

음향방출법을 이용한 원전 밸브누설 평가에 관한 연구

Study on the Leak Detection and Evaluation for Nuclear Power  
Plant Valve Using Acoustic Emission

이상국, 이선기, 이육륜  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력발전소에 있어서 밸브내부 누설검사를 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 연구에서는 밸브 시트면에 누설상태를 모의하여 질소가스와 상온수를 누설시킬 때의 음향특성 실험을 수행하였다. 또한 원자력발전소에서 사용되는 대형밸브에 대한 음향센서의 부착위치와 누설음의 크기와의 관계 및 고온의 실제 밸브에 대한 음향센서의 부착방법인 도파관(waveguide)을 이용한 경우의 검출특성을 조사하였다. 발전소에 있어서 음향방출법에 의한 밸브내부 누설검사법의 개발을 목적으로 실제 밸브를 이용하여 밸브내부 누설시 음향특성을 파악하고, 그것에 기초한 검사법의 적용성을 검토하였다. 실제 발전소의 대형 밸브를 대상으로 음향방출법을 이용하여 밸브내부 누설검출실험을 수행하여 밸브내부의 미소누설 검출 가능성과 누설검출의 성능을 향상시키는 방법의 가능성을 확인할 수 있었다.

Abstract

The objective this study is to estimate the feasibility of acoustic emission method for the internal leak from the valves in nuclear power plants. From the experimental results, it was suggested that the acoustic emission method for monitoring of leak was feasible. When the background levels are higher than the acoustic signals from leak, we can detect the leak analyzing the spectrum of the remainders which take the background noise from the acoustic signals.

## 1. 서론

발전소에는 수많은 밸브가 사용되고 있으며 정기점검에는 정기적으로 건전성 검사가 수행되고 있다. 이 때문에 발전소의 안전운전에 영향을 주는 밸브 및 안전작업의 대상이 되는 중요한 밸브에 대해서는 동작 건전성검사 및 밸브내부 누설검사가 실시되고 있다<sup>1)</sup>. 밸브내부에서의 누설은 밀봉부(seal부)인 밸브몸체/밸브하부 시트(seat)면에 이물질 삽입, 빈번한 밸브 개폐에 의한 손상, 밸브몸체/밸브 시트의 균열 등이 원인이 되어 발생하며, 이러한 결과 유량증가 또는 밸브 1차측에서의 압력저하를 초래한다. 밸브내부의 누설검사는 현재까지 압력계를 이용하여 수행하여 왔으나, 음향방출법에 의한 밸브내부 누설검사법은 밸브내부의 누설에 따라 발생하는 음향을 밸브 외부에서 검출하는 간편한 방법으로 실제 발전소 밸브에 실용화하기 위한 개발이 진행되어 왔다<sup>2-6)</sup>. 본 논문은 실제 발전소의 대형 밸브를 대상으로 음향방출법을 이용하여 밸브내부 누설검출실험을 수행하여 밸브내부의 미소누설 검출이 가능함을 확인하였으며, 또한 실제 발전소 밸브를 이용하여 주변환경소음(background noise) 및 누설시의 음향특성 분석, 스펙트럼분석에 의해 누설검출의 성능을 향상시키는 방법을 검토한 것이다.

## 2. 밸브내부누설시의 음향특성

발전소에 있어서 밸브내부누설검사를 행하기 위해서는, 사전에 실제사용 밸브와 같은 형식의 밸브에 의해 누설량과 누설음과의 관계를 파악해두고 실제 밸브로 누설이 없을 때의 주변환경소음과의 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 크기와 관계 및 고온의 실 밸브에 대한 음향센서의 부착방법인 도파관(waveguide)을 이용한 경우의 검출특성을 조사하였다.

### 2.1 시험장치 및 시험방법

#### 2.1.1 시험밸브

시험에 사용한 밸브는 원자력발전소에 실제로 설치되어 있는 밸브와 동일형식의 밸브를 사용하였다. 시험밸브의 사양을 표 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 PWR(pressurized water reactor) 발전소의 주증기라인의 격납용기외에 있는 주증기 격리밸브 후단에 설치되어 있다.

