

음향방출을 이용한 저어널 베어링의 조기파손감지(I) - 베어링 손상 형태별 감지능력 및 측정기술 -

윤동진*, 권오양*, 정민화**, 김경웅***

* 한국표준과학연구원 소재특성평가센터

** 한전기술연구원 전력연구실

*** 한국과학기술원 정밀공학과

요약 일반적으로 구름 베어링 시스템에 비해 발전용 터어빈이나 내연기관 엔진과 같은 저어널 베어링을 가진 시스템은 상대적으로 대형 설비이거나 더 가혹한 운전조건에서 가동되는 경우가 많다. 이런 회전기계류에서의 베어링의 파손은 설비의 운전 중단 및 관련 설비의 파손까지도 초래할 수 있게 된다. 따라서 이로 인한 보수에 소비되는 시간 및 경제적인 손실등을 피하기 위해서는 저어널 베어링의 조기파손 감지의 역할은 매우 중요하게 된다. 본 연구에서는 음향방출 기술을 이용하여 베어링에서 발생할 수 있는 파손의 조기검출을 위해 실험실용으로 직접 제작한 저어널 베어링 시스템을 이용하여 여러 형태의 비정상 조건을 만들어 가며 실험을 행하였다. 베어링 손상 및 피로의 주요인으로는 윤활유 부족, 윤활층에의 이물질의 혼입, 조립 불량등이 대표적인 원인으로 알려져 있으며 이에 근거하여 실험 조건을 윤활유에의 이물질 혼입, 윤활유 부족, 그리고 축과 베어링간의 금속간 접촉등의 인위적인 형태로 구성하여 실험하였다. 그 결과로서 음향방출 기술이 저어널 베어링의 조기파손 감지에 매우 효과적인 도구라는 것을 입증하였다.

1. 서론

최근 많은 설비에 있어서 기계류의 상태 진단은 설비의 중요도 및 특수성을 고려할 때 매우 중요한 비중을 차지하게 되며 그에 대한 관심이 날로 증가하고 있는 실정이다. 특히 고장이나 비정상 운전등을 사전에 감지하여 대처함으로써 대형사고의 예방 및 유지보수의 경제적인 절감을 기대할 수 있게 된다. 이 중 발전설비나 우주항공 분야에서의 회전기계 부분은 그 역할이 매우 중요하게 되며 이에 대한 조기파손의 감지는 매우 중요하게 된다.

회전기계의 파손감지에 대한 연구는 특히 베어

링의 파손감지에 대해서는 지난 수십년간 많은 연구가 진행되어 왔으며¹⁾⁻³⁾ 구름(rolling element) 베어링에 대한 경우에는 진동해석 및 고주파 공진기술 등의 해석기술이 베어링의 조기파손 감지에 효과적인 기술로서 알려져 있으며 그 기술면에서도 상당히 발전된 상태라고 볼 수 있다.^{4),5)} 반면 저어널 베어링의 조기파손 감지의 경우에는 뚜렷한 진단기술이 현재 제시되지 않고 있는 실정이다.^{6),7)} 현재 윤활유의 온도측정, 진동해석 및 트라이블로지적인 관점에서의 몇몇 기술이 적용되고 있긴 하나 이들 방법은 대부분 베어링 부위에서의 손상이 어느 정도 상당히 전개된 후에야 비정상 징후를 나타내

게 된다.

그러나 본 연구에 적용하게 되는 음향방출(Acoustic Emission : AE) 기술은 그 특성상 결합이나 금속간 마찰의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석하기 때문에 상대적으로 조기탐지에 유리한 점이 있다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 음향방출을 이용하여 저어널 베어링에서의 조기파손 감지에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 실험실용 모의 저어널 베어링 시스템을 제작하였으며 여러 형태의 운전조건 및 윤활조건에 대한 음향방출 결과와 베어링에서의 파손형태와의 관계를 고찰하였다. 또한 실제 베어링에서 손상에 영향을 주는 주요 요소로 알려진 윤활층에의 외부 이물질의 침입, 불충분한 윤활 등에 실험의 초점을 맞추었다.

