# 음향방출법에 의한 발전용 밸브 누설평가

이상국 \*•이선기\*•이준신\*•이욱륜\*

# The Evaluation of Internal Leak in Valve for Power Plant Using Acoustic Emission Method

Sang-Guk Lee, Sun-Ki Lee, Jun-Shin Lee and Wook Ryun Lee

Key Words: Acoustic Emission Method(음향방출법), Valve(밸브), Internal Leak(내부누설), Power Plant(원자력발전소)

### 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. 서 론

발전소에는 수많은 밸브가 사용되고 있으며 그 중 발전소 안전운전에 큰 영향을 주는 밸브는 동 작 건전성 검사, 밸브내부 누설검사가 수행되고 있다[1]. 밸브내부의 누설은 밀봉부(seal)인 밸브몸 체/밸브 시트(seat)면의 이물질 삽입, 빈번한 밸브 개폐에 따른 손상, 밸브몸체/밸브 시트의 균열, 밸브 스템(stem) 패킹(packing) 또는 용접부위 결 함 및 피로균열 등에 의해 발생하게 된다. 이러 한 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.

↑ 한전 전력연구원 E-mail : sglee@kepri.re.kr TEL : (042)865-5512 FAX : (042)865-5514 \* 한전 전력연구원

이러한 손상방지를 위하여 사용되는 누설검사 에는 현재까지 레벨감소, 압력계를 이용한 입출 구 압력차(압력감소), 온도변화 및 습도측정, 내압 (가압)시험 및 진공(감압시험) 등을 이용하여 왔 으나, 누설유무, 누설율, 누설속도 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. 음향방출법 에 의한 밸브내부 누설검사법은 밸브내부의 누설 에 따라 발생하는 음향을 밸브 외부에서 검출하 는 간편한 방법으로 실제 발전소 밸브에 실용화 하기 위한 연구가 진행되어 왔다[2-6].

본 논문은 밸브시트면의 미소누설로부터 발생 하는 음향특성을 분석하기 위한 기초 연구로서, 밸브시트면의 누설을 모의하기 위하여 밸브시트 누설형상을 다양하게 변화시킨 각종 시험편을 준 비한 실험을 통하여 음향의 발생요인을 조사한 것이다. 실험은 밸브 유체가 상온수의 경우를 대 상으로 상온수가 수중에 누설하는 경우의 음향특 성을 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

#### 2.1 실험장치

실험장치의 개요도를 Fig.1에 나타낸다. 압축탱 크는 질소가스로 가압된 물 또는 가압된 질소 가 스는 ∮500 mm의 대구경 플랜지(SUS 304)에 고 정 설치되는 시험편의 누설구로부터 방출된다. 가압수를 수중에 방출하는 경우는 플랜지에 아크 릴 통을 부착하여, 누설구로부터 유체흐름을 가 시화할 수 있도록 하였다. 가압수 및 질소가스를 대기 중에 방출하는 경우는 아크릴 원통을 제거 했다. 누설구 출구쪽 압력은 대기압이다. 압력의 조절은 질소용기에 있는 감압밸브에서 가감하였 다. 시험편의 누설구로부터 물, 또는 질소가스가 방출될 때 발생하는 음향은 플랜지, 아크릴 원통 의 수중 또는 대기 중으로 전파한다. 플랜지 직 경을 크게 한 것은 질소가스가 대기 중으로 누설 하는 경우, 플랜지에 부착한 음향센서에 대기 중 에 전파한 누설음의 영향을 줄이기 위한 것이다. 또한 플랜지는 밸브몸체 두께를 고려하여 20 mm 의 두께로 하였다. 시험편은 플랜지에 그리스를 중간에 삽입하고 직접 부착하였다.



Fig.1 Experimental apparatus

# 2.2 실험방법

측정기의 사양을 Table 1에 나타낸다. 플랜지에 전파된 누설음은 누설측과 반대의 플랜지면에 그 리스를 매개시켜 직접 부착한 음향센서에서 측정 하였다. 플랜지 중심에서 음향센서까지의 거리는 80 mm이다. 사용된 음향센서는 PZT(실리콘산 티 탄산 연자기) 타입의 공진형 AE센서이며 공진주 파수는 50 ㎞이다.

