

## 회전기 진단을 위한 무선식 AE 측정장치 개발

권 오 양 · 김 영 환 · 윤 동 진

### Development of a Wireless Acoustic Emission System for the Monitoring of Rotating Structures

O. Y. Kwon, Y. H. Kim and D. J. Yoon

**Abstract** A wireless acoustic emission (AE) system has been developed for continuous monitoring of rotating structures such as turbine rotors. The cable between preamplifier and signal processing unit of a conventional AE system was replaced by the frequency modulated telemetry. The detected signals were modulated and transmitted as an RF signals by the transmitting module, then received and demodulated by the receiving module. The distance between the transmitting and the receiving antennas could be separated up to 10cm within a reasonable signal-to-noise ratio. The simulated AE signals generated by pencil lead breaks from rotating structures were successfully detected using the developed wireless AE monitoring system.

#### 1. 서 론

음향방출(Acoustic Emission : AE)은 구조물의 다가을 파손에 대하여 경보 신호를 제공하는 장점이 있어서, 구조물의 건전성 평가나 비정상적 가동 상황의 탐지를 초기 단계에서 가능하게 해준다. 한편, 소재 특성의 향상으로 증기 터빈이나 터빈 제너레이터 등의 대형 회전 기계류들은 효율을 높이기 위하여 점점 더 가혹한 조건에서 사용되는 일이 많아졌는데, 이는 회전체들에 파손이 일어날 가능성이

증가함을 의미한다. 따라서, 이들의 파손에 대한 진단 및 조기 경보체제에 AE를 적용하려는 연구가 많이 진행되었다.

압전형 AE 센서는 값이 싸고, 취급이 간편하며, 높은 수신감도 및 SNR 때문에 널리 사용되고 있으나, 이는 접촉식일 뿐만 아니라 반드시 전선을 통하여 후속 측정기와 연결되어야 한다는 단점을 지니고 있다. 따라서 회전하는 물체에는 기존의 압전형 센서를 부착할 수 없기 때문에 이들의 Monitoring을 위해서는 Journal Bearing과 같이 가까이 정지하고

\* 한국표준과학연구원 비파괴시험실  
접수 : 1991년 8월 23일

있는 부분에 센서를 부착하고 이를 통하여 전달되는 AE 신호를 검출하고 있다.

그러나, 이와같은 방법으로 AE 신호를 검출할 경우에는 파원에서 발생된 AE신호가 베어링 등을 통과하는 동안에 파형이 왜곡될 뿐만 아니라 감쇠가 일어나서 검출되는 AE 신호의 크기는 현격하게 줄어든다. 실험에 의하면 AE 센서를 Rotor 외부의 Bearing에 부착한 경우에 검출되는 신호는 AE 센서를 rotor 내부에 부착하였을 경우에 비하여 신호의 크기가 1/100로 줄어든다.<sup>1)</sup> 파손에 대한 경보 신호를 조기에 탐지하기 위해서는 매우 작은 AE 신호를 높은 감도로 검출하여야 하므로, AE 센서는 될수록 AE 신호의 발생이 예상되는 위치 또는 관심의 대상인 구조물에 가능하면 가깝게 그리고 직접 부착되어야 한다.

이러한 문제점은 센서와 SPU(Signal Processing Unit) 사이의 연결을 전선 대신에 전파를 이용하는 무선식 센서를 사용함으로써 극복될 수 있다. 이는 회전체에 부착할 경우의 장애요소인 Preamp.와 SPU를 연결하는 전선을 제거하고, 제거된 부분은 Telemetry에 의해 그 기능을 대신하도록 하는 것 이외에는 AE 센서와 신호 처리의 다른 부분들은 기존의 AE 장비와 동일하여 무선식 센서의 출력신호는 통상적인 Preamp. 출력과 마찬가지로 SPU에 입력되어 data로 처리된다.

