

초음파 측정에 의한 베어링손상 평가

이상국* · 이인철*
*한국전력공사 전력연구원

Assessment of Bearing Damage by Ultrasonic Measurement

SANG-GUK LEE*, In-CHEOL LEE*
*Korea Electric Research Institute, KEPCO, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Ultrasonic Measurement 초음파 측정, Bearing Damage 베어링 손상, Frequency Spectrum Analysis 주파수 스펙트럼분석, Amplitude Analysis 진폭분석

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 부분에서의 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 상태감시 및 손상감지에 관한 연구 및 기술의 적용은 매우 활발한 편이며 현재에도 이들에 대한 더 나은 조기파손감지 기술의 개발에 역점을 두고 있다(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 의

존하고 있는 실정이다(Cooper, 1991; Hudnik 등, 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 운영을 기할 수 있는 초음파 검출기술 개발이 필요하다.

따라서 본 연구는 초음파 측정기술을 이용하여 운전중인 볼 베어링에서 방출되는 초음파성분을 취득하고 베어링 구성요소인 외륜, 내륜, 볼 및 기본열인 케이지 주파수를 정상치와 dB (데시벨) 진폭증가값에 비교분석함으로써 베어링의 이상상태를 검출함으로써, 볼 베어링의 손상을 조기에 검출하는 기술을 개발하고 실질적으로 설비의 진단에 활용될 수 있는 진단기술 개발이 주 목적이라 할 수 있다.

2. 초음파 신호검출

2.1 베어링 이상상태 검출

미국 NASA 연구소에서는 베어링에서 발생된 열과 진동특성을 이용해서 기존에 검출하였던 베어링 Failure 검출을 초음파 주파수대역인 24 kHz ~ 50 kHz 범위의 주파수에서 감시하는 동안 주파수 진폭의 변화가 열과 진동을 포함하는 다른 감시시스템의 지시치가 나타나기 전에 베어링 Failure의 초기징후를 나타내는 음향방출이 선행하였다는 연구결과가 있었다. 이 기술

제1저자 이상국 연락처: 대전광역시 유성구 문지동 103-16

042-865-5512 sglee@kepri.re.kr

은 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 헤테로다인 시켜 가청음으로 청취함으로써 베어링상태를 조기에 진단 할 수 있다. 베어링의 온도상승 및 저주파수 진동증가에 선행해서 검출하는 초음파상태감시시스템은 아래의 장점들이 있다.

- 운전 중에 이상을 감시할 수 있다
- 이상의 조기검출이 가능하다
- 일차적인 이상요인의 직접적인 원인을 검출할 수 있다

초음파 상태감시 시스템을 이용하면 베어링의 마모검출, 피로파손 개시, 베어링 표면의 경화 및 윤활유의 과잉 및 부족 등의 베어링의 이상상태를 검출할 수 있다.

2.2 베어링 손상원인

베어링 Trouble의 유형으로는 설치 불량 16%, 윤활 불량 36%, 이물이나 수분 혼입이 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 Failure가 발생한다.

베어링 조기실패의 원인인 불충분한 윤활, 부적절한 윤활재의 사용, 결함있는 윤활 시스템, 베어링 설치 및 축계의 과도한 변형 등 문제들의 결합으로 베어링에서는 Rubbing의 자국이 발생한다. 만약 베어링 실패의 전과 후의 적용조건, 운전조건 및 환경을 포함하는 모든 조건들이 잘 파악 되었다면 실패의 성향과 발생원인들을 조사함으로써 대책을 수립할 수 있다.

2.3 베어링 손상검출방법

베어링이란 회전하고 있는 기계의 축(軸)을 일정한 위치에 고정시키고 축의 자중과 축에 걸리는 하중을 지지하면서 축을 회전시키는 역할을 하는 기계요소로서 볼베어링은 축과 베어링의 볼 또는 롤러가 접촉하며 축이 회전하면 볼 또는 롤러도 같이 회전하기 때문에 마찰저항은 작게 작용된다. Ball 베어링은 Roller나 Ball이 Raceway(윤거)안에 있는 금속이기 때문에 회전에 의해 피로가 시작되어 변형이 일어난다.

