

밸브누설 진단용 PZT 및 Pb-Free 음향센서의 압전특성 비교 연구

이상국[†]·박성근*

Study on the Comparison of Piezoelectric Property of Acoustic Sensor for Valve Leak Diagnosis

Sang-Guk Lee and Sung-Keun Park

Key Words: Valve Leak(밸브누설), Piezoelectric Acoustic Emission Sensor(공진 압전 음향센서), Pb-Free Acoustic Emission Sensor(무연 압전 음향센서), Fourier-Frequency Transform (푸리에 변환), Frequency Analysis(주파수분석)

Abstract

To compare the sensor performance of AE leak diagnosis system which can measure valve leak conditions, AE activities such as RMS voltage level, AE signal trend, leak rate degree according to AE database, FFT spectrum were measured on valve of the simulated test system for power plant. AE activities were recorded and analyzed from various operating conditions including different temperature, pressure difference, valve size and fluid using both piezoelectric acoustic emission sensor and Pb-Free acoustic emission sensor. The results of this study are utilized to select the type of sensors, the frequency band for filtering and thereby to improve the signal-to-noise ratio for diagnosis or monitoring of valves in operation. As the final result of application study above, portable type leak diagnosis system by AE was developed. The outcome of the study can be definitely applied as a means of the diagnosis or monitoring system for energy saving and prevention of accident for power plant valve.

1. 서 론

현재까지 발전소에서 사용되어온 밸브 누설검사에는 레벨 감소 체크, 압력계를 이용한 입출구 압력차, 온도 및 습도측정, 내압(가압) 시험 및 진공(감압) 시험 등을 이용하여 왔으나, 미소 누설상태(누설유무, 누설율, 누설속도 및 누설형상 등)의 정보에 대한 실시간 측정이 불가능하고 측

정 신뢰도면에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 측정이 신속하고 측정 정밀도가 높으며 미소 누설상태의 실시간 측정평가 및 감시(on-line monitoring)가 가능한 음향방출기술에 의한 밸브누설 감시시스템의 적용이 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 음향방출기술에 의한 밸브누설 감시시스템의 적용을 위하여 진단시스템에 적합한 음향센서의 특성을 평가하여 고감도 및 환경친화형 음향센서를 개발하기 위해 무연 압전(Pb-Free Type) 음향센서와 기존 공진 압전(Piezoelectric Type) 음향센서를 이용하여 밸브 누설 실험을 수행하였다. 이들 결과로부터, 발전소 밸브 누설진단에 적합한 음향센서를 결정함으로

[†] 회원, 한전 전력연구원

E-mail : sglee@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5650 FAX : (042)865-5604

* 한전 전력연구원

써 향후 확대 적용을 도모하고자 하였다. 본 논문에서는, 두 가지 음향센서에 대한 압전특성 및 음향신호 수신감도 등을 분석한 결과를 소개하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험밸브

본 실험에 사용된 시험밸브는 원자력발전소에 실제로 설치 및 사용중인 밸브와 동일한 밸브이다. 2인치 게이트밸브이며 경수로형 원자력발전소의 고압터빈 증기 배기라인에 설치되어 있으며, 시험밸브의 주된 사양을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Specifications of the test valve

Specification	
Valve Type	Motor Operated Gate Valve
Valve Name	PWR High-temp. Turbine Steam Exhaust Valve
Valve Size(inch)	2
Max. Pressure(LB)	900
Operating Pressure(kgf/cm ²)	12.5
Operating Temperature(°C)	310
Fluid	Steam
Valve Material	A217WC9

고압터빈 증기 배기계통 밸브는 고압터빈의 응축된 응축수를 복수기로 배수하기 위한 역할을 하는 밸브들이다. 차압 및 온도는 정상 운전 중 약 10~28.8 kg/cm² 및 약 310 °C의 조건으로 운전되는 소형밸브로 출력에 따라 개폐 제어되는 모터구동밸브(MOV; Motor Operated Valve)이다. 주로 닫힘상태에서 운전되며 누설발생시 출력 및 열손실 등에 큰 문제점을 초래하게 된다.

