

# AE를 이용한 저어널베어링에서의 윤활유 이물질 혼입의 영향 감시 ( Monitoring of Lubrication Conditions in Journal Bearing by Acoustic Emission )

윤 동 진, 권 오 양, 정 민 화, 김 경 용\*\*

한국표준과학연구원 소재특성평가센터

\* 한전기술연구원 전력연구실

\*\* 한국과학기술원 정밀공학과

**Abstract.** Systems with journal bearings generally operate in large scale and under severe loading conditions such as steam generator turbines and internal combustion engines, in contrast to the machineries using rolling element bearings. 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 employed to the detection of incipient failure caused by intervention of foreign particles 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 inserting alumina particles to the lubrication layer 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.

## 1. 서 론

대부분의 회전 기계에서는 정지 부위와 회전체 사이의 연결 매체로써 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 설치나 교환등 비교적 그 사용면에서 손쉬운 편이므로 소형 및 저속, 저부하의 운전 조건을 가지는 회전 기계류에 널리 사용되고 있는 편이다. 반면 미끄럼 베어링의 경우에는 대부분 설치 및 윤활유 공급등과 같이 구름 베어링에 비해 다소 용이하지 않은 점도 있다고 볼 수 있다. 그러나 특히 회전 기계의 운전 조건이 고속, 대 용량으로 가게 되면 이 저어널 베어링의 역할은 더 중요하게 되며 이 베어링의 손상으로 인해 설비의 파손 및 경제적인 손실 또는 인명 피해등 대형 사고를 유발하는 원인이 될 수 있으므로 그 중요도 및 관심이 높아지고 있다. 즉 발전 설비나 우주 항공 분야에서의 회전기계 베어링의 역할은 매우 크게 되며, 특히 이에 대한 조기 파손 감지는 매우 중요하다고 볼 수 있다.

베어링 손상 및 파손 감지에 대한 연구는 지난 수십년간 많은 연구가 진행되어 왔으며 [1-3], 구름 베어링의 경우에는 진동 해석 및 고주파 공진 해석 등의 기술이 베어링의 조기파손 감지에 효과적인 기술로서 알려져 있으며 그 기술면에서도 상당히 발전된 상태라고 볼 수 있다.[4,5] 반면 저어널 베어링의 조기 파손 감지에 관한 연구는 상대적으로 매우 적은 편이며 뚜렷한 진단 기술이 현재 제시되지 않고 있는 실정이다.[6-8] 물론 윤활유의 온도 측정, 진동 해석등을 현재 적용하고는 있으나 이들 방법은 대부분 베어링의 손상이 어느 정도 상당히 전개된 후에야 징후를 나타내는 편이 있다고 본다. 그리고 윤활유 속에 포함된 마모 입자(wear debris)를 검출하는 ferrography나 SOAP (Spectrometric Oil Analysis Procedure) 방법을 사용하여 마모나 손상의 정보를 얻는데 대한 연구 보고는 많으나 그 중 저어널 베어링의 진단이나 관련 연구 보고는 매우 드문 편이며 특히 이물질의 혼입에 대한 이의 응용은 거의 보고되지 않고 있는 실정이다.[9]

본 연구에서 적용하게 되는 음향방출(Acoustic Emission : AE) 기술은 그 특성상 결함이나 마모 그리고 금속간 마찰등의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석하기때문에 상대적으로 손상의 조기 탐지에 매우 유리한 점이 있다고 볼 수 있으며 또한 센서만을

