

## AE법에 의한 발전용 밸브누설평가를 위한 주파수분석 연구

이상국\*

\*한국전력공사 전력연구원 원자력연구실

### A Study on the Frequency Analyzing of Leak Evaluation in Valve for Power Plant Using AE

SANG-GUK LEE\*

\*Nuclear Power Research Laboratory, KEPRI, KEPCO, Daejeon, Korea

**KEY WORDS:** Acoustic Emission(AE) 음향방출, Power Plant Valve 발전용 밸브, Valve Leak 밸브누설, Frequency Analysis 주파수분석, Background Noise 주변잡음

**ABSTRACT:** The objective of this study is to estimate the feasibility of acoustic emission method for the internal leak from the valves in nuclear power plants. The acoustic emission method was applied to the valves at the site, and the background noise was measured for the abnormal plant condition. From the comparison of background noise data with the experimental results as to relation between leak flow and acoustic signal, the minimum leak flow rates that can be detected by acoustic signal was suggested. When the background noise level are higher than the acoustic signal, the method described below was considered that the analysis the remainder among the background noise frequency spectrum and the acoustic signal spectrum.

#### 1. 서 론

발전소에는 수많은 밸브가 사용되고 있으며 그중 발전소 안전 운전에 큰 영향을 주는 밸브는 동작 건전성 검사, 밸브내부 누설검사가 수행되고 있다(Hartman, 1980). 밸브내부의 누설은 밀봉부(seal)인 밸브몸체/밸브 시트(seat)면의 이물질 삽입, 빈번한 밸브개폐에 따른 손상, 밸브몸체/밸브 시트의 균열, 밸브 스템(stem) 패킹(packings) 또는 용접부위 결함 및 피로균열 등에 의해 발생하게 된다. 이러한 밸브누설로 인하여 유량증가나 밸브 1차측 압력 저하, 냉각기능 상실 및 방사선 물질 방출 등 안전계통에 저하를 가져오게 되는 등 발전소 운전에 막대한 손상 및 사고를 초래하게 된다.

이러한 손상방지를 위하여 사용되는 누설검사에는 현재까지 레벨감소, 압력계를 이용한 입출구 압력차(압력감소), 온도변화 및 습도 측정, 내압(가압)시험 및 진공(감압시험) 등을 이용하여 왔으나, 누설유무, 누설율, 누설 속도 및 누설형상 등 미소 누설상태의 정보에 대한 실시간 측정이 불가능하고 압력계 보정 및 압력측정시의 절차의 복잡성 및 간접적인 측정에 의한 측정값 신뢰도 등 많은 문제점이 있어 신속하며 측정 정밀도가 높으며 미소 누설상태의 실시간 측정 및 평가(on-line monitoring)가 가능한 음향방출법(acoustic emission method ; AE법) 도입에 의한 밸브누설 감시시스템 개발이 시급히 필요하다. 음향방출법에 의한 밸브내부 누설검사법은 밸브내부의 누설에

따라 발생하는 음향을 밸브 외부에서 검출하는 간편한 방법으로 실제 발전소 밸브에 실용화하기 위한 연구가 진행되어 왔다(Allen 등, 1988; Kumagai 등, 1990; Kumagai 등, 1988; Kitazima, 1986; Kitazima, 1988).

본 논문은 실제 발전소의 대형밸브를 대상으로 음향방출법을 이용하여 밸브내부 누설검출 실험을 수행하여 밸브내부의 미소 누설 검출이 가능함을 확인하였으며, 또한 실제 발전소 밸브를 이용하여 주변잡음 및 누설시의 음향특성 분석, 주파수 스펙트럼 분석에 의해 누설검출의 성능을 향상시키는 방법을 검토한 것이다.

