

## 음향방출을 이용한 저어널 베어링의 조기파손감지(II)

— 윤활유 이물질 혼입의 영향 및 감지 —

윤동진\*, 권오양\*, 정민화\*\*, 김경웅\*\*\*

\* 한국표준과학연구원 소재특성평가센터

\*\* 한전기술연구원 전력연구실

\*\*\* 한국과학기술원 정밀공학과

**요 약** 일반적으로 회전기기의 저어널 베어링 부분은 윤활유 공급의 부족이나 윤활층에 이물질이 혼입되면 시스템의 고장이나 가동중단 등의 원인이 되기도 한다. 따라서 베어링 손상에 기인하는 사고와 관련된 안전운전 문제와 유지비용의 절감을 위해 여러가지 파괴 및 비파괴시험법들이 사용되어 왔다. 본 연구에서는 저어널 베어링에서 가장 발생하기 쉬운 윤활층에의 이물질 혼입에 의해 야기되는 베어링 파손의 조기검출을 위해 음향방출 기술을 적용하였으며, 전보의 연구에 이어 좀더 정량적이고 체계적인 실험을 수행하였다. 실험실용으로 직접 제작한 모의 베어링 시스템을 이용하여 여러 형태의 인위적인 이물질 혼입 상태를 만들어 실험하였으며 베어링 손상 및 결함 형태의 해석을 위해 AE rms level, 파형분석, AE 변수 등의 여러 파라미터를 사용하여 분석 고찰하였다. 그 결과 AE rms level의 변화가 이물질 혼입의 영향에 민감함을 보여주었으며 AE 변수 등 다른 정보들로부터 손상 원인별로 신호형태를 확인할 수 있었다.

### 1. 서 론

대부분의 회전 기계에서는 정지 부위와 회전체 사이의 연결 매체로서 베어링이 존재하게 된다. 이 베어링의 역할은 회전체에서는 매우 중요한 부분이라 할 수 있으며, 사용 용도가 고속이거나 또는 설비 자체의 중요성이 클 때는 그 역할 및 손상에 대한 관심이 훨씬 더 크게 된다. 베어링의 종류에는 그 기능 및 사용 목적에 따라 여러가지가 있으나 일반적으로 크게 구름 베어링과 미끄럼 베어링으로 나누어 진다고 볼 수 있다. 구름 베어링의 경우에는 사용면에서 설치나 교환등이 비교적 손쉬운 편이므로 소형 및 저속, 저부하의 운전 조건을 가지는 회

전 기계류에 널리 사용되고 있다. 반면 미끄럼 베어링의 경우에는 대부분 설치 및 윤활유 공급이 구름 베어링에 비해 다소 용이하지 않은 점도 있으나 특히 회전 기계의 운전 조건이 고속, 대용량으로 가게 되면 이 베어링의 역할은 더 중요하게 된다. 즉 발전 설비나 우주 항공 분야에서의 회전기계 베어링의 역할은 매우 크게 되며, 이 베어링의 손상으로 인해 설비의 파손 및 경제적인 손실 또는 인명 피해 등 대형 사고를 유발하는 원인이 될 수 있으므로 이에 대한 조기 파손 감지는 매우 중요하다고 볼 수 있다.

베어링 손상 및 파손 감지에 대한 연구는 지난 수십년간 많은 연구가 진행되어 왔으나,<sup>1)~3)</sup> 저어

(접수 : 1994. 5. 2)

널 베어링의 경우에는 구름 베어링에 비해 상대적으로 연구나 논문의 발표가 매우 저조한 편이다. 기존의 진동 해석을 통한 연구에서는 대부분 회전체에 해당하는 로타나 회전체 일부분의 이상 상태를 진단하는 것이 많으며 베어링에 대한 것은 거의 찾아볼 수 없는 정도이다.<sup>4),5)</sup> 물론 베어링과 축 사이의 윤활층에서 발생하는 마모에 의한 마모 입자 검출에 관한 논문은 상당수 있으나 대부분 윤활유의 상태 감시로서 윤활유 속에 포함된 마모 입자(wear debris)를 검출하는 ferrography, SOAP(Spectrometric Oil Analysis Procedure), particle size analysis, filter analysis 방법등을 사용하여 이상 마모나 손상의 정보를 얻고 있다.<sup>6)-10)</sup> 그 중 저어널 베어링의 진단에 관한 연구 보고는 매우 드문 편이며 특히 이물질의 혼입에 대한 이의 응용은 거의 보고되지 않고 있는 실정이다.<sup>11)</sup> 이들 방법은 대부분 손상에 기인한 마모 입자를 사후에 분석하기 때문에 on-line monitoring에 의한 조기진단과는 본질적으로 차이가 많다고 할 수 있다.

본 연구에서 적용하고자 하는 음향방출(Acoustic Emission : AE) 기술은 그 특성상 결함이나 금속간 마찰의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석하기 때문에 상대적으로 손상의 조기탐지에 매우 유리한 점이 있으며 또한 센서를 원하는 부위에 부착하기만 하면 설비에는 거의 영향을 주지 않으므로 설치에 용이하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 음향방출 기술을 이용하여 저어널 베어링에서의 비정상 조건 및 손상을 조기에 탐지할 수 있는 기술의 개발을 위한 실험 및 분석을 하였으며 이를 위해 모의 저어널 베어링 시스템을 설계 제작한 후 여러 형태의 운전 조건 및 윤활 조건 그리고 이물질 혼입 등의 영향에 대해 고찰하였다. 본 논문에서는 전보<sup>12)</sup>에 이어 실제 베어링의 손상에 영향을 주는 주요 요소로 알려진 윤활층에의 이물질 혼입에 대한 고찰에 그 초점을 맞추었다.