원하는 부위에 부착하기만 하면 설비에는 전혀 영향을 주지 않으므로 설치에 용이하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용량방출 기술을 이용하여 저어널 베어링에서의 조기파손 감지에 대한 실험 및 분석을 하였으며 이를 위해 모의 저어널 베어링 시스템을 설계 제작한 후 여러 형태의 운전 조건 및 윤활 조건 그리고 이물질 혼입등의 영향에 대해 고찰하였다. 본 논문에서는 이전 연구[10]에 이어 실제 베어링에서 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 설계 및 제작하였으며 시스템 구성은 이전 연구 발표 [10]에서 상세히 다루었으며 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 베어링과 축 사이의 윤활층을 통과 한 후 다시 오일 탱크로 순환되도록 하였으며 미세 이물질의 적절한 섞임을 위해 교반기(stirrer)를 사용하였다. 이때 사용된 윤활유 순환 펌프는 인위적인 이물질의 혼입때문에 회전식이 아닌 파스톤식 정량 펌프를 사용하였다. 이물질의 순간 혼입을 위한 실험의 경우에는 베어링의 윤활유 공급 입구 쪽에 주사기를 사용하여 주입할 수 있도록 하며 빠져나온 윤활유는 폐유통에 들어가도록 하였다.

AE 계측은 550kHz에서 -60dB (ref. 1V/ $\mu$ bar)의 최대감도를 갖는 광대역형 센서(WD: by PAC)의 사용과 프리앰프에서의 60 dB의 증폭 그리고 125kHz-1MHz의 band pass filter를 사용한 후 AET 5500 시스템에서 처리하였다. AET5500 시스템에서는 AE event 취득 및 AE parameter에 대한 분석을 수행하게 된다. 또한 AE 신호는 디지털 오실로스코프(LeCroy 9400)를 사용하여 기록한 후 파형 및 주파수 분석에 사용하였으며 AE RMS 값의 기록은 상용의 RMS voltmeter(HP3400A)를 사용하여 측정된 DC 출력을 X-Y 기록계에 기록하였다.

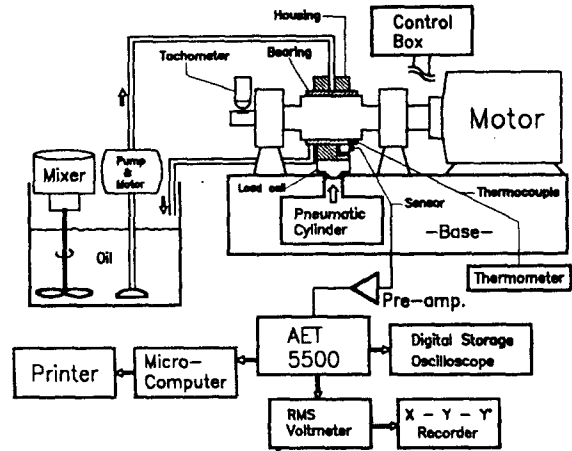


Fig. 1 Schematics of experimental apparatus of bearings and AE data acquisition

### 2-2. 실험 방법

앞에서 설명한 모의 베어링 시스템에서 실험 베어링중 하부 베어링의 뒷면을 센서를 부착하기 쉽게 평면으로 가공한 후 센서를 부착하였으며 윤활유의 공급은 상부 베어링의 중앙으로 공급이 되어 베어링의 원주 방향으로 균유 흡을 따라 전체 베어링에 공급이 되는 형태로 되어있다. 회전 속도는 control box 내의 inverter로부터 조절이 가능하게 되어있으나 실제의 회전속도를 축의 끝단에 있는 속도계(tachometer)를 사용하여 측정 확인 하였으며, 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 세가지로 크게 분류하여 실험을 행하였다. 그리고 이들 각각에 대해 운전 조건(회전속도 및 하중)을 달리하는 형태로 실험을 구성하였다. 먼저 본 시스템의 축 및 베어링의 크기 그리고 윤활유 및 운전조건등의 여러 변수에 의해 결정되는 최소 유막 두께(MOFT : Minimum Oil Film Thickness)를 본 실험 조건에 대해 이론적으로 계산하였다. 즉 이물질 입자의 크기는 이론에 의해 예측되는 최소 유막 두께인  $15\mu m$ 를 기준으로 하여  $0.1\mu m$ 에서  $38\mu m$  범위의 네가지 크기를 사용하였으며, 혼입 농도는 오일량에 대비하여 100 ppm(0.01%)부터 5000 ppm(0.5%) 까지 범위의 세가지 양을 교반기

를 사용하여 윤활유에 섞은 후 공급하였다. 또한 운전조건으로서는 이들 각각의 조건에 대해 200 rpm 및 600 rpm 의 두 종류로서 상대적인 저속 및 고속 회전 에 대해 실험을 하였다. 전체적인 실험 종류 및 형태를 Table 1에 요약하여 나타내었다.