무선식 센서를 적용하려는 회전기계류의 AE 진단 시에는 파원해석과 같은 근본적인 분석보다는 AE 신호의 발생 유무 및 빈도 등과 같은 AE 변수를 이용하여 처리하면 되므로, 대략 300kHz 이하의 공진형 센서를 사용하여 AE 신호를 검출하면 충분하다. 반면에 시험대상체가 고속으로 회전하더라도 충격에 충분히 견딜 수 있어야 하고, 송신부의 전원은 가능하면 외부에서 공급이 되어야 하며 송신부(Sensor+Transmitter)의 무게가 시험대상체의 무게에 비하여 무시할 정도로 작아야 하는 등의 조건이 고려되어야 한다.

지금까지 알려진 바로는 일본 Hitachi 연구소에서 개발한 무선식 센서가 유일하며<sup>2)</sup>, 이는 미국의 EPRI Project에도 사용이 되어<sup>3)</sup> 성공적인 평가를 받았으나, 이들 연구는 상세한 내용이 공개되지 않고

있다.

## 2. 장치제작

무선식 AE 측정장치는 Fig.1에 나타난 바와 같이 크게 나누어서 송신부와 수신부로 구별할 수 있다. 여기서 송신부는 AE 센서를 포함한 AE 신호 처리 부분, 주파수 변조부 및 송신 안테나로 나눌 수 있고, 수신부는 수신 안테나, Demodulator 및 Amplifier로 나눌 수 있다. AE 센서는 공진 주파수가 150 kHz인 상용화된 압전형 센서를 사용하였고, 송신부의 AE 신호 처리부와 수신부의 Amplifier는 기존의 AE 시험장치와 동일하므로 이에 대한 자세한 설명은 생략하였다.

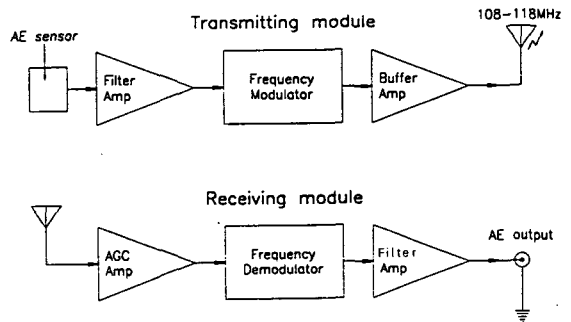


Fig.1 Schematic diagram of the wireless AE monitoring system.

무선식 AE 측정장치에서 가장 핵심적인 부분은 수  $\mu V$ 에 불과한 압전 센서의 출력을 RF 신호로 바꾸어 전파 형태로 송신하는 Modulator와 이에 대응하는 수신부의 Demodulator 부분이다. AE 신호의 주파수 대역이 수백 kHz 정도로 매우 높은 편이고 신호의 크기가 전파 신호의 영향을 적게 받기 위해서 FM(Frequency Modulation) 방식을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 FM 주파수 영역은 108-118 MHz로 VCO(Voltage Controlled Oscillator)를 이용하여 AE 신호의 크기에 따라서 주파수가 바뀌도록 하였다.

송수신 안테나는 회전시에 항상 같은 조건을 이루

도록 하기 위해서는 회전축에 축대칭인 형태가 바람직한데, 본 연구에서는 원판형으로 설계하였다. 또한 송신안테나는 회전축과는 전기적으로 절연이 필요하여 송신부와 안테나 사이에 절연물질을 사용하여 전기적으로 분리시켰다.

무선식 AE 측정장치의 송신부에는 전원이 필요한데, 이 장치의 주된 대상인 회전체와 같은 동적인 구조물에서는 외부로부터 전원을 공급받기는 곤란하고, 자체적으로 전원부를 지녀야 한다. 이 경우는 전지를 사용하는 것이 비교적 간편하지만, 장치의 크기와 무게를 증가시키고 사용시간의 제약을 받게된다. 그러나, 본 연구에서는 우선 무선 장치의 동작 원리에 대한 연구를 위하여 사용에 편리한 전지를 사용하기로 하였고, 전지 교환을 위하여 송신부를 분해하는 일이 없도록 충전식 전지를 사용하였다.

송신부는 가급적 작게 제작하는 것이 유리하나 본 연구에서는 기본적으로 동작원리에 대한 연구에 중점을 두었고, 현재의 송신부의 크기는 직경 10cm, 길이 8cm, 무게 1kg 정도로 비교적 큰편으로, 송신부의 소형화 자체는 앞으로의 연구과제로 남아있다. 개발된 무선식 AE 장치의 외관은 Fig. 2와 같다.

