

## 음향 방출을 이용한 저어널 베어링의 조기 파손 감지(Ⅲ)

### - 저어널 베어링 AE 진단 시스템 개발 -

정민화\*, 조용상\*, 윤동진\*\*, 권오양\*\*\*

\* 한전기술연구원 기술지원센터

\*\* 한국표준과학연구원 방재기술연구센터

\*\*\* 인하대학교 기계공학과

요 약 회전 기계의 저어널 베어링 상태를 음향 방출(AE) 기술을 활용하여 감시하기 위한 진단 시스템을 개발하였다. AE 기술은 베어링 시스템에 있어서 비정상 상태를 탐지하기 위하여 이용된다. 모의 저어널 베어링 시스템을 이용한 실험과 실제 발전 설비에 대한 적용 시험의 결과로부터 AE 신호 파라메타 중에서 rms voltage가 가장 유효한 것으로 판명되었으며, 이러한 연구 결과를 토대로 하여 진단 시스템의 알고리즘과 판단 기준들이 설정되었다. 베어링 진단 시스템은 AE 센서 및 전치앰프로 구성된 신호 감지부, AE rms voltage를 측정하기 위한 rms-to-DC 변환 회로부로 구성된 신호 처리부, A/D 변환기를 이용하여 rms voltage 신호를 PC에 연결해 주는 인터페이스부, 베어링 상태 보기와 진단 프로그램을 포함하는 그래픽 디스플레이 및 소프트웨어부의 4부분으로 구성된다.

### 1. 서 론

산업 설비, 기계류 등의 운전 및 감시 형태가 점차 무인화 및 자동화의 추세로 감에 따라 이들에 대한 유지 보수 및 사고 예방의 차원에서 설비 진단에 대한 관심이 매우 높아지고 있는 실정이다. 뿐만 아니라 이들의 설비는 점차 고속, 고부하, 고온 등의 운전 조건에 직면함에 따라 미소한 부분에서의 손상이나 파손시 대형 사고가 유발될 가능성이 높아지게 되며 그에 따른 피해도 상당히 크게 된다. 따라서 최근에는 설비의 진단에서도 손상을 조기에 발견하거나 미소한 결함을 조기에 발견하여 대처함으로써 적절한 부품 교체 및 보수가 이루어질 수 있도록 하는데 많은 관심이 집중되고 있다.

특히 발전 설비나 기계류에서의 회전체 부분은 위험과 대형 사고의 잠재적 요소를 가지고 있는 부분으로서 조기 감지 대상의 대표적인 경우라고 말할 수 있다. 따라서 이들 회전체에서 가장 중요한 부분이라 할 수 있는 베어링의 상태 감시 및 손상 감지에 관한 연구 및 기술의 적용은 매우 활발한 편이며 현재에도 이들에 대한 더 나은 조기 파손 감지 기술의 개발에 역점을 두고 있다.<sup>1-3)</sup> 그러나 지난 발표에서도 언급하였듯이 대부분의 연구들이 구름베어링에 대한 것들이 많은 편이며<sup>4, 5)</sup> 저어널 베어링에 대한 진단 기술은 상대적으로 저조할 뿐만 아니라<sup>6)</sup> 지금까지의 연구는 대부분 윤활층에서 발생하는 마모 입자 분석이나 윤활유 상태 감시 등의 방법에 의존하고 있는 실정이다.<sup>7-10)</sup>

따라서 본 연구는 음향 방출 기술을 이용하여 베어링 손상의 대표적인 요인으로 알려져 있는 베어링과 축간의 금속간 접촉이나 윤활층내의 이물질의 침입 등에 의한 손상을 조기에 검출하는 기술을 개발하고 실질적으로 설비의 진단에 활용될 수 있도록 베어링 진단 시스템을 개발하는 것을 주 목적으로 하였다. 베어링 손상의 조기 진단 기술에 관한 연구 내용은 이전 발표<sup>11), 12)</sup>에서 이미 보고하였으며 이번 연구에서는 음향 방출을 이용한 저어닐 베어링 진단 기술을 바탕으로 실제 설비 진단에 적용될 수 있는 베어링 진단 시스템의 개발에 주 관점을 두었다.