2. 실험

2.1. 실험 장치

본 실험을 위하여 모의 저어널 베어링 시스템을 제작하였으며 시스템 구성은 이전 연구 발표<sup>12)</sup>의 것

을 참조 바라며 그와 동일한 시스템에서 실험을 행하였다. 여기서는 윤활유 공급에의 외부 이물질 혼입 방법 및 관련 주변 장치에 대해 주로 서술하고자 한다. 전반적인 모의 베어링 시스템 및 실험 장치의 구성에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 베어링과 축 사이에 공급되는 윤활유는 그림에서와 같이 윤활유 탱크로부터 유입된 후 윤활층을 통과한 후 다시 오일 탱크로 순환되도록 하였으며 미세 이물질의 적절한 섞임을 위해 교반기(stirrer)를 사용하였다. 이때 사용된 윤활유 순환 펌프는 인위적인 혼입 때문에 회전식이 아닌 피스톤식 정량 펌프를 사용하였다. 이물질의 순간 혼입을 위해서는 윤활유 공급 라인 입구쪽에 주사기를 사용하여 주입할 수 있도록 하며 빠져 나온 윤활유는 폐유통에 들어가도록 하였다.

AE 신호측정은 550kHz에서 -60dB(ref. 1V/ $\mu$ bar)의 최대감도를 갖는 광대역형 센서(WD : PAC)의 사용과 프리앰프에서의 60dB의 증폭 그리고 125kHz - 1MHz의 plug-in type band pass filter를 사용한 후 AET5500 시스템에서 처리하였다. AET5500 시스템에서는 AE 신호 취득 및 AE parameter에 대한 분석을 수행하였으며, AE 신호는 또한 디지털 오실로스코프(LeCroy 9400)를 사용하여 기록한 후 파형 및 주파수 분석에 사용하였고 AE RMS 값의 기록은 상용의 RMS voltmeter(HP3400A)를 사용하여 측정된 DC 출력을 X-Y 기록계에 기록하였다.

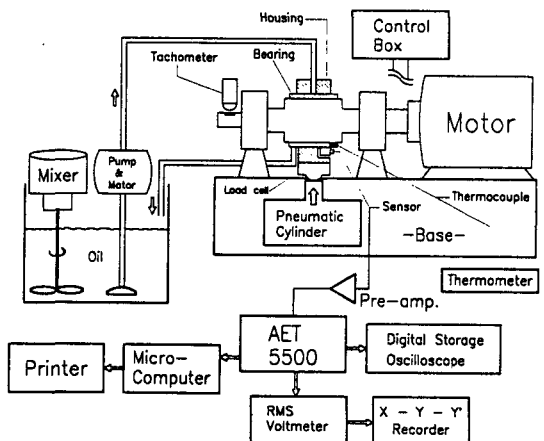


Fig. 1. Schematics of experimental apparatus of bearings and AE data acquisition

2.2. 최소유막두께의 이론적 계산

본 연구에서는 베어링 손상의 여러 형태를 인위적으로 만들어 가며 실험을 하게되므로 운전조건에 대한 베어링 윤활층의 정보를 알아야 할 필요가 있다. 특히 이물질 혼입 실험과 같이 혼입하고자 하는 이물질의 크기 선정에 있어서는 실험 대상 운전조건에서의 유막의 간극(oil clearance) 및 최소유막두께(MOFT: Minimum Oil Film Thickness)에 대한 정보가 반드시 필요하다고 할 수 있다.

유체윤활이론에서 사용되는 베어링 관련 변수들은 많으나 보통 Sommerfeld 수로 무차원화된 것을 이용하게 되며 이 값은 주어진 L/D 값과 편심율  $\epsilon$  과의 함수로써 나타낼 수 있게 된다. 따라서 이 Sommerfeld 수는 설계상에 중요한 변수로 사용되며 다음은 Sommerfeld 수의 정의와 그 변수들을 설명한다.

$$S = \frac{\eta D^3 L N}{4 W C^2}$$

S : Sommerfeld number

$\eta$  : Oil viscosity(Ns/m<sup>2</sup>)

D : Bearing diameter(m)

L : Bearing width(m)

N : Rotational speed of shaft(rpm)

W : Load(N)

C : Radial clearance(m)

그리고 윤활층내에서의 최소유막두께의 값은 정의에 의해 최대 편심율과 윤활간극과의 관계식으로 얻을 수 있으며 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$h_{min} = c(1 - \epsilon_{max})$$

즉 최대 편심율  $\epsilon_{max}$ 의 값이 정해지면 베어링 치수(L/D)에 해당하는 Sommerfeld 수가 구해지며 원하는 회전 속도의 변화에 따라 그에 따른 하중능력의 관계를 얻을 수 있다. Table 1은 이론 수치해석을 통해 얻은 결과의 하나로서 회전속도 200rpm의 경우에 대한 편심율, 최소유막두께, 그리고 하중능력간의 관계를 보여주고 있다.