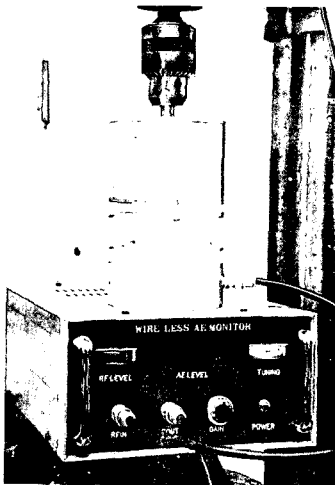


Fig. 2 Overall view of the wireless AE monitoring system a : transmitting module. b : receiving antenna, c : receiving module

### 3. 정지상태에서의 특성조사

FM방식의 신호 전송에서 신호의 크기는 RF 신호의 진폭에 무관하고 단지 RF 주파수에만 관련되므로, 전파가 도달하는 어느 일정한 범위내에서는 송수신 안테나 사이에 거리에 무관하게 신호를 수신할 수 있다. 그러나, 안테나 사이의 거리가 어느정도 이상으로 멀어지면 RF 신호가 약해지고 잡음 신호가 상대적으로 커지게 될 것으로 예상된다. 실제로 개발된 무선식 AE 측정장치를 사용할 때에 이 장치의 설치조건을 결정하기 위해서는 송수신 안테나 사이의 거리에 따른 데이터의 전송 특성을 조사할 필요가 있으므로 이 장치가 정지된 상태에서 송신 및 수신용 안테나 사이의 거리가 변할 때의 데이터 전송 특성의 변화를 고찰하였다. 데이터 전송 특성은 모의 AE 신호에 대하여 수신되는 AE 신호의 크기와 AE 신호가 없을 때의 잡음의 크기를 조사하였다.

연필심 파괴를 재현성이 높은 AE 발생원으로 가정하여<sup>4)</sup>, 송신부의 같은 위치에서 모의 AE 신호를 발생시키고 이때 송수신 안테나 사이의 거리가 1cm, 5cm 및 10cm 일때에 수신된 신호를 Fig. 3에 나타내었다. 이 신호들을 비교하여 보면 AE 신호의 크기나 파형은 송수신 안테나 사이의 거리에 따라서 큰 변화가 없으나 잡음 신호의 크기는 거리가 멀어짐에 따라서 점차 증가함을 알 수가 있다. AE 신호의 크기를 Fig. 3에 표시한 A 및 B 부분의 전압으로 정의하고, 잡음의 신호는 탄성파가 없을 때의 RMS 전압계의 출력 전압으로 정의하여, 송수신 안테나의 거리가 0.5~50cm 범위일 때의 AE 및 잡음 신호의 크기 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 바는 예상한대로 안테나 사이의 거리가 증가함에 따라서 수신되는 AE 신호의 크기는 거의 변화가 없고, 잡음 신호의 크기는 증가하는 현상을 나타내었다. 따라서 안테나 사이의 거리가 멀어질수록 SNR이 낮아지는데, 특히 거리가 10cm 이후 부터는 잡음신호의 크기가 급격한 증가를 나타내었다. 따라서 이 무선식 AE 장치는 송수신 안테나 사이의 거리가 약 10cm 이내에서는 사용할 수 있음을 알 수 있는데 이는 실제 응용에 있어서 충분한 거리이다.