표 1 시험밸브의 사양

	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 그림 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. 음향센서는 PZT(실리콘 산 티탄산 연자기) 타입의 공진형 음향센서이며, 공진주파수가 50 kHz와 70 kHz의 것을 사용하였다. 음향센서로부터의 출력은 전치증폭기(preamplifier)에서 40dB로 증폭시킨후 주증폭기(main amplifier)에서 20dB 증폭시켰다. 전치증폭기의 주파수대역은 20 kHz에서 2 MHz이며, 또한 주파수분석기의 주파수대역은 10 kHz에서 200 kHz이다. 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 표 2에 나타낸다. 밸브 시트면에서의 누설상태는, 시트가 이물질을 삽입한 밸브가 틈새(slit) 모양에 따라 미소하게 개방된 상태의 경우와 시트면에 균열손상이 생겨 누설이 발생하는 경우의 두 가지 형태로 누설를 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 2~300 Ncc/sec의 유량범위에서 실험을 수행하였다.

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

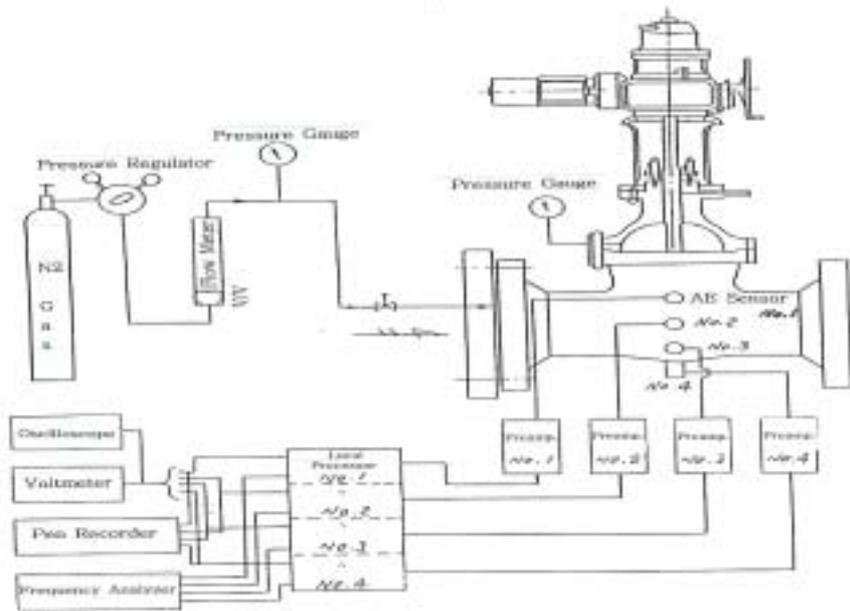


그림 1 누설실험을 위한 측정시스템의 실험장비 및 블록 다이어그램

표 2 실험조건

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

#### 2.1.4 시험방법

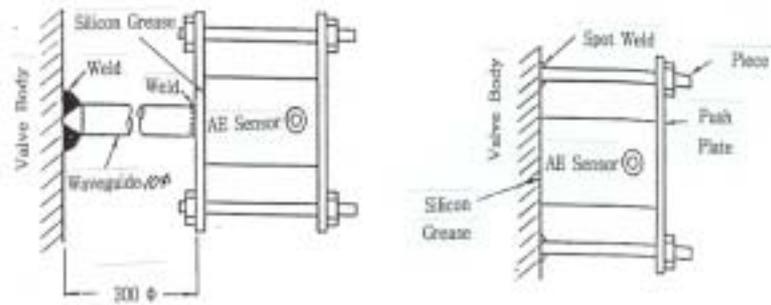


그림 2 센서 설치방법

질소가스의 경우 미소개도의 누설상태는 밸브 시트면에 두께 약 0.05 mm, 폭 18 mm의 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 0.05 mm를 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 합쳐 좁은 상태로 만들어 넣어 밸브가 완전히 닫힐 때 시트면에 이물질이 삽입된 상태로 만들었다. 시험후에 뽑아낸 와이어 1개의 상태는 밸브 체결로 인하여 폭이 약 1.5 mm, 두께가 0.05 mm의 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 본넷내에 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 본넷내 압력이 밸브 입구압력과 동일한 압력이 될 때까지는 시간이 필요하기 때문에 밸브 몸체 입구측에  $\Phi$  5 mm의 발란스 홀을 개방하여 누설음 판별과 실험의 신속을 기하였다.