2. 실험

2.1. 실험 장치

본 실험을 위하여 실험실용 모의 저어널 베어링 시스템을 설계 및 제작하였으며 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 시스템은 크게 나누어 회전 축 및 시험 베어링부, 이를 구동하는 모터 구동부, 하중을 가하는 공압 실린더부 그리고 회전속도 및 하중을 제어하는 제어부로 나눌 수 있다. 윤활유의 공급은 펌프로서 공급한 후 다시 순환될 수 있도록 하였으며 열전대를 사용하여 윤활유 및 베어링의 온도를 각각 측정하도록 하였다.

베어링 시스템에서 가변할 수 있는 회전속도는 60-2000rpm까지 가능하며 하중은 최대 2ton까지 가할 수가 있다. 사용된 베어링은 자동차용 엔진에

사용되는 메인베어링으로서 내경과 폭이 각각 60.0 mm와 49.0mm인 copper-lead alloy metal로 이루어져 있다.

AE 계측은 AET5500 시스템을 사용하였으며 RMS voltmeter(HP3400)와 디지털 오실로스코프를 사용하여 각각 AE rms값 측정 및 주파수 분석을 행하였다. 사용된 센서는 550kHz에서 -60dB(ref. 1V/ μ bar)의 최대감도를 갖는 광대역형 센서이며 (WD, PAC), 프리앰프에서는 60dB의 증폭과 2MHz low plug-in filter를 사용하였다.

2.2. 실험 방법

본 실험에서는 하우징에 조립된 메탈베어링과 저어널 사이의 윤활층에 의한 정상적인 운전조건으로부터 과부하나 윤활유 부족 또는 이물질 침입등의 비정상 상태를 만들어 모의 실험을 하는 것이므로 하부 베어링과 윤활유 출구부의 온도를 열전대를 사용하여 측정하고 또한 저어널과 베어링간의 금속간 접촉을 확인하기 위하여 전기저항법을 사용하였다. 센서는 하부베어링에 약간의 평면을 만들어 부착하였으며 회전속도는 inverter로 조절하고 타코메터로써 실측하였다. 하중은 로드셀 indicator에서 원하는 값으로 설정한 후 실험을 하였다.

실험의 종류는 크게 두가지로 나누어 윤활유 부족에 의한 각 운전 조건별 특성과 외부 이물질 침입의 영향에 대한 특성을 조사하였다. 구체적인 실험 방법 및 조건은 다음과 같다.

윤활유 부족에 의한 영향 : 각 운전조건에서 윤활유 공급 도중 윤활유 주입을 중단

- a) 440kgf, 200rpm : Test 1
- b) 1000kgf, 200rpm : Test 2
- c) 440kgf, 1000rpm : Test 3

외부 이물질 침입의 영향 : 정상 윤활상태에서 윤활유 공급 입구에 이물질을 주입

(공통 운전조건 : 30kgf 및 120rpm)

- a) Machined steel chip(200 μ m-1mm)Test 4
- b) 연삭 슛들 입자 삽입(20-200 μ m)Test 5

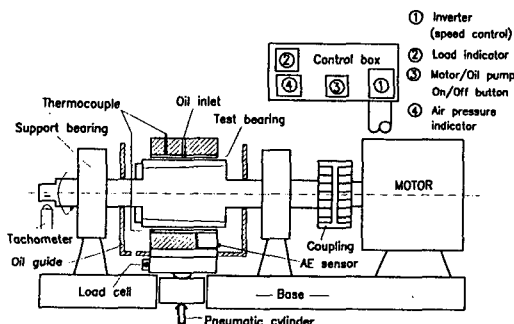


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

3. 결과 및 고찰

3.1. 윤활유 부족에 의한 영향

일반적으로 정상적인 동압베어링의 유체윤활 상태에서는 베어링과 축 사이에 윤활층이 존재하여 두 면 사이의 윤활역할 및 저어널을 지지하는 역할을 하게 된다. 그러나 만약 윤활이 부족하게 되면 윤활층이 파괴되는 동시에 상대운동 면에서의 금속간 접촉이 발생하게 되며 이것은 시스템의 회전운동에 의한 noise source에 참가하여 음향방출 신호 변화

의 원인이 되게 된다.