2.2 실험장치 및 실험방법

질소가스에 의한 밸브누설 시험방법은 Fig.1에 나타낸다. 질소가스에 의한 밸브누설시험은 밸브 입구측에 감압한 질소가스를 가압하여 누설상태를 모의한 밸브 출구측 시트면의 누설부를 통과시켜 밸브 출구측에서 대기중으로 방출하였다. 밸브 시트면에 있어서 누설로 발생하는 음향은 밸브외벽에 부착한 음향센서로 검출한다. 음향센

서는 PZT 압전소자 타입과 Pb-Free 압전소자 타입의 2가지 공진형 음향센서이며, 공진주파수가 143 kHz와 178 kHz의 것을 사용하였다. 음향센서로부터의 출력은 전치증폭기(preamplifier)에서 20dB로 증폭시킨 후 주증폭기(main amplifier)에서 20 dB 증폭시켰다. 전치증폭기의 주파수대역은 20kHz에서 2MHz이며, 또한 AE 측정장치의 주파수대역은 1kHz에서 400kHz이다. 사용된 음향측정장치의 사양을 Table 2에 나타낸다.

Table 2 Specifications of measuring instrument

측정기	형식 및 사양
AE Sensor	PZT : Resonance Frequency 143 kHz, Operating Temperature 150 °C under PB-Free : Resonance Frequency 178 kHz, Operating Temperature 120 °C under
Pre-amplifier	Frequency Band 20kHz~2MHz, Gain 20, 40, 60 dB
Local Processor	Frequency Range 1kHz~400kHz, cut-off Frequency THRU- THRU, Gain 20 dB

밸브 시트면의 누설상태는 밸브 디스크에 균열손상이 발생하여 누설이 발생하는 경우를 모의하였다. 미소개도의 누설상태는 균열손상 깊이를 변화시켰다. 누설량은 누설형상과 밸브 출입구의 차압에 의해 변화하며 압력에 따라 비례하므로 밸브 입구압력을 변화시켜 누설량을 조절하였으며, 이 때 정확한 누설량은 측정하지 않았다. 밸브입구의 압력은 2~10 kgf/cm²이며 2, 6, 10 kgf/cm²의 세 가지 압력으로 변화시켰다.

밸브 디스크에 대한 균열손상은 밸브 하부의 시트 방향면(Fig.2의 "A" 표시 부분)에 V노치손상을 절삭용 바이트로 가공하였다. V노치의 최소손상깊이는 0.5, 1.0, 3.0 및 5.0 mm의 세 가지 타입으로 가공하여, 누설량은 주로 이 깊이를 변화시켰다. 질소가스 누설에 따라 발생하는 음향은 밸브 입구압력, 누설형상 등의 시험조건외에 밸브 크기, 압력등급에 의한 밸브몸체, 밸브시트 폭, 밸브박스두께 등이 음향전파특성에 영향을 준다. Fig.2는 밸브 디스크 및 밸브 시트형상과 V노치 가공 위치를 나타낸다.