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

## 2.2 시험결과 및 검토

### 2.2.1 가스 누설시 발생하는 음향특성

밸브 크기가 다른 게이트밸브에 대해서, 밸브 출입구차가 10 kgf/cm<sup>2</sup>인 경우에 있어서 질소가스 누설량과 누설음의 크기와 의 관계를 조사한 것이 그림 4이다. 음향센서를 밸브 박스에 직접 부착한 경우에, 밸브내부 누설장소에 가장 근접한 위치에서의 누설음의 크기이다. 또한 밸브가 미소개도의 경우와 균열결함이 있을 경우에 대해서도 나타내었다. 밸브 입구압력이 일정한 상태에서 누설량이 변화하고 있는 것은 미소개도와 균열결함의 누설형상의 크기를 변화시키고 있기 때문이다. 그림중의 주변환경소음 레벨은 현장 소음레벨이다. 누설음의 크기는 거의 누설량과 비례함과 함께 증가하나, 증가경향은 미소개도와 균열결함의 누설상태 및 밸브크기에 따라 다르다. 미소개도상태의 경우, 누설음의 크기가 주변환경소음 레벨 이상으로 되고 누설음의 크기의 비교로부터, 검출 가능한 누설량은 10인치 밸브에서 약 1.5 Ncc/sec, 24인치 밸브에서 45 Ncc/sec이다.

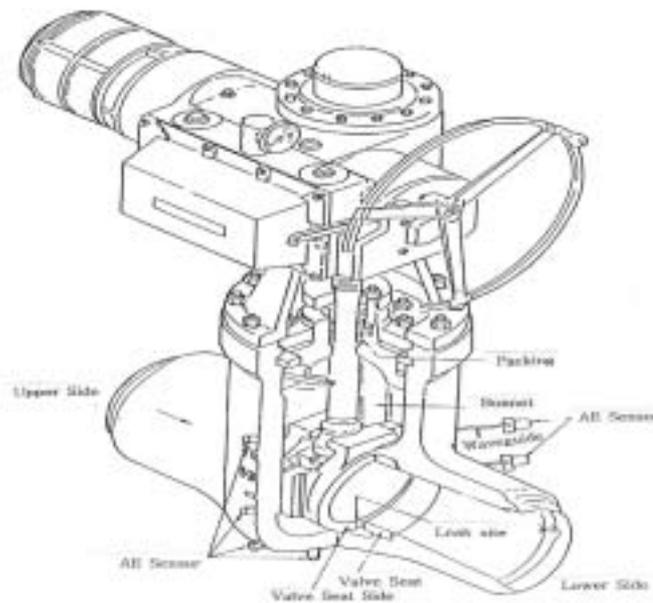


그림 3 밸브 누설시험 방법

14인치 밸브에서 15 Ncc/sec 밸브 크기가 크면 누설음의 크기는 작아지는 경향이 있다. 미소개도의 누설형상은 시트면에 끼워진 테이프의 양쪽으로부터의 슬리트상의 간극이며, 테이프 폭과 두께가 동일한 경우, 밸브 크기가 큰 만큼 슬리트 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 전