Table 1. Summary of contaminations and operating conditions

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

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

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 입자 크기에 대한 영향

이론식에 근거하여 계산된 베어링과 축 간의 간극이 200rpm/130kgf의 운전 조건의 경우 예측되는 최소 유막 두께가 15 $\mu\text{m}$  이므로 이 값을 기준으로 하여 네가지의 입자 크기를 선택하였다. 여기서는 앞의 실험 종류의 구성중 입자의 크기에 대한 영향을 조사해 보고자 한다. 즉 200rpm/130kgf의 운전 조건하에서 알루미늄 입자의 크기가 각각 0.1 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ , 8 $\mu\text{m}$ , 38 $\mu\text{m}$ 인 네 종류를 주입한 경우의 결과를 분석하였다. 입자의 주입은 정상적인 운전 상태에서 베어링의 윤활유 공급 입구 부근에서 혼합된 오일이 들어있는 주사기를 사용하여 일정한 양을 수 분간 주입하도록 하였다.

Fig. 2는 이들 네가지 종류 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)의 값에 해당이 되며 화살표의 표시가 되는 부분부터 주입이 시작되었음을 나타낸다. 또한 주입의 중단도 역시 화살표로 표시를 하였다. 대부분 5분 정도의 주입을 시도하였으며 전체적으로 입자의 크기에 대해 많은

차이를 보여주고 있음을 알 수 있었다. Fig. 2(a)의 경우는 0.1 $\mu\text{m}$ 의 입자 크기로서 미세한 분말이 윤활유 층에 들어가는 순간에 AE source를 발생시킨 후 유출되는 오일에 쉽게 따라 빠져나가는 영향으로 신호의 형태가 간헐적인 모습을 보여주고 있다. 반면 1 $\mu\text{m}$  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 판촉이 훨씬 용이하다고 볼 수 있다. 여기서 나타나는 현상중의 하나는 8 $\mu\text{m}$  입자 보다 1 $\mu\text{m}$  크기의 입자의 주입시 그 값이 더 크게 나왔으며 이는 입자의 크기 및 분말 상태를 확인하기 위해 SEM 사진으로 조사해 본 결과 1 $\mu\text{m}$  입자의 분말이 8 $\mu\text{m}$  입자의 크기 보다 더 큰 상태로 엉켜 있음을 확인 하였으며 이에 의한 결과로써 더 큰 신호를 발생시키고 있다고 간주되어졌다. 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 있었다. 이는 이 경우의 입자는 빠져나간 것도 있지만 그 크기의 영향으로 인하여 어느 정도의 양은 베어링 면에 남아서 연속적인 AE 신호를 계속 발생 시키고 있다고 볼 수가 있다. 이것에 대한 정보는 파형 분석에서도 얻을 수가 있었다.

Fig. 3은 위의 각 조건에서 발생한 AE 신호의 대표적인 파형을 나타내어 보았다. 앞서서도 설명한 바와 같이 0.1 $\mu\text{m}$ 의 경우는 상대적으로 에너지가 적은 신호가 간헐적으로 발생이 되는 경우였으며 이와 같은 신호가 거의 동일하게 발생되고 있었다. 1 $\mu\text{m}$ 와 8 $\mu\text{m}$ 의 경우에는 입자 크기의 유사성 때문에 거의 비슷한 유형의 파형이 지배적으로 발생되었으며 전형적인 돌발형 신호의 형태를 가지고 있었다. 반면 38 $\mu\text{m}$ 의 경우에는 알루미늄 입자가 윤활 간극내에서 일부 베어링면에 안착되어 계속해서 축과의 마찰을 유도하여 그림에서와 같은 연속적인 파형의 신호를 발생시키고 있음을 알 수 있었다.