**2. 측정 및 감시의 원리**

본 베어링 진단 시스템은 베어링과 축 사이의 유체 윤활에 의해 분리된 윤활층에의 외부 이물질의 혼입이나 내부에서 발생한 마모 입자 등에 의한 베어링 손상 요소 및 베어링과 축간의 상호 금속간 접촉으로 인한 베어링 손상의 조기 발견을 위해 음향방출 센서를 사용하여 진단하게 된다. 즉 정상적인 운전 및 베어링 상태에서의 신호와 앞서 언급한 비정상 상태에서의 신호를 비교 판정함으로써 손상의 형태 및 정도 등을 알려 주게 되며 이런 현상을 조기에 발견하여 관찰함으로써 대형 사고의 위험을 예방할 수 있게 된다.

특히 본 시스템은 베어링이나 하우징에 부착된 센서를 통해 베어링에서 발생하는 탄성파를 감지함으로써 운전중에도 항상 감시할 수 있는 장점이 있으며 센서 및 전치증폭기 출력 이후의 모든 진단 및 신호 처리는 제어실에서 보기 쉽게 감시할 수 있도록 되어있다. 그 원리를 보면 Fig. 1에서 보는 바와 같이 베어링에서 발생한 비정상 신호는 센서에서 탐지되고 전치증폭기를 거친 후 rms 회로 및 필터링 기능을 가진 신호 처리부를 거쳐 각 베어링에 대한 채널별 AE rms voltage level을 내보내게 된다. 이들 신호는 AD 변환기를 거친 후 진단 프로그램에서 디스플레이되며 모의 실험 연구 결과에서 얻은 데이터 베이스를 근거로 한 신호 형태 분류를 이용하여 최종적인 AE level의 체크 및 손상에 대한 정보를 알려주게 된다.

이 정보는 경보음이나 다른 방법을 통해 설비 감시자에게 알려지게 되고 자동 및 수동에 의해 운전

자가 설비에 관련된 다른 정보를 종합하여 운전 정지 및 기타 조치에 관련된 최종적인 결정을 내리게 된다.

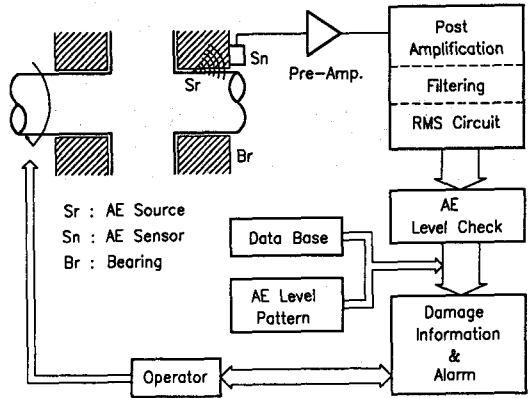


Fig. 1. Principle of AE monitoring by the diagnosis system.

**3. 베어링 진단 시스템의 구성**

본 연구에서 개발된 베어링 진단 시스템은 크게 4 부분으로 나눌 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 첫째는 신호 감지부로서 베어링이나 하우징에 부착된 AE 센서와 센서 출력 신호를 취급이 가능한 정도의 신호로 증폭하는 전치증폭기까지를 포함하게 된다. 센서는 운전 특성에 따라 광대역형이나 공진형의 센서를 사용하게 되며 전치증폭기에서는 40 또는 60 dB의 증폭을 하게된다. 둘째는 신호 처리부로서 전치증폭기에 공급되는 DC power supply 및 전치증폭기 출력 단자로부터 AE 신호를 추출해 내는 decoupling 회로부와 이들 신호의 rms voltage level을 계산해 주는 rms-to-DC 회로부 그리고 증폭 및 필터링 역할을 하는 부분으로 구성되어있다. 셋째는 인터페이스부로서 이 rms 출력을 PC에 연결하여 그래픽 처리 및 데이터 처리를 위한 analog-to-digital 변환부의 역할을 하는 부분으로서 베어링 숫자 만큼의 채널을 보유한 다채널 A/D 변환기 보드 및 입출력 단자 터미널로 구성된다. 단자 터미널은 앞 부분의 회로 박스에 포함되며 A/D 변환기는 컴퓨터내의 확장 슬롯에 설치된다. 네번째 부분은 자체에서 개발한 그래픽 디스플레이용 소프트웨어를 사용하여 디지털화된 rms voltage 신호를 받아서 모니터상에 그 값을 히스토그램의 형태로 실시

