

# 주축계 구름 베어링의 수명 특성에 관한 연구

황 평\*, 권 성 인\*\*, 양 승 한\*\*

영남대학교 공과대학 기계공학과\*, 영남대학교 대학원\*\*

## A Study on the Life Prediction Characteristics of the Rolling Bearing in the Machining Center Main Spindle

Pyung Hwang\*, Sung-In Kwon\*\*, Seung-Han Yang\*\*

Dept. of Mechanical Eng., Yeungnam Univ.\*, Graduate School Yeungnam Univ.\*\*

### ABSTRACT

공작기계의 주축은 최근 고속화, 고정밀화 및 고강성화되어가는 경향이 커지고 있다. 이러한 경향에 따라서 주축의 설계는 매우 중요하며, 주축용 베어링은 앵글리 콘택트 볼베어링이 많이 사용되고 있다. 공작기계의 주축은 고속 회전에 따른 고강성의 필요성이 증대하게 되고, 고강성을 얻기 위하여 축 방향의 일정한 예압을 주게 된다. 이 예압량은 결국 축 방향의 하중이므로 주축용 베어링의 수명을 변화 시키게 된다. 따라서 축 방향 하중의 변화에 따른 베어링의 수명 특성을 파악하여야 하며 적절한 베어링 수명의 판단을 통해 기계의 보수 및 관리에 관한 재경비를 절감할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 실험을 통해 베어링의 특성 주파수를 이끌어 내고 주파수 스펙트럼 분석을 이용하여 베어링의 상태를 진단하는 기본적인 데이터를 얻는다.

### 1. 서 론

생산성의 향상, 또는 가공 조건의 최적화에 의한 가공 정밀도 및 생산된 제품의 정밀도의 향상 등의 필요성으로부터 머시닝 센터에 있어서 고속화 경향이 최근에 더욱 커지고 있다. 또한 고속 회전에 따른 고강성의 필요성이 증대하게 되고, 지금까지의 회전 범위에서는 크게 중요하지 않았던 진동이나 소음이 작업장의 환경 조건 및 기계 운용자의 안전성에 대해 큰 영향을 미칠 수가 있다. 또한 생산된 제품의 신뢰성과 가공 제품의 품질에도 막대한 영향을 끼칠 수 있다.

머시닝 센터 주축의 고속화, 고정밀화 및 고강성화 경향에 따라 머시닝 센터의 주축은 축의 지지 시스템으로서 앵글리 콘택트 볼베어링이 많이 쓰여지고 있는 추세이다. 앵글리 콘택트 볼베어링을 사용하는 머시닝 센터의 주축은 고강성을 얻기 위하여 축 방향으로 일정한 예압을 주게 되며, 이 예압으로 인해 축 방향 하중이 주어지게 되고 전체 시스템의 동적 특성 또한 변화하게 된다[1].

회전기계에 있어서 결함은 종종 베어링의 결함 때문인 경우가 많다. 베어링의 상태 관찰에 관한 고전적인 방법은 느낌이나 온도의 측정을 통한 것이었다. 하지만 베어링의 온도는 베어링의 이상을 초기 단계에서 판단하기에는 불충분하다. 사람의 촉각으로 느낄 수 있는 베어링의 이상 진동은 저주파인 경우가 많으며, 이 저주파 진동으

로 베어링의 결함을 판단할 경우 이미 베어링은 심각한 상태에 이르렀으며, 기계작동에 있어서 저주파의 진동이 매우 격렬하고 베어링은 짧은 시간 내에 파손된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 더 넓은 주파수 영역에서 관찰할 필요성이 있으며 저주파수 진동의 분석과 함께 더 높은 주파수를 관찰함으로써 베어링의 결함을 초기에 판단할 수가 있다. 보다 정확한 베어링 결함의 진단을 위하여 주파수 영역의 신호 분석과 동시에 시간 영역에서의 신호 분석을 겸하는 것이 필요하다[2-3].