또한 Fig.2는 수중 마이크로폰의 주파수특성과 비교하기 위해 측정용 음향센서와 거의 동일특성 의 가진용 음향센서를 플랜지에 부착하고 화이트 노이즈(white noise)를 가진 할 때의 주파수응답이 다. 즉, (1)은 화이트 노이즈의 원신호, (2)는 측정 용 음향센서의 주파수응답으로, 20 배와 60 배 부근에서 피크를 나타낸다. (3)은 아크릴 원통중 의 수중 마이크로폰의 주파수 응답으로, 거의 평 탄한 특성이지만, 가진용 음향센서의 주파수특성 인 20 배와 60 배의 성분이 부분적으로 피크치를 가지는 주파수특성을 나타내고 있다. 20 배이하 는 가진용 음향센서의 감도가 낮기 때문에 응답 하지 않은 것으로 생각된다.

Table 1 Specification of measuring instrument

측정기	형식 및 사양					
음향센서	티탄산지르콘산연자기(PZT), 공진주파수 50 kHz, 100℃  하					
프리엠퍼	주파수대역 100 Hz~20 MHz, (gain) 40 dB					
로칼 프로세서	주파수범위 1 kHz~2 MHz, cut-off 주파 수 THRU- THRU, 20 dB					
수중소음계	주파수대역 10 Hz~100 kHz, 1 kHz~200 kHz					
소음계	주파수대역 2 Hz~70 kHz, 콘덴서 마이 크로폰 1/4 !치					
압력변환기	PGM-10KC					
2ch FFT -석기	입력 채널수 2 , 100 kHz 표시					

Fig.3은 압축탱크 상부에서 대기 중으로 질소가 스를 방출시킬 때의 음향을 아크릴 원통속의 수 중 마이크, 플랜지의 음향센서 및 대기 중의 소 음계 마이크로폰으로 측정한 스펙트럼(spectrum)



Fig.2 Frequency responses AE sensor caused by whitenoise signal

이다. 동일한 음원에 대한 세 가지의 스펙트럼에 는 주파수 상관관계가 존재하고, 실험에서는 어 느 것이든 두 개의 스펙트럼 비교에 의해 음원의 스펙트럼 특징을 취득할 수 있었다. 누설음이 플 랜지를 전파하는 경우, 고체 중에서 다중반사 등 에 의해 음원에서 음향센서까지의 전파경로는 복 잡하며, 음향센서의 부착위치에 따라서도 누설음 의 크기가 변화할 수 있다. 따라서 누설유체와 누설형상이 서로 다른 음향특성을 비교하는 일련 의 실험에서는, 동일한 음향센서를 한점에 고정 시켜 동일한 실험체계로 실험하였다. 그리고 실 험개시 및 종료 전후에 가진용(加振用) 음향센서 에 의해 상호교정을 행하고 실험전후의 상대감도 에 차이가 없음을 확인하였다.

음향센서로부터의 출력은 전치증폭기(preamplifier)에서 40 dB 증폭되며, 다시 주증폭기 (main amplifier: local processor)에서 20 dB 증폭시 켰다. 음향출력은 실내공조에 의한 4 此이하의 저주파의 주변잡음을 여파(filtering)시키고, 4 썺 ~100 썺의 주파수범위의 실효치 출력전압 (mVrms)을 교류전압계로 읽은 다음 2채널 FFT분 석기에서 스펙트럼분석을 행하였다.

수중으로 상온수를 누설시킨 경우, 수중 마이 크로폰(0 dB =1 V/μPa)을 아크릴 원통 속에 달 고, 다시 방수시킨 음향센서를 수중에 설치하여, 두 가지 방법으로 수중음향을 측정하였다. 수중 의 음향센서는 플랜지에 부착한 음향센서와 거의



Fig.3 Frequency responses AE sensor caused by gas leak

동일한 특성의 센서로 하였다.