간 디스플레이 해주며 경고 및 위험의 표시 기능, 데이터 저장 기능, 그리고 베어링 시스템을 화면으로 볼 수 있도록 해주는 소프트웨어 및 그래픽 기능 부분으로 구성된다.

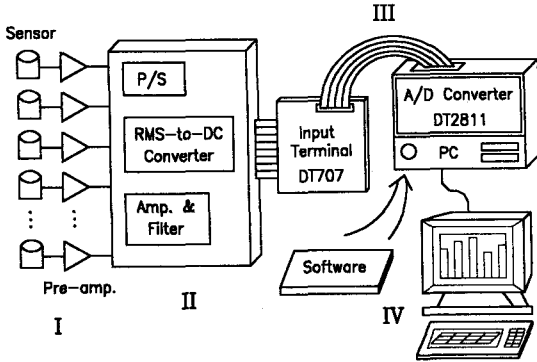


Fig. 2. Overview of the monitoring system for journal bearings.

4. 시스템 Flow Chart 및 판단/분류 기능

본 연구에서 개발한 베어링 진단 시스템은 기본적으로 센서에서 출력되는 신호가 rms 회로를 거쳐 AE 신호의 rms 값을 구한 다음 A/D 변환기를 거쳐 바로 컴퓨터로 연결되어 그 값에 대해 디스플레이 및 비정상 상태에 대한 판단을 행하게 된다. 따라서 비정상 상태 진단에 사용되는 데이터들은 디지털화된 샘플 데이터로서 이 값들을 신호 처리 기술을 이용하여 계산하게 된다. 입력 신호에 대해 베어링 시스템의 비정상을 알려주고 그 원인이 무엇 인지를 알려주는 판단 기준 및 결함의 분류에 대해 알아보면 다음과 같다.

모니터 상에서는 현재 각 베어링에서의 AE rms voltage level에 대한 값을 히스토그램 형식으로 그래픽 막대를 이용하여 실시간으로 나타내어 주며 이들 값이 미리 설정된 임계치값을 넘게 되면 경고, 즉 주의 경보와 위험 경보 등을 알려주게 된다. 또한 이 값들이 주의 경보 값을 넘게 되면 rms voltage level의 변화 형태에 따라 그 특성을 분류하기 위해 rms voltage level의 기울기(slope)와 변동하는 정도를 알 수 있는 레벨의 표준 편차(standard deviation)를 계산하게 되며 미리 입력된 판단 기준들(criteria)에 의해 비정상 상태의 분류 및 경고 메

시지를 알려주게 된다. 여기서 사용되는 판단 기준을 위한 입력 변수들은 설비의 조건 및 정상적인 주변 잡음(background noise)에 따라 달라지게 되나 대략 신호 레벨의 편차를 기준으로 하여 2-4배 정도의 값을 사용하게 된다. 이 과정에 대한 자세한 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다.

