

# 음향방출기법을 이용한 전로베어링 안전진단 기술개발

박경조

여수대학교 기계자동차공학부  
(2002. 11. 11. 접수 / 2003. 5. 25. 채택)

## Development of Diagnosis Technique for Converter Bearings by Using Acoustic Emission

Kyung-Jo Park

Division of Mechanical and Automotive Engineering, Yosu National University  
(Received November 11, 2002 / Accepted May 25, 2003)

**Abstract** : A method is presented for diagnosing the converter bearings by using acoustic emission. The flaking mechanism causing the large-scale bearing for furnace to flaw is investigated and a possibility of defect is verified by Finite Element method. The diagnosis logic is proposed for detecting the flaw of a non-continuous rotating machine. It is proved that the acoustic emission energy can be used as a representative parameter for an acoustic event. Applying the method to the tilting bearings for steel mill in operation, the effectiveness of this logic is evaluated. It is shown that AE signal is generated only when the bearing is tilting, and the trend analysis can be focused upon this process.

**Key Words** : converter, acoustic emission, flaw detection

### 1. 서 론

철강업을 둘러싼 경영환경은 더욱 치열한 경쟁양상이 전개되고 있고, 이에 따른 각종 생산성 향상 및 효율화를 위한 요구가 더욱 높아지고 있다. 이와 더불어 장비의 노후화 및 제조사의 재료 불균일, 작업환경의 변화 등에 의해 발생하는 결함을 조기에 진단하고 대처할 수 있는 기계장치 안전진단에 관한 기술개발 요구도 날로 증대하고 있다. 특히 결함에 의한 기계파손은 짧은 시간에 급속도로 발생하는 경향이 있으므로 조기에 결함의 발생여부를 파악하지 못하면 값비싼 장비의 파손은 물론이고, 장비교체 시기까지 작업중단에 의한 엄청난 생산손실을 초래한다. 따라서 기계의 결함발생 여부를 진단하기 위한 여러 가지 시도들이 진행되어 왔다.

육안에 의한 검사 또는 운전자 귀에 들리는 이음 신호에 의한 판단과 같은 원시적인 방법에서부터 X-ray 또는 진동모니터링 장치개발까지 여러 가지 방법들이 시도되어 왔다. 이 중 진동모니터링 장치는

생산현장의 기계상태를 실시간으로 진단할 수 있고, 중앙집중 모니터링 및 경보시스템 작동의 자동화가 가능하여 작업현장에서 널리 쓰이고 있다. 감시방법으로는 첨두치(peak-to-peak amplitude) 크기의 변화 감시, 포락선(envelope) 검출<sup>1)</sup>, 셉스트럼(cepstrum) 분석<sup>2)</sup> 및 웨이브렛(wavelet) 분석방법<sup>3)</sup> 등이 사용되고 있다. 그러나 진동신호는 결함이 상당 정도 진전되었을 때 비로소 계측기에 나타나는 신호이므로 초기 결함 및 미세결함 탐지에는 유용한 방법이라 할 수 없다.

특히 본 연구에서 대상으로 하는 극저속, 불연속 회전체의 경우 기존의 고속회전 베어링에 적용하였던 진동신호 분석에 의한 결함크기 및 위치판정법을 적용할 수 없으므로 진동모니터링에 의한 이상 진단 방법을 적용하는 데는 한계가 있다. 일본의 경우 몇몇 연구에서 극저속 회전체의 외륜에 가속도계가 아닌 스트레인 게이지를 부착하고, 진동신호의 첨두치를 모니터링하여 이상을 진단하고 수명을 예측하는 방법을 개발하였지만<sup>4)</sup>, 초기의 결함을 탐지해내는 데는 성공하지 못하였다. 국내의 경우 소형

kjpark@yosu.ac.kr

고속회전 베어링에 대해서는 많은 연구들이 진행되었지만 대형 극저속 베어링에 대한 진단사례는 아직까지 발표되지 않고 있다.

한편 베어링이나 로터기구(rotary mechanism) 같은 회전기계의 결함탐지를 위해 음향방출(acoustic emission) 방법을 적용하는 사례가 최근 발표되고 있다. 일본의 제철소의 경우 음향방출법을 기계장치 결함탐지에 적용하려는 시도가 최근 활발히 이루어지고 있다<sup>5)</sup>. 그러나 이러한 방법들도 고속으로 회전하는 회전체가 적용대상이고, 본 연구의 대상인 극저속, 불연속 회전기계에 대한 연구사례는 아직까지 보고된 바가 없는 것으로 알고 있다.

최근 산업설비의 비파괴검사법 중에서 초음속 탐성과를 이용한 결함탐지 기술이 많이 개발되어 있는데 이 방법은 현재 정적 구조물에 주로 적용되는 방법으로써 미세한 초기결함의 크기와 위치를 찾는 데 매우 효과적인 방법으로 알려져 있다. 이 중 음향방출법 또는 응력과 방출법은 재료의 국부적인 결함성장애 의한 과도 진동에너지(transient vibration energy)를 측정하여 결함의 위치를 탐색하는 방법으로, 재료의 전위(dislocation)와 같은 미시적인 현상에서부터, 기계파괴를 초래하는 대규모 크랙성장 시 발생하는 초음파까지 모두 측정 가능한 방법이다. 따라서 표면파와 같은 미세한 초기결함 탐지에 매우 유리한 방법으로, 대형 극저속 회전체에 이 기술을 적용하면 조기에 결함을 진단하여 대형 사고를 사전에 예방할 수 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 작업 중 발생할 수 있는 베어링 파손에 의한 손실을 줄이고 회전기계의 건전성을 실시간으로 모니터링할 수 있는 장치를 개발하기 위해, 음향방출법을 이용한 초기 결함탐지 기술을 개발하는 것을 목표로 한다.