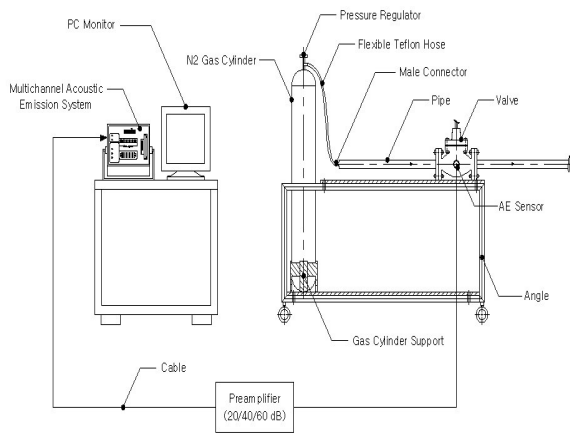


Fig. 1 Experimental apparatus

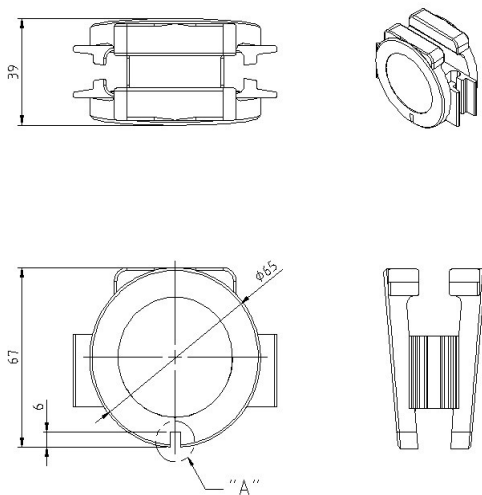


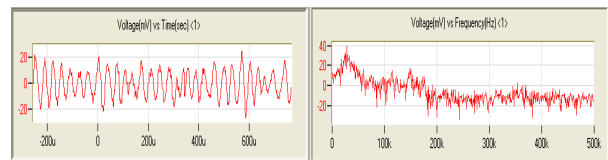
Fig. 2 Shape of valve disk and seat

3. 실험결과 및 고찰

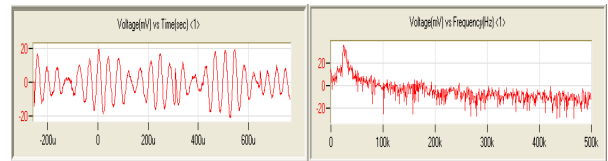
3.1 음향신호의 전압 및 FFT 파형 특성

Fig.3의 (a)~(d)는 질소가스 누설실험에서 밸브 디스크 균열손상 크기를 0.5 mm하였을 때, 입구 압력 변화에 따른 PZT(이하 No.1 센서) 및 PB-Fee(No.2 센서) 음향센서 각각으로부터 취득한 음향신호의 전압 및 FFT 주파수분석 파형을 분석한 결과이다. Fig.3의 (a)~(d)에서 시간에 따른 전압파형을 보면, 유체누설에 따른 전형적인 연속형 신호(continuous type signal) 특성을 잘 나타

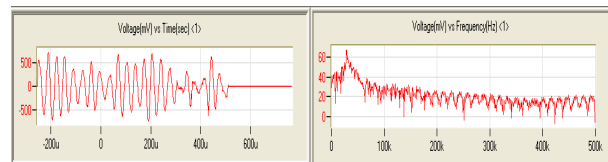
내고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig.3에서 FFT 주파수 파형을 보면, 압력증가에 따라 거의 유사한 25kHz의 최대주파수(peak frequency)를 나타내지만 Y축의 전압진폭(voltage amplitude) 크기는 40 mV에서 60 mV로 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한, No.1 센서와 No.2 센서 양자를 비교하면 압력증가 및 균열크기에 따른 전압파형 및 FFT 주파수 파형의 최대주파수(peak frequency) 및 진폭(amplitude) 변화는 거의 유사한 특성을 나타내고 있다.



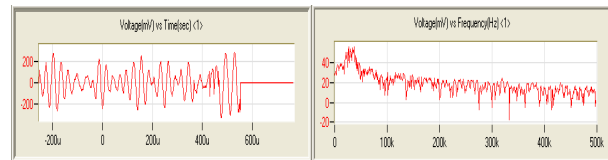
(a) 0.5 mm, 2 bar sensor1



(b) 0.5 mm, 2 bar sensor2



(c) 0.5 mm, 6 bar sensor1



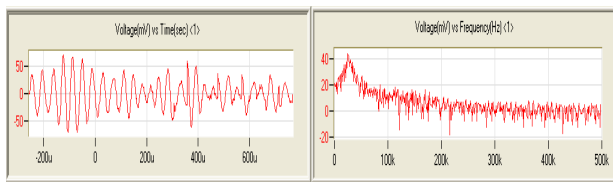
(d) 0.5 mm, 6 bar sensor2

Fig.3 Voltage and FFT waveform analysis

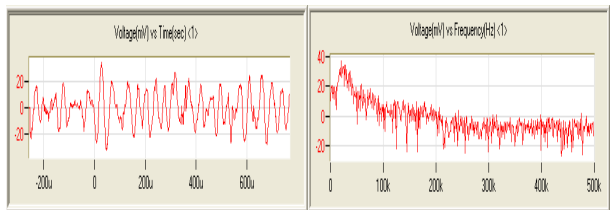
(0.5 mm V notch)

Fig.4의 (a)~(e)는 질소가스 누설실험에서 밸브 디스크 균열손상 크기를 5.0 mm로 하였을 때, 입구 압력 변화에 따른 No.1 및 No.2 음향센서 각각으로부터 취득한 음향신호의 전압 및 FFT 주파수분석 파형을 분석한 결과이다. Fig.4에서 시간