따라서 Roller나 Ball 표면을 불규칙하게 만들며 여기서 음향방출이 일어나며 그 중에 초음파영역(24 kHz ~ 50 kHz)의 주파수를 분석하여 보면 진폭상의 dB(데시벨)이 증가하는 현상을 알 수 있다. 또한 베어링 표면에서의 경화 역시 Ball이 원주 밖으로 나가려 하는 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 Heterodyne(주파수변

환)시킴으로써 헤드셋을 통한 베어링 Failure 상태를 현장에서 직접 판단 가능하다. Fig.1은 베어링의 구조를 나타낸다.

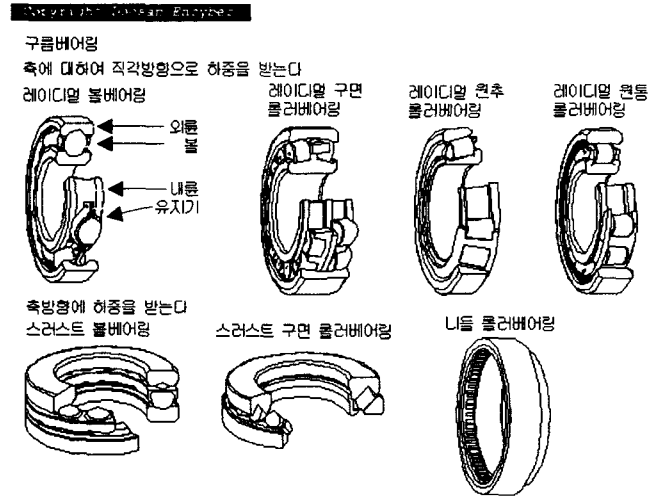


Fig.1 Structure of bearings

저속 베어링의 크기는 통상 1/2" 이상이고 고점도 윤활제로 그리스를 주입하여 사용한다. 고점도인 그리스가 베어링에서 방출되는 음향 에너지를 대부분 흡수하기 때문에 들리지는 않으나 변형이 발생되면 딱딱거리며 어딘가에 걸린 듯한 소리로 나타나게 된다.

상시감시시스템에서는 기준값을 설정하여 감시중에 진폭값의 증가로 이상유무를 판단하고 있다. 즉 초음파 신호검출시스템과 Vibration Analyzer를 이용하여 베어링의 이음 분석에 사용한다. Fig.2는 발전소 현장에서 베어링 상태 진단하는 방법을 보여준다.



Fig.2 ultrasonic signal measuring method in site

3. 초음파 상태감시 신호분석 결과 및 고찰

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

3.1 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) : 손상된 외륜에 볼이나 롤러가 통과되면서 발생
- ② 내륜볼 통과 주파수(BPFI) : 손상된 내륜에 볼이나 롤러가 통과되면서 발생
- ③ 볼 자전 주파수(BSF) : 볼이나 롤러 결함으로 발생
- ④ 기본열 주파수(FTF) : 케이지 손상 및 부적절한 운동으로 발생

여기에서, 각각의 주파수를 이론적인 계산식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{Hz} = \text{RPM}/60$$

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

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

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

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

여기서,

ϕ = 접촉각 : 축에 수직인 선과 볼 중심에서 볼과 내륜/외륜이 접촉하는 호의 접촉점이 있는 선 사이의 각도

N = 구름요소(볼과 롤러)의 수

P = 피치 직경 : 통상 평균값 사용

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

Hz = 초당 회전수로 나타내는 회전단위의 속도

위 식들은 Hz단위로 나타내며, CPM 단위로 표시할 수 있다. 4개의 베어링 결함주파수들이 회전속도로 변조되어서, 회전속도 간격으로 측대역주파수들이 발생된다.