## 2. 결함발생 원인분석

### 2.1. 극저속, 대형회전체 개요

본 연구에서 대상으로 하는 극저속, 대형 회전체는 Fig. 1에 보인 바와 같다. 이러한 대형 회전체는 제철소에서 제강작업에 사용되는데 전로 안의 내용물이 잘 섞이도록 전로는 불규칙적으로 회전한다. 전로를 지지하는 베어링은 양 쪽에 두 개가 있는데 하나의 베어링(fixed bearing)은 고정되어 있고 베어링을 구동하는 불기어(bull gear)가 장착되어 있다. 다른 한 쪽의 베어링(expansion bearing)은 축방향으

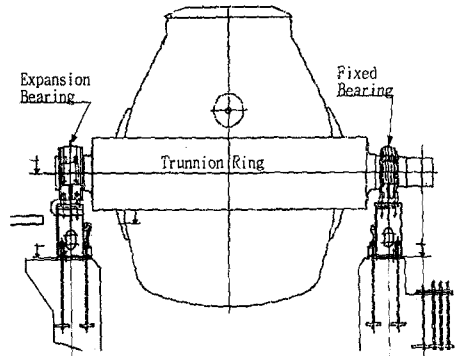


Fig. 1. Large-scale bearing for furnace

로 약 60mm 정도 미끄러질 수 있는 구조로 되어 있는데 이는 전로의 가열에 의한 축의 열변형을 보상하기 위한 것이다.

사용된 베어링 형식은 구형 볼러베어링(spherical roller bearing)으로 고정단, 자유단 모두 북형 36개의 볼러로 구성되어 있다. 베어링의 외경은 1,460mm, 내경은 1,120mm이고 폭은 335mm 이다. 베어링의 최대 회전속도는 1 rpm이다. 전로의 무게는 1,504.4 ton이고 고정단의 구동장치 무게는 249.9 ton으로 전로베어링 총 무게는 1754.3 ton이다. 이를 모멘트 원리를 적용하여 양 쪽 베어링 지지하중으로 나누면 고정단 베어링이 지지하는 하중은 1,028.5 ton이 되고, 자유단 베어링이 지지하는 하중은 725.8 ton이 된다. 작용하는 하중은 고정단 쪽이 크지만 지금까지 결함이 발생하였던 베어링은 주로 자유단 베어링이었다. 이는 결함의 발생원인이 작용하중의 크기에 관계되는 것이 아니라 다른 이유 때문인 것으로 생각될 수 있다. 따라서 결함의 발생원인을 구조적 관점에서 엄밀하게 조사해 볼 필요가 있다고 할 수 있다. 이는 차후에 결함탐지를 위한 음향방출 시험의 결과 해석에도 유용한 정보를 제공한다.

### 2.2. 결함발생 원인분석

베어링 결함발생의 첫 번째 원인으로 볼러의 재질불량을 들 수 있다. 볼러의 재질은 16CrNiMo6인데 성분분석 및 검토보고서에 따르면 표준성분과 동일하다는 결과를 얻었기 때문에 결함발생의 원인으로서는 생각할 수 없다. 두 번째 볼러 경도부족을 생각해 볼 수 있는데 베어링 제작사에서 표준으로 삼는 표면경도는 HRC ≥ 59~63, 경화층 두께는 4.5 mm 이상이다. 경도계를 사용하여 측정된 표면경도는 HRC 65이고 경화층 두께는 8mm로써 제작사의

표준조건을 만족하므로 이것 역시 원인이라고는 할 수 없다.

세 번째는 피로에 의한 균열발생이 원인이 되었다고 가정할 수 있다. 롤러의 최소 피로한도는  $48 \text{ kgf/mm}^2$ 인데 정상적인 부하조건에서 롤러의 최대 발생응력은  $25.7 \text{ kgf/mm}^2$ 로 피로에 의한 균열발생은 불가능하다고 할 수 있다. 그러나 나중에 설명할 롤러의 끼임현상이 발생하면 균열이 발생할 가능성도 있다. 제작과정 중 열처리 작업 시의 냉각속도가 부적절할 경우 담금질 균열이 발생할 수 있지만 제작사의 X-ray검사 및 열처리 검사 자료에 의한 확인 결과 균열이 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다. 간극(clearance) 부족에 의한 과부하에 의해 결함이 발생할 가능성도 있다. 그렇지만 저속, 대형 구형 롤러 베어링의 반경방향 허용간극은  $1.2 \sim 1.6 \text{ mm}$ 인데 치수검사 결과 측정된 간극이  $1.3 \text{ mm}$ 이므로 이 또한 원인이 될 수 없다.