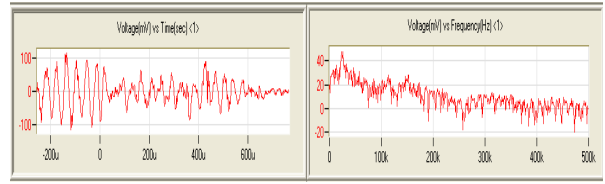
에 따른 전압파형을 보면, 유체누설에 따른 전형적인 연속형 신호(continuous type signal) 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig.4에서 FFT 주파수 파형을 보면, 압력이 2~6 kgf/cm² 증가에 따라 거의 유사한 25kHz의 최대주파수(peak frequency)를 나타내지만 10 kgf/cm²의 압력에서는 약 50 kHz의 피크주파수(peak frequency)를 나타내고 있어 누설 압력에 따른 주파수특성변화를 알 수 있다. 그러나, 밸브 디스크 균열손상 크기가 5.0 mm로 증가됨에 따라 주파수 Y축의 전압진폭(voltage amplitude) 크기는 피크주파수에서 40 mV로 음향진폭 크기는 변화하지 않고 있다. 이는 밸브 디스크 균열의 크기가 증가함에 따라 음향밀도(acoustic density)가 밸브내부 공간에서 감소하여 압력증가에 따른 음향크기와 감소의 양이 거의 상쇄되어 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig.4의 (d)에서 전압진폭이 피크주파수에서 80 mV가 된 것은 신호취득시 수신감도이상으로 전치증폭기의 이득(gain)을 순시적으로 60 dB로 증가시킨 것이므로 전체적인 파형변화는 없는 것으로 생각된다. 또한, No.1 센서와 No.2 센서 양자를 비교하면, 밸브 디스크 균열손상 크기가 3.0 mm의 경우와 같이 압력증가에 따른 전압파형에서 2~6 kgf/cm²까지는 약간 상이한 파형을 가지지만 10 kgf/cm²에서는 거의 유사한 전압파형을 나타내고 있다. FFT 주파수 파형에서는 압력증가에 따른 최대주파수(peak frequency) 및 진폭(amplitude) 변화는 거의 유사한 특성을 나타내고 있다.



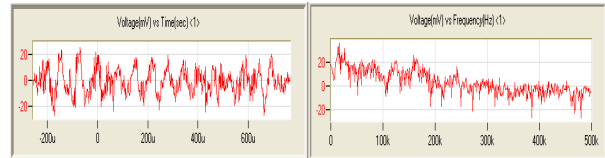
(a) 5.0 mm, 2 bar sensor1



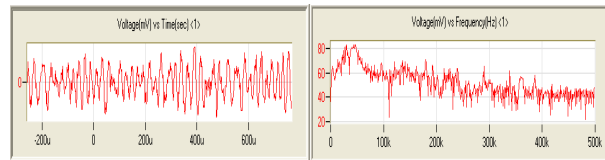
(b) 5.0 mm, 2 bar sensor2



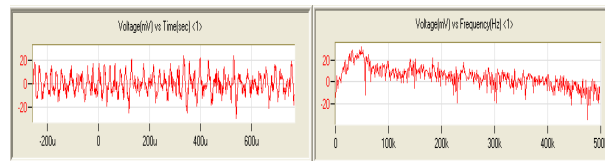
(c) 5.0 mm, 6 bar sensor1



(d) 5.0 mm, 6 bar sensor2



(e) 5.0 mm, 10 bar sensor1



(f) 5.0 mm, 10 bar sensor2

Fig. 4 Voltage and FFT waveform analysis (5.0 mm V notch)

3.2 음향신호변수(AE activity) 분석결과

Fig.5는 음향신호의 특성을 해석하기 위한 요약도이다. 그림에서 AE Threshold는 음향방출 시험기로 하여금 음향방출 신호로 인지하도록 설정하는 문턱전압(threshold voltage)값이다. Time of hit는 AE 신호가 AE 문턱전압(threshold voltage)를 초과하여 발생되기 시작하는 시간을 말하며 AE counts는 지속시간(AE duration)동안 문턱 전압값을 넘어서 하나의 사건(event)으로 음향방출시험장치에 인지되는 수로 정의된다. AE 진폭(amplitude)은 AE hit의 기간 동안의 최대의 (양과 음의) AE 시그널 진폭(excursion)을 가리킨다.