#### 2. 밸브 내부누설시 음향특성

발전소에 있어서 밸브내부누설검사를 행하기 위해서는, 사전에 실제사용 밸브와 같은 형식의 밸브에 의해 누설량과 누설음과의 관계를 파악해두고 실제 밸브로 누설이 없을 때의 주변잡음과의 비교에 의해 누설량을 평가할 필요가 있다. 따라서 본 실험은 밸브 시트면에 누설상태를 모의하여 질소가스와 상온수를 누설시킬 때의 음향특성을 실험에 의해 조사하였다. 또한 대형밸브에 대한 음향센서의 부착위치와 누설음의 크기와와의 관계 및 고온의 실 밸브에 대한 음향센서의 부착방법인 도파관(waveguide)을 이용한 경우의 검출특성을 조사하였다.

제1저자 이상국 연락처: 대전광역시 유성구 문지동 103-16

042-865-5512 sglee@kepri.re.kr

## 2.1 시험장치 및 시험방법

### 2.1.1 시험밸브

시험에 사용한 밸브는 원자력발전소에 실제로 설치되어 있는 밸브와 동일형식의 밸브를 사용하였다. 시험밸브의 사양을 Table 1에 나타낸다. 10인치 전동식 게이트밸브는 PWR (pressurized water reactor) 발전소의 RHR계(residual heat removal system)의 잔열제거 냉각계통 라인에 설치되며, 14인치 전동식 게이트밸브는 CSS계(containment spray system)의 원자로격납용기 스프레이펌프 입구에 설치되어 있다. 그리고 24인치 전동식 게이트밸브는 주증기라인의 격납용기외에 있는 주증기 격리밸브 후단에 설치되어 있다.

Table 1 Specification of test valves

	시험밸브 No.1	시험밸브 No.2	시험밸브 No.3
밸브형식	전동식게이트밸브	전동식게이트밸브	전동식게이트밸브
밸브명칭	PWR RHR냉각기출구 라인밸브	PWR C/V스프레이펌프 입구밸브	PWR 주증기 제3밸브
호칭직경	10B	14B	24B
압력분류	1,500LB	150LB	600LB
사용압력	175kgf/cm <sup>2</sup>	4kgf/cm <sup>2</sup>	87.9kgf/cm <sup>2</sup>
사용온도	200°C	144°C	302°C
사용유체	물	물	증기
밸브재료	SCS 14A	SCS 13A	SCPL 1

### 2.1.2 시험장치

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.

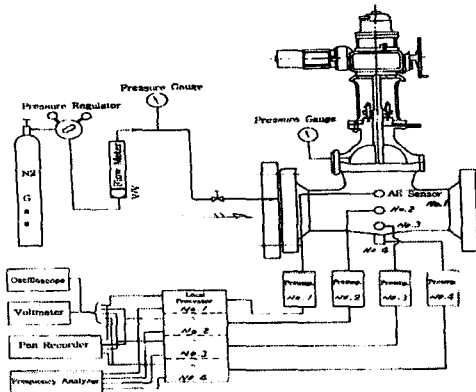


Fig. 1 Experimental apparatus and block diagram of measuring system for leak test

음향센서는 PZT(실리콘산 티탄산 연자기) 타입의 공진형 음향 센서이며, 공진주파수가 50kHz와 70kHz의 것을 사용하였다. 음향 센서로부터의 출력은 전치증폭기(preamplifier)에서 40dB로 증폭시킨후 주증폭기(main amplifier)에서 20dB 증폭시켰다. 전치증폭기의 주파수대역은 20kHz에서 2MHz이며, 또한 주파수분석기의 주파수대역은 10kHz에서 200kHz이다. 상온수에 의한 누설시험은 밸브 입구측을 가압펌프로 가압하여 밸브 출구측은 대기 개방과 만수의 경우 두가지 조건으로 행하였다. 만수의 경우 밸브 출구측 압력은 대기압으로 하였다.

### 2.1.3 시험조건

시험조건을 Table 2에 나타낸다. 밸브 시트면에서의 누설상태는, 시트가 이물질들을 삽입한 밸브가 틈새(slit) 모양에 따라 미소하게 개방된 상태의 경우와 시트면에 균열손상이 생겨 누설이 발생하는 경우의 두 가지 형태로 누설을 모의하였다. 누설량은 시트면의 누설상태와 밸브 출입구의 차압에 따라 변화하고, 누설량에 따라 누설음의 크기가 변화하였다. 시험조건에서의 누설량은, 음향방출법에 의해 미소누설시의 검출성능을 평가함을 목적으로 하였으므로 미소유량이 얻어질 수 있도록 누설상태를 조절하였다. 질소가스의 경우 누설량은 약 2~300Ncc/sec의 유량 범위에서 실험을 수행하였다.