대상이 되는 2분할형 베어링의 경우 내륜의 내경이 트러니언축(trunnion shaft)의 외경보다 작아야 클램핑링(clamping ring)으로 체결 시 내륜이 축에 밀착될 수 있다. 그러나 본 베어링의 경우 클램핑 링으로 내륜 체결 시 축과 내륜 사이에 점쇄가 없어 내륜이 축에 밀착되게 체결할 수가 없다. 이에 의해 설계하중 이외의 이상하중이 발생할 수 있고 결함 발생의 원인이 될 수 있다. 또 축방향 유동방지를 위해 디스턴스슬리브(distance sleeve)가 베어링 내륜에 밀착되어야 하는데 필러게이지(filler gage)를 사용하여 축방향 간극을 측정된 결과 상부에서  $2.0\text{mm}$ , 하부에서  $3.0\text{mm}$  총  $5 \text{ mm}$ 의 간극이 존재함을 확인하였다. 이와 같은 간극에 의해 베어링 내륜은 축방향으로 유동할 수 있고 이에 의해 롤러가 외륜과 내륜 사이에 끼이는 현상이 발생하게 된다.

이상의 원인분석으로부터 베어링에 결함이 발생하는 과정을 다음과 같이 추정할 수 있다. Fig. 2에서 내륜이 축방향(좌측)으로 이동하면 롤러가 조립되는 내륜과 외륜 사이의 거리가 줄어들어 롤러의 끼임현상이 발생되고, 우측 롤러는 내륜과 외륜 사이의 거리가 커져 하중분담률이 저하된다. 우측 롤

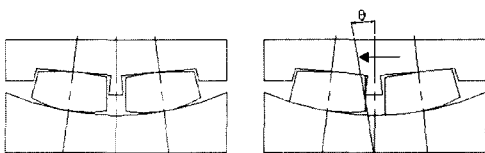


Fig. 2. Roller jammed between inner and outer race



Fig. 3. FE model for roller bearing

러의 하중분담률이 저하됨에 따라 끼임이 발생한 좌측 롤러의 하중분담률은 증가하게 되고, 끼임 발생에 의해 자동조심역할을 상실하게 되며, 베어링 텀팅 시 모서리부는 과하중이 작용하게 되어 조기에 손상이 발생하게 된다. 이 때 외륜은 롤러 모서리부와 접촉되는 부위에서 마모가 발생하게 된다. 또한 우측 롤러의 하중분담률 저하에 따라 끼임이 발생한 좌측 롤러의 하중 분담률은 증가하여, 과하중에 의해 롤러에 윤활유가 공급되는 급지구멍(hole) 부위에서 높은 응력의 반복작용에 의해 피로 균열이 발생할 가능성이 커지게 된다. 끼임이 발생한 좌측 롤러의 하중작용선은 롤러의 중심에서 벗어나게 되므로 균열발생 기점도 롤러 중심축에서 벗어나게 된다. 특히 그림과 같이 어떤 원인에 의해 트러니언축이 초기에 휘어져 있을 경우( $\theta$ ) 좌측 롤러의 가장자리의 전달면이 축소되어 진단될 가능성이 그만큼 더 커지게 된다.

### 2.3. 유한요소해석

롤러 끼임에 의한 응력집중 현상을 해석하기 위해 유한요소모델을 수립하고 접촉부에서의 응력을 계산하였다. 이에 대한 유한요소모델은 Fig. 3에 보인 바와 같다. 유한요소해석을 위해 사용한 프로그램은 ANSYS 5.0이다. 구속조건 및 경계조건이 대칭인 점을 고려하여 롤러 및 외륜을 절반만 모델링하였다.

끼임 현상에 의해 복렬베어링 중 일렬의 베어링이 모든 하중을 지지한다는 가정 하에, Fig. 4에 보인 바와 같이 가운데 베어링에 작용하는 하중  $P_0$  및 전체 베어링에 작용하는 하중  $P$ 는 다음과 같이 구

할 수 있다<sup>11)</sup>.

$$P_o = \frac{5}{z} P \quad (1)$$

여기서 P는 베어링에 작용하는 전체 하중이고, z는 볼러의 개수이다. 앞에서 구한 자유단 지지하중 및 볼러의 수를 대입하면  $P_o=791.1N$  임을 알 수 있다.

베어링에 작용하는 하중이 전체 볼러에 균일하게 분포할 때의 외륜과 볼러 사이의 접촉응력을 Fig. 5에 나타내었다. 균일분포 하중  $f_o$ 는  $f_o=P_o/L=(791.1/136=2.9N/mm)$  이다. 이 때 접촉응력은 볼러의 중앙