본 실험에서는 음향신호의 수신감도와 크기를 나타내는 이들 두 가지 음향특성을 이용하여 균열크기, 입구압력 및 두 종류 센서간의 비교검토를 수행하였다.

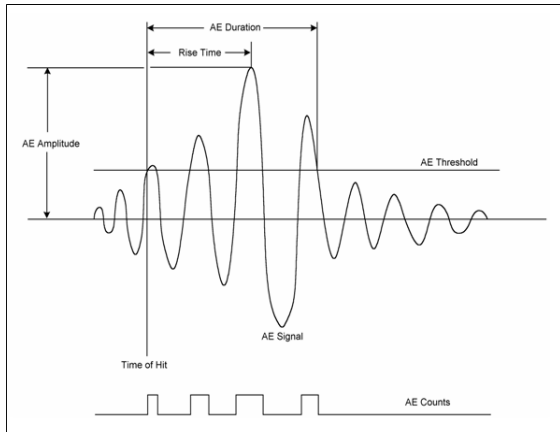
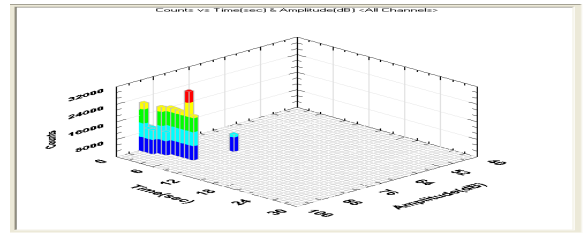
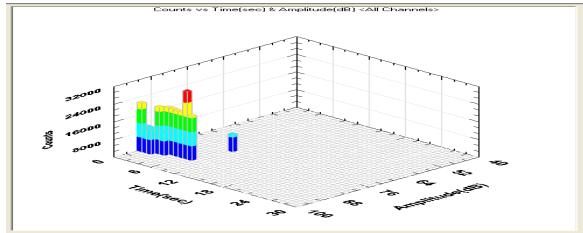


Fig. 5 Analysis diagram of acoustic emission signal

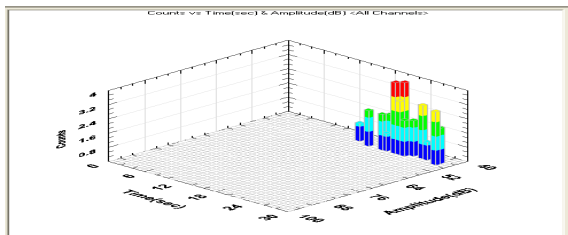


(e) 0.5 mm, 10 bar sensor1

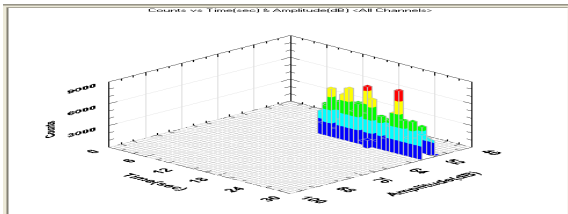


(f) 0.5 mm, 10 bar sensor2

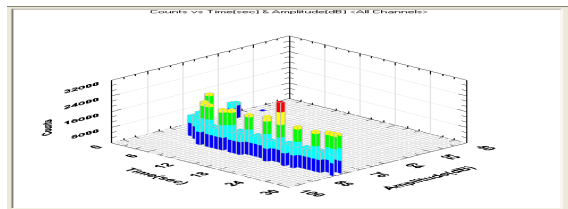
Fig. 6 AE counts vs time(sec) & amplitude(dB)



