

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.7.583

# 초음파를 이용한 발전용 회전기기 베어링 손상상태 평가 연구

이상국<sup>†</sup> · 이선기\* · 이도환\*\* · 박성근\*\*\*  
(2008년 4월 29일 접수, 2008년 5월 24일 수정, 2008년 6월 4일 심사완료)

## A Study on Damage Evaluation of Bearings for Rotating Machinery in Power Plant Using Ultrasonic Wave

Sang-Guk Lee, Sun-Ki Lee, Do-Hwan Lee and Sung-Keun Park

**Key Words:** Ultrasonic Wave(초음파), Bearing Damage(볼베어링 손상), Frequency Spectrum Analysis(주파수 스펙트럼분석), Amplitude Analysis(진폭분석), Rotating Machinery(회전기기), Power Plant(발전소)

### Abstract

For the purpose of monitoring by ultrasonic test of the ball bearing conditions in rotating machinery, a system for their diagnosis was developed. ultrasonic technique is used to detect abnormal conditions in the bearing system. And various data such as frequency spectrum, energy and amplitude of ultrasonic signals, and ultrasonic parameters were acquired during experiments with the simulated ball bearing system. Based on the above results and practical application for power plant, algorithms and judgement criteria for diagnosis system was established. Bearing diagnosis system is composed of four parts as follows : sensing part for ultrasonic sensor and preamplifier, signal processing part for measuring frequency spectrum, energy and amplitude, interface part for connecting ultrasonic signal to PC using A/D converter, graphic display and software part for display of bearing condition and for managing of diagnosis program.

### 1. 서 론

산업설비나 기계류 등의 운전 및 감시 형태가 점차 무인화 및 자동화의 추세로 감에 따라 이들에 대한 유지 및 사고 예방의 차원에서 설비진단에 대한 관심이 매우 높아지고 있는 실정이다. 뿐만아니라 이들의 설비는 점차 고속, 고부하, 고온 등의 운전조건에 직면함에 따라 미소한 부분

에서의 손상이나 파손시 대형사고를 유발할 가능성이 높아지게 되며 그에 따른 피해도 상당히 크게 된다. 따라서 최근에는 설비의 진단에서도 손상을 조기에 발견하거나 미소한 결함을 조기에 발견하여 대처함으로써 적절한 부품 교체 및 보수가 이루어질 수 있도록 하는데 많은 관심이 집중되고 있다. 특히 발전설비나 기계류에서의 회전체 부분은 위험과 대형사고의 잠재적 요소를 가지고 있는 부분으로서 조기감지 대상의 대표적인 경우라고 말할 수 있다. 따라서 이들 회전체에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있는 베어링의 상태 감시 및 손상감지에 관한 연구 및 기술의 적용은 매우 활발한 편이며 현재에도 이들에 대한 더 나은 조기파손감지 기술의 개발에 역점을 두고 있

† 책임저자, 회원, 한전 전력연구원  
E-mail : sglee@kepri.re.kr  
TEL : (042)865-5635 FAX : (042)865-5604  
\* 한전 전력연구원  
\*\* 한전 전력연구원  
\*\*\* 한전 전력연구원

다.(Balderston, 1969; Harting, 1978) 그러나 대부분의 연구들이 구름베어링에 대한 것들이 많은 편이며(Dyer, 1978; Mcfadden, 1984) 볼 베어링에 대한 진단기술은 상대적으로 저조하며(Sato, 1983) 지금까지의 연구는 대부분 윤활층에서 발생하는 마모입자 분석이나 윤활유 상태감시 등의 방법에 의존하고 있는 실정이다.(Cooper, 1991; Hudnik et al., 1991) 또한 베어링의 이상상태 (마모, 표면경화, 윤활유 과잉/부족공급) 현상으로 온도상승 및 저주파수 진동증가 발생을 사전에 신호 검출하는 기술이 필요하며 저속회전기 베어링에 대한 운전상태 및 손상진단을 통해 발전설비의 원활한 운전을 위하여 초음파 검출기술 개발이 필요하다.(Lee, 2004)

따라서 본 연구는 초음파 측정기술을 이용하여 운전중인 볼 베어링에서 방출되는 초음파성분을 취득하고 베어링 구성요소인 외륜, 내륜, 볼 및 기본열인 케이지 주파수를 정상치와 dB(데시벨) 진폭의 증가값과 비교분석함으로써 베어링의 이상상태를 검출함으로써, 볼 베어링의 손상을 조기에 검출하는 기술을 개발하기 위하여 수행한 연구결과를 소개하고자 한다.