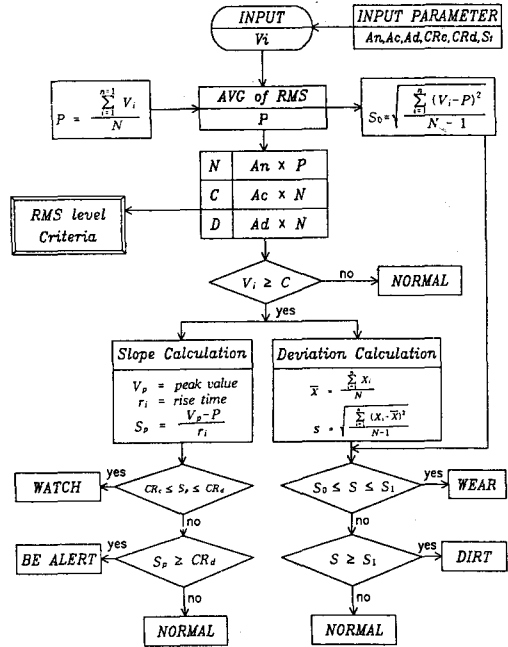


Fig. 3. Flow chart for judgement and classification of the system.

본 시스템의 진단 알고리즘은 크게 두 부분으로 나눌 수 있는데 첫번째는 임계치 설정값에 의한 일차적인 경보 기능이라 말할 수 있다. 즉 먼저 샘플링된 rms 입력신호를  $V_i$  라 할때 이 값은 자동 임계치 설정을 위해 제일 먼저 신호의 평균값(avg. of rms voltage)을 구하게 된다. 이 값은  $P$ 로 주어지며 그리고 현재 레벨에서의 신호에 대한 표준 편차값도 이때 미리 구하게 되며 이 값은  $S_0$ 로 주어진다. 두번째는 신호의 레벨이 일단  $C$  값을 넘게 되면 이차적인 신호 처리 프로그램을 수행하는데 이는 rms voltage level의 값이 주의 경보 임계치를 넘게 되면 이를 기준으로 일정한 기간 동안의 샘플링 신호에 대해 신호 레벨의 기울기(slope) 및 표준 편차를 계산하여 손상의 형태나 특성을 판단하는 기능

이다. 여기서 신호 레벨의 기울기는 손상 상태의 심각함을 판단하는 기준이 되며, 표준 편차의 값은 마모 및 손상의 형태를 구별하는데 사용이 된다.

5. RMS 회로 구성 및 특성

본 연구에서는 AE rms voltage level의 측정은 주로 열적 방법(thermal method)을 이용하는 Hewlett-Packard 회사의 HP3400A rms voltmeter를 사용하였으나 본 연구의 결과를 실제 진단 시스템에 사용하는 경우에는 부피 및 가격의 면에서 훨씬 효율적이 되도록 시중에서 구할 수 있는 rms-to-DC 컨버터를 사용하여 rms 회로를 제작하였다. 즉 이 IC를 이용하여 회로 box내에 다수 채널에 해당하는 만큼의 회로를 구성할 수 있도록 하였다.

현재 rms-to-DC 컨버터에는 몇 종류가 있으나 이들중 성능이 우수한 AD637J 을 선정해 회로를 구성하였다. 이 컨버터는 다른 종류와는 달리 inverting low pass filter 단계를 사용함에 의해서 입력 신호 레벨의 크기에 관계없이 평균화 시정 상수의 값이 일정하게끔 buffered voltage output을 제공해 준다.<sup>13)</sup> 여기서 조절해 주어야 하는 값은 오직 CAV 이며 이 값은 rms 값의 특성에 크게 영향을 미치므로 잘 선정해야 한다. CAV는 회로에 사용되는 커패시턴스의 값을 의미한다. 즉 평균화 시정 상수(averaging time constant)의 값이나 DC error의 크기 그리고 output ripple의 최대치 등에 영향을 직접적으로 미치게 된다. 평균화 시간은 rms 컨버터가 계산하는 동안 입력 신호를 붙잡고 있는 시간이므로 이것은 rms 측정의 정확도에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 여기서 평균화 시정 상수의 값과 CAV 값과의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\tau \text{ in seconds} = \frac{0.025 \text{ seconds}}{\mu\text{F}} \times C_{AV} \dots\dots\dots(1)$$

6. 그래픽 Display 프로그램 개발

6.1 프로그램 구성 및 기능

프로그램은 그래픽 처리 및 프로그램 구성의 장점을 가진 Borland C++ 언어로서 한글 Windows 환경에서 작업을 하였으며 실제 운영시에는 실행 화일을 한글 Windows 환경에서 수행하기만 하면 된다.