구름 베어링은 모든 것이 이상적인 형태를 가졌다 하더라도 베어링의 틈새 때문에 진동을 발생시킨다. 즉, 내륜의 중심 위치의 변화 때문에 진동은 발생하게 된다. 또, 앵글리 콘택트 볼베어링을 가진 고속 스플린들에 있어서 고유 진동수는 회전속도의 증가에 따라서 감소하는 것으로 나타나며 이 현상은 베어링 강성의 변화에 기인하는 것으로 알려졌다[4].

### 2. 구름 베어링의 특성 및 주파수

구름 베어링은 기계에 있어서 회전하는 축을 고정 및 지지하는 역할을 한다. 구름 베어링은 기본적으로 베어링에 대한 축의 상대적인 운동을 거의 허락하지 않는 매우 작은 틈새를 가지도록 설계되었다. 그러므로 축으로부터 발생되는 힘은 베어링의 내륜, 전동체 그리고 외륜을 통

해 베어링 하우징에 전달된다. 이러한 힘의 전달을 이용하여 구름 베어링을 포함하는 기계의 상태 진단에는 주로 베어링의 하우징을 이용한다.

머시닝 센터용 주축에 많이 사용되고 있는 앵글리 콘택트 볼베어링은 정밀 베어링이어야 하며 조합된 형태로 이용이 많이 된다. 조합된 베어링에 대해 큰 강성과 정밀도, 고속 회전 등이 요구된다. 특히 하중을 받는 상태에서의 주축의 편차의 크기가 머시닝 센터의 생산성과 가공 정밀도를 결정하게 되므로 강성은 머시닝 센터 응용에 있어서 중요하다. 강성의 증가는 예압량의 조절을 통해 가능하며 이러한 예압은 축 방향의 하중으로서 베어링에 작용하게 된다.

구름 베어링은 베어링 제작시의 문제, 부적절한 조립, 과중한 하중, 부적절한 작동이나 윤활, 또는 극한 환경 등에 의해 파손이 일어난다. 위의 사항들이 완전하게 이루어지더라도 베어링 재료의 피로에 의해 파손이 일어날 수 있다. 대부분의 구름 베어링에서 피로에 의한 파손은 베어링의 궤도나 전동체상의 아주 작은 불연속적인 결함에 의해 성장된 것이다. 이러한 결함이 발생할 경우 베어링은 전동을 일으키게 되며 전체 기계에 영향을 미치게 된다[5].

Fig. 1은 주축에 주로 사용되고 있는 앵글리 콘택트 볼 베어링의 기하학적 형상을 나타내고 있다. 앵글리 콘택트 볼 베어링은 단열로서 사용되기 보다는 더 높은 강성과 회전 정밀도를 얻기 위해 배면, 정면, 병렬의 조합된 형태로서 많이 사용된다.

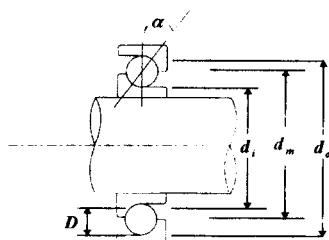


Fig. 1 앵글리 콘택트 볼 베어링

베어링에 결함이 발생할 경우 베어링은 그 특성 주파수를 발생시킨다. 이 주파수는 베어링의 기하학적 형상과 축의 회전속도에 밀접한 관계를 가지고 있다. 베어링의 내륜이 축에 고정되어 축과 함께 회전하고 외륜은 하우징에 의해 고정되어 있을 경우, 베어링의 특성 주파수들은 다음과 같이 표현할 수 있다[6].

$$FTF = \frac{\Omega}{2} \left( 1 - \frac{D}{d_m} \cos \alpha \right) \quad (1)$$

$$F_{bs} = \frac{d_m}{2D} \Omega \left\{ 1 - \left( \frac{D}{d_m} \right)^2 \cos^2 \alpha \right\} \quad (2)$$

$$F_{or} = \frac{N}{2} \Omega \left( 1 - \frac{D}{d_m} \cos \alpha \right) \quad (3)$$

$$F_{ir} = \frac{N}{2} \Omega \left( 1 + \frac{D}{d_m} \cos \alpha \right) \quad (4)$$