실험중에 누설음의 음향출력이 변동하는 경우 가 있기 때문에, 누설부 입구배관에 압력변환기 를 부착하여 관내의 압력변동을 측정하였다. 수 중누설의 경우 누설유량은 아크릴 원통으로부터 오버 플로어(over flow) 되는 유량을 메스 실린더 (mass cylinder)로 측정하였다. 누설구로부터 물을 수중에 누설시킨 경우의 분류는 카메라로 촬영하 였다. 이 경우는 시험편을 아크릴 원통 중심에 위치시켰다.

밸브 시트면에서의 누설형상은, 시트면에서 밸 브몸체/ 밸브시트가 합쳐져 있으므로 간극 단면 형상으로 비교하여 유로가 긴 것이다. 기본적인 형상으로서 시트면에 이물질이 삽입된 경우는 슬 리트(slit) 형상, 밸브몸체/ 시트에 손상이 있을 경 우는 원형 혹은 삼각의 누설형상으로 예상된다. 또한 누설유로가 길기 때문에 도중에 단면형상이 변화는 것도 고려해 볼 수 있다. 또한 밸브몸체/ 시트의 합체부 출구로부터의 누설은 수직단면에 서의 누설은 아니고, 밸브몸체 혹은 시트에 인접 하여 유체가 흐르고 음향발생에 물체의 영향을 받게 된다. 실험은 이들의 누설상태를 고려해서 Table 2, Table 3 및 Table 4에 나타낸 누설형상에 의해 실험을 행하였다.

시험편으로부터의 누설량은 입구압력으로 변화 시켰다. 출구압력은 항상 대기압이다. 물이 수중 과 대기중으로 누설시의 입구압력을 0 Mpa(0 kgf/cm)~1.6 Mpa(16.3 kgf/cm)의 범위까지 변화시 켜, 음향출력이 충분한 크기가 되는 압력으로 실 시하였다. 누설부의 유속은 단면형상에 따라 다 르며, 두께 10 mm, 구경 0.24 mm의 수직구멍의 경우 유속범위는 3~34 m/s이며, 레이놀즈수 범 위는 (0.6~5.9) × 103이다.

시험편	두께	평균구경	비	단면적
번호	w(mm)	d(mm)	w/d	a(mm²
1	1	0.26	3.85	0.053
2	1	0.36	2.78	0.102
3	1	0.44	2.27	0.152
4	3	0.21	14.3	0.035
5	10	0.24	41.7	0.045
6	10	0.30	33.3	0.071
7	10	0.41	24.4	0.132
8	10	0.60	16.7	0.282
9	20	0.42	47.6	0.139
10	40	0.38	105.3	0.113

Table 2 Leak type of straight hole

Table	3	Leak	type	of	slit	ho	ole	
					C1:4			ſ

시험편 번호	두께 w(mm)	Slit 폭 t (mm)	Slit 길이 l (mm)	비 l/t	단면적 a (mm²	으로 환산 (mm)
11	10	0.07	0.55	7.86	0.039	0.22
12	10	0.05	0.92	18.4	0.046	0.24
13	10	0.025	1.47	58.8	0.037	0.22
14	10	0.05	1.33	26.6	0.066	0.29
15	10	0.1	0.74	7.4	0.074	0.31
16	10	0.06	2.34	39.0	0.14	0.42

그거

시험편 번호	입구 구경 d in (mm)	출구 구경 d out (mm)	두께 w (mm)	
17	0.21	0.38	7	넓은 수직공
18	0.38	0.21	7	좁은 수직공
지정면	상면두께	하면두께	Slit	Slit
시험편 번호	W up(mm)	W low(mm)	폭 t (mm)	길이 l (mm)
19	3	10	0.05	1.40
20	7	10	0.11	1.33

 Table 4 Valve simulated type

# 3. 실험결과 및 고찰

# 3.1 출구분류의 상태

수직구멍에서 출구로 분류되는 상태를 수중 카 메라로 촬영하여 Fig.4 및 Fig.5에 나타낸다. Fig.4 는 7번 시험편(이하 TP7로 표기, d=0.41 mm, w=10 mm)의 경우에 분류의 확산상태이다. 분류 는 출구에서 약 25°의 퍼지는 각도로 확산한다. 실험조건 범위내의 유속에서는 현저한 차이는 없 다. 또한 출구근처에서 흩어지지 않는다. 깊이를 변화시킨 TP3(d=0.44 mm, w=1 mm)의 경우도 출 구에서 분류의 확산상태는 TP7의 경우와 거의 같 다.