Fig. 2(a)에서는 Test 1 운전조건에서의 윤활유 부족 영향에 의한 AE rms 전압을 나타내고 있다. 상대적으로 저 하중 저속에서의 영향을 고찰한 것으로서 정상운전 후 6분경에 윤활유의 중단으로서 AE rms 값이 증가하기 시작함을 볼 수 있으며 기존 존재하던 윤활유의 점차적인 고갈로 인해 약간의 기울기를 가지며 증가하고 있다. 그리고 나서는 거의 특이한 변화없이 일정한 값으로 완만하게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이는 두 면 사이에 윤활제가 존재하는 경계윤활 상태에서의 마모 실험과 비슷한 상황으로 볼 수 있으며 저속 및 저하중에 의한 매우 완만한 마모 추이를 나타낸다고 볼 수 있다.

반면, Fig. 2(b)에서는 Test 2 운전조건에서의 윤활유 부족 영향에 의한 AE rms 전압을 보여주고 있는데 앞의 경우보다 초기 윤활유 고갈에 의한 AE rms 값의 증가가 상대적으로 매우 급격해졌으며 이는 상대적으로 고하중에 의한 영향으로 두 면간의 접촉이 급격히 진전된다고 볼 수 있다. 이 경우에는 시간이 감에 따라 점진적인 rms 값의 증가를 보이다가 윤활유 중단 약 30분경부터는 급격한 증가를 보이며 큰 변화가 있음을 나타내고 있다. 이는 고하중에 의해 앞의 경우보다 더 빨리 마모의 정도가 심해졌음을 알 수가 있다. 이 사실은 실험 후 관찰된 베어링 표면에서의 마모 상태로서 입증이 되며 Photo. 1(a)에서와 같이 베어링 표면에서 국부적으

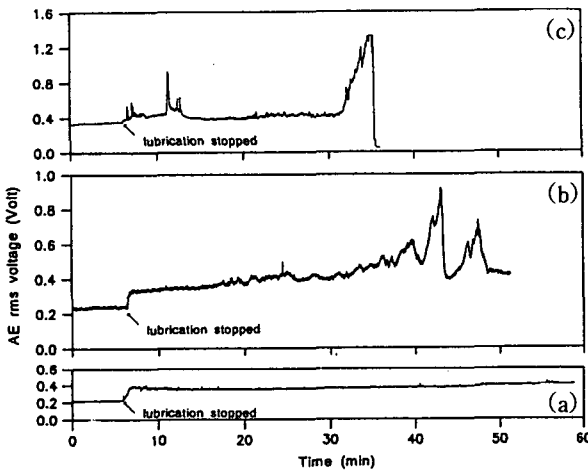
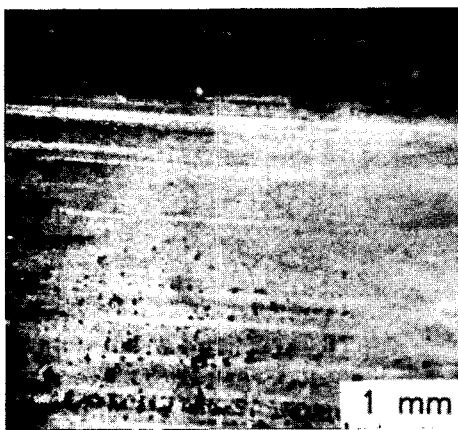
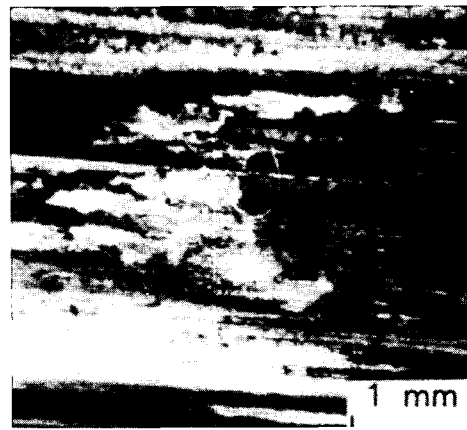


Fig. 2. AE rms voltage vs. time curves at various operating conditions.