따라서 본 연구에서는 최소유막두께의 값을 15 $\mu$ m

로 유지하기위해 운전조건을 각각 회전속도 200rpm 및 하중 1322N(약 130kgf)으로 설정하였으며 회전속도가 바뀌는 경우에는 최소유막두께의 값을 일정하게 유지하기 위해 그에 따른 하중을 설정하여 실험을 하였다. 즉 600rpm의 경우에는 약 400kgf의 하중을 적용하게 된다.

Table 1. Relationship between parameters at 200 rpm

Eccentricity	$h_{min}(\mu m)$	Load capacity(N)
0.900	20.0	923.35
0.905	19.0	983.67
0.910	18.0	1052.42
0.915	17.0	1131.50
0.920	16.0	1223.44
0.925	15.0	1322.64
0.930	14.0	1428.83
0.935	13.0	1566.00
0.940	12.0	1717.11
0.945	11.0	1919.12
0.950	10.0	2151.10
0.955	9.0	2416.67
0.960	8.0	2757.04
0.965	7.0	3209.02
0.970	6.0	3838.24
0.975	5.0	4774.39
0.980	4.0	6117.19
0.985	3.0	8156.25
0.990	2.0	13050.00
0.995	1.0	27964.29

2.3. 실험 방법

앞에서 설명한 모의 베어링 시스템에서 실험 베어링중 하부 베어링의 뒷면을 센서를 부착하기 쉽게 일부를 평면으로 가공한 후 센서를 부착하였으며 윤활유의 공급은 상부 베어링의 중앙으로 공급되어 베어링의 원주 방향으로 급유 흡을 따라 전체 베어링에 공급되는 형태로 되어있다. 회전속도는 control box 내의 inverter로부터 조절이 가능하나 실제의 회전속도를 측의 끝단에 있는 속도계(tachom-

eter)를 사용하여 측정 확인하였으며, 하중 조절은 공압 실린더를 조절하는 레귤레이터(regulator)를 사용하여 원하는 하중으로 설정한 후 실험하였다.

본 연구에서는 베어링과 축 사이의 이물질 혼입에 대한 영향을 고찰하기 위해 혼입하는 이물질 ( $Al_2O_3$  particles)의 크기, 혼입 농도, 혼입 방법의 세 가지로 크게 분류하여 실험을 행하였다. 그리고 이들 각각에 대해 운전조건(회전속도 및 하중)을 달리하는 형태로 실험을 구성하였다. 즉 이물질 입자의 크기는 앞에서 계산한 최소유막두께를 기준으로 선정하였다. 즉, 본 실험에 해당하는 운전조건의 경우 이론적으로 계산하여 얻은 최소유막두께는 15  $\mu m$ 였으며 이값을 기준으로 하여 이 값보다 작은 입자 0.1 $\mu m$ , 1 $\mu m$ , 8 $\mu m$ 의 세가지와 이 값보다 큰 입자 38 $\mu m$ 의 네가지 입자 크기를 선정하였다. 혼합 농도는 오일량에 대비하여 100ppm(0.01%), 1000ppm(0.1%), 5000ppm(0.5%)의 세가지 양을 교반기를 사용하여 윤활유에 섞은 후 공급하였다. 또한 운전조건으로서는 이들 각각의 조건에 대해 200rpm/130kgf 및 600rpm/400kgf의 두 종류로써 상대적인 저속 및 고속 회전에 대해 실험을 하였다. 각 속도에 대해 하중조건이 다른 것은 동일한 최소유막두께를 유지하기 위한 것이며 계산에서 얻어진 조건들이다. 전체적인 실험 종류 및 형태를 Table 2에 요약하여 나타내었다.

Table 2. Summary of contaminations and operating conditions

size( $\mu m$ )	series conc. (%) speed (rpm)	1. Injection		2. Addition	
		*	0.01	0.1	0.5
0.1	200	○	○	○	—
	600	○	○	○	—
1	200	○	○	○	○
	600	○	○	○	—
8	200	○	○	○	○
	600	○	○	—	—
38	200	○	○	—	—
	600	○	○	—	—

\* 0.15cc/min injected into 140~150cc/min lubricant

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 입자 크기에 대한 영향

이론식에 근거하여 계산된 베어링과 축 간의 간극이 200rpm/130kgf의 운전조건인 경우 최소유막두께가 15 $\mu m$ 이므로 이 값을 기준으로 하여 네가지의 입자 크기에 대해 고찰하였다. 즉 200rpm/130kgf의 운전조건하에서 알루미늄 입자의 크기가 각각 0.1 $\mu m$ , 1 $\mu m$ , 8 $\mu m$ , 38 $\mu m$  인 네 종류의 이물질을 주입하였으며 주입 방법으로는 정상적인 운전상태에서 베어링의 윤활유 공급 입구부근에서 이물질이 혼합된 오일이 들어있는 주사기를 사용하여 평균 0.15cc/min 정도의 양을 수 분간 주입하도록 하였다. 이 때 공급되는 윤활 유량은 140~150cc/min 이었다.