Table 2 Experimental conditions

호칭직경 및 시험조건		미소개도 (slit 결합)		균열결합	
		질소가스	상온수	질소가스	상온수
10인치	압력(kgf/cm <sup>2</sup> .g)	7~10	5~100	7~10	5~100
	누설량(Ncc/sec)	2~300	~2	1.3~50	~2
14인치	압력(kgf/cm <sup>2</sup> .g)	7~10	-	7~10	-
	누설량(Ncc/sec)	2~300	무시험	1.3~50	-
24인치	압력(kgf/cm <sup>2</sup> .g)	7~10	-	7~10	-
	누설량(Ncc/sec)	2~300	-	1.3~50	-

이때의 밸브 출입구 차압은 7~10kgf/cm<sup>2</sup>이다. 상온수의 경우 미소유량을 얻기 위해서 누설상태를 만들고, 밸브 출입구 차압은 발전소 점검시의 밸브 누설검사시 가압하는 5~30kgf/cm<sup>2</sup>의 차압과 그것보다 더 높은 경우인 40~100kgf/cm<sup>2</sup>의 차압으로 행하였다.

### 2.1.4 시험방법

질소가스의 경우 미소개도의 누설상태는 밸브 시트면에 두께 약 0.05mm, 폭 18mm의 은박테이프를 펼쳐 붙이고, 밸브를 전체 개방할 때 테이프 양측에 생기는 슬리트상의 간격으로부터 누설이 발생하도록 하였다. 누설량을 적게 하는 경우는 테이프

폭을 1/2~1/3으로 줄였으며 밸브를 묶어 테이프 두께를 변화시켰다. 밸브 시트면의 균열손상으로 인한 누설상태는 밸브 몸체에 60°의 V 노치 손상을 절삭용 바이트로 가공하였다. V노치의 최초 깊이는 0.05mm를 목표로 가공하고 누설량의 증가를 위해 결합의 깊이를 깊게 하였다.

손상가공후 깊이는 측정하지 않았다. 상온수의 경우, 미소개도를 모의한 누설상태는 밸브 시트면에  $\phi$  0.32mm의 철사(와이어) 1개 또는 2개를 함쳐 좁은 상태로 만들어 넣어 밸브가 완전히 닫힐 때 시트면에 이물질이 삽입된 상태로 만들었다. 시험후에 뽑아낸 와이어 1개의 상태는 밸브 체결로 인하여 폭이 약 1.5mm, 두께가 0.05mm의 작은 와이어 상태가 되었다.

상온수를 이용한 시험밸브는 질소가스에 의한 시험시와 동일한 10인치 밸브를 사용하였으므로, 균열결합의 누설상태는 10인치 밸브와 동일하다. 게이트 밸브의 경우, 완전 닫힘상태에서 밸브 입구측을 가압하면 입구측의 씨일면에 미소간극이 생겨 본네트내에 유체가 유동하게 된다.

입구측 압력이 소정의 압력이 될 때까지 이러한 간극에서 누설음이 발생하여, 출구측 씨일면에 모의한 누설상태로부터 발생하는 누설음과 구분되지 못할 수도 있음을 고려할 수 있고, 또한 본네트내 압력이 밸브 입구압력과 동일한 압력이 될 때까지는 시간이 필요하기 때문에 밸브 몸체 입구측에  $\phi$  5mm의 발란스 홀을 개방하여 누설음 판별과 실험의 신속을 기하였다. 음향센서는 Fig.2에 나타낸 것과 같이, 밸브 박스에 직접 부착한 경우와 도파봉(직경 10mm, 길이 300mm: SUS제)을 끼워 넣어 부착한 두 가지 방법으로 수행하였다. 도파봉을 사용하여 부착하는 것은 고온의 현장 밸브 및 보온재가 있는 경우를 고려한 것이다.

