

AE(Acoustic Emission)를 이용한 마찰 및 파괴현상 해석과 베어링 상태진단 적용

안 효 석

KIST Tribology연구실

접촉운동에 의해 재료 접촉부위의 기계적 상태의 변화가 야기될 때 에너지가 방출되며 그 중의 일부는 AE (음향방출)의 형태로 방출된다. AE가 재료의 표면과 작용해서 일어나는 표면변위(surface displacements)는 기술적으로 표면에 설치한 변위계(displacement sensor)에 의해 쉽게 측정될 수 있으며 이 측정값은 AE가 발생된 물리적인 원인을 설명해주는 여러가지 정보를 제공한다. AE측정의 용이함과 재료의 기계적 변형, 파단과 구조 및 조성 등의 변화와 AE와의 밀접한 관계로 인해, 재료의 마찰 접촉시의 거동을 이해하기 위해 AE 모니터링이 점차 활발히 적용되고 있다.

트라이볼로지 관점에서 AE의 측정은 크게 두 가지 목적으로 이용될 수 있다. 첫째는 마찰, 마모거동을 이해하기 위한 연구의 목적으로 사용되는 AE이며 이 경우 AE의 특성적 신호를 마찰·마모와 관련된 재료의 기계적 변화와 연결시키는 것이다. 일반적으로, 실험을 통해 실제 기계요소의 마찰현상을 시뮬레이션할 경우 가장 주요한 인자로 취급되는 것은 마찰계수이며 AE는 상대적인 기술적 난이성 때문에 큰 관심의 대상이 되지 못하고 있는 실정이다. 마찰계수는 단지 실험장치를 통해서나 쉽게 구할 수 있으며 따라서 실제 복잡한 기계시스템의 접촉요소들의 경우 그 접촉상태를 이해하기 위해 마찰계수를 구하고자 하나 현실적으로 가능치 않다. 그러나 AE진단은 이러한 문제점을 크게 해결해 줄 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 두번째는 재료나 기계의 변화상태를 지속적으로 감지하는 진단기술로서의 응용이다. 이미 단편적으로나마 기계상태진단 기술로서 발전용 터어빈베어링, 핵발전소 반응로펌프 베어링, 기계공구(milling, cutting tools)의 상태 진단기술로 적용이 되고 있다. 따라서 본고에서는 AE를 이용한 마찰, 마모해석 및 상태진단기술 적용에 대해 간략히 소개하고자 한다.

(1) 음향방출에 대한 개요

AE는 고체물질(매질)을 통해 탄성파(elastic wave)로서 전달되는 에너지 방출의 한 형태로서 기술적으로는

트랜스듀서(transducer)에 의해 측정될 수 있다. 이러한 탄성파는 고체내에 있는 균열, 위상변화, 또는 미세 소성변형 등에 의한 탄성에너지 방출에 기인한다. 기계적 에너지를 전기에너지로 변환시켜 주는 트랜스듀서는 파에 의하여 발생하는 고체 표면의 변위나 속도에 의해서 작동한다.

AE 신호는 Fig. 1에서와 같이 그 형상에 따라 두 가지로 분류된다. (a)와 같이 진폭의 변화가 크지 않고 연속적인 것을 연속 AE 신호(continuous type)라 하고, (b)와 같이 진폭의 변화가 불규칙하며 간헐적으로 폭발적인 것을 불연속 AE신호(burst type)라 한다. 따라서 AE의 형상에 따라 해석방법이 달리 선정되어야 한다.

Fig. 2는 전압으로 표시된 AE 신호로 해석방법으로는 다음과 같은 방법이 사용되어지고 있다.

가) AE count율

AE count율은 단위시간당 기준치를 넘는 신호의 개수를 말하며, 보통 기준치는 잡음 정도에 의하여 정해지므로 이에 따라 AE count율도 달라진다. 그러므로 측정된 AE의 정확한 해석을 위하여 noise level을 각각의 상황에 따라 적당히 설정하여야 한다. Fig. 1의 (a)와 같은 연속 AE 신호에서는 잡음 정도를 변화시켜도 AE count율이 일정하므로 이를 사용할 수 없고 (b)와 같은 불연속 신호에서만 AE count율을 적용할 수 있다.