어떤 경우에는 기보 열 주파수 혹은 볼 자전주파수가 고유진동수 혹은 볼 통과 주파수들을 변조시키며, 손상된 베

어링에서 발생하는 주파수들은 베어링 결함주파수와 고유진동수 그리고 회전주파수의 조합이다.

3.2 초음파 이음 진단시스템 구성

볼 베어링의 협대역 진동분석은 다음 단계로 이루어진다.

첫째, 베어링 주파수들을 계산한다.

둘째, 진동신호를 측정하고 분석한다.

셋째, 스펙트럼에서 주파수와 측대역 성분들을 판별한다.

넷째, 스펙트럼과 시간과형의 형상, 에너지 그리고 진폭을 평가한다. Fig.3은 볼 베어링의 협대역 진동분석 방법을 나타낸다.

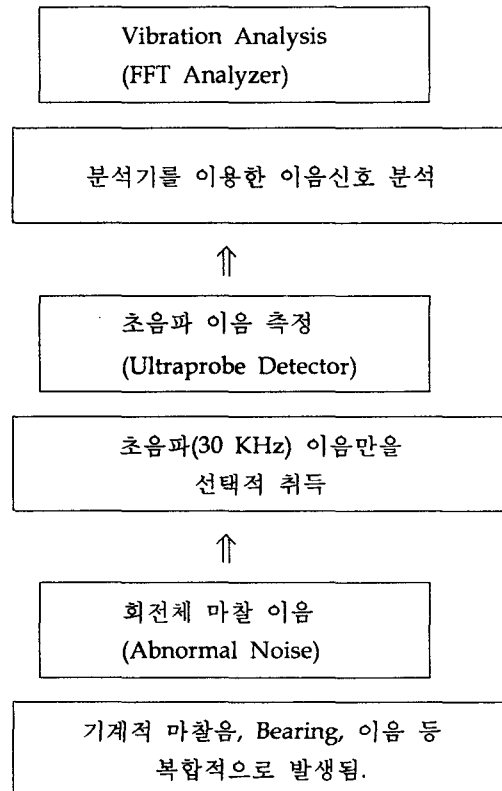


Fig.3 Method of Vibration Analysis

3.3 진폭분석

베어링의 Ball은 Race 표면 위에서 Hole 또는 결함을 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 dB(데시벨) 즉 진폭증가 현상으로 나타내게 된다.

Table 1은 건전한 베어링과 대비해서 사용에 따른 베어링 이상상태를 나타내는 것으로 베어링 진폭증가인 dB값의 증가량에 따라서 나타나는 상태를 나타낸 것으로써 초기 진폭 대비 증가된 진폭값이 8 dB 차이가 발생되면 베어링 Failure 초기상태에 들어섰음을 나타내게 되며, 12 dB 이

상 편차가 발생되었을 시 이미 사용 베어링은 Failure가 시작되었음을 나타내게 된다.

Table 1 Amplitude analysis

8 dB	Failure 초기상태
12 dB	Failure 시작
16 dB	Failure
35-50 dB	파손 상태

3.4 주파수 스펙트럼분석

초음파 센서에서 검출된 시간축 상의 진동을 FFT(Fast Fourier Transformation)를 통한 주파수 축으로 변환하면 사용 베어링의 상태를 보다 정밀하게 분석할 수 있는데 이것은 베어링의 고유주파수를 구하고 그 주파수의 정수 배인 1X, 2X, 3X 등의 진폭값을 분석함으로써 이상유무를 판단한다.

베어링 각 메이커별 Number에 대한 고유주파수 값은 일본 NTN 베어링 데이터를 적용하여 계산에 의해 구한다.