Fig. 2는 이들 네가지 크기의 알루미늄 입자를 주입했을 때의 시간에 대한 AE rms level을 보여주고 있다. 각각의 그림에서 표시된 바와 같이 초기의 rms level은 정상 운전시의 BGN(background noise) 값에 해당하며 화살표로 표시된 순간부터 주입이 시작되었음을 나타낸다. 또한 주입의 중단도 역시 화살표로 표시하였다. 대부분 5분 정도의 주입을 시도하였으며 전체적으로 입자의 크기에 대해 많은 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다. Fig. 2(a)의 경우는 0.1 $\mu m$ 의 입자를 주입한 경우의 결과로서 입자의 크기가 매우 미세하기 때문에 윤활층에 혼입되면서 일부는 부분적으로 적은 에너지의 AE source를 발생시키게 되며 일부는 유출되는 오일과 함께 쉽게 빠져나가는 영향으로 인해 rms 값의 변화가 현저하지는 않지만 간헐적인 peak를 나타내는 형태로서 구별은 충분히 가능하다고 볼 수 있다. 반면 1  $\mu m$  이상의 입자 크기에 대해서는 Fig. 2(b)과 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 주입이 계속되는 동안 AE rms level이 일정한 수준으로 상승한 상태에서 급격한 변화를 나타내고 있다. 이는 혼입되는 이물질의 입자 크기가 커질수록 발생할 수 있는 AE source의 에너지가 더 크게 나타나며 따라서 rms level의 변화나 크기에 영향을 미치게 되어 훨씬 더 관측이 용이하게 된다고 볼 수 있다. 여기서 나타나는 현상중의 하나는 그림에서 보듯이 8 $\mu m$  입자 보다 1 $\mu m$  입자의 주입시 그 rms 값이 예상과는 달리 더 크게 나왔다. 따라서 이 결과를 확인하기 위하여 입자의

크기 및 분말 상태를 SEM 사진으로 조사해 본 결과 1 $\mu$ m 입자의 분말이 8 $\mu$ m 입자의 크기 보다 더 큰 상태로 엉켜져 있음을 확인하였으며 이에 의한 결과로써 Fig. 2(b)의 1 $\mu$ m 입자의 경우가 더 큰 신호를 발생시키고 있다고 판단 되어졌다. Fig. 2(d)는 예상되는 최소유막두께의 값보다 큰 입자의 크기에 의한 결과로서 예측한 바와 같이 상대적으로 매우

큰 신호를 발생하고 있었으며 앞의 경우와는 달리 주입이 중단된 상태에서도 AE rms level은 상당한 수준에서 머물고 있음을 알 수 있다. 이는 최소유막 두께보다 큰 입자는 빠져나간것도 있지만 그중 일부는 베어링 면에 남아서 연속적인 AE 신호를 계속 발생시키는 때문으로 생각된다. 이에 대한 또 다른 증거는 다음의 파형 분석에서도 얻을 수가 있었다.