(a) Test 1, (b) Test 2 and (c) Test 3



(a)



(b)

Photo 1. Photographs of damaged bearing surfaces observed posthumously

(a) Test 2 and (b) Test 3.

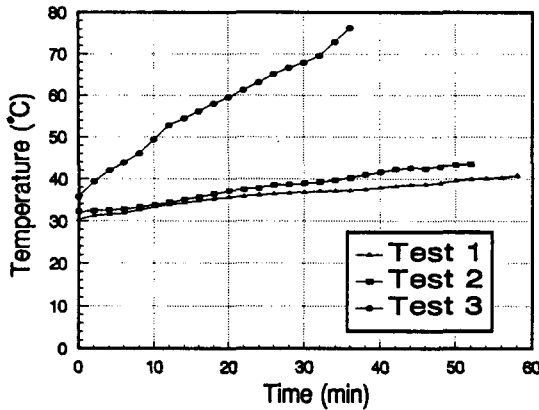


Fig. 3. Temperature changes vs. time in the metal bearing for each Test

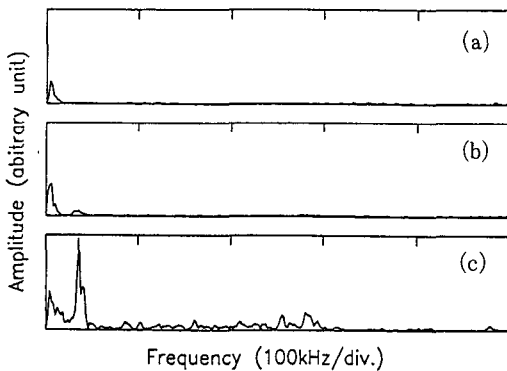


Fig. 4. Frequency spectra of signals detected at (a) starting point of Test 1, (b) after transient of Test 1, (c) after 40 minutes of Test 2

로 lead-tin coating 층이 벗겨진 상태를 볼 수 있었다.

Fig. 2(c)에서는 Test 3 운전조건에서의 윤활유 부족 영향에 의한 AE rms 전압을 보여주고 있다. 이 경우에는 상대적으로 저하중 고속회전에 의한 영향을 관찰한 것으로서 AE rms 값에서 나타난 바와 같이 하중에 의한 영향보다는 회전수가 증가함에 따라 AE rms 값의 증가는 물론 베어링의 손상에도 큰 영향을 미쳐 표면이 심하게 마모됨을 볼 수도 있었다. 즉 윤활유 고갈이 시작되자마자 심한 마모 현상을 나타내었으며 25분 뒤에는 상당히 큰 AE rms 값을 보여주면서 몇 분간 증가하다가 시스템의 회전이 중단하게 되었다. 이 당시 베어링의 온도는

거의 80°C까지 이르렀으며 고온의 영향으로 회전이 무리가 간 것으로 판명되었다. Fig. 3은 각 실험에 대한 베어링에서의 온도 변화를 나타낸 것이며 앞의 두 경우에 비교하여 베어링의 온도가 급격히 증가함을 보여주고 있다. 실험 후 베어링의 표면은 매우 심하게 마모된 상태였으며 copper lining 층이 노출되어져 있었다. 또한 이부분은 seizure 현상과 같이 고온에 의해 점계탄 모습으로 되어있었으며 이에 대한 손상된 베어링의 표면을 Photo 1(b)에 나타내었다.

전체적으로 AE rms level의 변화는 운전조건이 가혹하게 됨에 따라 심한 마모 현상이 더 일찍 당겨지게 됨을 볼 수 있는데 이는 Test 2의 전체 부분이 고속 회전이 됨에 따라 두 면간의 상대 이동거리가 길어진 만큼 그 현상이 앞당겨져 Test 3의 AE rms 결과의 앞부분에 나타나는 현상과 유사한 결과라고 생각할 수가 있다. 따라서 Test 1의 경우에는 이 현상이 시간이 많이 경과한 한참 뒤에야 나타날 것으로 추측할 수가 있다.