Fig.4 Condition in a jet (TP7,  $\emptyset$  41, t=10 mm, Po=10 kg/cm<sup>2</sup>)



Fig.5 Cavitation in a jet (TP3, Ø 44, t=1 mm, Po=10 kg/cm<sup>2</sup>)

그러나 TP3의 경우, Fig.5에 나타낸 것과 같이 유속이 약 20 m/s이상에서 케비테이션에 의한 것 으로 생각되는 기포 발생을 확인할 수 있다. TP3 는 구경에 대한 두께의 비(w/d = 2.27)가 다른 것 에 비교하여 작기 때문에 수직구멍 입구에서 분 리된 케비테이션 기포가 출구에서 관찰되는 것으 로 생각된다.

TP7은 출구에서의 기포발생은 명확히 확인할 수 없으나, 이는 입구에서 분리된 흐름이 유로에 서 다시 합쳐져 출구에서 기포의 확인이 어렵기 때문이라고 생각된다. 그러나 TP8 (d=0.6 mm, w=10 mm)과 같이 직경이 커 유속이 증가하면, 기포가 발생한다.

3.2 누설형상과 누설량



Fig.6 Relation between aspect ratio and leak flow rate



Fig.7 Flow rate coefficient

Fig.6은 형상비(aspect ratio)에 대한 누설량의 관 계이다. 형상비가 큰 만큼 누설량은 감소한다. 밸 브 시트면이 이물질을 삽입한 경우, 누설형상은 슬리트상이 되는 것이 예상되어 밸브크기가 클수 록 형상비가 커지므로 동일한 밸브 차압에서 누 설량은 감소한다.

수직구멍 시험편과 슬리트 시험편의 유량계수 를 레이놀즈수와의 관계로 표시한 것이 Fig.7이 다. 수직구멍은 레이놀즈수가 크게 되면 약 0.6으 로 거의 일정한 값이 된다. 슬리트의 유량계수는 수직구멍 경우의 약 1/3이다. 물이 수직구멍 시험 편으로부터 수중으로 누설하는 경우의 입구압력



Fig.8 Relation between inlet pressure and leak flow rate(straight hole)



Fig.9 Relation between inlet pressure and leak flow rate(slit hole)

과 누설량과의 관계를 Fig.8에 나타낸다. 누설량 은 두께가 1 mm<sup>~</sup>20 mm인 경우는 구경과 함께 증가한다. 두께가 40 mm의 경우는 두께 10 mm, 20 mm의 경우와 비교하여 누설량이 적으며, 압 력손실이 큰 것으로 생각된다. 슬리트의 경우 입 구압력에 대한 누설량과의 관계를 Fig.9에 나타낸 다.

# 3.3 상온수가 수중으로 누설시의 음향특성3.3.1 수직공 시험편

누설음의 크기를 누설부의 평균속도와의 관계 로 표시한 것이 Fig.10, Fig.11 및 Fig.12이다. Fig.10은 누설부의 두께가 10 mm로 구경을 변화 시켰다. TP5, TP6, TP7 및 TP8의 경우, Fig.11 및 Fig.12는 구경이 각각 0.2φ, 0.4φ로 두께를 변화 시킨 경우의 누설음의 크기이다. 유속을 증가시 켜 누설음의 크기를 조사하였다. 이들 그림으로



부터 다음과 같은 내용을 알 수 있었다.

Fig.11 Relation between leak velocity and leak sound level



Fig.12 Relation between leak velocity and leak sound level

 누설음은 거의 유속과 함께 증가한다. 누설 음 증가를 시작하는 유속은 구경에 대한 두께의 비(w/d)가 작을수록 빨라지는 경향이 있다. 유속 과 누설음의 크기와의 관계를 회귀분석하여 구한 유속의 멱(누승)지수는 약 2.8~4.1의 범위에 있 다.