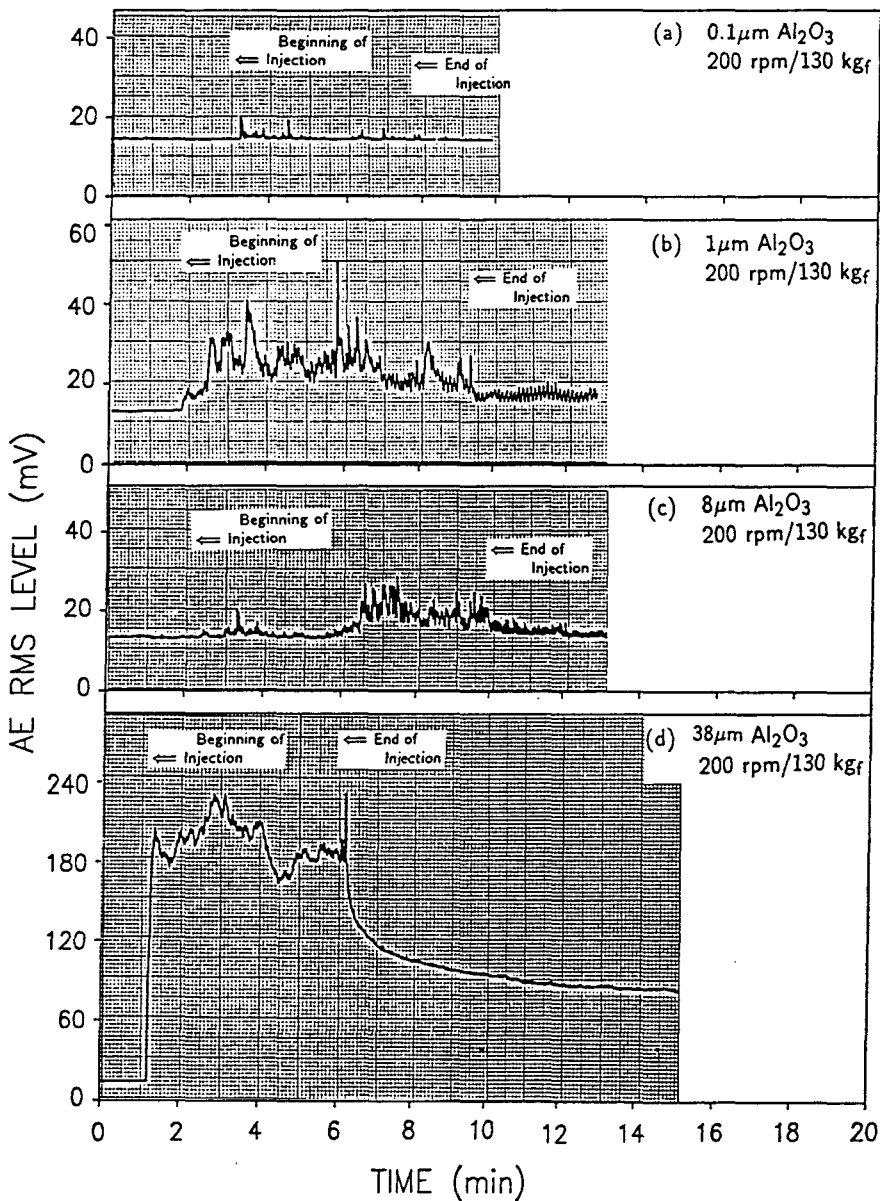


Fig. 2. AE intensity with various size of particles injected

Fig. 3은 위의 각 조건에서 발생한 AE 신호의 대표적인 파형을 나타낸다. 앞서서도 설명한 바와 같이 0.1 $\mu\text{m}$ 의 경우는 상대적으로 에너지가 적은 신호가 간헐적으로 발생되는 경우였으며 이와 같은 돌발형 신호가 거의 반복되어 발생되고 있었다. 1 $\mu\text{m}$ 와 8 $\mu\text{m}$ 의 경우에는 거의 비슷한 유형의 파형이 지배적으로 발생되었으나 전체적으로 1 $\mu\text{m}$  입자의 경우가 더 큰 에너지를 가지는 파형의 모습을 나타내었으며 그 형태에 있어서는 두 경우 모두 전형적인 돌발형 신호의 모습을 나타내었다. 반면 38 $\mu\text{m}$  입자

의 경우에는 이물질이 윤활 간극내에서 일부가 베어링면에 안착되어 계속해서 축과의 마찰을 유도하는 메카니즘으로 인해 그림에서와 같은 연속적인 파형의 신호를 발생시키는 것으로 판단된다. 즉, 이런 형태의 신호는 AE energy 값이 매우 크게 나타나게 되므로 AE rms level에서도 큰 변화를 나타내게 된다. 따라서 이들 각각의 파형에서도 상대적인 결함의 크기나 형태등의 예측이 가능하다고 볼 수 있다.

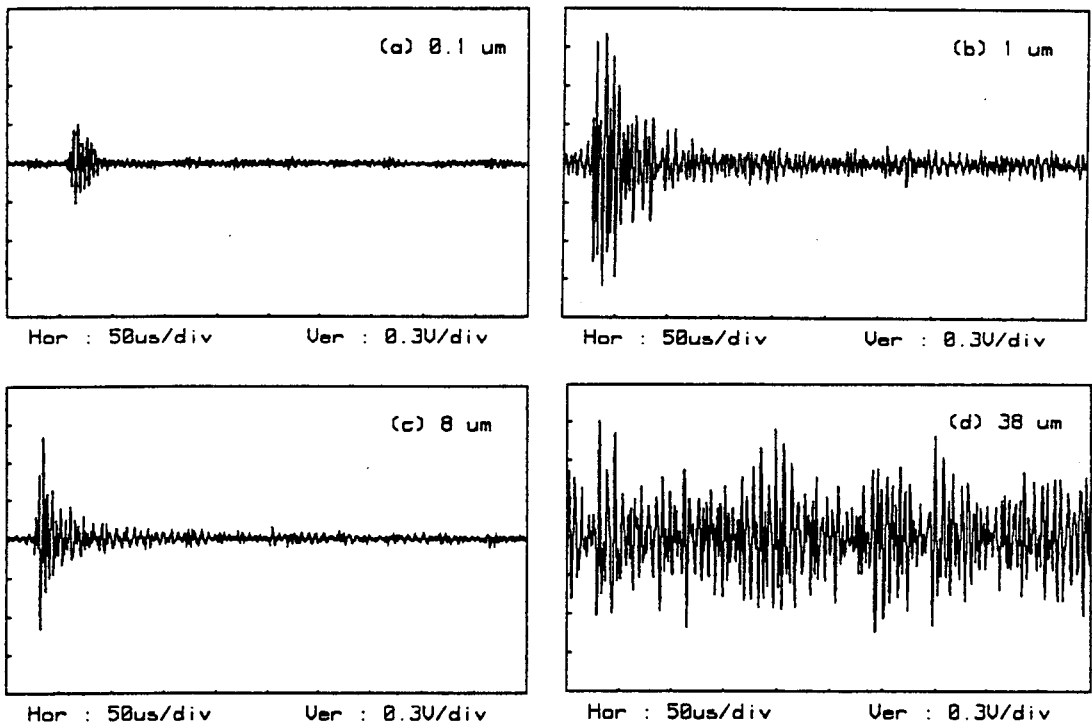


Fig. 3. Typical waveforms recorded from each experiment in Fig. 2

Fig. 4는 위의 각 실험에 대해 측정된 AE event를 분석한 AE parameter 분석 결과의 하나로서 energy distribution에 대한 것이다. 전체적인 분포의 형상은 비슷하게 나타나고 있으나 입자의 크기가 커짐에 따라 더 큰 값의 에너지 분포도를 형성하게 되며 이는 입자의 혼입에 의해 발생하는 AE 신호가 입자 크기에 따라 신호의 크기도 많이 달라짐을 의미하게 된다. 즉 38 $\mu\text{m}$  입자의 경우는 연속적인 형태의