여기서,  $D$ : 전동체의 직경(mm),  $d_m$ : 베어링의 꾸리 직경(mm),  $\Omega$ : 내륜의 회전속도(Hz),  $\alpha$ : 접촉각(degree),  $N$ : 전동체의 수,  $FTF$ : 전동체의 결함에 의해 발생되는 주파수,  $F_{bs}$ : 전동체의 결함에 의해 발생되는 주파수,  $F_{or}, F_{ir}$ : 외륜 및 내륜의 결함에 의해 발생하는 주파수이다.

위의 베어링의 결함에 대한 특성 주파수 계산식은 축 방향 하중이 작용하지 않는, 접촉각이 0라는 가정이 포함되어 있다. 그러나 앵글리 콘택트 볼 베어링의 경우 실제적인 작동은 예압에 의해 접촉각을 가지며 특히 공작 기계에 있어서 축 방향 하중을 받으며 축의 회전에 따라서 접촉각이 변한다. 이러한 이유로 계산상의 주파수와 실제 측정한 주파수 사이에는 수 Hz의 차이가 일어나며 회전 속도에 관한 성분의 영향으로 축대파가 나타난다. 또 볼 베어링에서의 결함은 베어링의 형상 치수와 회전속도에 의해 주어진 반복적인 주파수로서 일련의 버스트를 나타낸다. 이 버스트의 주파수 성분은 가진된 공진에 의해 지배되므로 높고 반복 주파수에서 성분은 낮다. 그러나 버스트가 포락선을 형성할 경우, 그것의 주파수 스펙트럼은 반복률과 하모닉스에 의해 지배된다.

### 3. 베어링 결함의 진단

베어링의 고장 진단을 위해서는 시간 영역에서의 신호 처리와 주파수 영역의 신호처리를 병행하는 것이 정확한 진단에 효과적이다.

기계에 설치된 센서로부터 받아들여진 신호에 대해 시간 영역에서의 신호처리를 통해 얻을 수 있는 고장 진단 용 변수로서는 절대 평균값(absolute mean value), 피크값(peak-to-peak value), 평균 제곱근(root mean square, RMS), 첨도(kurtosis), 과고율(crest factor) 등이 있다.

주파수 영역에서의 신호의 해석은 시간 영역에서의 신호를 주파수 영역으로 변환시키는 방법을 사용하며 signal enhancement(or synchronous time averaging, history ensemble averaging), waterfalls(RPM spectral maps), Campbell diagram, cepstrum analysis 등을 사용한다.

본 연구에서는 스펙트럼분석기와 ADRE(Automated Diagnostics for Rotating Equipment, Bently Nevada)를 사용하여 기본적으로 waterfall을 관찰하며 시간의 따른 진폭의

크기의 변화를 관찰하고 동시에 power spectrum 을 이용하여 베어링 특성 주파수들의 변화를 관찰하는 방법을 사용하였다. 실험 결과에서 설명되는 시간에 따른 진폭의 변화를 그린 trend plot 은 베어링 결합의 발생 또는 결합의 진전과 함께 진폭의 크기가 크게 변하게 된다. 단지 trend plot 만을 사용할 경우 베어링에 의한 결합인지 다른 요인에 의한 것인지 판단하기에는 곤란하며 이러한 점을 보완하기 위하여 베어링의 특성 주파수를 관찰 할 수 있는 power spectrum 을 동시에 관찰한다.