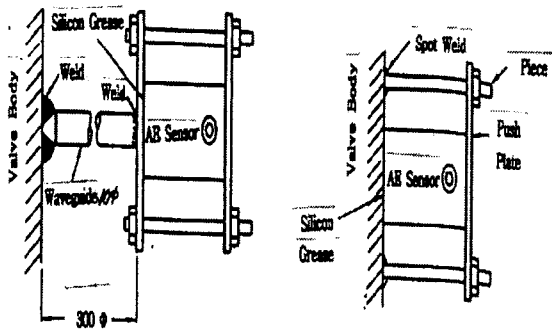


Fig. 2 Setup method of a sensor

음향센서는 Fig.3에서 나타낸 것과 같이 밸브 중심으로 밸브 박스 주변에 부착할 경우, 각각 4점의 위치에 부착하여 측정점에 따른 누설음의 크기에 대한 경향을 조사하였다.

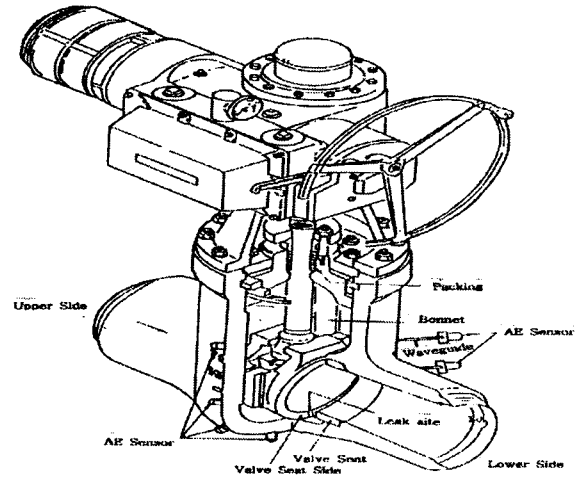


Fig. 3 Experimental method of leak test

## 2.2 시험결과 및 검토

### 2.2.1 가스누설시 발생하는 음향특성

밸브 크기가 다른 게이트밸브에 대해서, 밸브 출입구차가  $10\text{kgf/cm}^2$ 인 경우에 있어서 질소가스 누설량과 누설음의 크기와 관계를 조사한 것이 Fig.4이다. 음향센서를 밸브 박스에 직접 부착한 경우에, 밸브내부 누설장소에 가장 근접한 위치에서의 누설음의 크기이다. 또한 밸브가 미소개도의 경우와 균열결합이 있을 경우에 대해서도 나타내었다. 밸브 입구압력이 일정한 상태에서 누설량이 변화하고 있는 것은 미소개도와 균열결합의 누설형상의 크기를 변화시키고 있기 때문이다. 그림중의 주변환경소음 레벨은 현장 소음레벨이다. 누설음의 크기는 거의 누설량과 비례함과 함께 증가하나, 증가경향은 미소개도와 균열결합의 누설상태 및 밸브크기에 따라 다르다. 미소개도상태의 경우, 누설음의 크기가 주변환경소음 레벨 이상으로 되고 누설음의 크기의 비교로부터, 검출 가능한 누설량은 10인치 밸브에서 약  $1.5\text{Ncc/sec}$ , 24인치 밸브에서  $45\text{Ncc/sec}$ 이다. 14인치 밸브에서  $15\text{Ncc/sec}$  밸브 크기가 크면 누설음의 크기는 작아지는 경향이 있다. 미소개도의 누설형상은 시트면에 끼워진 테이프의 양쪽으로부터의 슬릿상의 간극이며, 테이프 폭과 두께가 동일한 경우, 밸브 크기가 큰 만큼 슬릿 형상의 길이가 길어져 누설공이 가늘게 길어진다. 그 때문에 누설량이 같다면 밸브크기가 클수록 누설 유체속도가 작아지고 누설음의 크기도 작아지게 되는 것으로 예측된다.