파형 및 신호의 크기로 인해 에너지 분포가 상대적으로 큰 쪽에 분포하게 된다. 그러나 energy distribution의 분석에서는 정량적인 의미에서의 각 신호에 대한 peak amplitude 및 event duration등의 신호 형태를 판단할 수 있는 정보를 이 분포도만으로는 얻기 힘들다. 따라서 추가적인 분석 방법으로서 각각의 parameter에 대한 분포도가 아니라 서로의 상관 관계를 볼 수 있는 cross-plot을 Fig. 5와 같이 그

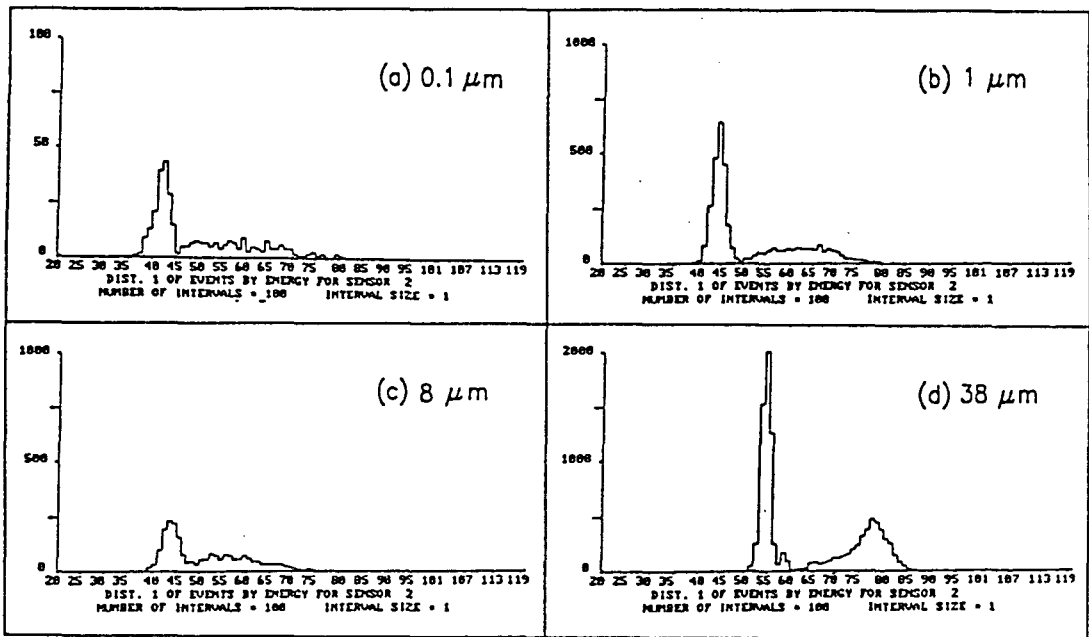


Fig. 4. Distribution of events by energy from each experiment in Fig. 2

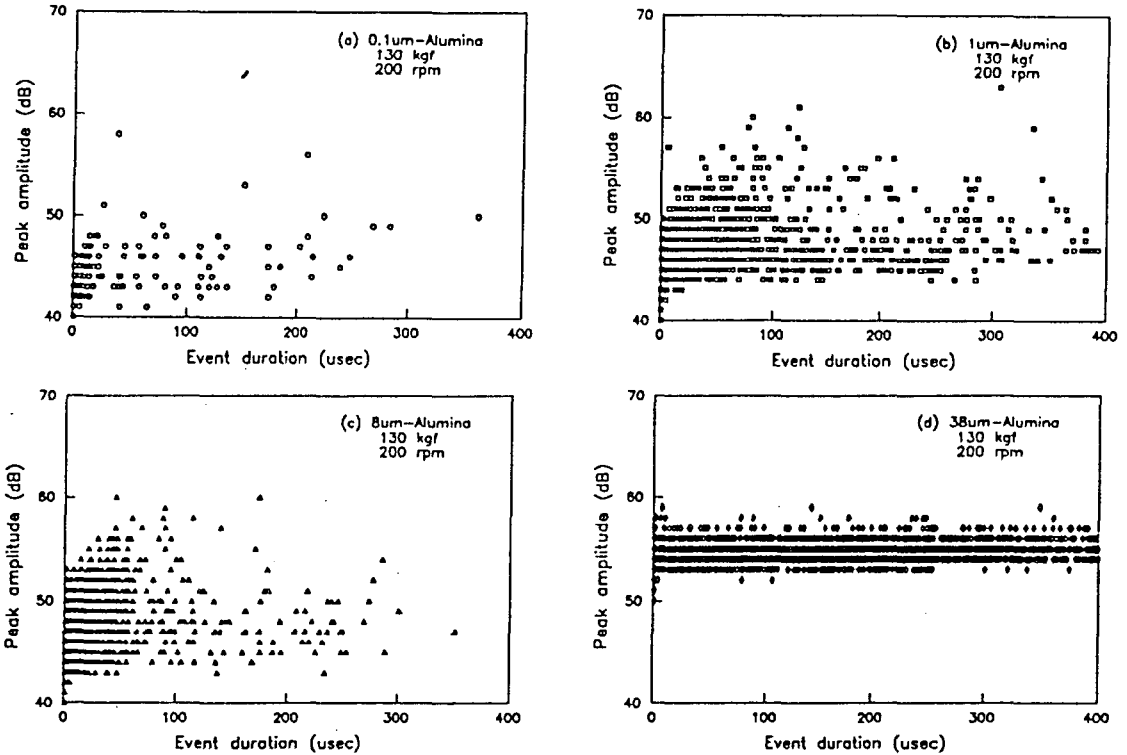


Fig. 5. Cross-plot of peak amplitude vs. event duration

려보게 되면 신호의 형태를 더욱 분명하게 분류할 수 있게 된다. 앞에서의 파형의 형태에서도 관측되었지만 여기서 보는 바와 같이 다른 입자의 경우에 비해 peak amplitude도 상대적으로 어느 정도 더 큰 값을 나타내지만 event duration의 크기가 훨씬 길어지며 반대로 peak amplitude의 분포는 집중되어지고 있음을 알 수 있다. 다시 말하면 신호의 peak amplitude에서는 큰 변화가 없으면서 신호의 길이가 긴 형태의 파형을 알 수 있다.

Fig. 6은 윤활유에의 이물질 혼합에 대한 실험으로서 입자를 주입하는 대신 윤활유 탱크에서 입자를 일정 비율로 섞은 다음 연속적으로 윤활유를 베어링에 공급할 때의 영향을 보여 주고 있다. 이 경우에는 전체 윤활유 양에 대비하여 이물질 입자의 양을 100ppm(0.01%) 정도 섞어서 순환 시킨 것이다. 마찬가지로 입자의 크기는 0.1 $\mu$ m에서 38 $\mu$ m까지의 네가지 크기를 사용하였다. 운전 조건은 200 rpm/130kgf으로써 동일하게 하였다. 