본 실험에서는 추가적으로 AE 신호의 파형과 주파수 분석을 통하여 각 실험 조건에서의 베어링 마모 현상을 고찰하여 보았다. Fig. 4는 정상적인 운전 조건일때와 윤활유 부족에 의한 베어링과 저어닐간의 금속접촉에 의해 발생한 AE 신호의 주파수 스펙트럼의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)는 Test 1에서의 정상적인 운전시 발생한 신호의 스펙트럼을 보여주며, 반면 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)에서는 각각 Test 1과 Test 2에서의 윤활유 부족시에 발생한 신호의 스펙트럼 내용이다. 그림에서 보는 바와 같이 고 하중이나 고속 회전수로 감에 따라 약 35kHz에서의 peak와 100-300kHz 정도의 범위에서 주파수 성분이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이는 마모상태의 변화와 더불어 주파수 성분이 다른 요소가 발생되고 있음도 알 수 있었다. 결과적으로 베어링과 축간의 마모의 정도 또는 손상의 정도에 따라 발생 신호의 주파수 성분이 정상일때와는 다르게 나타나는 정보를 얻을 수 있었다. 즉 rms 전압의 변화와 더불어 이 주파수 스펙트럼 분석은 저어닐 베어링에서의 손상 정도를 확인할 수 있는 효과적인 도구로서 사용될 수 있다고 판단되었다.

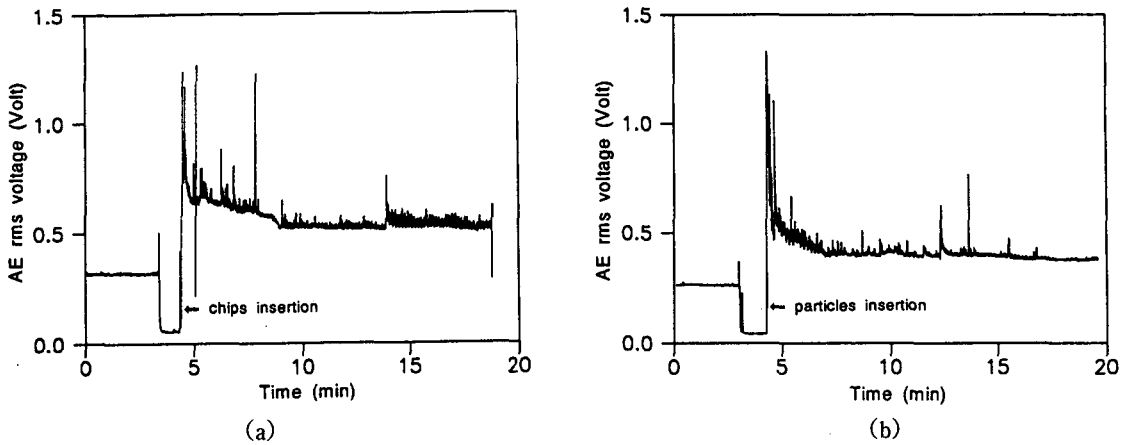


Fig. 5. AE rms voltage vs. time curves due to the introduction of (a) steel chips and (b) corundum particles

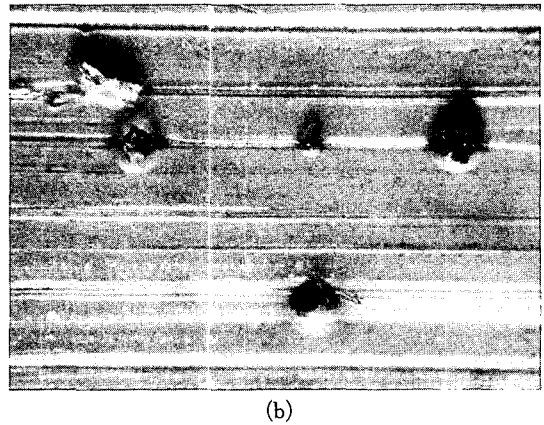
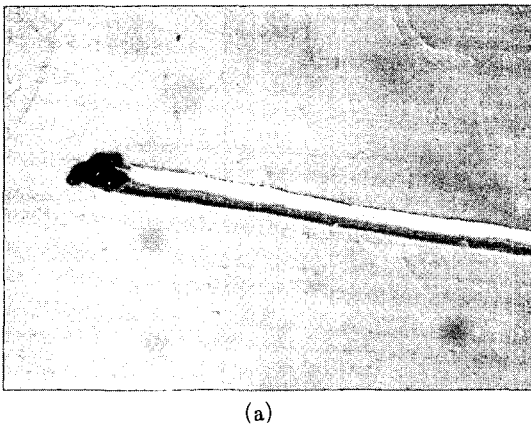