또한 밸브크기가 클수록 밸브 몸체와 밸브 시트폭은 두꺼워지는 경향이 있고 밸브의 압력등급에 관계하는 밸브박스 구조에 의해 누설장소에서 밸브박스 외벽까지의 누설음 전파특성 등이 누설음의 크기에 영향을 주고 있는 것으로 생각된다.

균열결합 누설상태의 경우는, 미소개도 상태의 경우와 비교하여 큰 누설음이 발생하였다. 24인치 밸브에 있어서도, 누설량이  $3\text{Ncc/sec}$ 에서도 주변환경소음 레벨보다 훨씬 큰 누설음이 검출된다. 밸브크기에 따른 누설음의 크기의 차는 균열결합 형상을 동일하게 가공하지 않은 원인인지는 명확히 알 수 없다.

균열결합 경우의 누설음의 크기의 차는 밸브크기보다는 누설 장소로부터의 전파특성 등의 영향이 큰 것으로 생각된다.

10인치 밸브에서 미소개도상태 경우의 누설음 스펙트럼을 Fig.5에 나타낸다. 누설량에 따라 스펙트럼 레벨은 증가하나, 어느 경우도 20kHz 부근과 70kHz 부근에서 주파수 레벨이 피크를 이룬다. 이 경향은 밸브크기에 의해 변하지 않는다. 주변환경 소음의 스펙트럼도 같은 경향을 나타낸다. 검출한 누설음의 스펙트럼에는 특징적인 차이는 보이지 않고 음향센서의 특성이 나타나고 있는 것으로 생각되고, 스펙트럼 비교로부터 누설음의 특징을 조사하기 위해서는 보다 상세한 분석이 필요하다. 도파봉을 끼운 음향센서를 부착한 경우의 스펙트럼에는 도파관의 고유진동수가 실려, 누설음의 스펙트럼 비교에 의한 검토는 더욱 복잡하게 된다.

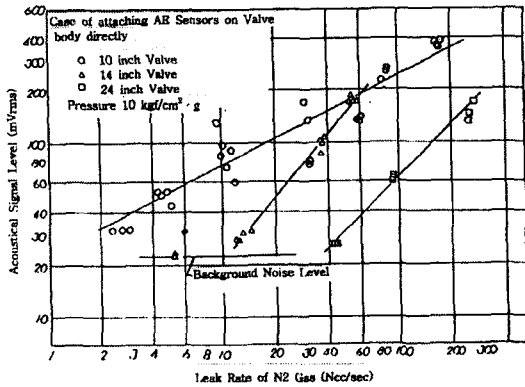


Fig. 4 Acoustical signal with the valve internal leak

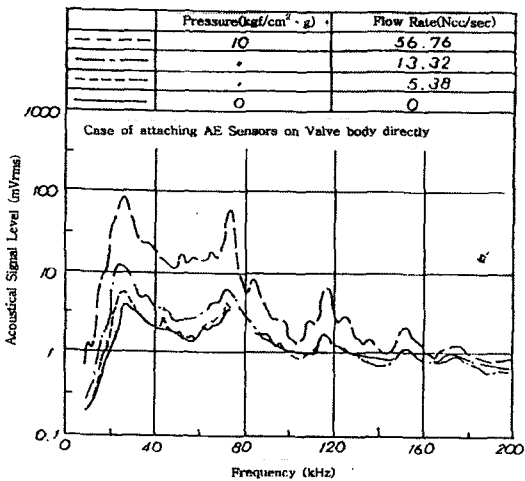


Fig. 5 Frequency spectrum of leak noise

### 2.2.2 상온수 누설시 발생하는 음향특성

Fig.6은 10인치 밸브의 상온수 누설시에 있어서 누설량과 누

설음 크기와의 관계이다. 밸브 출구측이 대기 개방의 경우와 만수의 경우 및 밸브차압과 누설상태를 변화시킨 경우에 대해서 나타낸다. 누설상태는 1)균열결합의 경우 2)균열결합에 가느다란 선 1개를 삽입시킨 경우 및 3)균열결합에 가느다란 선 2개를 삽입시킨 경우로 3가지의 조건으로 수행하였다.