## 2. 초음파 신호검출

### 2.1 베어링 이상상태 검출

미국 NASA 연구소에서는 베어링에서 발생된 열과 진동특성을 이용해서 기존에 검출하였던 베어링 손상(failure) 검출을 초음파 주파수대역인 24 kHz ~ 50 kHz 범위의 주파수에서 감시하는 동안 주파수 진폭의 변화가 열과 진동을 포함하는 다른 감시시스템의 지시값이 나타나기 전에 베어링 손상의 초기징후를 나타내는 음향방출(AE; acoustic emission)이 선행하였다는 연구결과가 있었다. 이 기술은 회전기 베어링 동조주파수의 변조탐지와 분석을 근거로 하였으며, 초음파 수신시스템에서 탐지성능이 미세한 부분까지도 검출된다는 사실을 알 수 있다.

즉, 특정주파수로 조정하여 베어링과의 동조와 주변의 소음에 상관없는 주파수를 분리하여 베어링의 상태를 진단하는 기술로써 베어링에서 발생된 음파의 진폭변화를 감시하고 주파수변환(heterodyne)을 시켜 가청음으로 청취함으로써 베어링상태를 조기에 진단 할 수 있다. 베어링의

온도상승 및 저주파수 진동증가에 선행해서 검출하는 초음파상태감시시스템은 운전 중에 이상을 감시할 수 있으며, 이상의 조기검출이 가능하다. 또한 일차적인 이상요인의 직접적인 원인을 검출할 수 있다. 또한 베어링의 마모검출, 피로파손 개시, 베어링 표면의 경화 및 윤활유의 과잉 및 부족 등의 베어링의 이상상태를 검출할 수 있다.(Lee et al., 2003)

### 2.2 베어링 손상원인

베어링 고장(trouble)의 유형으로는 설치 불량 16%, 윤활 불량 36%, 이물이나 수분 혼입 14%, 파손이 34%에 해당된다. 베어링이 완벽하게 사용되었다면 그 베어링의 예상된 피로한도의 수명을 제공하지만, 피할 수 없는 원인들인 부적절한 설치, 취급 불량, 윤활부족, 외부 문제의 개입 또는 비정상적인 열 발생 등에 따라서 빠른 시기에 손상이 발생한다. 베어링 조기 손상의 원인인 불충분한 윤활, 부적절한 윤활재의 사용, 결합있는 윤활 시스템, 베어링 설치 및 축계의 과도한 변형 등 문제들의 결합으로 베어링에서는 마찰(rubbing)의 자국이 발생한다. 만약 베어링 손상의 전과 후의 적용조건, 운전조건 및 환경을 포함하는 모든 조건들이 잘 파악 되었다면 손상의 성향과 발생원인들을 조사함으로써 대책을 수립할 수 있다.

### 2.3 베어링 손상검출방법

베어링은 회전하고 있는 기계의 축(軸)을 일정한 위치에 고정시키고 축의 자중과 축에 걸리는 하중을 지지하면서 축을 회전시키는 역할을 하는 기계요소로써 볼베어링은 축과 베어링의 볼 또는 롤러가 접촉하며 축이 회전하면 볼 또는 롤러도 같이 회전하기 때문에 마찰저항은 작게 작용된다.

#### 2.3.1 볼 베어링

볼 베어링은 롤러나 볼이 윤거(raceway)안에 있는 금속이기 때문에 회전에 의해 피로가 시작되어 변형이 일어난다. 따라서 롤러나 볼 표면을 불규칙하게 만들며 여기서 저주파대역의 초음파인 음향방출이 발생하며 그 중에 24 kHz ~ 50 kHz의 초음파 주파수대역을 분석하여 보면 진폭상의 dB(데시벨)이 증가하는 현상을 알 수 있다. 또한 베어링 표면에서의 경화 역시 볼이 원주 밖