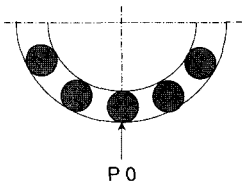


Fig. 4. Bearing load condition

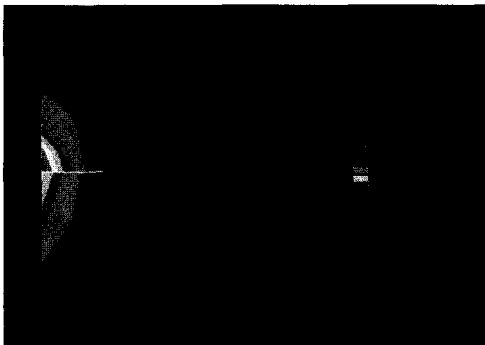


Fig. 5. Contact stress for uniform load

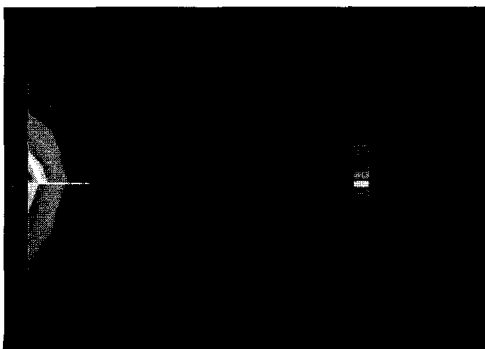


Fig. 6. Contact stress for linear load

부분에서 최대가 되고 그 크기는 14.7MPa이다. 베어링에 작용하는 하중이 볼러 반경의 1/4에 집중해서 선형분포할 때의 접촉응력 해석결과는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다. 마찬가지로 중앙부분에서 최대 접촉응력이 발생하는데 그 크기는 117 MPa로 균일분포 하중에 비해 접촉응력이 8배 정도 증가한 것을 알 수 있다. 이로부터 볼러의 끼임현상이 발생하면 하중의 편중 현상이 발생하게 되고 따라서 접촉응력이 증가하게 된다. 이런 현상이 반복적으로 되풀이되면 피로에 의한 균열이 발생할 가능성이 많아지게 된다는 것을 알 수 있다.

### 3. AE 진단로직의 구성

음향방출 신호는 물체가 변형되거나 파괴될 때, 그 때까지 축적되어진 스트레인에너지(strain energy)가 음파로 변형되어 전파되는 파동이다. 재료 내부의 탄성에너지가 해방될 때의 탄성파의 전파현상으로, 파괴가 일어날 때뿐만 아니라 재료의 결정구조의 전위(dislocation)나 변태 등도 적용대상이 된다. 또한 탄성변형이나 습윤 시에도 발생할 수 있다. 재료에 외력이 가해지면 스트레인 에너지로 재료 내부에 축적되지만, 한계에 도달하게 되면 변형이나 균열 발생의 현상이 일어나게 되어 그 순간에 탄성에너지가 해방되기 때문이다.

AE는 초음파를 이용한 비파괴검사 방법이지만, UT(초음파탐상법)과는 명확히 다르다. UT법은 초음파를 방사하여 결함부에서 반사하여 되돌아오는 반사파(echo)를 수신하여 결함의 위치 및 크기를 판단하는 방법으로 능동적 방법이라 할 수 있다. 반면 AE는 재료 내부에서 방출되는 초음파를 수신하는 방법으로 수동적 방법이라 할 수 있다. 재료 내부에서 방출되는 AE는 에너지의 크기가 미약하기 때문에 AE센서의 신호를 40dB(100배) 또는 60dB(1000배)로 증폭하여야만 신호로써 가시화할 수 있다. 이 때문에 여러 종류의 주변잡음(ambient noise)이 관심 대상 신호에 섞여 들어올 수 있는 가능성이 매우 커지게 되고, 따라서 주변잡음과 대상신호를 분별해 낼 수 있는 방법의 개발이 필요하게 되었다. 아래 그림 Fig. 7은 AE를 이용하여 극저속, 대형회전체의 결함을 검출하기 위해 적용한 진단로직을 나타내고 있다.

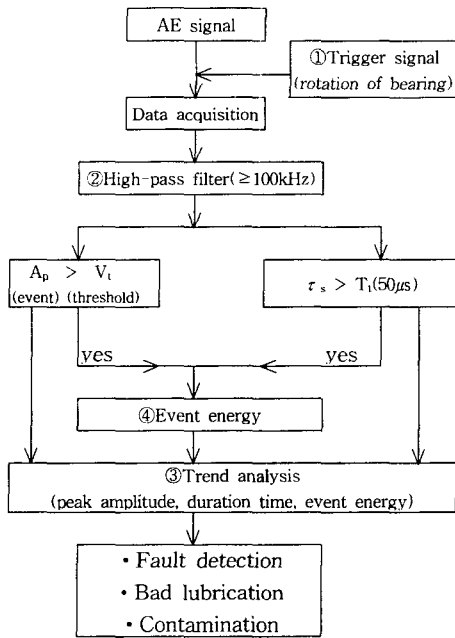


Fig. 7. Flow chart for diagnosis logic

전로가 철광석 및 재료를 장입하여 쇳물을 끓여 내는데 걸리는 시간은 1시간 가까이 소요된다. 이 시간 동안 연속해서 AE파를 측정하면 컴퓨터에 저장되는 데이터량도 방대해지고, 각 작업구간 별 특징을 살펴보는 데도 문제점이 많다. 본 실험에 앞서 수행한 예비 현장실험 결과 베어링이 털링하지 않는 경우에는 AE신호가 발생하지 않는다는 것을 확인하였다. 또 결함은 하중의 변동에 의해 성장할 수 있는데 베어링이 회전하지 않는 경우에는 하중은 일정하므로 결함성장 가능성도 없다고 할 수 있다. 따라서 타코미터(tacometer)를 회전축에 부착하여 이로부터 나오는 신호를 AE 데이터 취득장치의 외부 트리거신호(external trigger signal)로 사용하면 데이터 획득에 소요되는 시간을 단축할 수 있다. 실제로 베어링이 털링하지 않는 시간은 전체 작업시간의 3/4에 달하기 때문에, 베어링 털링 시에만 측정을 수행하면 측정시간 및 데이터양을 크게 감소시킬 수 있다.