이 실험은 순간적인 외부 이물질의 혼입에 의한 영향이 아니라 외부로부터 들어온 이물질이나 내부에서 마모 등에 의해 발생하는 이물질들이 윤활유내에 어느 정도 포함된 상태를 가상하여 실험 환경을 구상하였다. 이때 혼입한 입자의 비율은 전체 윤활유 양에 대비하여 섞은 알루미늄 입자의 비율이 100ppm(0.01%)

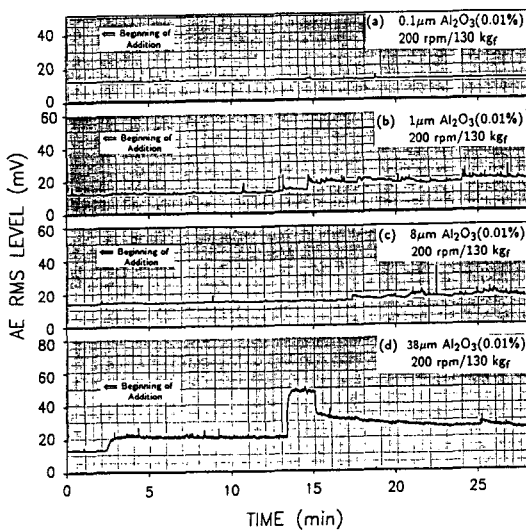


Fig. 6. AE intensity with various size of particles added to oil bath

에서 부터 5000ppm(0.5%)까지의 세 단계로 구성되어 실험을 하였으며 이 중에서 최소 혼입량인 100 ppm을 혼입했을 경우의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 0.1 $\mu$ m 입자 크기의 경우는 혼합한 오일이 들어가는 시점에서 아주 미소하게 그 징후를 보여주고 있으나 뚜렷한 양상이나 rms level의 증가가 그리 눈에 띄지 않고 있다. 반면 1 $\mu$ m 이상의 입자 크기에서는 혼입 초기에는 그 징후만 보이다가 시간이 갈수록 이물질에 의한 영향이 점점 더 크게 나타남을 알 수 있다. 38 $\mu$ m의 경우에는 혼입 초기부터 뚜렷한 rms level의 증가와 더불어 계속적인 큰 신호들의 발생이 존재하고 있음을 볼 수 있다. 이 결과에서 보듯이 100ppm 정도의 혼합 농도에서도 충분히 이물질의 검출이 가능함을 확인 할 수 있었다.

### 3.2. 혼입 농도에 대한 영향

윤활유에 혼합된 입자의 혼입 농도가 신호에 미치는 영향을 보기 위해 네가지의 입자 크기에 대해 각각 세 가지의 혼입 농도를 선택하여 실험하여 보았다. 즉 전체 윤활유 양에 대비하여 혼합한 알루미늄 입자의 양이 100ppm(0.01%), 1000ppm(0.1%), 5000ppm(0.5%)의 세가지를 사용하였다. Fig. 7은 이 중 대표적으로 8 $\mu$ m 입자의 경우에 대한 각각의 운