## 4. 실험

### 4.1 실험장치

Fig. 2 는 베어링의 수명 및 결합을 시험하기 위한 실험장치의 개략도를 보여 준다. 여기에서 장치는 구동부와 시험부, 하중부로 나눌 수 있으며 구동부는 모터 및 커플링, 트리스트 베어링, 자동 조심 볼베어링과 축으로 구성되어 있으며 모터는 축과 커플링에 의해 직렬로 연결되고 축 방향 하중으로부터 모터를 보호하기 위해 트리스트 볼베어링을 사용하였다. 또한 축의 미소한 정렬 불량(misalignment)를 감소시키기 위하여 자동 조심 볼베어링을 사용하였다. 시험부는 축의 끝에 위치하며 시험 베어링을 제거한 후 축 방향 하중만을 고려하기 위하여 하중부가 따로 설계되었다.

일반적인 경우 베어링 하우징을 통해 베어링 결합을 진단하지만 여기서는 베어링 외륜에 직접 센서를 설치하여 진동 신호를 검출할 수 있도록 하였다. 베어링 외륜의 수평 및 수직 방향에 설치된 면위 센서로부터 받아들여진 신호는 스펙트럼분석기와 데이터 인터페이스 장치(DAIU, Data Acquisition Interface Unit)를 통해 컴퓨터로 보내어진다. 이 신호들은 컴퓨터와 스펙트럼분석기에 베어링의 상태에 따라 특정 주파수들을 출력하고, 또 이를 관찰함으로써 베어링의 상태를 관찰할 수 있도록 하였다. 축의 회전속도 및 위상각의 측정을 위해 커플링 앞쪽에 키 홈을 설치하고 Keyphasor 를 측정할 수 있도록 하였다. 이 실험 장치의 주축의 회전속도는 2390 rpm 과 3550 rpm 으로 회전한다. 실험에 사용된 시험 베어링은 앵글리 콘택트 볼베어링 NSK 7004A 로서 기하학적 형상에 관한 수치는 다음과 같다.

Bearing inner ring diameter :	$d_i = 24\text{mm}$
Bearing outer ring diameter :	$d_o = 32.6\text{mm}$
Ball diameter :	$D = 6.35\text{mm}$
Contact angle :	$\alpha = 30^\circ$
Number of balls :	$N = 12$

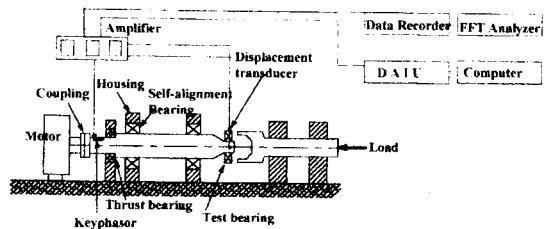


Fig. 2 실험 장치의 개략도

### 4.2 실험결과

Fig. 3 은 회전속도 3550 rpm 에서 시험 베어링(NSK 7004A)의 주파수 스펙트럼을 보여 준다. 이 작동 속도에서 베어링의 특성 주파수들은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Cage defect frequency} : F_{\text{TF}} = 24.59\text{Hz}$$

$$\text{Ball defect frequency} : F_b = 147.57\text{Hz}$$

$$\text{Outer race defect frequency} : F_{\text{or}} = 295.13\text{Hz}$$

$$\text{Inner race defect frequency} : F_{\text{ir}} = 414.56\text{Hz}$$

Fig. 3 은 복합적인 결합을 가진 주파수 스펙트럼을 보여 주고 있다. 시험 베어링은 무윤활 상태로 작동되며 축 방향 하중 60kgf 를 받고 있다. 베어링이 단 하나의 결합만을 가질 경우 결합에 관한 특성 주파수가 다른 주파수들에 비해 더 큰 영향을 미친다. 또한 이 스펙트럼에서 불균형(unbalance)이나 정렬 불량(misalignment)으로 인한 주파수 성분은 거의 정확하게 회전속도 주파수와 일치한다. 볼베어링의 특성 주파수들은 회전속도와 기본적인 특성 주파수들의 배수로서 나타나며 서로 영향을 주고 있어 계산상의 주파수와 차이를 나타내고 있다. 이 차이는 회전으로 인한 접촉각의 변화, 축 방향의 하중으로 인한 차이도 포함하고 있다. 모터 및 부하에 관련된 주파수는 120Hz 로서 기계의 시동 및 정지에 이르기까지 일정한 주파수를 나타내며 그 크기(amplitude)는 변한다. 베어링의 결합 발생시와 함께 소음 레벨(level)의 증가는 매우 크다.