대부분의 결함성장에 의한 AE신호는 150~300 kHz 사이의 주파수 성분을 갖는다. 따라서 AE신호를 이 주파수대역을 갖는 대역통과필터(band-pass filter)를 사용하여 필터링하면 순수하게 결함에 의한 AE신호를 얻을 수 있다. 예비 현장실험 결과, 측정된 AE신호는 10~350 kHz 사이의 성분을 가지므로, 100

kHz 고주파통과필터를 사용하여 축의 unbalance나 misalignment, looseness 등에 의한 저주파 진동신호를 필터링하면 순수 결함에 의한 AE신호를 얻을 수 있다. 또한 필터링에 의해 전기신호에 의한 잡음이나 주변 기기작동에 의한 잡음도 제거할 수 있다.

음향방출 신호의 진폭과 지속시간은 결함성장 초기에는 모두 증가하는 경향이 있다. 그러나 진폭은 결함이 성장함에 따라 포화상태에 이르게 되는 경향을 갖고 있는 반면 지속시간은 꾸준히 증가하는 경향을 갖기 때문에 진폭보다는 지속시간이 결함의 성장 및 파단현상을 보다 잘 대변한다고 할 수 있다. 따라서 지속시간의 경향을 분석하면 결함의 발생 및 성장을 보다 잘 진단할 수 있다. 진단 로직에서 관심 지속시간을 50μs 이상으로 설정하였는데 이는 전기신호와 같은 잡음신호는 지속시간이 대개 50μs 이하인 것으로 조사되었기 때문이다.

음향방출에너지(acoustic emission energy)는 에너지계수(energy count)라고도 불리는데 이 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$$E = \int_0^{t_s} [V(t)]^2 dt \quad (2)$$

여기서  $V(t)$ 는 과도 음향방출 신호의 전기볼트이고  $t_s$ 는 지속시간을 나타낸다. 이는 발생하는 AE신호가 최대 절두치에서 문턱값(threshold) 이하로 감소될 때까지 삼각형 형태를 가지므로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} R \cdot A_p \cdot \tau_s \quad (3)$$

여기서 알 수 있듯이 방출에너지는 진폭과 지속시간 모두의 함수이므로 한 개의 event를 가장 잘 대표하는 파라미터라 할 수 있다. 또한 음향방출에너지는 문턱값과 운전주파수(operating frequency)에도 덜 민감하다는 장점을 갖고 있다.

## 4. 현장시험 및 결과

### 4.1. 측정장치의 구성

조업현장에서 가동되고 있는 털링베어링의 AE신호를 측정하기 위하여 Fig. 8에 보인 바와 같이 2개의 위치에 AE센서를 부착하였다. 결함의 발생위치

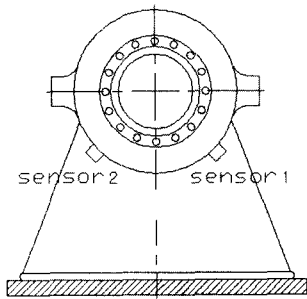


Fig. 8. AE Sensor location

를 검출하기 위한 위치표정을 수행하기 위해서는 3 개 이상의 센서가 요구되나, 본 연구의 대상인 틸팅 베어링은 그 동안의 사고 경위 및 작업조건을 고려 하면 초기결함은 대부분 하중이 크게 작용하는 베어링 하단부에서 시작된다는 것을 알았다. 즉 Fig. 8 에서 수직중심선을 중심으로 하단부 좌우 45° 내에서 결함이 발생하므로 결함의 위치를 미리 알고 있다고 할 수 있다. 따라서 2개의 센서만을 사용하여 결함의 발생유무 및 크기를 판별하고자 한다.

두 개의 센서는 수직중심선에 대해 양쪽으로30° 방향에 자기홀더(magnetic holder)를 이용하여 부착하였다. 센서와 베어링하우징 사이에는 AE파의 전달특성을 양호하게 유지하기 위하여 커플란트(couplant)로 접촉시켰다.

수직중심선 부근이 하중이 가장 크게 작용하기 때문에 결함발생 가능성이 가장 높으나, 음향방출 신호의 전달경로 상에 베어링유 급지라인이 횡단하여 통과하고 있기 때문에 신호의 감쇠가 뚜렷하고 전달되지 않는 파동도 존재한다. 이는 예비실험에서 이 위치에도 센서를 부착하여 3개의 센서를 이용하여 시험을 수행하였지만, 다른 2개의 센서에서 모두 측정된 신호가 이 센서에 의해서는 측정되지 않는 경우가 많았던 결과로부터 도출한 결론이다. 센서를 1개만 사용하여 AE신호를 포착할 수 있으나 틸팅의 방향이 시계방향, 반시계방향 모두에 대해 이루어지고, AE신호의 특성 상 감쇠률이 크기 때문에 한 쪽 방향의 틸팅에 의한 신호가 반대쪽 센서에 도달하지 못할 가능성이 크므로 양쪽에 센서를 부착하여 시험을 수행하였다.