Photo 2. Photographs of damaged bearing surfaces due to (a) embedded steel chips and (b) settled and movable ceramic particles

3.2. 외부 이물질의 침입에 의한 영향

일반적으로 엔진 저어널 베어링의 손상 원인으로서는 축정렬불량이나 조립불량의 원인에 의한 것도 많으나 대부분 베어링과 축 사이의 윤활층내의 이물질 침입에 의한 것으로서 조사 분석되고 있다. 즉 모래나 금속 칩 등이 처음 제작시나 조립시 충분히 제거되지 않게 되거나 또는 운전중에 축이나 베어링에서 분리된 이물질이 발생할 수 있게 된다. 따라서 베어링 라이닝과 축 표면으로부터 박리된 미세 입자들의 경우에는 abrasive 마모를 유발하는 경우가 있게 되며 베어링 메탈에 묻히기 어려운 정도의 큰 입자들의 경우에는 베어링과 축 표면에 흠집을

내게 될 수도 있다.⁸⁾

Fig. 5에서는 두 종류의 외부 이물질의 침입에 의한 AE rms 전압의 영향을 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 Test 4의 운전조건에서의 기계가공시 발생하는 금속칩을 운전중에 넣었을 때의 결과를 나타내며 칩이 주입되는 순간부터 AE rms 값이 불규칙한 양상으로 매우 증가하고 있으며 약 5분 경과후에는 거의 안정된 모습으로 유지하고 있음을 볼 수 있다. 이는 초기에는 금속 칩들이 주입되면서 많은 큰 AE 신호를 발생시키다가 이들 칩들이 베어링 표면에 박히거나 안주하면서 어느 정도 안정된 rms값을 나타낸다고 볼 수 있다. Photo 2(a)는 실험후에 광학현

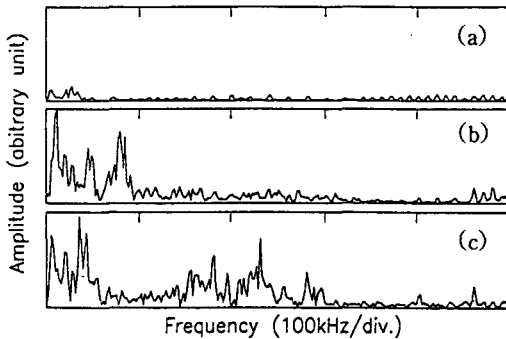


Fig. 6. Frequency spectra of signals detected (a) at starting point of Test 5, (b) from Test 4 after steel were chips introduced, (c) from Test 5 after ceramic particles introduced

미경으로 관찰한 것으로서 베어링 표면에 박힌 칩과 칩에 의한 마모 트랙의 전형적인 모습을 보여주고 있다. Fig. 5(b)는 위와 같은 운전조건에서의 모래류의 연삭 입자를 운전중에 윤활층 속에 주입한 경우 (Test 5)의 결과를 나타내며 금속칩을 주입했을 때와 거의 비슷한 양상을 보여주고 있다. 금속칩 주입시에는 안정된 부분에서 낮고 빈번한 rms level의 변화가 안정된 부분에서 간헐적으로 불규칙한 peak를 나타내고 있었다.

이는 연삭 입자의 경우에는 금속칩의 경우와는 달리 베어링 표면에 일찍 안주하지 않고 미끄러지거나 계속 움직이기 때문으로 생각된다. 이에 대한 것은 Photo 2(b)에서 보여지며 입자들의 운동에 의한 트랙과 이동 가능한 입자들을 볼 수가 있다.