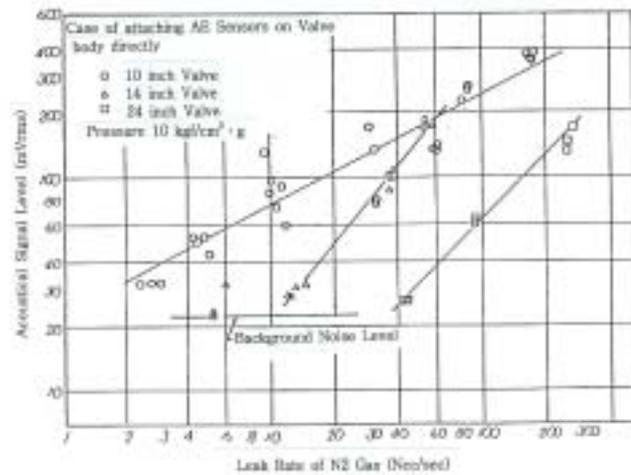


그림 4 밸브내부 누설에 따른 음향신호 레벨

파특성 등이 누설음의 크기에 영향을 주고 있는 것으로 생각된다. 균열결함 누설상태의 경우는, 미소개도 상태의 경우와 비교하여 큰 누설음이 발생하였다. 24인치 밸브에 있어서도, 누설량이 3 Ncc/sec에서도 주변환경소음 레벨보다 훨씬 큰 누설음이 검출된다. 밸브크기에 따른 누설음의 크기의 차는 균열결함 형상을 동일하게 가공하지 않은 원인인지는 명확히 알 수 없다. 균열결함 경우의 누설음의 크기의 차는 밸브크기보다는 누설장소로부터의 전파특성 등의 영향이 큰 것으로 생각된다.

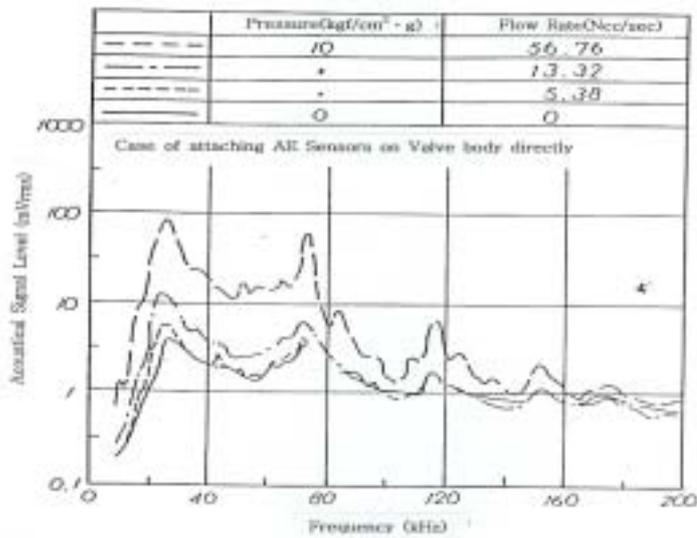


그림 5 가스 누설음의 주파수 스펙트럼

10인치 밸브에서 미소개도상태 경우의 누설음 스펙트럼을 그림 5에 나타낸다. 누설량에 따라 스펙트럼 레벨은 증가하나, 어느 경우도 20 kHz 부근과 70 kHz 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.

### 2.2.2 상온수 누설시 발생하는 음향특성

그림 6은 10인치 밸브의 상온수 누설시에 있어서 누설량과 누설음 크기와 의 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 결함으로부터 한줄기의 분출수가 방출되는 상황이나, 3)의 균열결합에 가느다란 선 2개를 끼운 경우는 슬릿에서 물이 누설하는 것처럼 시트면을 요동시키면서 분출수가 방출된다. 이와 같은 누설상태의 차이에 의해 누설음의 크기가 달라진 것으로 생각된다.