각 프로그램의 구성 및 기능 그리고 전반적인 역할에 대한 것을 Fig. 4에 기능별 블록 다이어그램으로 표시하였다.

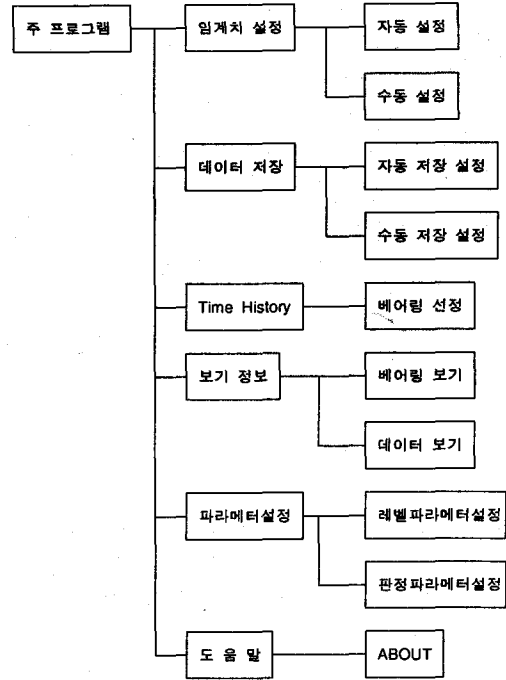


Fig. 4. Block diagram with detailed function of the diagnosis system.

먼저 주 프로그램에서는 베어링 진단 시스템의 주 화면, 즉 각 베어링에 대한 rms voltage level을 히스토그램 형식으로 실시간 그 정보를 알려주는 역할을 담당하며 주의 및 위험 경보를 해당 색으로 써 표시하는 기능을 맡게 된다. 그리고 주 프로그램이 총괄하는 기능으로서 주의 및 위험 경보의 기준치가 되는 임계치 설정 기능, 경보시에 자동 및 수동으로 작동하는 데이터 저장 기능, 원하는 베어링에 대해 수시로 시간에 대한 rms voltage level의 정보를 볼 수 있게 하는 time history 기능, 현재의 베어링 상태나 데이터를 볼 수 있는 보기 정보 기능, 손상의 판단 및 분류에 관계되는 기준치 설정의 기능인 파라메타 선정 기능, 그외 시스템의 정보를 알려주는 도움말 기능 등으로 구분할 수 있다.

6.2 진단 시스템의 그래픽 화면

베어링 진단 시스템의 주 화면은 각 베어링 번호에 따른 AE rms voltage level의 값을 히스토그램 형식으로 실시간 연속적으로 표시하게끔 되어있다. Fig. 5는 프로그램 실행시 초기의 주 화면을 나타내고 있다. 즉 해당 베어링에 대해 각각의 세 종류의 색으로써 정상(normal), 주의(caution), 그리고 위험(danger)의 영역이 표시되며 실제 rms voltage level이 주의나 위험의 영역으로 들어갈 때는 경보음을 울리게 되어있다. 앞서 설명한 각각의 기능들은 화면의 상단에 메뉴 방식으로 선택할 수 있게 되어 마우스를 이용하여 손쉽게 관심있는 정보를 선택할 수 있도록 구성되어 있다.

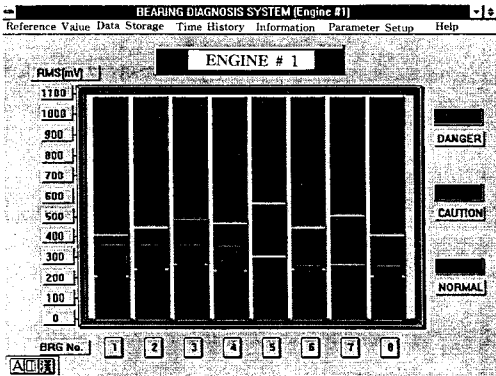


Fig. 5. Primary screen with main program being executed.