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 신

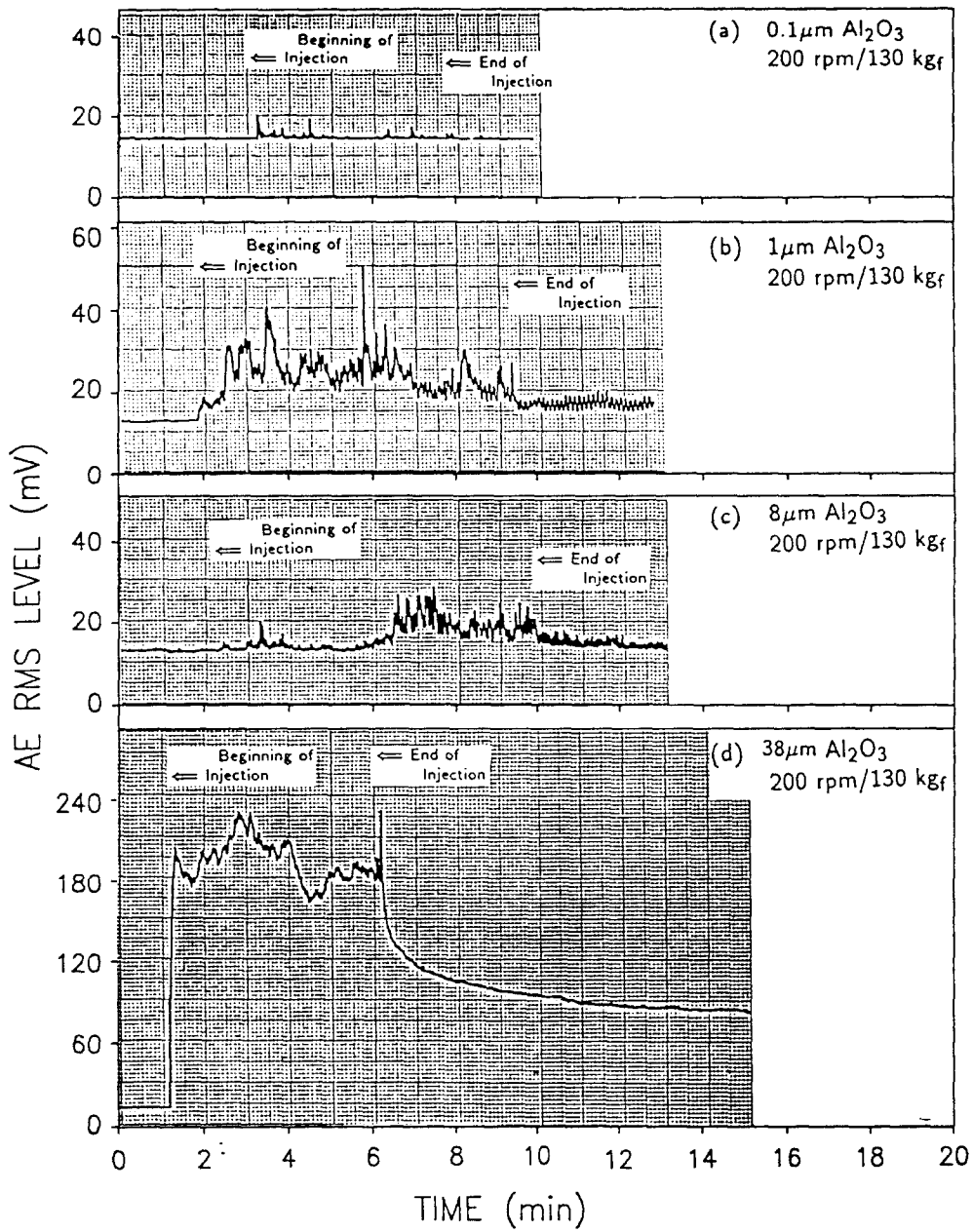


Fig. 2 AE intensity with various size of particles injected

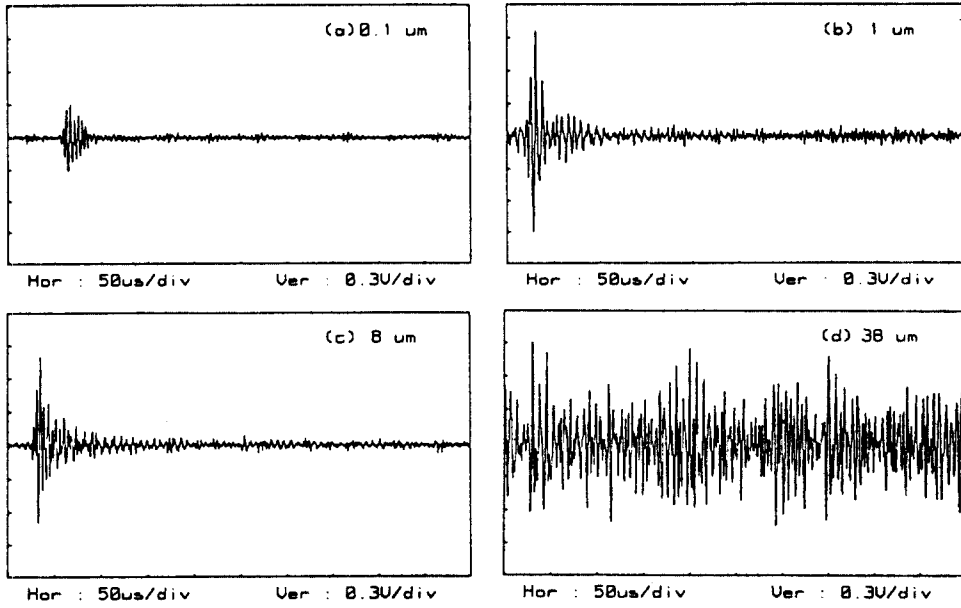


Fig. 3 Typical waveforms recorded from each experiment in Fig. 2

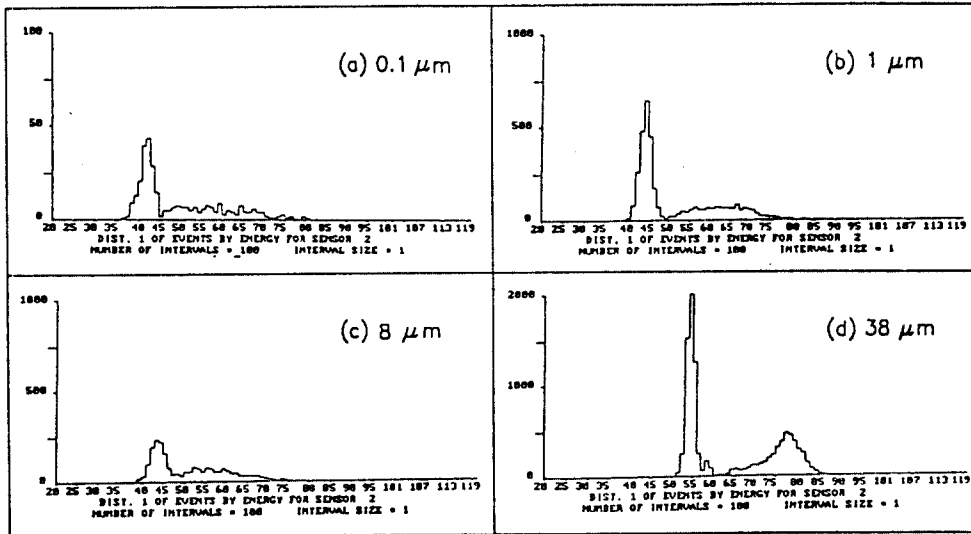


Fig. 4 Distribution of events by energy from each experiment in Fig. 2