누설음의 크기는 누설량과 함께 증가하나, 출구측이 대기개방과 만수의 경우에서 다르며, 전자쪽이 동일한 누설량에 대해 누설음이 크다. 밸브출구측이 대기개방의 경우에 누설장소로부터 분출수의 상태를 3가지 누설상태에 대해서 비교하면, 1)의 균열결합 경우는 결합으로부터 한줄기의 분출수가 방출되는 상황이나, 3)의 균열결합에 가느다란 선 2개를 끼운 경우는 슬리트에서 물이 누설하는 것처럼 시트면을 요동시키면서 분출수가 방출된다. 이와 같은 누설상태의 차이에 의해 누설음의 크기가 달라진 것으로 생각된다.

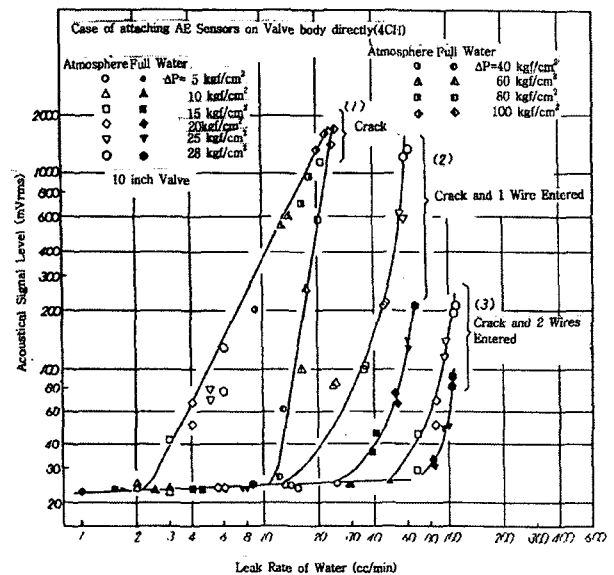


Fig. 6 Acoustical signal with the valve internal leak

상온수 누설시의 누설음 스펙트럼을 Fig.7에 나타낸다. 밸브출구측이 만수의 경우이다. 밸브 차압은 28kgf/cm<sup>2</sup>로 누설상태가 작다 다르다. 누설상태에 따른 스펙트럼의 파형은 변하지 않으며 25kHz 부근에서 피크를 형성한다. 가스방출시의 스펙트럼 형성과 거의 동일하다.

### 2.2.3 누설음 검출방법의 검토

대형밸브의 경우, 누설음의 크기는 밸브내부의 누설위치로부터 거리에 따라 변화할 것으로 예측된다. 또한 고온환경에서 사용되는 발전소 밸브와 보온재를 외부로 돌출시키는 것이 곤란한 밸브의 경우에는 도파봉을 설치하여 음향센서를 부착하는 것이 필요하다. 따라서 이러한 점에서 검토를 행하였다.

Fig.8은 상온수 누설시에 있어서 누설음의 크기를 누설위로부터의 거리에 대하여 나타낸 그림이다. 누설위치는 밸브하부의

씨트면이며, 거리는 밸브박스하부에서 밸브박스 주변상에 따른 거리이다. 밸브박스 하부로부터의 누설음은 서서히 작아지며 가장 거리가 떨어진 측정점에서 급격히 감소한다. 급격히 감소하는 특징은 가스누설시의 경우도 10인치 밸브뿐이며 14인치 및 24인치 밸브의 경우 누설음은 서서히 감소한다. 이는 밸브 크기에 따른 음향적 전파의 차이에 의한 것으로 생각된다.

누설위치에서 많이 떨어져 있다면 주변 환경소음과의 비교에 있어서 누설검출이 불리하지만, 밸브내부 시트면상의 누설위치의 예측은 밸브박스 주위에 복수개의 음향센서 출력의 상대비교에 의해 가능한 것으로 생각된다. 음향센서를 밸브박스에 직접 부착한 경우와 도파관을 붙인 경우에 대해서 누설음의 크기를 비교한 결과, 두 가지 방법 모두 차이가 없으며 밸브크기, 누설상태의 변화에 의해서도 같은 경향을 나타내었다.