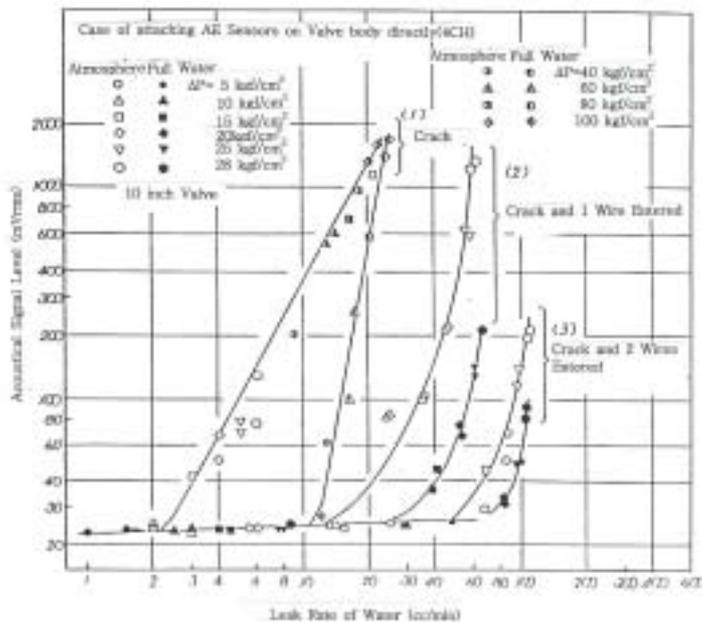


그림 6 밸브 내부누설에 따른 음향신호 레벨

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

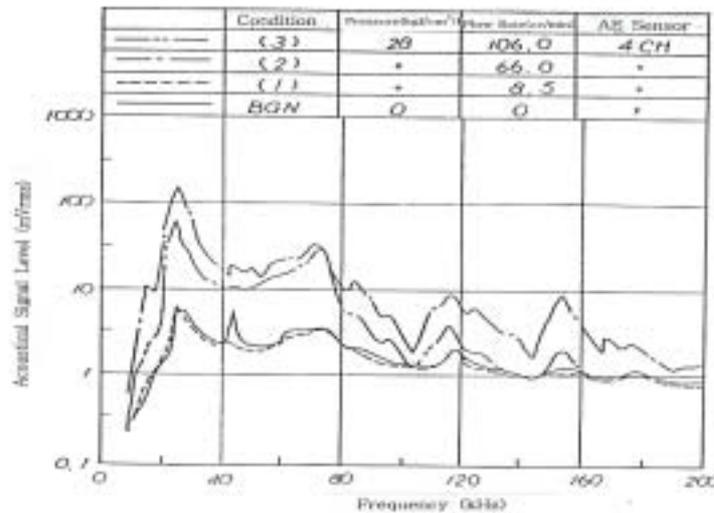


그림 7 상온수 누설음의 주파수스펙트럼

### 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 도파관을 설치하여 음향센서를 부착하는 것이 필요하다. 따라서 이러한 점에서 검토를 행하였다.

그림 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 감쇠한다. 급격히 감쇠하는 특징은 가스누설시의 경우도 10인치 밸브뿐이며 14인치 및 24인치 밸브의 경우 누설음은 서서히 감쇠한다. 이는 밸브크기에 따른 음향적 전파의 차이에 의한 것으로 생각된다. 누설음은 누설위치에 가까울수록 크고 떨어질수록 서서히 감쇠한다. 대형밸브의 경우, 1개의 음향센서에 의한 누설검출은 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.