나) AE에너지

AE에너지는 측정된 전기신호를 에너지로 환산한 것이다. 이는 대개 AE count율과 비례하나 AE 에너지는 탄성파 에너지로 해석되는 반면 AE count율은 AE 근원의 발생율의 강도로 해석된다. 트랜스듀서로 측정된 전압은 다음과 같이 AE에너지로 환산된다.

$$AE \text{ energy} = \int V(t)^2 dt$$

AE에너지에 의한 해석방법은 연속 신호나 불연속 신호 모두에게 적용할 수 있으나 단지 양적인 것만 측정할 뿐 잡음에 의한 신호의 제거 또는 감소가 불가능하다.

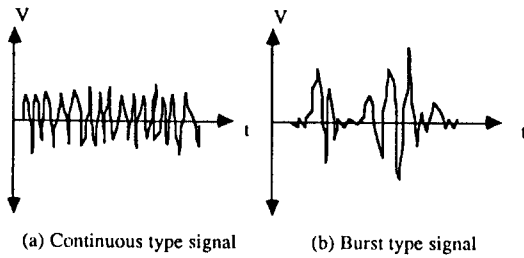


Fig. 1. Two different types of AE signal

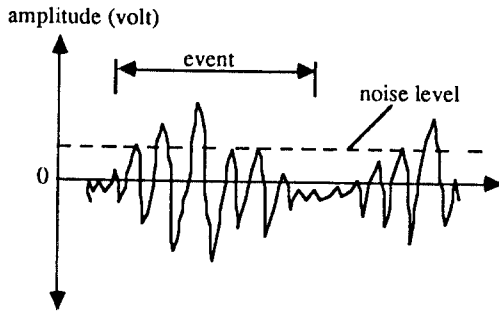


Fig. 2. Acoustic Emission signal

다) AE의 진폭(amplitude)

이는 측정된 AE의 최고 전압을 말하며, 전반적인 AE 발생의 해석보다는 개개의 AE 근원의 강도를 해석하는데 이용된다.

라) AE event율

AE event는 AE 근원의 강도와 관계없이 갯수와 관계되며 Fig.2에서는 두개의 event를 나타낸다. 한개의 event는 한개의 AE 근원에 의해 발생되므로 AE event율을 측정함으로써 발생빈도를 알 수 있으며, event 지속시간과 진폭으로 각 AE 근원의 특성도 알 수 있다. Event율도 AE count율과 같이 연속 신호에는 사용될 수 없다.

마) AE 진동수 분포

어느 AE 신호든지 고유진동수를 가지고 있으며, 이는 AE 근원의 특성에 의하여 결정되므로 AE 근원의 분별 및 해석에 이용된다. 예를들면, 그림에 나타난 AE 신호는 합금의 소성변형 중에 측정된 것으로 두개의 다른 진동수를 가지므로 두개의 다른 AE 근원이 발생했다고 할 수 있다. Fig.3에서 곡선 A로 나타난 신호는 합금에 포함된 취성 미립자의 크랙에서 발생된 탄성파에 의한 것이며, 곡선 B는 소성변형에 의한 전위(dislocation) 운동에서 발생한 신호로 해석된다.