실험장치의 구성도는 Fig. 9에 보인 바와 같다. AE센서는 압전형·광대역(piezoelectric wide-band)형 센서(PAC WD9208)를 사용하였고, 전치증폭기(PAC 1220A-AST)의 이득값은 40dB로 설정하였다. 초음속으로 수신되는 AE신호를 수집하고 저장하기 위

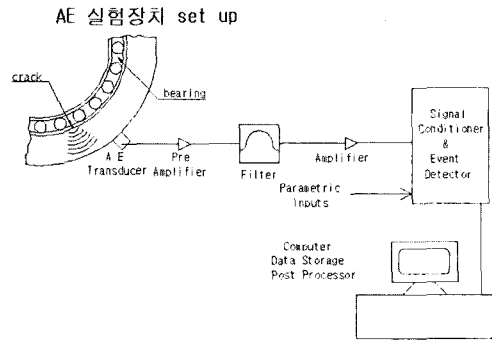


Fig. 9. Experimental Setup

No	Work	Tilting Sequence
1	Scrap Charging	0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°
2	Hot Metal Charging	0°, 45°, 90°, 135°
3	Blowing	0°
4	Temp Measuring and Sampling	0°, 45°, 90°, 135°
5	Tapping	0°, 45°, 90°, 135°
6	Slag Discharging	0°, 45°, 90°, 135°, 180°
7	Slag Coating	0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°

Fig. 10. Tilting sequence

해 고성능의 DSP(Digital Signal Processing) board가 필요한데 본 연구에서는 4-channel이고 데이터 전송 속도가 132 Mbytes/sec인 PAC사의 PCI-DSP를 사용하였다. 수집된 신호는 PC에 저장되어 AE전용 해석 프로그램인 DiSP를 이용하여 주파수분석 및 AE분석을 수행하였다.

## 4.2. 전로 작업별 최대 AE신호

전로가 첫물을 만들어내는 공정은 Fig. 10과 같이 7개의 작업공정(work)로 구성되어 있다. 전체 7개 과정 중 세 번째의 분취(blowing) 과정에 소요되는 시간이 전체시간의 3/4을 차지하는데, 이 시간 동안은 베어링이 틸팅하지 않으므로 AE파가 발생되지 않는다. 이는 예비시험에서도 확인된 사실이다. 따라서 본 논문에서 제시하는 결과는 이 구간을 제외한 나머지 6개 과정에 대한 결과만을 제시하고자 한다.

아래의 Fig. 11에 보인 시간신호는 각 과정에서 측정된 자료 중 진폭이 가장 큰 구간만을 선택하여 나타낸 결과이다. 데이터 취득주기(sampling interval)

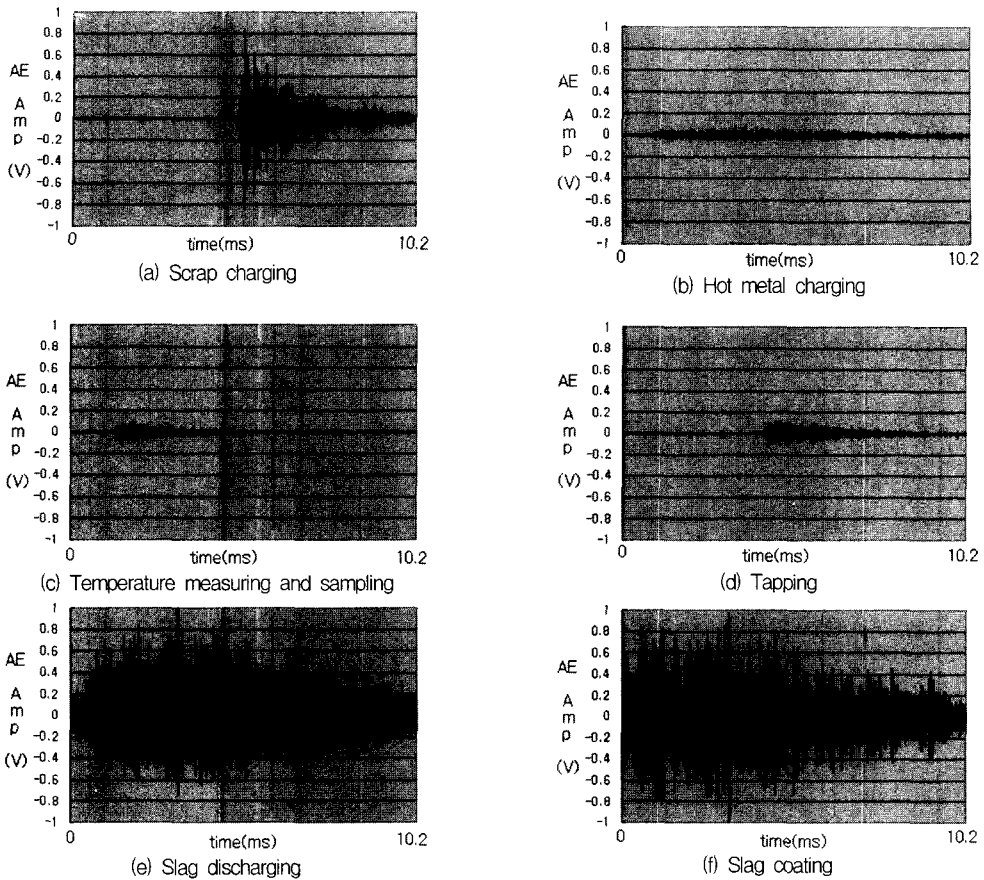


Fig. 11. AE signal for each work

는 10ms으로 결정하였으며, 전치증폭기의 이득은 40dB(100배 증폭)로 설정하였다. 예비 현장시험에서 취득주기를 1 $\mu$ s으로 설정하여 시험을 수행하였는데, 이 경우 하나의 음향방출계수(AE event)가 지속되는 동안의 신호를 연속해서 나타내지 못하고 신호 중간에 단속구간이 존재하는 것을 확인하였다. 이는 베어링 틸팅 시 발생하는 AE파의 지속시간이 길기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 하나의 취득주기 내에 하나의 event가 포함되도록 취득주기를 결정하였다.