* Motor Bearing Trouble : Spalled Damage

- 베어링 사용시간 : 60,000 Hours
- 베어링 Type : NSK 6312
- 베어링 RPM : 1773 RPM
- NSK 6312 베어링의 NSK 베어링 데이터

MAKER	BRG NO.	보조 기호	BPFO	BPFI	BSF	BTF
NSK	6312	-	3.06420	4.93560	2.02026	0.38303

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.

$$\text{외륜볼 통과 주파수(BPFO)} = 1773 / 60 * 3.06420 = 90.54 \text{ Hz}$$

- 1X 진폭 = 90.54Hz
- 2X 진폭 = 181.08Hz
- 3X 진폭 = 271.62Hz

$$\text{내륜볼 통과 주파수(BPFI)} = 1773 / 60 * 4.93560 = 145.84 \text{ Hz}$$

- 1X 진폭 = 145.84Hz
- 2X 진폭 = 291.69Hz
- 3X 진폭 = 437.54Hz

$$\text{볼 자전 주파수(BSF)} = 1773 / 60 * 2.02026 = 59.69 \text{ Hz}$$

- 1X 진폭 = 59.69Hz
- 2X 진폭 = 119.38Hz
- 3X 진폭 = 179.07Hz

$$\text{기본열 주파수(FTF)} = 1773 / 60 * 0.38303 = 11.31 \text{ Hz}$$

- 1X 진폭 = 11.37Hz
- 2X 진폭 = 22.63Hz
- 3X 진폭 = 33.95Hz

Fig.4는 베어링 각 부품에서 발생하는 고유주파수를 스펙트럼 분석하여 나타낸 것으로서 이상상태가 검출되면 각 주파수에서의 진폭치가 Fig.4와 같은 신호가 나타난다.

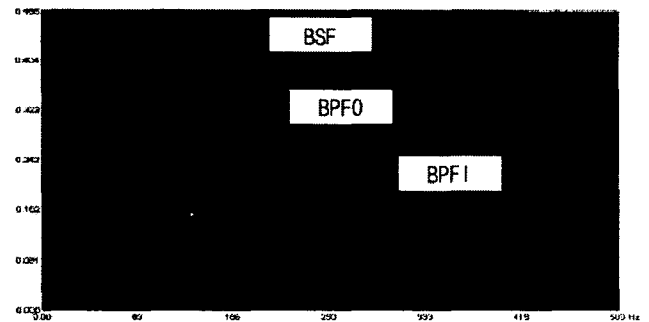


Fig.4 Frequency spectrum analysis

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

3.5 주파수변환(Heterdyne)을 통한 청각분석

이 검사는 현장에서 즉시 베어링의 상태를 판단할 수 있으며 검사속도를 빠르게 할 수 있으나 의심이 되는 베어링의 정밀한 진단을 위해서는 주파수 스펙트럼분석이 행하여져야 한다. 청각 분석은 검사자가 건전한 베어링에서 나는 소리에 친숙해야 하는데 그 소리는 돌진 또는 씹는 음으로 들린다. Failure 단계에 있는 베어링은 거친 소리가 나며 딱딱거리는 소리를 나타낸다. 손상된 Ball은 소리가 격렬하며 딸각거리는 소리로 들릴 수 있으며 균일하지 않는 거친 소리는 Race가 손상되었거나 Ball이 손상되어 불균일한 면을 나타내게 된다. 윤활부족의 상태를 나타내는 음은 건전한 베어링의 돌진음과 유사하고 약간 더 거친 시끄러운 돌진음으로 들린다. 베어링 표면에서 미끄러져서 굴러가는 음은 거칠면서 굵히는 듯한 음을 나타내며 음이 증가되고 짧게 지속이 된다. 이러한 상태가 탐지되었으면 정밀한 주파수 분석을 행하여야 한다. 비교분석은 두가지 이상의 유사한 베어링을 검사하여 그 잠재적인 차이들을 “비교” 하는 방법이다. 기준값 분석은 특정한 베어링의 기준값을 정하고 시간단계를 지

나는 동안 검사이력값을 관리분석하는 방법이다. 즉 특정 초음파 주파수대에서 마모패턴을 초기 탐지하고 베어링 문제들을 진단한다.