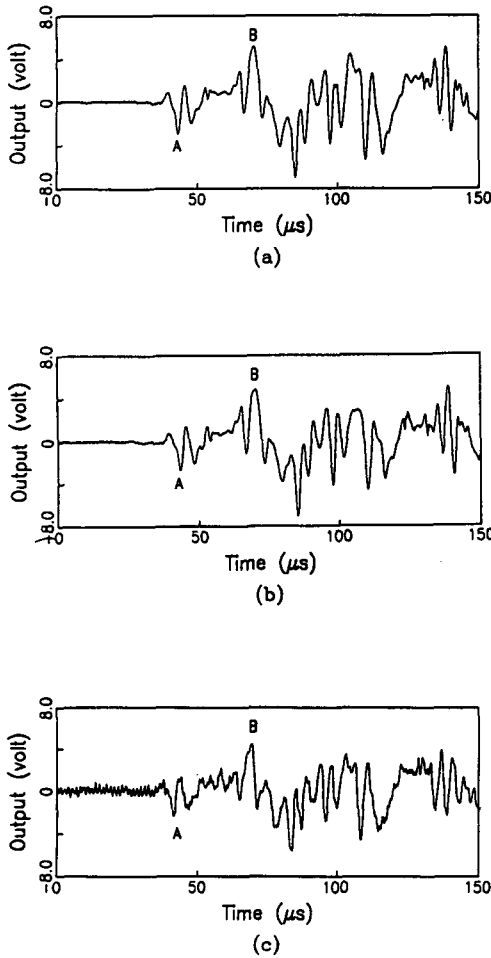


Fig.3 Received signals using the wireless AE system for pencil lead breaks. The distance between the transmitting and the receiving antennas were (a) 1cm, (b) 5cm, and (c) 10cm.

4. 회전시의 특성조사

개발된 무선식 AE 장치는 주로 회전기의 AE 진단 시험에 적용될 것으로 예상하여 본 장치의 송신부가 회전할 때의 기계의 진동신호에 의한 영향등을 고려하였다. 송신부를 Drilling Machine에 물리고 1600rpm의 속도로 회전시킬 때의 신호 전송특성을 조사하였다. 이때 송수신 안테나 사이의 거리는 1cm로

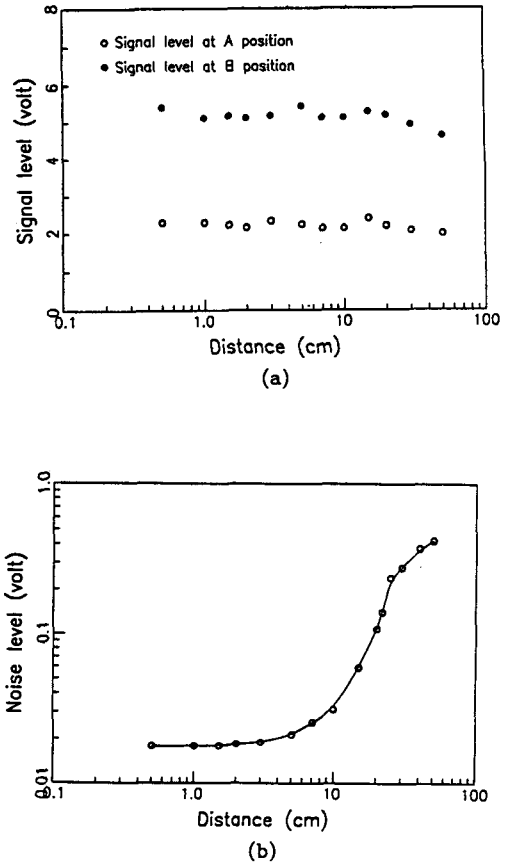


Fig.4 (a) AE signal and (b) noise levels versus the distance between the transmitting and the receiving antennas.

유지하였다.

탄성과 신호를 발생시키지 않고 Drilling Machine을 회전시켰을 때에 검출된 신호 및 주파수 스펙트럼은 Fig.5와 같다. 이 신호에서 보는 바와 같이 기계가 회전함에 따라 발생하는 잡음 신호가 매우 크게 나타났는데, 이는 무선식 AE 측정 장치에 의한 잡음이 아니라 회전하는 구조물 고유의 진동신호이다. 이 진동신호는 다른 AE 장치를 이용하더라도 나타나는 신호로서 그 크기는 거의 ±1Volt 정도이다. 이 크기는 AE 신호에 비하여 상당히 큰 신호로

회전체의 조기경보를 목표로 하는 경우 미세한 AE 신호의 발생은 검출이 곤란해진다.

Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 진동 신호는 주로 50kHz 이하의 주파수 성분을 지니고 있는데, 이 주파수 영역은 사용된 AE 센서의 공진 주파수에 비하여 상대적으로 낮은 주파수 성분이므로 AE 신호에 영향을 미치지 않는 범위에서 수신부의 출력신호를 Band - Pass Filter를 사용하여 제거하였다. Cut - off Frequency가 70-500kHz인 Band - Pass Filter를 사용한 후의 잡음 신호 및 주파수 스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. 그 결과로서 20kHz 근처의 잡음신호는 Filter에 의하여 그 크기가 60dB정도가 줄어들었고 50kHz 근처의 신호는 20dB 정도가 감소되었다. 따라서 회전에 의한 잡음 신호는 Filter를 사용하면 만족할 만큼 제거할 수 있다.

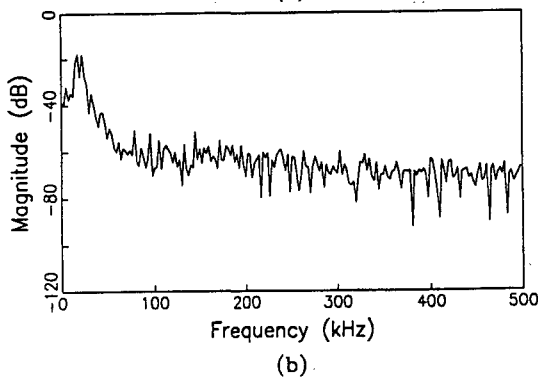
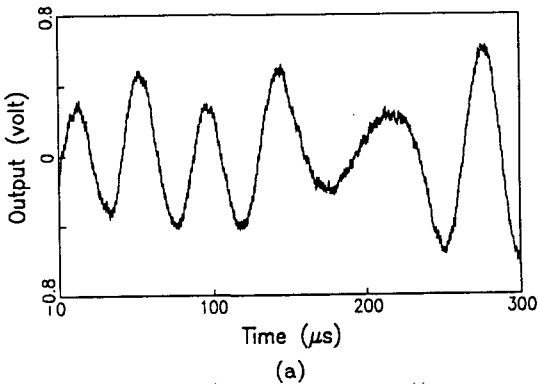


Fig. 5 Noise signal of rotating structures detected by the wireless AE system. (a) time domain waveform and (b) frequency spectrum

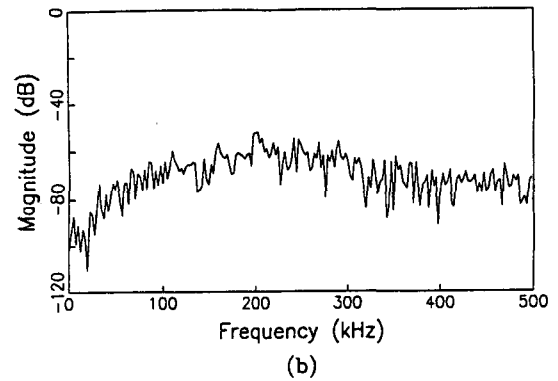
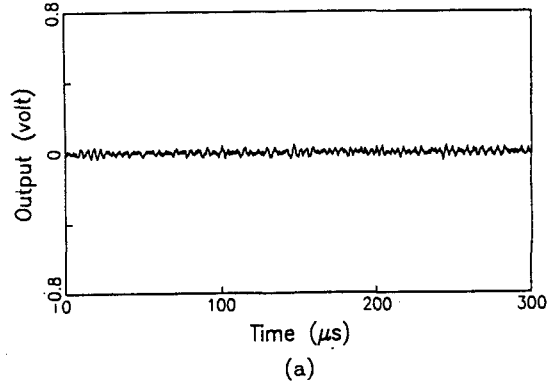


Fig. 6 Filtered noise signal of rotating structures detected by the wireless AE system. (a) time domain waveform and (b) frequency spectrum

Filter를 사용하지 않고 송신부에 연필심을 설치하고 회전에 파손시킬 때에 무선식 AE 장치로 수신한 신호와 그 주파수 스펙트럼을 Fig. 7에 나타내었다. Filter를 사용하지 않은 경우에 잡음 신호가 비교적 큼에도 불구하고, 회전시 발생하는 탄성과 신호가 훌륭하게 수신부로 전송되었는데, 이는 연필심 파괴가 실제 상황에서보다 비교적 큰 탄성파원이기 때문이다. 그러나, 이 경우에도 20kHz 근처의 잡음 신호에 해당하는 성분은 AE 센서의 공진 주파수에 해당하는 150kHz 근처의 신호의 크기에 비하여 -10dB 정도로 크게 작용하고 있어서 발생하는 AE 신호의 크기가 연필심 파괴의 1/10 또는 그 이하가