Fig. 1 Bearing failure types

으로 벗어나려는 성질 때문에 파형의 진폭증가를 초래하고 있으며 울림현상이 반복해서 일어나게 된다. 초음파 영역(24 kHz ~ 50 kHz)에서 검출된 진폭상의 증가는 가청음(20 Hz ~ 20 kHz)으로 파수변환(heterodyne)시킴으로써 헤드셋을 이용하여 베어링 손상상태를 현장에서 직접 판단이 가능하다. Fig. 1은 베어링의 손상유형을 나타낸다.((Lee et al., 2003)

2.3.2 저속 베어링

저속 베어링의 크기는 통상 1/2" 이상이며 고점도 윤활제로 그리스(grease)를 주입하여 사용한다. 고점도인 그리스가 베어링에서 방출되는 음향 에너지를 대부분 흡수하기 때문에 귀로 청취할 수 없으나, 변형이 발생되면 딱딱거리며 어딘가에 걸린 듯한 소리를 발생하게 된다. 이러한 원리를 이용한 상시감시시스템에서는 기준값을 설정하여 감시하는 동안 진폭값의 증가로부터 이상유무를 판단하고 있다. 즉 초음파 신호검출시스템과 진동분석기(vibration analyzer)를 이용하여 베어링의 이음분석에 사용한다. Fig. 2는 발전소 현장에서 베어링 상태를 진단하고 있는 방법을 보여준다. 본 연구에서의 실험대상 베어링은 발전소 주요 기기를 유체를 이용하여 냉각시키기 위한 원심형 펌프에 사용되는 베어링이며, 펌프

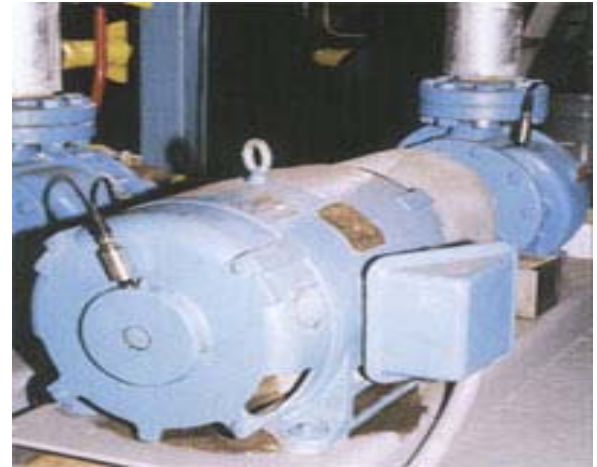


Fig. 2 Ultrasonic signal measuring method in site



Fig. 3 Ultrasonic sensor part

를 구동하는 출력 37 kW, 최대토크 180 %의 권선형 3상 유도모터가 설치되어 있다.

2.3.3 실험방법 및 절차

Fig. 3은 초음파(음향방출) 센서부를 나타내며 초음파검출시스템은 1개의 신호수신 채널로 구성되며 24 kHz의 하이패스 필터(high-pass filter)와 50 kHz의 로우패스 필터(low-pass filter)가 내장된 음향방출시스템을 사용하였다. 사용된 초음파 센서는 20~175 kHz의 주파수대역을 가진 공진형 압전 음향방출 센서이며, 센서를 금속 하우징에 내장시키고 센서 수신면에 자석을 이용하여 측정 대상에 접촉하여 실험을 수행하였다.

실험방법은 비교분석과 기준값 분석의 두 가지 방법으로 수행하였다. 비교분석 방법의 경우, 초음파 신호검출시스템의 사용 모듈을 청음봉 접촉 모듈을 선택하고 초음파 주파수를 최초로 최대

30 kHz의 범위로 선정하였다. 그런 다음 베어링 하우징상에 진단대상 부위(point)를 선정하여 Fig. 2와 같이 초음파센서를 접촉하였다. 이때 센서접촉은 같은 각도에서 베어링에 접근하였으며 베어링 하우징상의 같은 지점에서 초음파 센서를 부착하여 데이터를 취득하여 측정부위에 따른 절대 분석 및 비교분석을 수행하였다. 그리고 기준값 분석은 건전한 베어링에 대한 검사이력값에 비교하는 방법으로, 향후의 기록값은 초기에 선정된 주파수를 설정하여 검사 데이터의 추이를 연속해서 그래프로 분석하는 방법이다. 기준값 분석의 경우, 기준값 대비 8 dB이 증가할 때는 윤활부족 상태를 지시토록하고 재 윤활 후에도 진폭값이 회복되지 않으면 베어링이 결함 개시상태에 있음을 나타내도록 하였으며 기준값과 비교해서 12 dB이 증가할 때는 베어링이 결함 초기모드가 시작되는 것으로 하여 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