3.6 초음파 상태감시 검사절차

우선 비교 분석방법으로는 사용 모듈은 청음봉 접촉 모듈을 사용하며 초음파 주파수 선정은 최초 30kHz로 선정한다. 베어링 하우징 상에 감사 Point 선정 후 청음봉 접촉모듈 적용 (센서 접촉을 확실히 하여야 한다.)하고 같은 각도에서 베어링에 접근하여야 하며 베어링 하우징 상의 같은 지점에서 초음파 센서를 부착하여야 한다. 그리고 최초에 검사 감도값을 줄이고 데이터를 취득한다. 이때 하중 조건과 같은 회전속도의 유사 베어링을 선정하여 데이터를 취득한다. 그 다음으로는 절대분석 및 비교분석 실시한다.

기준값 분석에 있어서는, 건전한 베어링에 대한 검사이력값에 비교하는 방법으로 향후의 기록값은 초기에 선정한 주파수를 정하여 고정시키며 검사 데이터의 추이를 연속해서 그래프로 표현한다. 기준값 대비 8 dB 증가 시는 윤활부족 상태지시하며, 재윤활 후에도 진폭값이 회복되지 않으면 베어링이 Failure 초기 상태에 있다. 그리고 윤활막이 감소하기 때문에 주파수 진폭이 증가한다. 기준값 대비 8 dB 이상은 윤활부족으로 나타나는 불균일한 파형을 동반한다 이때 조치는 베어링 표면을 균일하게 닦는다는 시간이 필요하므로 조금씩 윤활유를 주입하되 과윤활은 절대 피하여야 한다. 베어링 과윤활 시 문제점 : 베어링 Failure의 흔한 원인이며 과도한 압력으로 베어링 밀봉을 파괴하거나 터트려서 응력과 결함을 만들 수 있는 온도상승의 원인이 된다. 기준값 대비 12 dB 증가 시는 베어링 Failure 초기모드가 시작된다.

4. 초음파 이음진단 결과

4.1 고유주파수 분석에 의한 손상검출

Motor End 측에서 이상소음 발생을 초음파 이음분석결과를 나타낸 것으로서 이음주파수 분석결과 BPF1, BPF0, BSF의 주파수가 뚜렷하게 진폭이 증가되었음을 알 수 있다. 즉 베어링은 Fig.5와 같이 손상되었음을 확인할 수 있다.

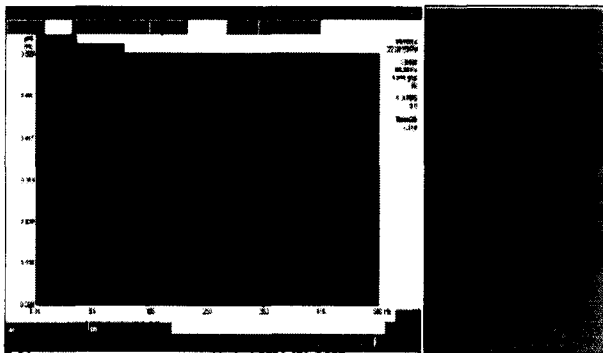


Fig.5 Frequency analysis result according to bearing damage

베어링을 분해한 결과 베어링 Race Way 및 Roller에 심한 Spalling Damage 발생되었음을 알 수가 있으며 손상에 대한 원인은 칩재, 최초 조립시에 베어링의 Race Way에 발생된 미세 손상이 발생된 후 진전하며, 들쭉, 정상 운전 중 베어링 Grease에 이물질 침투 후 미세손상으로 진전한다. 또한 셋째, 운전 또는 정지 시에 전기적인 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 Grease 주입 등 주기적인 점검을 통해서 손상을 방지하여야 한다.