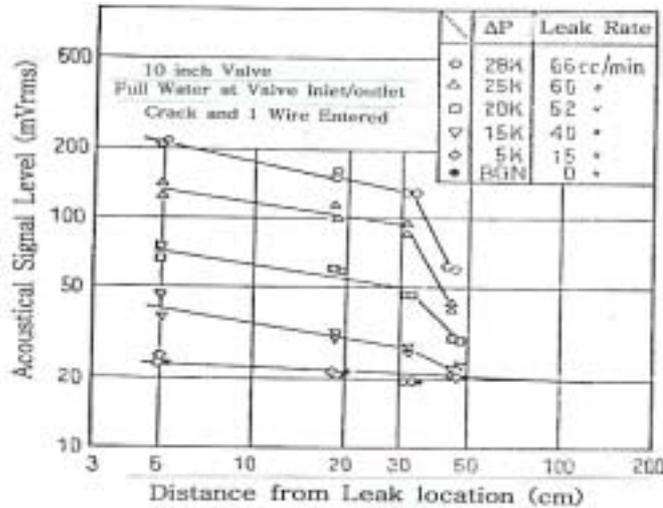


그림 8 음향신호의 누설위치에 따른 감쇠

#### 2.2.4 누설음의 검출능력

질소가스 및 상온수 누설시의 시험결과로부터, 미소개도와 균열결함의 누설상태에 있어서 시험시의 주변 환경소음은 거의 20~25 mV<sub>rms</sub>이며, 그 이상의 누설음이 검출된다면 이때의 누설량이 검출가능한 최소 누설검출량이다. 밸브의 누설량은 일반적으로 밸브크기를 기준으로 하여 표시되기 때문에 최소 누설검출량을 밸브크기를 기준으로 표시하여 나타내었다.

일반적으로, 발전소용 게이트밸브에 대한 질소가스 또는 공기 등의 기체에 의한 밸브 씨트 누설시험은 특수한 경우를 제외하고는 수행되지 않는다. 따라서, 본 연구에서 얻어진 질소가스에서의 최소 누설검출한계를 MSS-SP61에서 허용되고 있는 공기에 의한 밸브 씨트 누설량(50 cc/min/inch)과 비교하였다. 최소 누설검출량은 거의 허용량에 가까운 값이며, 허용량에 가까운 미소누설에서도 누설음을 검출할 수 있는 능력이 있음을 알 수 있었다. 상온수의 누설량은 전력용 규격 E-101에서 No Leak가 목표값으로 되어 있다. 본 시험결과는 균열결함의 경우 약 1 cc/min/inch, 균열결함과 미소개도의 경우 약 4 cc/min/inch의 누설량 이상에서 누설음 검출이 가능하다. No Leak에서는 누설음이 발생하지 않으나, 본 시험결과 검출가능한 최소 누설검출량은 작은 값인 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터, 음향방출법에 의한 밸브내부 누설검사법은 대형 밸브에 있어서도 미소누설을 검출할 수 있는 능력을 가지고 있으며, 실제 발전소에 있어서의 밸브 시트면의 씨일성능의 건전성을 평가하는 수단으로 적용 가능한 것으로 생각된다. 단, 최소 누설검출량은 현장의 주변 환경소음과 비교한 것이며, 또한 누설상태는 미소누설을 얻기 위해 모의하였고 누설량은 밸브 차압에 따라 변화하는 것 등을 고려하여 실제 밸브에의 적용을 위해서는 이러한 점을 고려할 필요가 있다.

### 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 발전소에서 이러한 기법을 적용하기 위한 소형검출기의 제작도 수행하였다. 이와 아울러 실제 발전소 밸브에 음향방출법을 실용화하기 위해서는 주변환경소음이 문제가 되는 것을 파악하여 주변환경소음이 큰 경우의 누설 검출에 대해서 주변환경소음을 스펙트럼분석에 의해 소거하는 간편한 방법을 검토하였다. 음향방출법에 의한 밸브내부 누설검사법이 실용화되면 발전소 등 정기검사시에 있어서 밸브 누설검사의 신뢰성이 증가하고 정기검사 작업의 합리화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- (1) Hartman, W. F., “Acoustic Monitoring of Relief Valve Position” , EPRI NP-1313, , (1980), p1-42
- (2) Allen, J. W., Hartman, W. F. and Robinson, J. C., “Acoustic Monitoring of Power Plant Valves” , EPRI NP-2444, (1988), p22-30
- (3) Kumagai, H. and Suzuki, A., “The Evaluation for Application of the Detection Method of Internal valve Leak Using Acoustic Method” , CREIPI Report No. T89011, (1990), p1-12
- (4) Kumagai, H., Suzuki, A., Kitazima, A., Fukada T. and Tashiro, H., “The Availability of the Detection Method of Internal Valve Leakage Using Acoustic Method” , CREIPI Report No. T87112, (1988), p1-42
- (5) Kitazima, A., “Monitoring of Valve Operation conditions by Acoustic Method” , CREIPI Report No. 285089, (1986), p1-33
- (6) Kitazima, A., “Acoustic Leak Detection in Piping System(Part 1)” , CREIPI Report No. 277059, (1988), p21-32