(2) 마모에 의한 AE의 근원분석

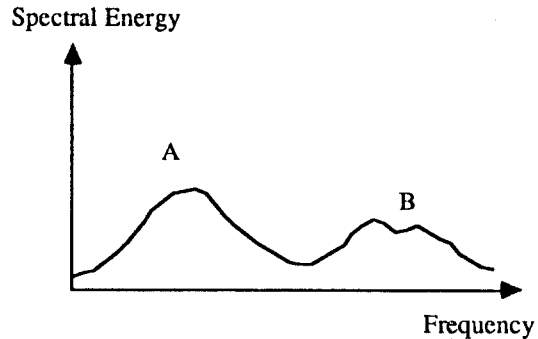


Fig. 3. Frequency domain of AE signal

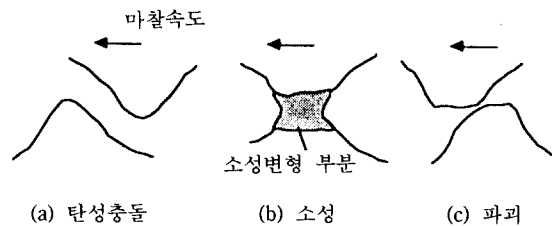


Fig. 4. Wear process of asperities

마모에 의한 AE 방출은 마찰되는 두 물체의 실접촉 점간의 상호작용에 기인한다. 그 접촉점은 극히 작으며 접촉운동시 AE와 관계되는 세 가지 다른 물리적인 메카니즘을 겪게 되며 이 세 가지 현상-미세표면돌기(micro-asperities)의 탄성 충돌, 파괴 및 국부적인 소성-은 마찰에 의한 AE의 근원이 된다. Fig.4에서 보는 바와 같이 마찰접촉시 먼저 두개의 표면돌기가 탄성충돌을 하게 된 후에 소성변형(Fig.4(b))을 수반하고 접촉조건이 더욱 심각해지면 파괴된다(Fig.4(c)).

AE는 이미 기술한 바와 같이 탄성체에서 발생되는 탄성파가 표면에 도달된 상태이므로, 이는 트랜스듀서에 의하여 전기에너지로 바뀌어져 해석된다. 그러므로, AE가 에너지로서 해석되기 위하여 그의 근원으로부터의 탄성에너지를 분석하여야 한다. 탄성에너지를 방출하는 세 가지 메카니즘 중에서 돌기의 탄성충돌은 파괴나 소성변형과 비교될 때 극히 작으므로 무시할 수 있으며, 결국 돌기의 소성변형이나 파괴에 의한 탄성에너지 방출이 AE의 주된 원인이 된다.

가) 돌기의 소성변형으로부터의 탄성과 에너지 방출 결정체의 소성변형은 전위의 이동에 의해서 이루어지며, 그것의 움직임은 탄성체의 변형을 수반하며 이에 따른 탄성파를 형성한다. 탄성과 에너지는 전위가 움직일 때 가속 또는 감속 때에만 발생되므로 그와 관계되는 전위의 속도함수는 초기의 step motion과 harmonic motion으로 나타낼 수 있다.

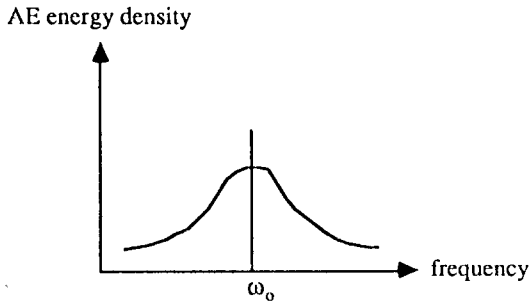


Fig. 5. AE frequencies from plastic deformation of asperity

초기 step motion은 항복변형(yield strain)에 의해 주로 발생하며, 전위가 합금성분 등과 같은 이물질에 묶여 있을 때 이러한 현상이 소성변형 중에 강하게 나타난다. 소성변형이 계속되어 움직이는 전위수가 계속 증가하면서 그의 움직임이 다른 전위 또는 합금성분과 같은 방해물과의 상호작용으로 속도의 변화, 즉, 가속과 감속을 겪게 되므로 탄성과 에너지가 발생한다. 이러한 움직임은 방해물들과의 위치 에너지가 거리에 의한 주기적인 관계가 되므로, 그의 움직임은 harmonic 함수로 나타내진다.