4.2 조화주파수 분석에 의한 손상검출

Motor Coupling측 볼베어링에서 이상소음 발생을 초음파 이음분석결과를 나타낸 것으로서 이음주파수 분석결과 BPF1의 주파수가 뚜렷하게 진폭이 증가되어 정수배인 1X, 2X, 3X, 4X의 진폭값을 알아보기 위한 조화주파수 분석을 통해서 베어링 INNER-RACE에 손상이 발생되어 진전된 것이다.

MOTOR SPEED = 20 Hz 이며, INNERRACE 주파수인 BPF1 = 98.5 Hz이었다.

따라서 조화주파수를 계산하면,

$$1 \times BPF1 = 98.50\text{Hz}$$

$$2 \times BPF1 = 197.00\text{Hz}$$

$$3 \times BPF1 = 295.50\text{Hz}$$

$$4 \times BPF1 = 394.00\text{Hz}$$

과 같으며, Fig.6의 좌측 그림에서 주파수 진폭이 증가되었음을 알 수 있었으며, 분해결과 Fig.6의 우측 그림과 같이 손상된 내륜에 볼이 통과되면서 발생된 신호임을 알 수 있다.

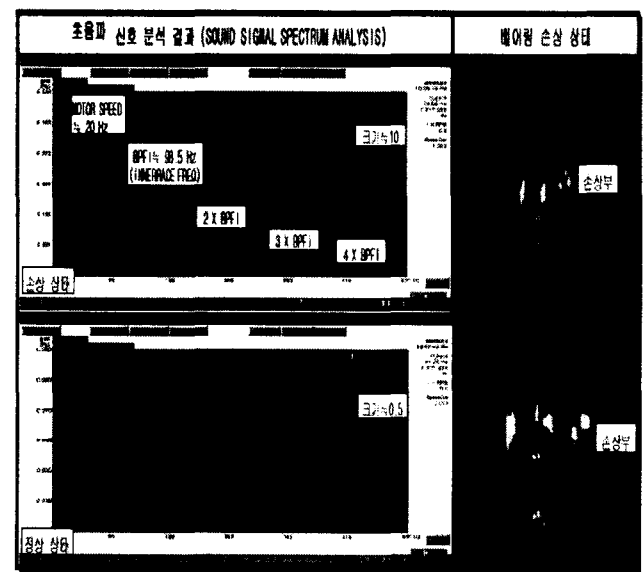


Fig.6 Ultrasonic signal analysis result according to bearing damage

5. 결 론

- (1) 운전 중 볼 베어링에서 발생하는 마찰 이상음을 초음파 검출기술은 재료의 변형 또는 균열 및 전파 시 수반되는 순간적인 에너지 방출에 의한 탄성파로써 이상현상이 상당히 진전된 후에야 변화가 발견되는 결합 기계구조물의 특정 공진주파수를 분석하는 진동해석에 선행해서 검출할 수 있는 장점이 있음을 확인하였다.
- (2) 초음파는 재료내의 탄성파로써 결합의 발생/성장에 따른 에너지 변화에 직결되어 결합 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 통과주파수(BPFI), 볼이나 롤러 결합으로 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 진폭 증가값에 의해서 베어링의 이상상태를 검출할 수 있었다.

참 고 문 헌

- H. L. Balderston(1969), *Materials Evaluation*, Vol. 27, pp. 121-128
- D. R. Harting(1978), *ISA Trans.*, Vol. 17, pp. 35-40
- D. Dyer, R. M. Stewart(1978), *J. of Mechanical Design*, Vol. 100, pp. 229-235
- P. D. Mcfadden and J. D. Smith(1984), *Tribology International*, Vol. 17, pp. 3-10
- I. Sato, T. Yoneyama, S. Sasaki and T. Sazuki(1983), *J. of Acoustic Emission*, Vol. 2, pp. 1-10
- P. Cooper(1983), *J. of NDT*, March, pp. 75-83
- V. Hudnik and J. Vizintin(1991), *Tribology International*, Vol. 24, pp. 95-98