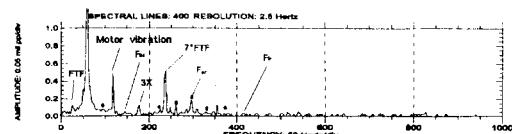


Fig. 3 축 방향 하중 60kgf, 회전속도 3550rpm 에서 시험 베어링의 주파수 스펙트럼

Fig. 4 는 결합이 없는 새로운 베어링이 회전속도 3550 rpm, 축 방향 하중 60kgf 에서 결합이 발생한 이후까지의 스펙트럼의 흐름을 보여 주고 있는 Cascade plot 이다. 이러한 조건하에서 결합이 발생된 것과 함께 회전속도의 동기

성분인  $nX\text{-}rpm$  성분과 모터 및 부하에 관련된 120Hz 성분의 크기가 확연히 구별됨을 볼 수 있다.

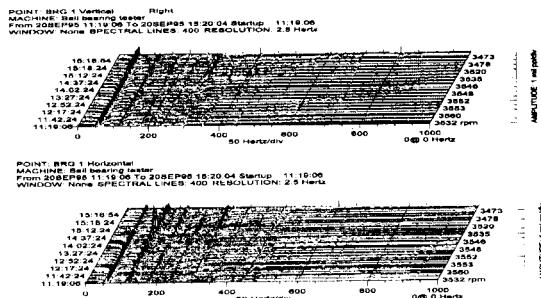


Fig. 4 축 방향 하중 60kgf, 회전속도 3550rpm에서 시험 베어링의 Cascade plot



Fig. 5(a) 수직 센서에서의 시간에 따른 amplitude의 변화

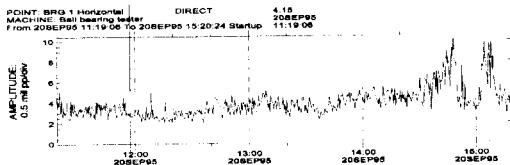


Fig. 5(b) 수평 센서에서의 시간에 따른 amplitude의 변화  
Fig. 5 축 방향 하중 60kgf, 회전속도 3550rpm에서 시험 베어링의 Trend plot

Fig. 6은 축 방향 하중 60kgf를 받고 축 회전속도 3550 rpm에서 회전하는 앵글리 콘택트 블 베어링의 Cascade plot을 보여준다. 베어링의 무윤활은 베어링 결합의 증가를 가속시키며 열의 발생을 유도한다. 또 축 방향 하중은 베어링의 내륜 및 외륜과 볼의 접촉을 증가시키고 리테이너와 볼의 접촉 또한 증가시켜 재질이 가장 약한 부분인 리테이너의 결함을 가장 빨리 일으키는 것으로 관찰 되었다. Cascade plot 상의 후미 부분인 원으로 표시된 부분이 이 리테이너의 결함에 의한 특성 주파수가 발생된 부분으로 거의 모든 베어링 시험에서 관찰 되었다. 리테이너의 결함은 베어링의 다른 부분에까지 악영향을 미쳐 내·외륜의 마모를 증가 시킨다. 이러한 마모로 인한 기계의 정도 저하는 당연한 결과로서 나타나게 된다. 리테이너 결합의 특성 주파수는 앞서 계산에 의해 보인 것과 같은 24.59Hz 부근에서 발생하며 그 차이는 1~2 Hz 만의 차이를 보였다.