본고에서는 수식은 다루지 않지만 에너지는 전위의 속도의 제곱에 비례하므로, AE 에너지는 정량적으로 소성변형되는 양에 비례하며, 소성변형되는 단위부피당으로는 전위의 속도로 결정된다.

전위에 가해진 응력은 마찰력에 의하여 정해지므로, 주어진 수직응력에서 마찰속도 및 마찰시간의 변화에 따른 마찰계수 변화와 전위속도와와의 상호관계를 얻을 수 있다. 그러나, 실제의 마찰면적을 알지 못할 경우 각각의 돌기에 가해지는 응력을 알지 못하므로 전위의 속도를 얻을 수 없으나, 돌기의 소성변형 중에는 항복응력(yield stress)이 가해진다고 할 수 있다. 그리고, 돌기의 소성 변형량은 돌기의 형상이 주어진 경우에 수직응력과 마모속도에 의해 정해진다.

이러한 소성변형에 의한 AE 신호의 진동수 ω_0 는 Fig. 5에서와 같이 소성변형시의 전위농도에 의해 주어진다.

나) 돌기 파괴로부터의 탄성과 에너지 방출

파괴가 시작될 때, 탄성에너지 방출율 G(elastic energy release rate)가 크랙 저항을 R(crack resistance)보다 크게 되며, 잔여 에너지 $E(=G-R)$ 는 탄성체의 운동에너지의 형태로 방출되어 탄성파를 발생시킨다. 돌기 파괴는 소성변형 중에 압착 용접된 부분이 전단력에 의해 다시 떨어져 나가는 움직임이나 취성이 큰 돌기에 나타난다. 전자의 경우 소요되는 에너지의 대부분이 소성 변형에 쓰이므로 그에 해당하는 R값이 크게 되므로 파



Fig. 6. Brittle fracture of asperity during friction

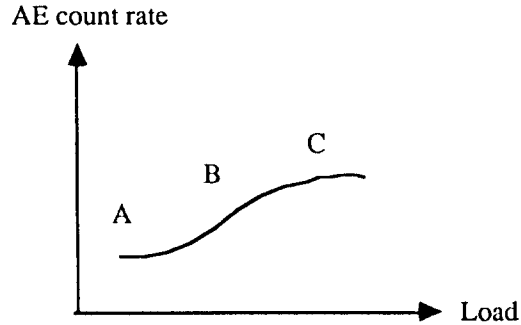


Fig. 7. AE count rate in terms of load

괴로부터의 AE와 관계되는 E값이 극히 작으며, 소성에 의한 AE는 R값에 관계된다. 그러나, Fig. 6에서와 같이, 취성이 강한 소재의 경우 탄성충돌 후 소성변형을 거치지 않고 파괴될 수도 있다. 이러한 경우에는 R값이 극히 작으므로 파괴에 소요되는 에너지의 상당 부분이 탄성 에너지로 방출된다. 그러므로 파괴면으로부터의 AE를 고려할 때 후자의 경우가 주요한 AE의 근원이 된다.

(3) AE에 영향을 미치는 주요 마모조건

마찰에 의한 두 물체의 접촉은 불연속적이고 간헐적인 동적운동에 의하여 물질의 떨림 현상을 유발한다. AE 형태는 크게 두 가지로 다음과 같이 분류된다. 충격이나 기구학적인 운동 중에 의해 발생하는 구조물의 진동(ringing frequency)으로 나타나는 것과 AE 근원에 의한 탄성과의 발생 및 전달에 의한 진동(wave frequency)으로 나타나는 것이다. 전자에 의한 AE는 후자의 것과 비교하면 매우 낮은 진동수를 가지므로 필터를 사용하여 후자의 것만 얻으므로 AE 근원 분석에 이용된다.

전술한 바와 같이 마모에 의한 AE 근원은 돌기의 소성변형 및 파괴이므로 마모조건과 이들과의 관계는 AE 진단(monitoring)에 의해 알 수 있다. AE에 영향을 미치는 주요한 마모조건은 마찰계의 표면상태, 마찰계수, 하중, 마찰속도 등이다.