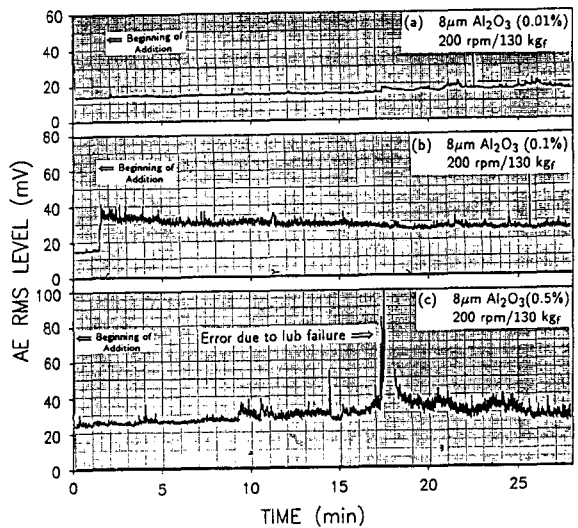


Fig. 7. AE intensity with particles concentration added to oil bath



전 시간에 따른 AE rms level의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 0.01% 때의 미소한 변화에 비해 이물질의 혼합 농도가 커짐에 따라 그 신호 특성은 크게 변하고 있음을 볼 수 있으며 0.1% 이상의 경우 부터는 혼합 윤활유의 공급이 시작되면서 급격한 rms 값의 증가를 보여 주고 있다. 또한 혼합 농도가 0.5%의 경우에는 전체적인 rms level은 0.1% 경우와 비슷하나 초기의 급격한 증가와 더불어 rms level의 변화에서도 매우 불규칙한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 윤활유내의 이물질의 양이 많아짐으로 인해 베어링에 미치는 손상의 정도가 더 심해진다는 것을 의미한다. 결과적으로 0.01%의 미소량에서부터 0.5%의 실제 상황에 비해 극심한 이물질의 혼입에 이르기까지 AE rms 값의 변화는 정상적인 운전 상태와는 분명히 구별이 되는 양상을 보여주고 있으며 이물질 혼입 농도에 따라서도 다른 특성을 보여주고 있었다.

#### 4. 결 론

- 1) AE rms, AE waveform, AE parameter 등의 분석을 통해 저어널 베어링 시스템에서 비정상 조건의 조기검출 및 유발원인의 종류 판별이 가능하였다.
- 2) 최소유막두께를 이론적으로 결정하였으며 이를 경계로 하여 이물질 입자의 크기에 따른 AE activity의 변화가 매우 뚜렷함을 실험적으로 입증하였다.
- 3) 베어링에 큰 손상을 유발하는 신호의 형태는 peak amplitude는 물론 event duration의 증가로 인한 AE energy 값의 상승으로 규정지을 수 있

다.

- 4) 본 실험 결과로써 AE 기술이 저어널 베어링에서의 이물질 혼입에 의한 비정상 운전조건의 조기 검출 및 손상 감지에 유리한 도구임을 입증하였다.

#### 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, R. M. Stewart, J. of Mechanical Design, Vol. 100(1978), pp. 229-235
- 5) P. D. McFadden, J. D. Smith, Tribology International, Vol. 17(1984), pp. 3-10
- 6) P. Cooper, J. of NDT, March(1983), pp. 75-83
- 7) O. K. Kwon, et. al., Tribology International, Vol. 20(1987), pp. 153-159
- 8) V. Hudnik and J. Vizintin, Tribology International, Vol. 24(1991), pp. 95-98
- 9) T. Akagaki, K. Kato, Wear, Vol. 152(1992), pp. 241-252
- 10) R. C. Elwell, EPRI Proceedings EPRI CS-4024, Vol. 4024(1985), pp. 3/1-25
- 11) I. Sato, T. Yoneyama, S. Sasaki, T. Sazuki, J. of Acoustic Emission, Vol. 2(1983), pp. 1-10
- 12) 윤동진, 권오양, 정민화, 김경웅 한국비파괴검사학회지, Vol. 14, No.1(1994), pp. 16-22

**Acoustic Emission Monitoring of Incipient  
Failure in Journal Bearing**  
Part II : Intervention of Foreign Particles in Lubrication

Dong-Jin Yoon\*, Oh-Yang Kwon\*, Min-Hwa Jung\*\* and Kyung-Woong Kim\*\*\*

\*Korea Research Institute of Standards and Science

\*\*Research Center, Korea Electric Power Corporation

\*\*\*Precision Engineering Dept. KAIST

**Abstract** Journal bearings in the rotating machineries are vulnerable to the contamination or the insufficient supply of lubricating oil, which is likely to be the cause of unexpected shutdown or malfunction of these systems. Various destructive and nondestructive testing methods had been used for the reduction of maintenance cost and the operational safety problems due to the accidents related to bearing damages. In this experimental approach, acoustic emission monitoring is employed to the detection of incipient failure caused by intervention of foreign particles most probable in the journal bearing systems. Experimental schedules for the intervention of foreign particles was composed to be more quantitative and systematic than last study in consideration of minimum oil film thickness and particle size. The experiment was conducted under such designed conditions as inserting alumina particles to the lubrication layer in the simulated journal bearing system. Several parameters such as AE rms level, waveform, AE energy distribution and other AE event parameters are used for analysis and characterization of damage source. The results showed that the history of damage was well correlated with the changes of AE rms level and the type of damage source signal can be verified using other informations such as waveform, distributions of AE parameters etc.

---

*(Received : May 2, 1994)*