될 경우에는 검출이 곤란할 것으로 예상된다. 실제의 구조물에서 파손이 일어나는 초기에 발생하는 AE 신호의 크기는 연필심 파괴시 발생하는 신호에 비하여 매우 작을 것으로 예측되므로 이들을 검출하기 위해서는 Filter의 사용이 필요하다.

잡음 신호를 줄이기 위하여 Filter를 사용할 경우에 잡음 신호 뿐만 아니라 AE 신호 자체도 줄어들 수도 있으므로 Filter를 사용할 경우의 회전시에 발생하는 탄성과 신호 및 주파수 스펙트럼을 측정하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8로부터 AE 신호도 Filter의 영향을 받아서 Filter를 사용하지 않는 경우에 비하여 크기가 약 6dB 줄었음을 알 수 있는데, 잡음 신호는 20dB 이하로 줄었으므로 결과적으로 SNR은 15dB 정도 향상되었음을 알 수 있었다.

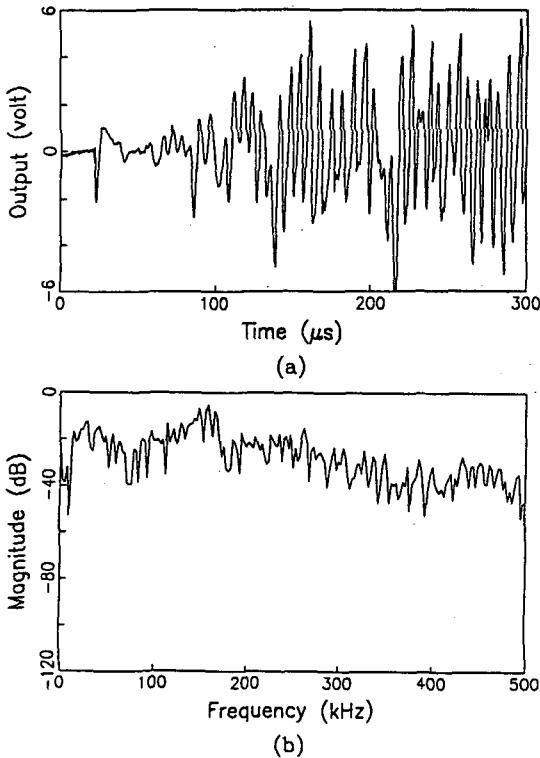


Fig. 7 AE signal generated by pencil lead breaks at rotating structures detected by the wireless AE system. (a) time domain waveform and (b) frequency spectrum.

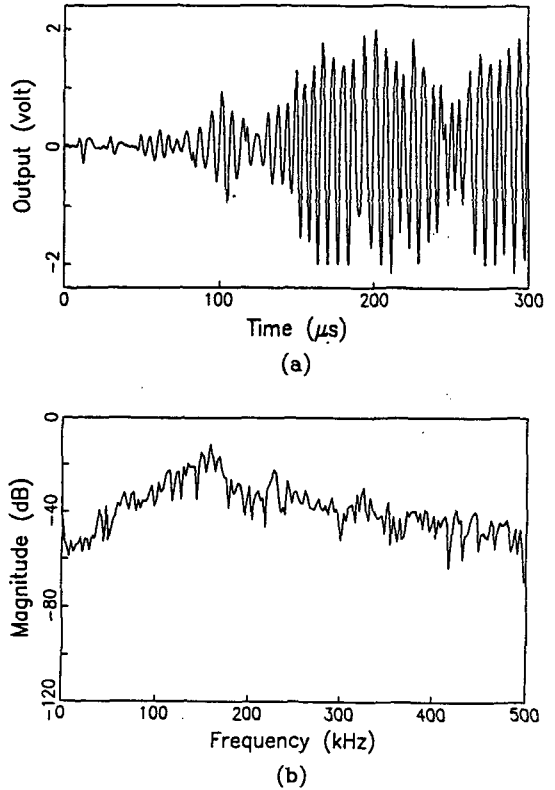


Fig. 8 Filtered AE signal generated by pencil lead breaks at rotating structures detected by the wireless AE system. (a) time domain waveform and (b) frequency spectrum.