표면상태가 거칠면 마찰계수도 증가하여 마찰에 의한 에너지 소모가 증가하며 AE 에너지도 더 많이 방출하게

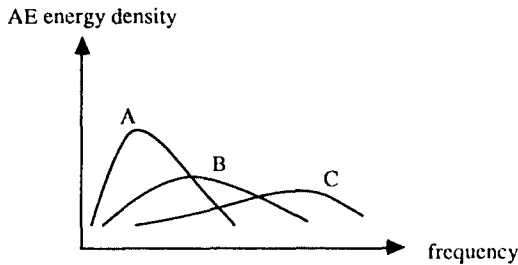


Fig. 8. AE spectral energy varying friction velocity

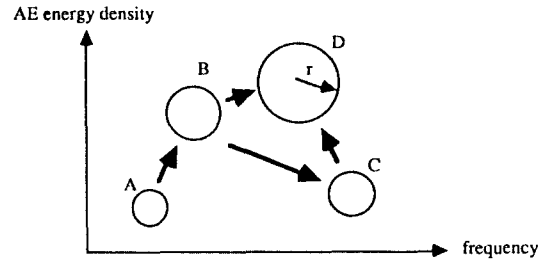


Fig. 9. Pattern recognition of AE signal from friction

된다. 그러나 표면이 거칠수록 돌기의 소성변형보다는 충격이나 파괴에 의한 AE 에너지 방출이 상대적으로 많아지므로 AE 신호의 진동수가 낮아지게 된다.

Fig. 7은 무윤활상태의 접촉시 하중에 따른 AE 방출을 나타낸 것으로 세 가지 다른 AE 근원으로 설명된다. 작은 하중에 의한 마찰은 주로 돌기의 충격과 탄성변형에 의해 AE가 방출되므로 그에 따른 AE 신호도 작으며 그림의 A부분과 같이 그의 범위안에서는 하중에 따른 AE 변화도 상대적으로 작다. 하중이 어느 정도 이상 증가하면 돌기의 파괴와 함께 소성변형이 왕성하게 되므로 AE 방출이 B와 같이 하중 증가에 따라 증가한다. 이는 돌기의 파괴와 소성변형이 주된 AE 근원이 됨을 말하며 이 범위의 하중에서는 AE와 하중의 관계가 매우 크다. 하중이 아주 크게 되면 압축하중의 증가로 돌기의 연성이 커져서 파괴보다는 소성변형이 왕성하여 C와 같이 하중 증가에 따른 AE 방출의 증가가 둔화된다. 그러나 AE 신호의 진동수는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 것과 같이 소성변형에 의한 것이 더 높으므로 하중이 증가함에 따라 진동수도 증가한다.

Fig. 8은 마찰속도 변화에 따른 AE 신호의 진동수를 나타낸 것이다. 위의 경우 마찰속도는 $A < B < C$ 이다. 일반적으로 AE 방출에너지는 마찰속도에 비례하며 진동수는 증가한다. 파괴에 의한 AE 신호는 식에서와 같이 마찰속도가 빨라지면 파괴지속시간이 작아지므로 진동수가 증가하며, 속도가 증가하면 온도상승으로 돌기 파괴보다는 소성변형이 주로 발생하므로 마찬가지로 AE 진동수가 증가한다.

이와 같이 마찰에 의한 AE 방출은 마찰조건에 따라 그의 에너지 방출량 및 진동수가 변하므로 AE 신호에 의한 마모상태 진단이 가능하다.

(4) AE를 이용한 베어링 마모의 진단기술

베어링 마모는 윤활막의 파괴와 돌기의 변형에 의하므로 마찰에 의한 AE 발생을 베어링 마모 감지에 적용할 수 있다. AE 신호 분석에 이용되는 두 가지 변수는 AE 에너지와 진동수이다.