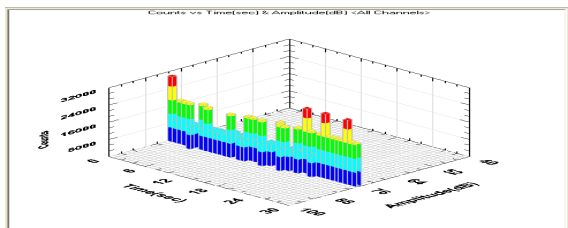
(a) 0.5 mm, 2 bar sensor1



(b) 0.5 mm, 2 bar sensor2



(c) 0.5 mm, 6 bar sensor1



(d) 0.5 mm, 6 bar sensor2

Fig.6의 (a)~(f)는 질소가스 누설실험에서 밸브 디스크 균열손상 크기를 0.5 mm하였을 때, 입구 압력 변화에 따른 No.1 및 No.2 음향센서 각각로부터 취득한 음향신호의 AE 카운트 및 진폭을 분석한 결과이다. Fig.6에서 보면, 압력이 증가함에 따라 AE 진폭의 크기는 증가하는 경향을 가지며 AE 카운터는 압력이 2 kgf/cm²에서 6 kgf/cm²로 될 때 증가한 후 10 kgf/cm²에서 다시 감소하는 경향을 가진다. No.1 센서와 No.2 센서 양자를 비교하면, 전체 압력범위에서 거의 유사한 AE 진폭범위를 가지며 AE 카운트는 2 kgf/cm²이외의 압력조건에서 거의 유사한 값을 가져 양 센서의 수신감도가 유사함을 알 수 있었다.

또한, 질소가스 누설실험에서 밸브 디스크 균열손상 크기를 5.0mm하였을 때, 입구압력 변화에 따른 No.1 및 No.2 음향센서 각각으로부터 취득한 음향신호의 AE 카운트 및 진폭을 분석한 결과, 압력증가에도 불구하고 AE 진폭의 크기는 거의 유사한 레벨을 나타내고 있는데, 이는 음향신호의 전압 및 FFT 파형 특성에서 고찰한 바와 같이 밸브 디스크 균열의 크기가증가함에 따라 음향밀도(acoustic density)가 밸브내부 공간에서 감소하여 압력증가에 따른 음향크기와 감소의 양이 거의 상쇄되어 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 전압진폭이 거의 100 dB에서 신호 크기를 나타내었으며 이는 신호취득시 수신감도가 이상으로 전치증폭기의 이득(gain)을 순시적으로

60 dB로 증가시킨 것에 기인한 것으로 분석된다.

4. 결 론

발전용 밸브 내부누설을 측정할 수 있는 최적의 음향센서를 선정하고 감도 높은 측정을 위하여 질소가스를 이용한 밸브누설 실험을 통하여 공진 압전형 및 무연 압전형 음향센서 특성비교 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전압파형 분석의 경우, 밸브 디스크 균열손상 크기에 상관없이 모두 전형적인 연속형 신호를 나타내어 양 센서에서 좋은 수신감도특성을 나타내었으며, FFT 주파수 파형분석의 경우는 밸브 디스크 균열손상 크기가 증가함에 따라 최대주파수(peak frequency)는 고주파수로 이동함을 알 수 있었다. 그러나 일정 균열크기에서 음향신호가 포화되는 상태를 확인할 수 있었다.

2) 음향신호의 AE 카운트 및 진폭(Amplitude) 특성분석에 있어서, 밸브 디스크 균열손상 크기가 증가함에 따라 AE 진폭(Amplitude)의 크기가 증가하며 AE 카운트는 상호 유사한 값을 가지는 경향으로부터 공진 압전(PZT) 및 무연 압전(PB-Fee) 음향센서 양자의 감도특성은 거의 유사함을 확인할 수 있었다.

3) 이러한 무연센서의 특성을 이용한다면 환경친화형 재료의 압전소자를 사용하여 고감도의 낮은 가격의 음향센서로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Kumagai, H. and Suzuki, A., 1990, "The Evaluation for Application of the Detection Method of Internal valve Leak Using Acoustic Method" , *CREIPI Report* No. T89011, pp.1~12.
- (2) Allen, J. W., Hartman, W. F. and Robinson, J. C., 1988, "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves" , *EPRI Report*, NP-2444, pp.22~30.
- (3) Kitazima, A., 1988, "Acoustic Leak Detection in Piping System(Part 1)" , *CREIPI Report* No.

277059, pp.21~32.

- (4) Kitazima, A., 1986, "Monitoring of Valve Operation conditions by Acoustic Method" , *CREIPI Report* No. 285089, pp.1~33.
- (5) Kumagai, H., Suzuki, A., Kitazima, A., Fukada T. and Tashiro, H., 1988, "The Availability of the Detection Method of Internal Valve Leakage Using Acoustic Method" , *CREIPI Report* No. T87112, pp.1~42.
- (6) Hartman, W. F., 1980, "Acoustic Monitoring of Relief Valve Position" , *EPRI Report*, NP-1313, pp.1~42.