여러개의 AE 신호가 Burst 형태로 인접하여 발생할 경우에 무선식 AE 장치의 신호 전송 특성을 조사하였다. 이를 위하여 여러개의 연필심을 일렬로 설치하여 회전시에 차례대로 파괴시키게 되면, 연필심의 갯수에 해당하는 탄성과 Pulse가 발생되는데, 4개의 연필심을 사용하였을 때에 검출된 신호를 Fig. 9에 나타내었다. 연필심 사이의 간격과 회전속도로 부터 탄성과 Pulse 사이의 시간간격을 계산하면 9.37ms로 이는 Fig. 9에서 pulse 사이의 시간 간격인 9.2ms와 잘 일치하였다.

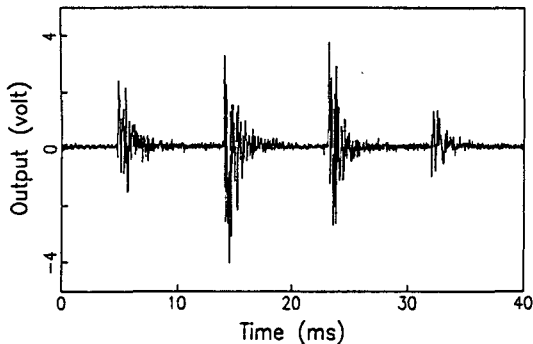


Fig.9 Multiple AE Signals generated by multiple breaks of pencil leads at rotating structures detected by the wireless AE system.

## 5. 결 론

회전기 진단을 위하여 무선식 AE 측정장치를 개발하고 그 성능을 평가하였다. Preamp와 SPU를 연결하는 전선을 제거하고 FM Telemetry로 대체하여 센서부분이 자유롭게 회전할 수 있으며 이로 인해 AE 신호의 검출에는 거의 지장을 받지 않음을 알 수 있었다. 개발된 무선식 AE 장치를 회전하고 있는 Rotor 등의 시험체에 직접 부착시키면 시험체 파손의 초기에 발생하는 미세한 AE 신호의 검출 가능성이 향상될 수 있다.

현재의 송신부의 크기는 매우 큰 편으로, 활용범위를 넓히기 위해서는 송신부의 크기를 줄여야 할 필요가 있다. 현재 사용된 AE 센서를 상용화된 것

을 사용하지 않고, 압전 소자 자체를 사용하게 되면 센서에 해당하는 크기는 쉽게 줄일 수 있다. 또한, 전자 회로는 전용 집적회로를 사용하면 소형화는 물론이고 소모전력을 줄일 수 있으므로 송신부의 소형화에 크게 기여할 것이다. 그러나, 송신부의 소형화의 가장 큰 장애요소는 전원부분으로, 지금의 충전식 전지를 사용할 경우 연구단계에서는 상관이 없지만, 이는 무겁고 사용시간이 짧아서 실용화에는 많은 문제점이 있다. 소형이고 수명이 긴 리튬 전지의 사용이나 Induction에 의한 전원의 외부 공급에 대한 연구를 통하여 해결해야 할 것이다.

## References

1. I. Sato, S. Sasaki, T. Watanabe and K. Takahashi, "Development of a wireless AE monitor and its application to the diagnosis to the rotating machinery", Proc. 5th Int'l AE Symp., pp. 454~464, Tokyo, Japan, Nov. 1980
2. I. Sato, T. Yoneyama, S. Sasaki and T. Sazuki, "Rotating machinery diagnosis with acoustic emission techniques", J. Acoustic Emission, Vol. 2, No.(1/2), pp. 1~10, Jan/Apr(1983)
3. L. J. Graham, et al., "Acoustic emission monitoring of steam turbines", EPRI CS-2367, Final Report, Rockwell Int'l to EPRI, Apr.(1982)
4. N. N. Hsu, "AE simulator", U. S. Patent, 4018084(1976)