베어링이 틸팅할 때는 전형적인 AE신호가 수신되는 것을 알 수 있다. 이 AE신호의 발생원인은 결합의 성장에 의한 것과 롤러와 외륜 사이의 유막과 피에 의한 고체와 고체 사이의 마찰에 의한 것으로 생각되어질 수 있다. 실험을 수행한 전로의 경우 최근에 정비를 수행하였기 때문에 내부에 결합이 발생하지 않은 것으로 생각하면, 유막과피에 의한 고

체-고체 마찰이 AE발생의 원인인 것으로 판단된다.

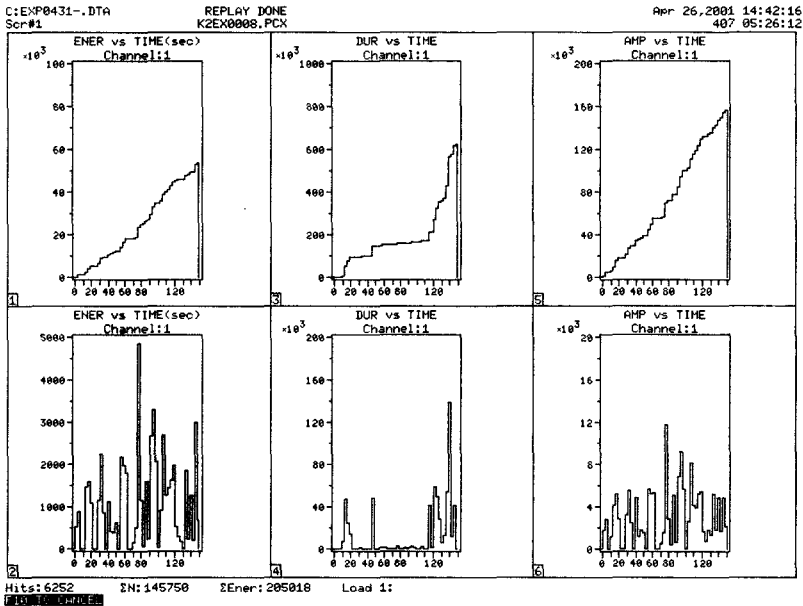
마찰 및 마모, 누설, 기포 발생 등은 표면에서의 변화이므로 일종의 가짜발생원(pseudo source)이나 실제로 이를 이용하여 진단하고 평가하는 방식이 음향방출의 그것과 매우 유사하므로 흔히 발생원으로 간주한다. 전로베어링의 결함은 주로 플레이킹(flaking)에 의한 박리현상에 의해 발생하는데 이는 마모가 주원인이다. 따라서 초기 마모에 의한 마찰 현상부터 박리가 발생한 이후의 결함에 의한 AE신호를 체계적이고 지속적으로 측정하여 경향관리(trend analysis)를 수행하면 극저속, 대형베어링의 진단관리를 수행할 수 있을 것으로 생각된다.

그림에 보인 데이터는 각 작업구간별로 가장 진폭(peak-to-peak)이 큰 AE신호를 그린 것이다. 그림에서 틸팅각이 큰 1) Scrap charging, 6) Slag discharging 7) Slag coating 시의 진폭수준이 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 일반적으로 진폭이 크면

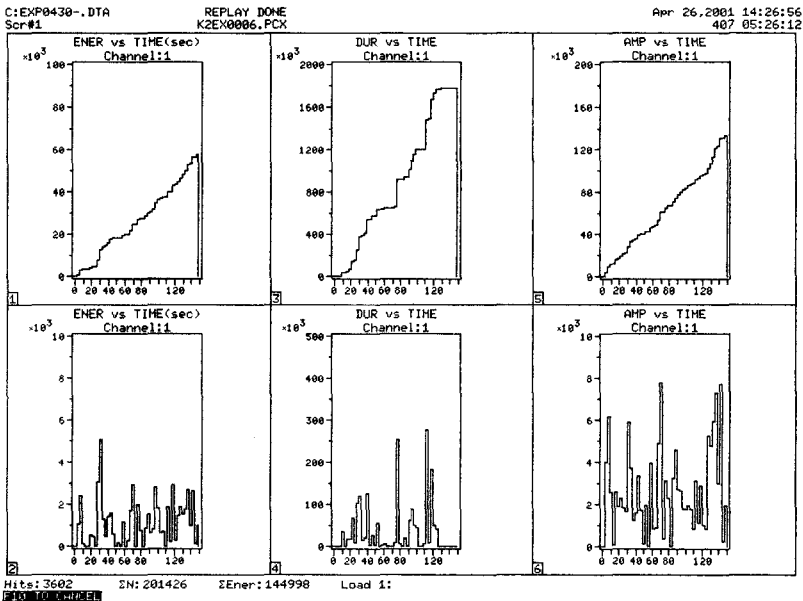
지속시간도 길게 나타나는 것도 알 수 있다. 이 중 7) Slag coating 시의 AE신호의 진폭이 가장 크고 지속시간도 길게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 이 작업구간의 텀팅 각 변화가 가장 심하고, 회전방향의 역전도 자주 발

생하기 때문으로 생각된다. 따라서 이 작업구간을 감시대상 작업공정으로 선정하여 진폭변화의 추이를 관찰하면 결함의 발생 및 성장 여부를 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

