로써 진동의 전달경로가 내륜→롤러→외륜이 되어 외륜은 진동레벨 상승폭이 제일 크고 가장 작은 분산을 나타내어 작은 결함에도 민감하였다.
- 3) 베어링의 롤러, 외륜과 내륜 중 어느 한 부분에 결함이 발생하면 결함 부위의 진동레벨만 상승하는 것이 아니라 정상인 부분도 동반상승하지만 결함부위의 분별이 가능하다.
- 4) 진단프로그램을 이용하여 적용실험을 실시한 결과 진단프로그램은 미소결함과 복합결함의 결함정도와 결함부위도 진단할 수 있었다.
- 5) 가우스 분포곡선이 교차하는 구간이 넓은 경우에는 제1종 오류와 제2종 오류가 발생할 확률

이 높아지며 교차구간이 좁은 경우는 오류의 발생률이 낮아져 결함과 정상이 뚜렷이 구별되었다.

### 참 고 문 헌

- 1) 김하식 외, 전력계통 연계운용을 위한 300KW 급 풍력발전SYSTEM의 설계 연구(I), 서울산업대학교 부속 대체에너지 기술연구소, 연구보고서, pp. 1~4, 1992.
  - 2) Brunn, P., Machine Condition Monitoring, Noise & Sound Vibration Control Worldwide, Sept. pp. 249~251, 1981.
  - 3) J. S, Bendat and A. G, Piersol, Random data, 2nded., Wiley, 1986.
  - 4) 金性源, 볼베어링 수명에 관한 실험적 연구, 서울대학교 석사학위 논문, pp. 50~53, 1990.
  - 5) Barry. W. Shappard, Determine bearing inner race defect length, Hydrocarbon Processing, pp. 101~103, Dec, 1992.
  - 6) J. M. Franco, N. Akuturk, Vibration of Rigid Shaft Supported by Ball Bearing with Several Defects, International Gas and Aeroengine Congress and Exposition, pp. 1~6, 1992.
  - 7) 편인범, 현대 통계학, 經進社, pp. 185~283, 1989.
  - 8) Richard L. Scheaffer, James T. McClave, Probability and Statistic for Engineers 2nded, Duxbury Press, 1980.
-