베어링 결함이 있는 기계를 분석하는 경우 손상의 초기단계에서 뚜렷이 구분되는 주파수들이 나타나며 협대역 성분들은 그 이후의 단계에서 나타난다. 따라서 운전주파수와 기본열 주파수의 성분들을 확인될 수 있는 분해능을 가진 분석시스템을 사용하여야 하며, 시간과형에는 베어링 손상의 초기단계에서 발생된 충격파를 나타낸다.

#### 3.1 실험장치 및 방법

#### 3.2 베어링 결함주파수 분석

구름요소가 내륜, 외륜, 보 및 케이지 등에 발생된 결함을 통과할 때에는 충격력이 가해져서, 하나의 베어링 주파수 혹은 여러 성분들이 조합된 진동을 발생시키게 된다. 기계구조에 따라서 베어링 하우징에서 얻어지는 진동의 크기가 결정된다. 볼 베어링에서는 그 형상과 운전속도에 따라서 독특한 주파수들이 발생하며, 손상된 베어링에서는 기본적으로 4가지의 주파수 성분들이 발생된다.

- ① 외륜볼 통과 주파수(BPFO ; ball pass frequency of outer race) : 손상된 외륜에 볼이나 롤러가 통과되면서 발생
- ② 내륜볼 통과 주파수(BPFI ; ball pass

frequency of inner race) : 손상된 내륜에 볼이나 롤러가 통과되면서 발생

- ③ 볼 자전 주파수(BSF ; ball spin frequency) : 볼이나 롤러 결함으로 발생
- ④ 기본열 주파수(FTF ; fundamental train frequency) : 케이지 손상 및 부적절한 운동으로 발생

여기에서, 각각의 주파수를 이론적인 계산식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{Hz} = \text{RPM}/60 \quad (1)$$

$$\text{FTF} = (\text{Hz}/2)/[1-(\text{B}/\text{P})\text{COS } \phi] \quad (2)$$

$$\text{BPFI} = (\text{N}/2)\text{Hz}/[1+(\text{B}/\text{P})\text{COS } \phi] \quad (3)$$

$$\text{BPFO} = (\text{N}/2)\text{Hz}/[1-(\text{B}/\text{P})\text{COS } \phi] \quad (4)$$

$$\text{BSF} = (\text{P}/2\text{B})\text{Hz}/[1-(\text{B}/\text{P})2\text{COS } \phi] \quad (5)$$

여기서,

$\phi$  = 접촉각 : 축에 수직인 선과 볼 중심에서 볼과 내륜/외륜이 접촉하는 호의 접촉점이 있는 선 사이의 각도(degree)

N = 구름요소(볼과 롤러)의 수(number)

P = 피치 직경 : 통상 평균값 사용(mm)

B = 볼 혹은 롤러의 직경, 페이퍼 롤러 베어링의 경우 평균값 사용(mm)

Hz = 초당 회전수로 나타내는 회전단위의 속도

위 식들은 Hz의 단위로 나타내며, CPM의 단위로 표시할 수 있다. 4개의 베어링 결함주파수들이 회전속도로 변조되어서, 회전속도 간격으로 측대역주파수들이 발생된다. 어떤 경우에는 기본열 주파수 혹은 볼 자전주파수가 고유진동수 혹은 볼 통과 주파수들을 변조시키며, 손상된 베어링에서 발생하는 주파수들은 베어링 결함주파수와 고유진동수 그리고 회전주파수의 조합이다.

#### 3.3 초음파 이음 진단

볼 베어링의 초음파 이음진단(abnormal noise diagnosis)을 위한 협대역 진동분석은 다음 단계로 이루어진다.

첫째, 베어링 주파수들을 계산한다.

- 둘째, 진동신호를 측정하고 분석한다.
- 셋째, 스펙트럼에서 주파수와 협대역 성분들을 판별한다.
- 넷째, 스펙트럼과 시간파형의 형상, 에너지 및 진폭을 평가한다.