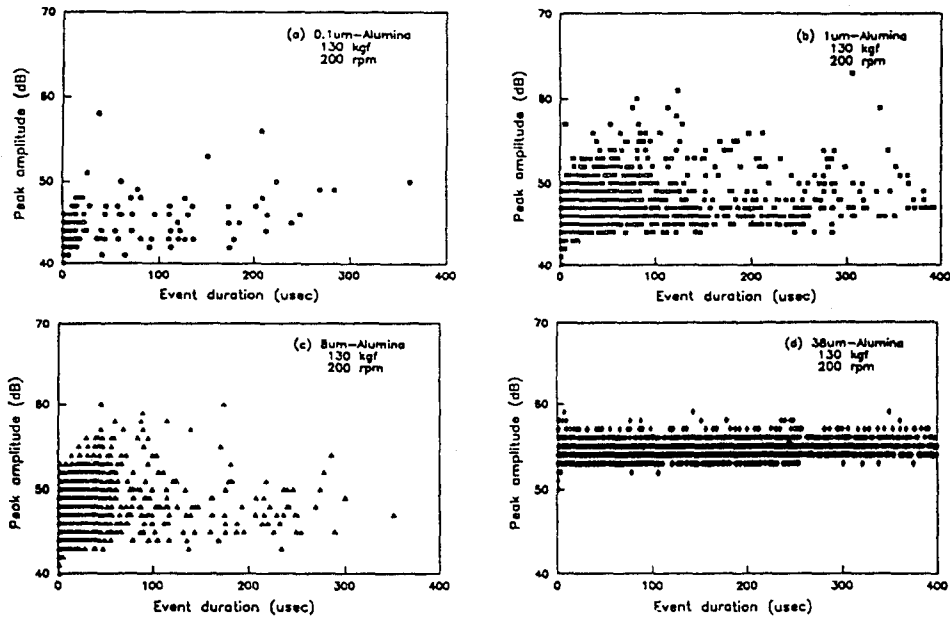


Fig. 5 Cross-plot of peak amplitude vs. event duration

호의 크기로 인해 에너지의 값이 매우 커지게 됨을 추측할 수가 있게 된다. 그러나 정량적인 의미에서의 각 신호에 대한 peak amplitude 및 event duration 등의 신호 형태를 판단할 수 있는 정보는 이 분포도만으로는 단정하기가 힘들게 된다. 따라서 추가적인 정보를 얻기 위한 방법으로서 Fig. 5에서와 같은 각각의 parameter에 대한 분포도가 아니라 서로의 상관 관계를 볼 수 있는 cross-plot을 그려 볼 수 있다. 여기서 보는 바와 같이 앞에서의 파형의 형태에서도 관측이 되었지만 다른 입자의 경우에 비해  $38\mu\text{m}$ 의 경우에는 peak amplitude도 상대적으로 어느정도 더 큰 값을 나타내지만 event duration의 크기가 훨씬 길어지며 peak amplitude의 분포는 집중되어지고 있음을 알 수 있다. 즉 이와 같은 종합적인 분석으로써 신호의 형태 및 그 특성을 파악할 수 있다고 볼 수가 있다.

Fig. 6은 앞의 실험과 같이 입자를 주입하는 경우가 아니고 윤활유 탱크에서 입자를 일정량을 섞은 다음 연속적으로 윤활유를 배어림에 공급할 때의 영향을 보여 주고 있다. 이 실험은 순간적인 외부 이물질의 혼입에 의한 영향이 아니라 윤활유내에서 운전중의 마모에 의해서 생기거나 또는 외부로부터 들어온 이물질들이 어느 정도 포함된 상태를 가상하여 실험 환경을 구상하였다. 이 때 혼합한 입자의 비율은 전체 윤활