Fig. 6(a)는 수평 방향의 센서로부터 받아들여진 신호이며 (b)는 수직 방향 센서로부터의 신호이다. (a)와 (b)의 두 그림 모두에서 이러한 현상을 볼 수 있다.



Fig. 6(a) X 축에서 베어링의 Cascade plot

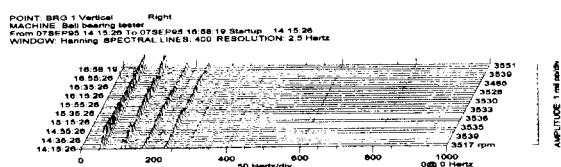


Fig. 6 축방향 하중 60kgf, 회전속도 3550rpm에서 NSK 7004A의 Cascade plot

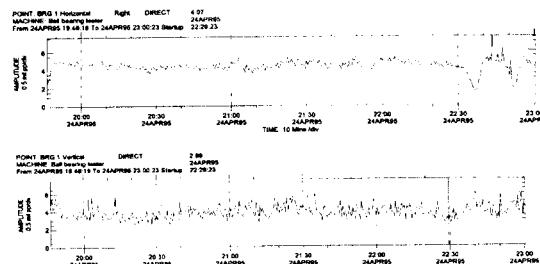


Fig. 7(a) Trend plot

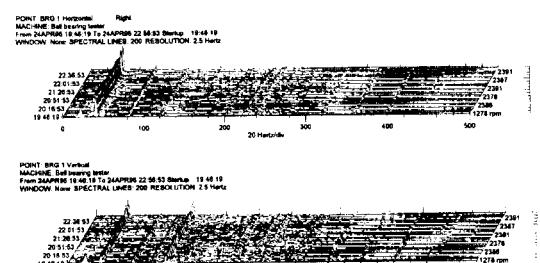


Fig. 7 축 방향 하중 50kgf에서의 볼베어링의 상태

Fig. 7은 축방향 하중 50kgf를 받으며 축의 회전속도가 2390 rpm인 경우의 베어링의 상태를 보여준다. Fig. 7(a)는 시간의 경과에 따른 amplitude의 변화를 보여준다. Amplitude는 22:36으로 표시된 부분에서 매우 심하게 변하고 있다. 이 부분이 베어링의 결함이 발생한 시점으로 판단된다. 하지만 이 그림만으로는 베어링의 결함과 기계의 다른 부분의 결함을 판단하기는 곤란하다. Fig. 7(b)는

cascade plot을 보여주고 있으며 Fig. 7(a)와 비교해 베어링의 결함 시기를 판단할 수 있다. 앞서 언급된 시점에서 1X-rpm의 amplitude가 갑자기 증가함을 볼 수 있으며, 개별적인 스펙트럼의 관찰을 통해 리테이너 결함임을 판단 가능하다.