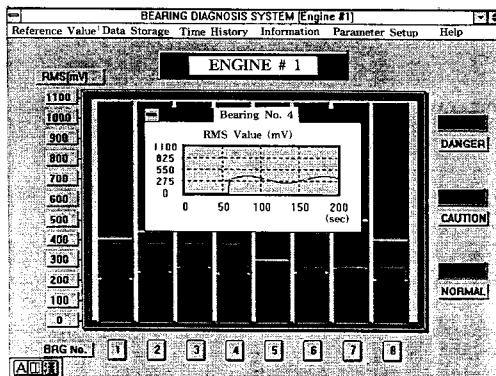


Fig. 6. Screen for AE rms voltage level for No. 4 bearing by time history menu.

Fig. 6은 선택 가능한 여러 종류의 화면 중의 한 예로서 time history 메뉴 선택시 4번 베어링을 선택했을 경우의 시간에 따른 AE rms voltage level의 변화를 보여주고 있다.

7. 진단 시스템 적용 시험 결과

실험실에서의 진단 시스템의 성능을 확인한 후 실제 발전 설비의 내연 엔진 베어링에 적용을 시도하여 그 결과를 확인해 보았다. 실험실에서는 모의 신호에 의한 시스템 작동 및 신호 판별에 대해 정상적으로 운영이 됨을 확인하였다. 그리고 실제 설비에의 적용으로서는 발전 설비중의 하나인 내연 엔진에 사용되는 메인 베어링에 센서 및 전치증폭기를 설치한 후 운전중에 발생하는 신호를 취득하여 시스템 작동 성능 및 rms voltage level을 분석하였다. 불행히도 실제 설비의 경우에는 가상 결함을 적용할 수가 없어 정상 운전 동안에의 신호만을 계측함으로써 확인하도록 하였다. 대표적인 결과로서 Fig. 7은 광대역형 센서를 사용하였을 경우(WD by PAC, 100- 300 kHz plug-infilter)의 정상 운전 동안에 측정된 결과이다. 1 시간에 걸친 기간 동안 거의 큰 변화없이 측정이 원활히 됨을 확인하였으며, 센서 종류 및 여러 종류의 주파수 대역에 대해 rms voltage level를 측정된 결과 가장 안정되고 최적의 주파수 대역이라고 생각되는 센서 및 필터 주파수 대역을 선정하였다. 즉 광대역형 센서 WD(by PAC)와 200 kHz high pass plug-in filter로 결정하였다. 이 조건에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 결과적으로 개발 제작된 진단 시스템은 실험실 조건의

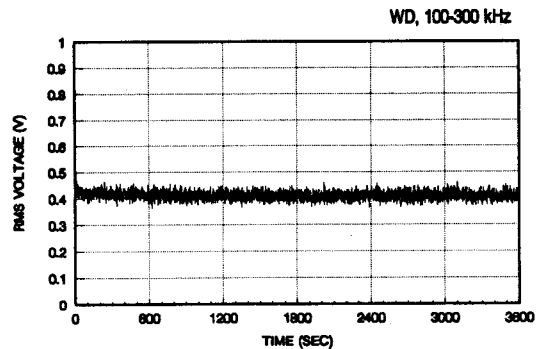


Fig. 7. AE rms voltage level with time during normal operation of engine (for WD sensor, 100-300 kHz plug-in filter).

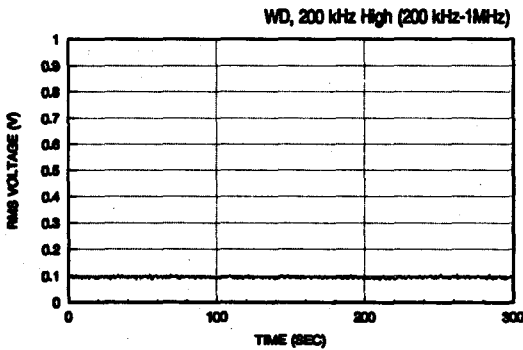


Fig. 8. AE rms voltage level with time during normal operation of engine (for WD sensor, 200 kHz high pass plug-in filter)

성능 실험 및 실제 설비에서의 적용 시험에서도 원활히 작동하는 좋은 결과를 얻었다.