② 유속을 증가시키면 누설음의 크기가 포화하는 경우가 있으며, 포화된 경우는 유속의 증감으로 누설음의 크기에 이력(hysteresis)이 있다.

또한 유속의 감소에 대해서 누설음의 크기가 전체적으로 분산되는 경향이 있다. 유속이 작아

#### 도 누설음이 큰 경우이다.

③ 두께 10 mm로 구경을 변화시킨 경우, 구경 이 클수록 누설음이 크다. 또한 구경이 일정하고 두께를 변화시킨 경우, 두께가 두꺼울수록 누설 음이 작아지는 경향이 있다. 두께가 1 mm인 경 우 10 m/s 부근의 유속에서 누설음은 불안정하게 크다.

# 3.3.2 슬리트 시험편

Fig.13은 슬리트 시험편 경우의 누설음 크기이 다. 수직구멍의 경우와 같이 어떤 유속에서도 증 가한다. TP11과 TP14의 누설음의 크기를 보면, 거의 동일한 단면적의 TP5와 TP6의 누설음의 크 기와 비교해 유속에 대한 증가율이 크다. 유속에 대한 멱(누승)지수는 각각 5.5 및 5.8이다. TP11는 TP14보다 단면적이 작으나, 형상비도 작기 때문 에 누설음이 커지는 것으로 생각된다.



Fig.13 Relation between leak velocity and leak sound level

3.3.3 응용형상 시험편

Fig.14는 넓은 수직구멍 시험편(TP17) 및 어긋 난 슬리트 시험편(TP19, TP20)의 누설음의 크기 이다. 넓은 수직구멍 시험편의 누설음은 그림 중 에 점선으로 나타낸 수직구멍 시험편(TP7)의 누 설음보다 크다. TP17의 구멍이 퍼지는 각은 1° 이다.



Fig.14 Relation between leak velocity and leak sound level

결 론

 상온수가 수중으로 누설할 때의 분류를 관 찰한 결과, 출구에 케비테이션 기포가 관찰되고 수중으로 누설할 때의 누설음은 출구에 있어서 제트소음의 전파에서는 없으며 주로 입구분리에 의한 케비테이션 노이즈가 지배적인 것이 명확하 게 되었다. 케비테이션 기포의 발생은 누설부의 단면적 및 깊이에 따라 다르다.

2) 수직공으로부터 수중으로 누설하는 경우, 누 설음이 증가하기 시작하는 유속은 구경으로 달라 지며, 유속에 대한 누설음의 증가는 구경에 관계 없이 유속의 약 3.5승에 비례한다. 구경이 크면, 누설음 도 커진다. 어떤 유속에서 누설음은 포화 하며, 그 때의 케비테이션 기포가 명확하다. 유속 의 증감에 대해서 누설음에 히스테리시스가 있 다. 또한 누설부가 깊으면 누설음은 작아지는 경 향이 있다.

3) 슬리트의 누설음은 수직공의 누설음보다 큰 경향이 있으나, 형상비(aspect ratio) 와 단면적의 크기가 영향을 준다.

# 참고문헌

(1) Hartman, W. F., 1980, "Acoustic Monitoring

of Relief Valve Position", EPRI NP-1313, pp.1-42

- (2) Allen, J. W.,1988, Hartman, W. F. and Robinson, J. C., "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves", EPRI NP-2444, pp. 22-30
- (3) 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
- (4) Kumagai, H., Suzuki, A., Kitazima, A., Fukada Τ. and Tashiro, Н., 1988, "The Availability of the Detection Method of Internal Valve Leakage Using Acoustic Method", CREIPI T87112, Report No. pp.1-42
- (5) Kitazima, A., 1986, "Monitoring of Valve Operation Conditions by Acoustic Method", CREIPI Report No. 285089, pp.1-33
- (6) Kitazima, A., 1988, "Acoustic Leak Detection in Piping System(Part 1)", CREIPI Report No. 277059, pp.21-32