AE 신호는 퍼짐성이 좋아서 어디에서나 쉽게 측정될 수 있다. 그러나 원하지 않는 신호 역시 퍼짐성이 좋으므로 이를 제거하기 위하여 밴드 패스(band pass) 필터를 사용하여야 한다. 고역 통과(high pass) 필터와 저역 통과(low pass) 필터를 동시에 이용함으로써 마모에 의한 AE 신호만을 대략 추출할 수 있다.

마모에 의한 AE 신호만을 얻은 후, AE count율, AE event율, AE 에너지 등을 이용한 AE 강도 해석과 AE 신호 진동수를 이용한 AE 신호 특성 해석이 곧 마모상태 변화의 예측을 가능케 한다.

이러한 마모상태의 변화는 두 변수(AE 에너지, AE 진동수)에 의한 형상 변화 도표를 이용하여 Fig. 9와 같이 표시된다. 이 도표는 측정된 AE 신호의 최대값과 진동수 및 편차(variance)가 사용된다. 원의 중심은 AE 에너지 또는 진폭의 최대값과 그에 해당하는 진동수에 의하여 정해지며, r은 편차에 의하여 주어진다. 측정된 AE 신호가 넓은 진동수 영역에 퍼져있으면 r값이 커지게 된다. 원 A, B, C, D는 시간의 변화에 의한 마모상태의 변화로부터 얻어진 AE 신호를 전술한 마모에 의한 AE 이론을 토대로 예측 표시한 것이다.

원 A는 정상상태의 마찰로부터 측정된 AE 신호라면, 원 B는 마모의 증가로 AE 에너지가 증가함에 따라 Y축의 값이 증가되고 돌기의 탄성충돌 및 파괴에 의한 것보다 소성변형에 의한 부분이 증가함으로 진동수와 r의 증가를 예기할 수 있다. 마모가 계속되나 온도의 증가로 소성변형이 왕성하게 되면 원 C와 같이 진동수는 증가하나 AE 에너지가 감소하게 된다. 그러나 마모가 계속됨에 따라 소성변형 뿐만 아니라 피로에 의한 파괴 또는 스킵핑 등에 의하여 불안정한 상태로 될 때는 원 D로 나타난다. 마모 과정에 따라 A-B-C-D 또는 A-B-D로 측정된 AE 신호가 변하게 된다.

이와 같이 AE 신호의 형상변화 도표에 의한 마모상태의 측정은 AE 신호의 두 변수(AE 신호 강도, AE 진동수)와 측정된 신호의 편차에 의한다. 미국의 EPRI (Electric Power Research Institute) 보고서를 인용하여 발전용 터어빈베어링의 wipe와 tilt를 진단하는 AE 측

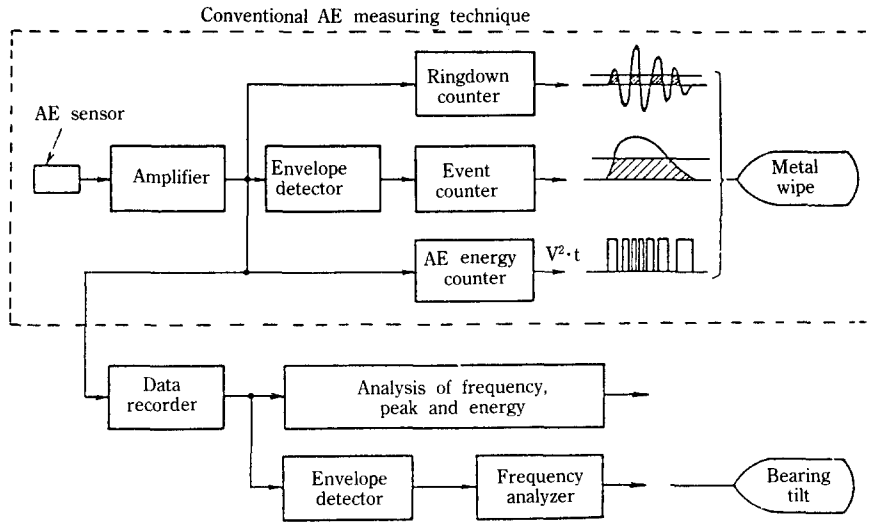
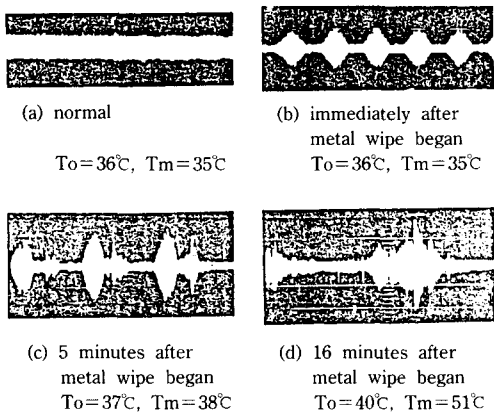