유 양에 대비하여 섞은 알루미늄 입자의 비율이 100 ppm (0.01%)에서 부터 5000 ppm(0.5%)까지의 세 단계로 구성하여 실험을 하였으며 이 중에서 최소 혼입량인 100 ppm을 혼입했을 경우의 영향을 Fig. 6에 나타내었다. 마찬가지로 입자의 크기는  $0.1\mu\text{m}$ 에서  $38\mu\text{m}$ 까지의 네가지 크기를 사용하였다. 운전 조건은 200 rpm/130kgf 으로서 동일하게 하였다. 그림에서 보는 바와 같이  $0.1\mu\text{m}$ 의 입자 크기의 경우는 정상 운전에서 혼합한 오일이 들어가는 시점에서 아주 미소하게 그 징후를 보여주고 있으나 뚜렷한 양상이나 rms level의 증가가 그리 눈에 띄지 않고 있다. 반면  $1\mu\text{m}$  이상의 입자 크기에서는 혼입 초기에는 그 징후만 보이다가 시간이 갈수록 이물질에 의한 영향이 점점 더 크게 나타남을 알 수 있다.  $38\mu\text{m}$ 의 경우에는 혼입 초기 부터 뚜렷한 rms level의 증가와 더불어 계속적인 큰 신호들의 발생이 존재하고 있음을 볼 수 있다.

### 3-2. 혼입 농도에 대한 영향

윤활유에 혼합된 입자의 혼합 농도가 신호에 미치는 영향을 보기 위해 네가지의 입자 크기에 대해 각각 세 가지의 혼입 농도를 선택하여 실험 분석하였다. 즉 전체 윤활유 량에 대비하여 혼합한 알루미늄 입자의