3.4 진폭분석

베어링의 볼은 윤거 표면 위에서 홀(hole) 또는 결함(failure)을 지나갈 때 충격을 일으킨다. 한 개의 베어링 구조에서 볼 때 동조현상은 이러한 충격이 반복됨에 따라 진동이 발생하거나 울림현상을 초래하게 때문에 검출된 음파의 진폭을 분석해서 보면 초음파 주파수 범위에서 진폭이 증가하는 현상을 나타내게 된다.

Table 1은 건전한 베어링과 대비해서 사용에 따른 베어링 이상상태를 나타내는 것이다. 베어링 진폭증가인 dB값의 증가량에 따라서 나타나는 상태를 나타낸 것으로써, 초기진폭 대비 증가된 진폭값이 8 dB 차이가 발생되면 베어링 손상 초기상태에 들어섰음을 나타내게 되며 12 dB 이상 편차가 발생되었을 때 이미 사용 베어링은 손상이 시작되었음을 나타내게 된다.

3.5 주파수 스펙트럼

초음파 센서에서 검출된 시간축 상의 진동을 FFT(Fast Fourier Transformation) 분석를 통한 주파수 축으로 변환하면 사용 베어링의 상태를 보다 정밀하게 분석할 수 있다. 이는 베어링의 고

유주파수를 구하고 그 주파수의 정수배인 1X, 2X, 3X 등의 진폭값을 분석함으로써 이상유무를 판단할 수 있다. 베어링 각 메이커별 고유번호(number)에 대한 고유주파수 값은 일본 NSK 베어링 데이터를 적용하여 계산에 의해 구한다.(Lee et al., 2003)

- Motor Bearing Trouble : Spalled Damage
  - 베어링 사용시간 : 60,000 Hours
  - 베어링 Type : NSK 6312
  - 베어링 RPM : 1773 RPM

Table 2는 NSK 베어링에 대한 데이터를 나타내며, 건전한 상기 베어링에 대한 각 부품의 고유주파수를 NSK 베어링 데이터를 이용하여 먼저 구하고 그 주파수의 정수배인 1X, 2X, 3X 등의 진폭값을 알아보기 위한 조화주파수를 구하면 다음과 같다.

- 외륜볼 통과 주파수(BPFO)
  - =  $1,773/60 \times 3.06420 = 90.54 \text{ Hz}$
  - 1X 진폭 = 90.54 Hz
  - 2X 진폭 = 181.08 Hz
  - 3X 진폭 = 271.62 Hz
- 내륜볼 통과 주파수(BPFI)
  - =  $1,773/60 \times 4.93560 = 145.84 \text{ Hz}$
  - 1X 진폭 = 145.84 Hz
  - 2X 진폭 = 291.69 Hz
  - 3X 진폭 = 437.54 Hz
- 볼 자전 주파수(BSF)
  - =  $1,773 / 60 \times 2.02026 = 59.69 \text{ Hz}$
  - 1X 진폭 = 59.69 Hz
  - 2X 진폭 = 119.38 Hz
  - 3X 진폭 = 179.07 Hz
- 기본열 주파수(FTF)
  - =  $1,773/60 \times 0.38303 = 11.31 \text{ Hz}$
  - 1X 진폭 = 11.37 Hz
  - 2X 진폭 = 22.63 Hz
  - 3X 진폭 = 33.95 Hz

Table 1 Amplitude analysis

Amplitude variation	Bearing conditions
8 dB	Failure early stage
12 dB	Failure initiation
16 dB	Failure progress
35-50 dB	Failure completion

Table 2 Bearing data for NSK 6312

MAKER	BRG. NO.	AUG. CODE	BPFO	BPFI	BSF	BTF
NSK	6312	-	3.06420	4.93560	2.02026	0.38303

Fig. 4는 베어링 각 부품에서 발생하는 고유주파수를 스펙트럼 분석하여 나타낸 것으로써, 이상상태가 검출될 때 각 주파수에서의 진폭값을 측정하는 방법에 대한 실례를 Fig. 4에 나타낸다.