즉 이물질 주입의 경우에는 초기 주입시의 불규칙한 AE rms level의 변화가 시간이 지나면서 안정되는데 이는 이물질의 일부가 윤활유와 함께 빠져나가기도하고 일부는 사진에서와 같이 베어링 표면에 박히거나 안주하면서 계속적인 abrasive 마모를 일으키게 되는 결과라고 말할 수 있다.

Fig. 6은 앞의 두 실험에서 발생된 AE 신호에 대한 주파수 분석의 결과를 나타낸다. 두 경우 모두 이물질을 주입하였을 경우 스펙트럼의 변화에서 뚜렷한 차이를 볼 수 있었으며 35kHz부근의 peak는 두 경우 모두 발생하며 금속칩의 경우 80kHz 부근에서 그리고 연삭 입자의 경우는 200kHz 부근에서 각각 고주파수 성분이 뚜렷이 나타나고 있음을 알

수 있다. 따라서 이들 정보로부터 AE rms level 변화에 의한 이물질 침입의 조기감지는 물론 추가적으로 발생 신호의 주파수 분석을 통해 결함의 특성을 고찰하는데도 도움이 될 것으로 생각된다.

4. 결 론

저어널 베어링의 조기파손 감지 및 베어링 손상의 과정에 대한 분석을 음향방출 기술을 이용하여 수행하였다. 베어링 손상 조건으로서 윤활유 부족 및 외부 이물질 침입의 두 형태의 손상 메커니즘을 적용하였으며 그에 따른 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 음향방출 기술은 저어널 베어링 파손의 조기감지에 유용하며 효과적인 도구이다.
2. AE rms voltage는 윤활층에서의 금속간 접촉이나 이물질 혼입에 기인한 베어링 손상의 상태를 감지할 수 있는 효과적인 indicator이다.
3. 주파수 스펙트럼에서의 변화는 저어널 베어링에서의 손상상태를 검증할 수 있는 추가적인 정보를 가지고 있다.

참 고 문 헌

- 1) H. L. Balderston, *Materials Evaluation*, Vol. 27 (1969), pp. 121-128
- 2) D. R. Harting, *ISA Trans*, Vol. 17(1978), pp. 35-40
- 3) L. M. Rogers, *Tribology International*, April(1979), pp. 51-59
- 4) D. Dyer, and R. M. Stewart, *J. of Mechanical Design*, Vol. 100(1978), pp. 229-235
- 5) P. D. McFadden, and J. D. Smith, *Tribology International*, Vol. 17(1984), pp. 3-10
- 6) I. sato, T. Yoneyama, S. Sasaki, and T. Sazuki, *J. of Acoustic Emission*, Vol. 2(1983), pp. 1-10
- 7) M. Wada, M. Mizuno, and T. Sasada, *Japanese Society of Precision Engineering*, Vol. 56(1990), pp. 1835-1840
- 8) H. E. Boyer, *Metals Handbook 8th ed.*, Vol. 10, pp. 397-415, American Society for Metals, Cleveland, OH, (1976)

Acoustic Emission Monitoring of Incipient in Journal Bearings

— Part I : Detectability and measurement for bearing damages

Dong Jin Yoon*, Oh Yang Kwon *, Min Hwa Chung ** and Kyung Woong Kim***

* Korea Research Institute of Standards and Science

** Research Center, Korea Electric Power Corporation

*** Precision Engineering Dept. KAIST

Abstract In contrast to the machineries using rolling element bearings, systems with journal bearings generally operate in large scale and under severe loading condition such as steam generator turbines and internal combustion engines. Failure of the bearings in these machineries can result in the system breakdown. To avoid the time consuming repair and considerable economic loss, the detection of incipient failure in journal bearings becomes very important. In this experimental approach, acoustic emission monitoring is applied to the detection of incipient failure caused by several types of abnormal operating condition most probable in the journal bearing systems. It has been known that the intervention of foreign materials, insufficient lubrication and misassembly etc. are principal factors to cause bearing failure and distress. The experiment was conducted under such designed conditions as hard particles in the lubrication layer, insufficient lubrication, and metallic contact in the simulated journal bearing system. The results showed that acoustic emission could be an effective tool to detect the incipient failure in journal bearings.

(Received : January 22, 1994)