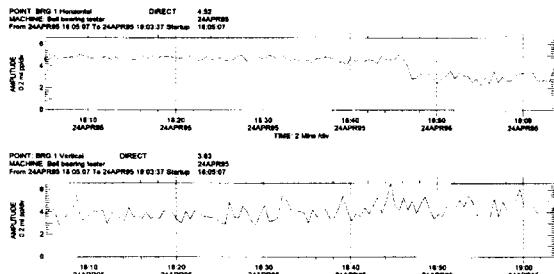


Fig. 8(a) Trend plot

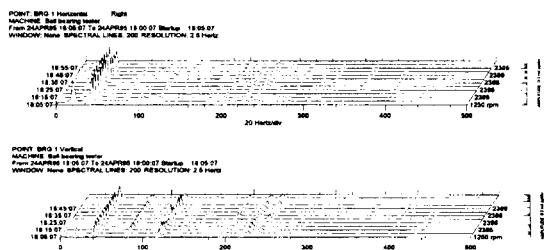


Fig. 8(b) Cascade plot

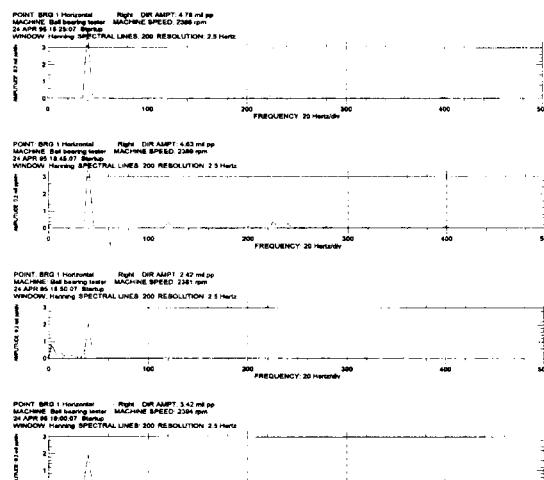


Fig. 8(c) Spectrum of the bearing

Fig. 8 외륜 흄에 결함을 가진 볼베어링의 상태

Fig. 8은 베어링의 외륜 흄에 인위적인 결함을 주었을 경우 베어링의 상태를 관찰한 그림이다. Fig. 8(a)는 Trend plot으로서 시간에 따른 amplitude의 변화를 보여준다. Fig. 8(b)는 Cascade plot을 보여준다. 시험이 끝난 베어링을 분

해하여 본 결과로는 인위적인 결함의 확대보다는 리테이너 부분의 많은 손상이 일어났으며 외륜 및 내륜 흄은 볼의 마찰에 의한 마모와 리테이너 접촉에 의한 마모가 심하게 일어났음을 볼 수 있었다.

Fig. 8(c)는 수평방향 센서로부터 받아들여진 신호의 스펙트럼을 시간의 경과에 따라 나열한 것이다. 세 번째 스펙트럼에서 리테이너 결함에 의한 특성 주파수 발생을 볼 수 있다. 이 결과는 시간상으로 Fig. 8(a)의 18:40과 18:50 사이의 결과와 비교해 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

베어링의 수명 평가 장치로 축방향 하중에 따른 베어링의 발생주파수를 분석함으로써 주어지는 하중이 전체 축계에 미치는 영향을 고려하고 베어링의 수명 예측을 위한 기본적인 데이터를 얻었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 베어링의 결함을 진단하기 위해서는 시간 영역에서의 진단 뿐만 아니라 주파수 영역에서의 진단이 필요하다.
2. 불베어링은 결함 발생시 리테이너, 볼, 내륜 및 외륜에 대한 특성 주파수를 발생시킨다.
3. 무윤활로 작동되어지는 앵글러 콘택트 볼베어링은 축방향 하중이 가해질 경우 가장 먼저 리테이너에 결함이 발생하였다.
4. 베어링의 상태 진단 및 기계 전체의 상태를 진단하는데 있어서 시간에 따른 amplitude의 변화를 나타내는 Trend plot은 매우 유용한 결과를 가져온다.

#### 참 고 문 헌

1. C.H. Chen, "An Integrated Approach Toward the Dynamic Analysis of High-Speed Spindles, Part 1: System Model", Transactions of the ASME Journal of Lubrication Technology, October 1994, pp 506-513
2. 이 형섭, "회전기계의 상태 진단법(I)", 기술정보·안전보건, pp. 79~83, 1995. 5
3. 임 환조, 김 성동 외, "회전체 고장진단을 위한 진동신호의 분석", 한국정밀공학회 출판학술대회 논문집, pp. 301~307, 1995. 5
4. Bently Nevada, "Technical Training, Machinery Diagnostic Course", Bently Nevada, 9-1 ~ 8, 1992
5. 황 평, 권 성인, 양 승한, "고속 고정밀 고강성 주축용 볼베어링의 수명예측", 고강도 고정밀 고속 주축 기술개발에 관한 연구 2차년도 중간보고서, pp. 1-52, 1994. 9
6. T.A.Harris, "Predicting the Performance of Rolling Bearings in Exceptional Applications", ASLE Paper 68 AM6C-1