8. 결 론

발전 설비와 같은 대형 회전 기계에 사용되는 저어널 베어링의 손상 감지를 위한 진단 시스템을 음향 방출(AE) 기술을 이용하여 개발하였다. 모의 저어널 베어링 시스템을 제작하여 수행한 실험실에서의 연구의 결과와 실제 내연 기관 발전소에 적용해 본 연구 결과를 토대로 본 시스템의 진단 및 손상의 판단 및 분류 기능에 대한 알고리즘을 완성하였으며 실제 설비에서 사용이 가능하도록 PC 운영 체제하에서 조작할 수 있는 하드웨어, 진단 및 그래픽 디스플레이 소프트웨어를 개발하였다.

본 베어링 진단 시스템은 범용의 AE 장비와는 달리 특정한 파라미터, AE rms voltage만을 측정하는 형태로 계측 회로를 구성하였으므로 다수 센서의 사용시에도 시스템 하드웨어가 간소화되는 장점이 있다. 또한 이들 진단 결과를 칼러 모니터 상에

그래픽 형태로 나타내고 메뉴 방식으로 다양한 기능을 사용할 수 있도록 함으로서 사용자가 손쉽게 편리하게 다룰 수 있도록 하였다. 마지막으로 개발된 진단 시스템을 실험실 시험 및 실제 설비에 적용하여 정상적으로 잘 작동됨을 확인하였다.

참고 문헌

- 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, and J. D. Smith, Tribology International, Vol. 17(1984), pp. 3-10
- 6) I. Sato, T. Yoneyama, S. Sasaki, T. Sazuki, J. of Acoustic Emission, Vol. 2(1983), pp. 1-10
- 7) P. Cooper, J. of NDT, March(1983), pp. 75-83
- 8) V. Hudnik, J. Vizintin, Tribology International, Vol. 24(1991), pp. 95-98
- 9) T. Akagaki and K. Kato, Wear, Vol. 152 (1992), pp. 241-252
- 10) R. C. Elwell, EPRI Proceedings EPRI CS-4024, Vol. 4024(1985), 3/1-25
- 11) 윤동진, 권오양, 정민화, 김경웅, 비파괴검사학회지, 제14권 제1호 (1994), pp. 16-22
- 12) 윤동진, 권오양, 정민화, 김경웅, 비파괴검사학회지, 제14권 제2호 (1994), pp. 122-131
- 13) C. Kitchin and L. Counts, "RMS to DC Conversion Application Guide," 2nd edition, Analog Device (1988)

## Acoustic Emission Monitoring of Incipient Failure in Journal Bearings(Ⅲ)

- Development of AE Diagnosis System for Journal Bearings -

Min-Hwa Chung\*, Yong-Sang Cho,\* Dong-Jin Yoon\*\*, Oh-Yang Kwon\*\*\*

\* Korea Electric Power Research Institute

\*\* Korea Research Institute of Standards and Science

\*\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Inha University

Abstract. For the condition monitoring of the journal bearing in rotating machinery, a system for their diagnosis by acoustic emission(AE) was developed. AE has been used to detect abnormal conditions in the bearing system. It was found from the field application study as well as the laboratory experiment using a simulated journal bearing system that AE RMS voltage was the most efficient parameter for the purpose of current study. Based on the above results, algorithms and judgement criteria for the diagnosis system was established. The system is composed of four parts as follows: the sensing part including AE sensor and preamplifier, the signal processing part for RMS-to-DC conversion to measure AE rms voltage, the interface part for transferring RMS voltage data into PC using A/D converter, and the software part including the graphic display of bearing conditions and the diagnosis program.

---

(Received: March 14, 1996)