그러나 위에서 제시한 결과는 10.2ms 동안 측정



(a) Scrap charging



(b) Slag coating

Fig. 12. AE event analysis



한 데이터로 각 작업공정을 대표하는 신호라고 해석할 수 있지만 각 작업공정 별로 짧게는 1분에서 길게는 4분 여 동안 발생하는 모든 AE신호를 포괄적으로 표현한다고는 할 수 없다. 따라서 음향방출 신호분석 방법 중 누적데이터(cumulative data) 관리 기법을 동원하여 1개의 작업공정 내의 모든 신호를 1개의 그래프에 표현하고 관리하는 방법이 필요하다고 할 수 있다. 음향방출계수(AE event)를 표현하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 진폭과 지속시간, 그리고 진폭과 지속시간의 곱으로 표현되는 AE에너지를 대표신호로 선정하여 분석하였다.

전체적으로 진폭 및 지속시간이 작았던 2) Hot metal charging, 4) Temperature measuring and sampling, 5) Tapping, 그리고 티핑 구간이 짧은 6) Slag discharging 구간은 제외하고, 첫 번째 작업인 1) Scrap charging과 마지막 작업인 7) Slag coating 구간에 대한 결과만 여기서 제시하고자 한다. 이에 대한 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

그림에서 위쪽은 누적신호이고 아래쪽은 순간신호이다. 첫 번째 작업인 1) Scrap charging의 경우 순간적으로 진폭이나 지속시간이 크게 나타나도 전체적인 누적신호는 작게 나타나는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는 지속시간 신호의 중간 부분에 신호가 발생되지 않는 구간이 존재하여 전체적인 에너지 수준이 높게 나타나지 않기 때문이다. 마지막 작업인 7) Slag coating의 AE에너지 수준은 상대적으로 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 7) Slag coating 시의 티핑각도 변화가 가장 심하고 작업시간도 가장 길기 때문인 것으로 분석된다.

이상의 결과로부터 마지막 작업인 7) Slag coating의 AE신호를 측정하고 위의 진단로직을 적용하여 데이터를 가공한 다음, 누적에너지, 지속시간, 진폭 신호의 경향을 시간별, 날짜별로 관리하면 극저속 초대형 베어링의 결함이나 윤활의 불량, 이물질의 혼입 등에 대한 정보를 분석할 수 있을 것으로 생각된다.

## 5. 결론

극저속 대형회전체인 전로베어링의 파손원인을 분석하고, 초음속 탄성파를 이용하여 대형회전체의 이상을 진단할 수 있는 장치를 개발하고, 실제 현장에 적용하여 효율성을 평가하였다.

전로베어링이 파손된 원인은 여러 가지를 추론해 볼 수 있지만 본 연구의 결과, 설치작업 불량 또는 T/R의 열변형에 의해 축이 변형된 상태에서 베어링이 티핑할 때, 내륜의 축방향 유동에 의해 발생하는 롤러의 끼임 현상이 주원인임을 입증하였다. 베어링에 대한 유한요소해석 결과, 롤러의 끼임 현상이 심해질수록 하중의 편중이 커지게 되어 외륜과 롤러 사이의 접촉부에서 접촉응력이 증가하게 되고, 반복적으로 이런 현상이 되풀이되면 피로에 의한 균열이 발생할 가능성이 있음을 확인하였다.

전로가 한 번 쇳물을 끓여내는 과정은 7개의 작업공정으로 구성되는데, 이 중 티핑각의 변화가 심한 Slag Coating 시의 AE신호 진폭 및 지속시간이 가장 크게 나타남을 확인하였다. 이로부터 이 작업공정의 AE신호를 측정하고 경향을 분석하면 베어링의 결함이나 윤활불량, 이물질의 혼입 등에 의한 정보를 분석할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 1) G.A. Ratcliffe, "Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using the Envelope Technique," Proc. I Mech. E Seminar on Machine Condition Monitoring, 1992.
- 2) R.B. Randall and J. Hee, Cepstrum Analysis, Digital Signal Analysis, Bruel and Kjaer, Chapter 11, 1985.
- 3) R.A. Gopinath and C.S. Burrus, "Wavelet Transform and Filter Bank," Wavelets-A Tutorial in Theory and Application, pp. 603-644, 1992.
- 4) 佐藤茂外 3人, 1992, "歪みげーじによる 低俗回傳 設備診斷の技術開發," 일본 Plant Engineering, pp. 423-432, 1992.
- 5) 井上紀明, 實踐 振動法による 設備診斷, Acoustic Emissionによる 診斷, 10장, 1998.
- 6) J.Y. Jong, "Acoustic Emission Analysis System for Diagnosis of Machinery," NASA Technical Note, MFS31468, 2000.
- 7) M. Dave, "Early Warning Fault Detection in Rolling Element Bearing Using Microlog Enveloping," SKF Application Note CM3021, 1996.
- 8) M. Huang etc., "Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research," Nondestructive Evaluation, pp. 624-635, 1998.
- 9) M. Dave, Bearing Reliability in Centrifugal

- Pumps, Randall Publishing, 2001.
- 10) D.E. Bray and D. McBride, "Nondestructive Testing Techniques," John Wiley & Sons, Chapter 12, 1992.
- 11) 유현일, 기계설계공학, 동명사, pp. 301- 334, 1999.