Fig. 10. Schematic diagram of signal analysis method



- 1) N=5 rpm, amplitude: 2 V/div, time: 20 ms/div
- 2) To: temperature of lubricating oil
- 3) Tm: temperature of babbitt metal face

Fig. 11. AE wave forms produced by metal wipes

정기술을 설명하면 Fig. 10과 같다.

그림에서 보면 베어링의 wipe는 AE sensor, Amp, envelope detector, ringdown counter, event counter, energy counter, RMS counter 등을 이용하여 측정할 수 있으나, 베어링의 tilt는 주변의 noise를 제거하고 tilt에 의해 발생하는 AE 신호만을 구별하는 신호처리 기술을 사용함으로써 분석할 수 있다.

Fig. 11은 베어링의 wipe 진전에 따른 AE 파형 변화를 보여주고 있다. (a)에서와 같이 정상상태에서는 일정한 진폭의 back-ground noise만이 관찰될 뿐이며 wipe가

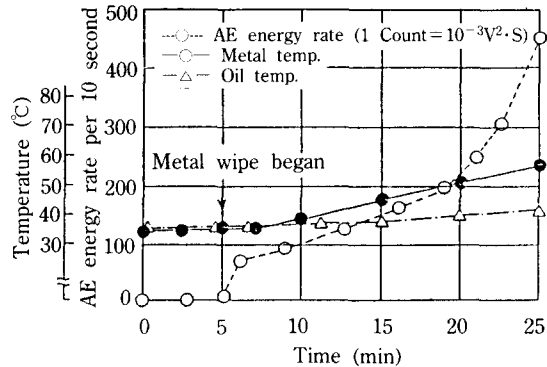


Fig. 12. Results of metal wipe monitoring test with model bearing

발생되면 (b)와 같은 파형으로 변화되어 시간이 지남에 따라 (c), (d)와 같이 파형이 변화한다. 즉 wipe 발생에 따라 금속간 접촉면적이 증가하므로써 AE 신호에 날카로운 진폭변화를 야기시키고 베어링의 마모와 변형을 일으키며 베어링과 오일의 온도를 증가시킨다. 따라서 Fig. 11의 (b)의 이전단계에서 경고를 하므로써 베어링 파손을 예방할 수 있다.

Fig. 12는 EPRI의 wipe 진단시험 결과를 보여주고 있으며, AE 에너지율을 이용한 방법이 베어링 wipe의 진단에 좋은 기술이라 설명하고 있다.