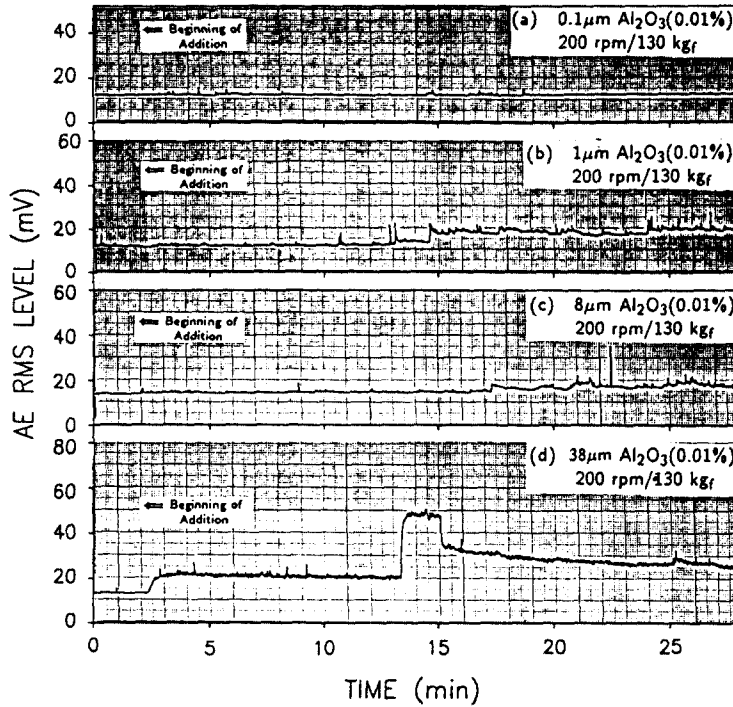


Fig. 6 AE intensity with various size of particles added to oil bath

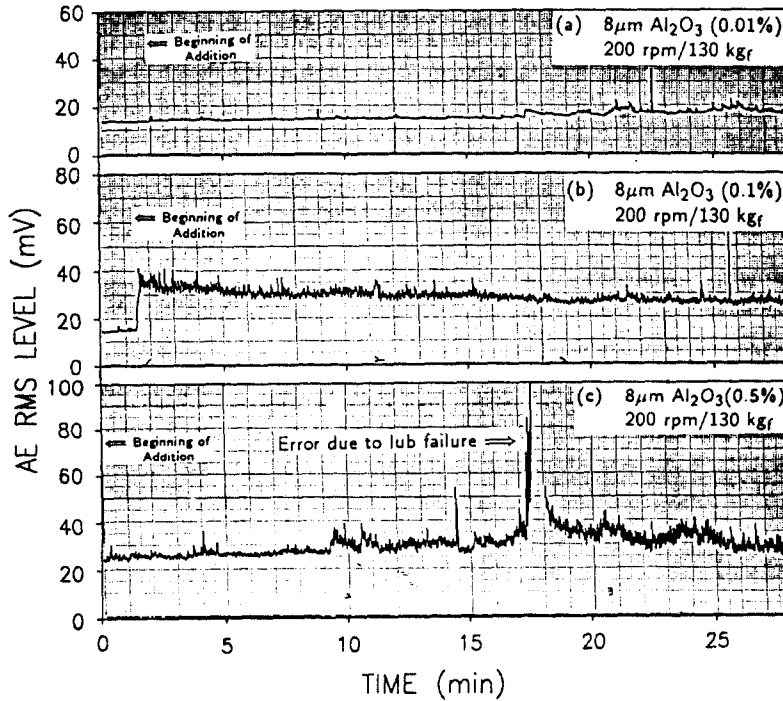


Fig. 7 AE intensity with particles concentration added to oil bath

량이 100 ppm (0.01%), 1000ppm(0.1%), 5000 ppm(0.5%)의 세가지를 사용하였다. Fig. 7은 이 중 대표적으로 8 $\mu$ m 입자의 경우에 대한 각각의 운전 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 초기의 급격한 증가와 더불어 rms level의 변화에서도 매우 불규칙한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 0.01%의 미소량에서 부터 0.5%의 실제 상황에 비해 심한 이물질의 혼입에 이르기까지 AE rms 값의 변화는 정상적인 운전 상태와는 분명히 구별이 되는 증상을 보여주고 있으며 이물질 혼입의 정도에 따라서도 다른 특성을 보여주고 있었다.

#### 4. 결 론

- 1) AE rms, AE waveform, AE parameter 등의 분석을 통해 비정상 조건의 조기검출 및 유발원인의 종류 판별이 가능하였다.
- 2) 최소유막 두께를 이론적으로 결정하였으며 이를 경계로 하여 이물질의 크기에 따른 AE activity의 변화가 매우 뚜렷함을 실험적으로 입증하였다.
- 3) 베어링에 큰 손상을 유발하는 신호의 형태는 peak amplitude 는 물론 event duration의 증가로 인한 AE energy 값의 상승으로 규정지을 수 있다.
- 4) 본 실험 결과로써 AE 기술이 저어널 베어링에서의 이물질 혼입에 의한 비정상 운전조건의 조기검출 및 손상 감지에 유리한 도구로 판단이 된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) H.L.Balderston, " The Detection of Incipient Failure in Bearings ", Materials Evaluation, 27, (1969), pp.121-128.
- (2) D.R.Harting, " Demodulated Resonance Analysis - A Powerful Incipient Failure Detection Technique", ISA Trans., 17(1), (1978), pp.35-40.
- (3) L.M.Rogers, " The Application of Vibration Signature Analysis and Acoustic Emission Source Location to On-line Condition Monitoring of Anti-friction Bearings ", Tribology International, April, (1979), pp.51-59.

- (4) D.Dyer, R.M.Stewart, "Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis", J. of Mechanical Design, 100, (1978), pp.229-235.
- (5) P.D. McFadden, J.D. Smith, " Vibration Monitoring of Rolling Element Bearings by the High Frequency Resonance Technique - A Review", Tribology International, 17(1), (1984), pp.3-10.
- (6) I.sato, T.Yoneyama, S.Sasaki, T.Sazuki, " Rotating Machinery Diagnosis with Acoustic Emission Techniques ", J. of Acoustic Emission, 2, (1983), pp.1-10.
- (7) M.Wada, M.Mizuno, T.Sasada, "Study on the In-Process Measurement of the Friction and Wear with AE Technique", JSPE, 56, (1990), pp.1835-1840.
- (8) H.E.Boyer, " Failure Analysis and Prevention", Metals Handbook 8th ed., American Society for Metals, Cleveland, OH, (1976), Vol.10, pp.397-415.
- (9) T.Akagaki, K.Kato, " Ferrographic Analysis of Failure Process in a Full -scale Journal Bearing", Wear, 152, (1992), pp.241-252.
- (10) 윤동진, 권오양, 정민화, "음향방출을 이용한 저어널 베어링에서의 조기파손감지", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회, 1992, pp.4-9