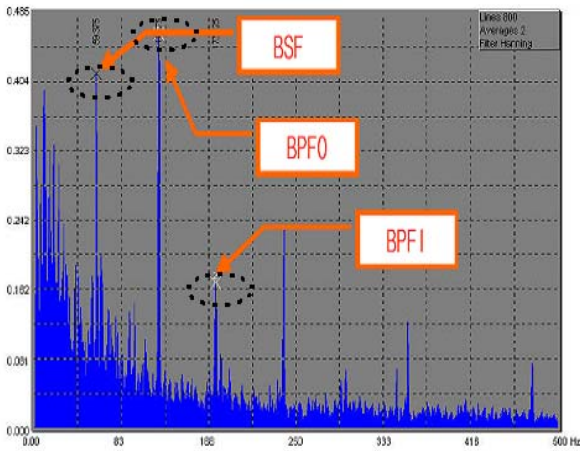


Fig. 4 Frequency spectrum analysis method

베어링에서 측정된 초음파 성분중의 스펙트럼분석 프로그램을 이용하여 이상유무 진단을 나타낼 수 있으며 기타 진동분석 프로그램 및 오실로스코프 통해서 현재의 운전상태를 확인할 수 있다.

4. 초음파 이음진단 결과

4.1 고유주파수 분석에 의한 손상검출

모터 종단(motor end)측에서 발생한 이상소음에 대한 초음파 이음분석결과를 나타낸 것으로써, 이음주파수 분석결과 BPF1, BPFO, BSF의 주파수가 뚜렷하게 진폭이 각각 기준값과 비교하여 12 dB이상 증가되었음을 알 수 있다. 즉 베어링은 Fig. 5와 같이 손상되었음을 확인할 수 있다. 베어링을 분해한 결과 베어링 윤거(race way) 및 롤러(roller)에 표면이 쪼개지는 심한 스폴링손상(spalling damage)이 발생되었음을 알 수가 있으며 손상에 대한 원인은 첫째, 최초 조립시에 베어링의 윤거에 발생한 미세 손상이 발생된 후 진전하며, 둘째, 정상 운전 중 베어링 글리스(grease)에 이물질 침투 후 미세손상으로 진전한다. 또한 셋째, 운전 또는 정지 시에 전기적인 아크(arc) 충격력이 가해져 미세손상 발생 후 진전하고 넷째, 약 50,000 시간 장기사용에 따른 피로 수명 한계에 도달하게 된다. 따라서 향후 재발방지 대책을 위해서 베어링에 글리스 주입 등 주기적인 점검을 통해서 손상을 방지하여야 한다.

4.2 조화주파수 분석에 의한 손상검출

모터 커플링(motor coupling)측 볼베어링에서의

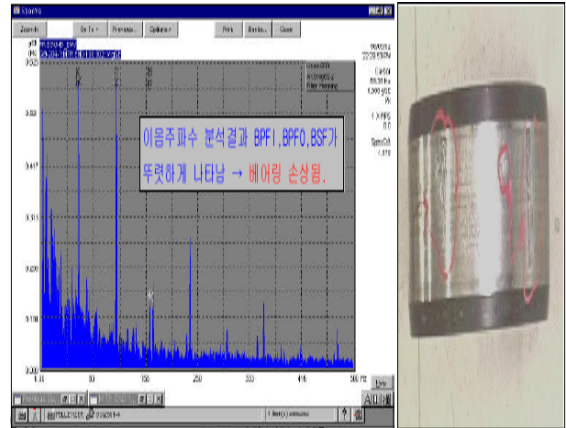


Fig. 5 Frequency analysis result according to bearing damage at motor end side

이상소음 발생에 대한 초음파 이음분석을 수행하였다. 이음주파수 분석결과, BPF1의 주파수 진폭이 0.5 dB에서 약 10 dB으로 증가되어 정수배인 1X, 2X, 3X, 4X의 진폭값을 알아보기 위한 조화주파수 분석을 통하여 베어링 내부 윤거(inner race)에 손상이 발생되어 진전된 것을 확인할 수 있었다. 이때 모터속도(moter speed)는 약 20 Hz이며, 내부윤거(inner race) 주파수인 BPF1은 약 98.5 Hz이었다. 따라서 조화주파수를 계산하면, 다음과 같다.