Fig. 13은 베어링 tilt 진단에 사용되는 신호처리기술을 보여주고 있으며, 정상상태와 tilt된 상태의 AE 파형은 구별하기 어려우므로 주파수 스펙트럼분석과 band-pass

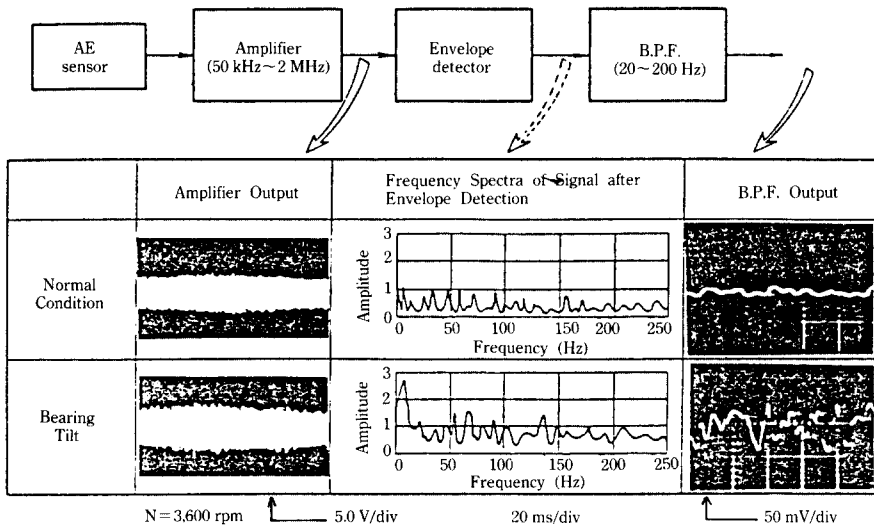


Fig. 13. Signal analysis of bearing tilt monitoring

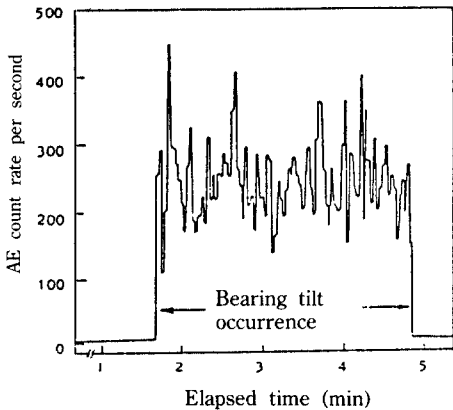
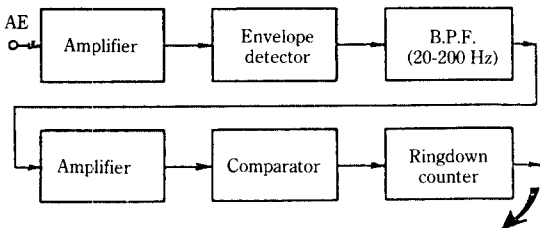


Fig. 14. Schematic diagram of AE counter and example of results obtained in bearing tilt test

필터를 사용하므로써 구별을 쉽게 할 수 있다. 이러한 베어링 tilt에 의한 신호는 진폭변조와 같이 고주파

noise와 중첩되어 있으며, 저어닐베어링의 화이트메탈 표면이 많은 점들과 접촉하므로 로터의 회전주파수와는 무관하다.

Band-pass 필터를 지난 신호에 대하여 AE count율을 적용하여 베어링의 tilt를 진단하는 방법은 Fig. 14에 보여주고 있다. 그림에서와 같이 AE count율의 증가는 베어링 tilt의 발생을 말하여 주므로 AE 신호에 의해 베어링의 tilt를 진단할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Myshkin, N.K. et al., Acoustic and Electrical Methods in Triboengineering, Allerton Press Inc., N.Y., 1988.
2. Klamecki, B.E. and Hanchi, J., "Wear process description based on acoustic emission", ASME Jr. of Tribology, July 1990, Vol.112, pp.468-476.
3. Sarichev, G.A. and Shchavelin, V.M., "Acoustic emission method for research and control of friction", Tribology International, Feb 1991, Vol.24, No.1, pp. 11-16.
4. Sato, I. et al., "Feasible acoustic emission techniques for journal bearing diagnosis", Proc. Turbine Bearings and Rotor Dynamics Workshop, EPRI, June 1985, pp.5-49/5-61.
5. Private communication with G.A. Sarichev and N.K. Myshkin