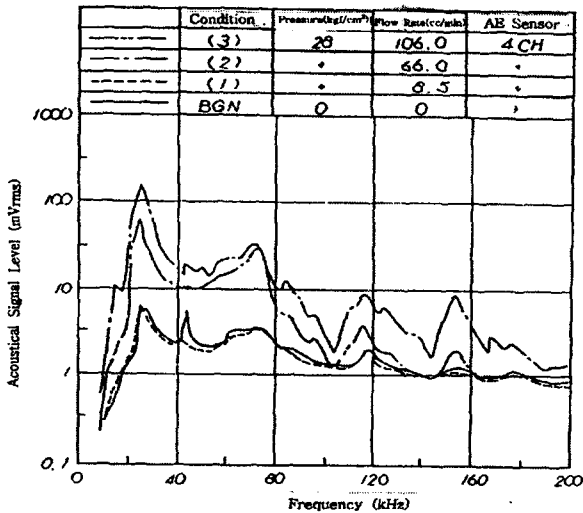


Fig. 7 Frequency spectrum of leak noise

### 3. 결 론

발전소에 있어서 음향방출법에 의한 밸브내부 누설검사법의 개발을 목적으로 실제 밸브를 이용하여 밸브내부 누설시 음향특성을 파악하고, 그것에 기초한 검사법의 적용성을 검토하였다. 또한 실제 발전소 밸브에 음향방출법을 실용화하기 위해서는 주변잡음이 문제가 되는 것을 파악하여 주변잡음이 큰 경우의 누설 검출에 대해서 주변잡음을 스펙트럼분석에 의해 소거하는 간편한 방법을 검토하였다. 음향방출법에 의한 밸브내부 누설검사법이 실용화되면 발전소 등 정기검사에 있어서 밸브 누설검사의 신뢰성이 증가하고 정기검사 작업의 합리화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

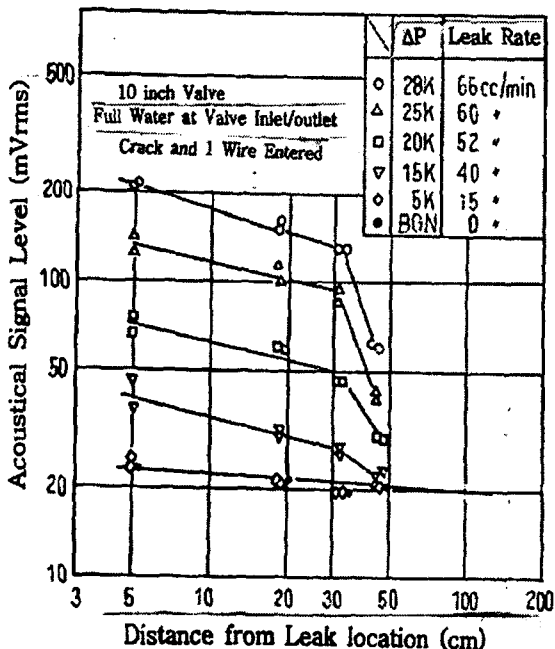


Fig. 8 Attenuation of acoustical signal level

누설음은 누설위치에 가까울수록 크고 떨어질수록 서서히 감소한다. 대형밸브의 경우, 1개의 음향센서에 의한 누설검출은

Hartman, W. F.(1980), "Acoustic Monitoring of Relief Valve Position", EPRI NP-1313, pp.1-42  
 Allen, J. W., Hartman, W. F. and Robinson, J. C.( 1988), "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves", EPRI NP-2444, pp.22-30  
 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  
 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  
 Kitazima, A.(1986), "Monitoring of Valve Operation conditions by Acoustic Method", CREIPI Report No. 285089, pp.1-33  
 Kitazima, A.(1988), "Acoustic Leak Detection in Piping System(Part 1)", CREIPI Report No. 277059, pp.21-32