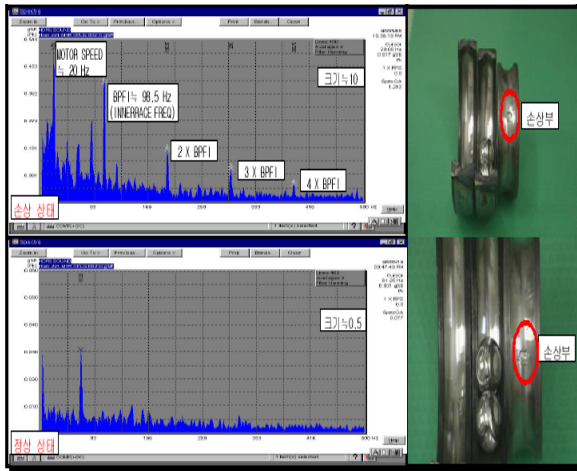
- 1 X BPF1 = 98.50Hz
- 2 X BPF1 = 197.00Hz
- 3 X BPF1 = 295.50Hz
- 4 X BPF1 = 394.00Hz

Fig. 6은 모터 커플링(motor coupling)측 볼베어링에서의 이상소음에 대한 초음파 이음분석 결과를 나타낸다. Fig. 6의 좌측 아래쪽 그림은 정상상태의 초음파 주파수분석결과이며 좌측 위쪽 그림은 손상발생시의 초음파 주파수분석결과를 각각 나타낸다. 좌측 위쪽 그림에서 주파수 진폭이 증가되었음을 알 수 있었으며, 분해결과 Fig. 6의 우측 그림과 같이 손상된 내륜에 볼이 통과되면서 발생한 신호임을 알 수 있다.

5. 결론

- (1) 운전 중 볼 베어링에서 발생하는 마찰 이





**Fig. 6** Ultrasonic signal analysis result according to bearing damage at motor coupling side

상음을 초음파 검출기술은 재료의 변형 또는 균열 및 전파 시 수반되는 순간적인 에너지 방출에 의한 탄성파로써 이상현상이 상당히 진전된 후에야 변화가 발견되는 결함 기계구조물의 특정 공진주파수를 분석하는 진동해석에 선행해서 검출할 수 있는 장점이 있음을 확인하였다.

(2) 초음파는 재료내의 탄성파로써 결함의 발생 및 성장에 따른 에너지 변화에 직결되어 결함 발생초기의 미소변화를 가장 일찍 탐지한다.

(3) 베어링에 미세균열이 발생된 경우 재료내부의 국부적 스트레인 에너지의 해소과정에서 발생하는 초음파를 검출함으로써 볼 베어링의 손상된 외륜볼 통과주파수(BPFO), 내륜볼 통과 주파수

(BPF1), 볼이나 롤러 결함으로 발생하는 볼 자전 주파수(BSF) 및 케이지 손상으로 인한 기본열 주파수(FTF)를 검출하고, 이들의 정수배인 조화주파수 성분중의 진폭을 정상치와 비교분석함으로써 초음파 주파수 범위에서의 dB(데시벨) 즉 진폭의 증가값을 평가함으로써 베어링의 이상상태를 검출할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Balderston, H. L., 1969, Materials Evaluation, Vol. 27, pp. 121~128.
- (2) Harting, D. R., 1978, ISA Trans., Vol. 17, pp. 35~40.
- (3) Dyer, D. and Stewart, R. M., 1978, J. of Mechanical Design, Vol. 100, pp. 229~235.
- (4) Mcfadden, P. D. and Smith, J. D. 1984, Tribology International, Vol. 17, pp. 3~10.
- (5) Sato, I., Yoneyama, T., Sasaki, S. and Sazuki, T., 1983, J. of Acoustic Emission, Vol. 2, pp. 1~10.
- (6) Cooper, P., 1983, J. of NDT, March, pp. 75~83
- (7) Hudnik, V. and Vizintin, J., 1991, Tribology International, Vol. 24, pp. 95~98.
- (8) Lee In-Chul et al., 2003, KEPRI Report, TM 02GP06, pp. 1~17.
- (9) Lee Sang-Guk 2004, "A Study on the Ultrasonic Measurement for Damage Evaluation of Power Plant Bearing," 2004 Fall Conference of the KSME, pp. 1727~1732.