

# 발전용 증기밸브 누설량 평가에 관한 연구 Study on Evaluation of the Leak Rate for Steam Valve in Power Plant

이상국 · 박종혁 · 유근배  
S. G. Lee, J. H Park and G. B. Yoo

**Key Words** : Steam Valve(증기밸브), Leak(누설), Acoustic Emission(음향방출), AE rms level(음향레벨), Background Noise(주변잡음), Power Plant(발전소)

**Abstract** : Acoustic emission technology is applied to diagnosis the internal leak and operating conditions of the major valves at nuclear power plants. The purpose of this study is to verify availability of the acoustic emission as in situ diagnosis method. In this study, acoustic emission tests are performed when the pressurized high temperature steam flowed through gate valve(1st stage reheater valve) and glove valve(main steam dump valve) on the normal size of 4 and 8 ". The valve internal leak diagnosis system for practical field was designed. The acoustic emission method was applied to the valves at the site, and the background noise was measured for the abnormal plant condition. To improve the reliability, a judgment of leak on the system was used various factors which are AE parameters, trend analysis, signal level analysis and RMS(root mean square) analysis of acoustic signal emitted from the valve operating condition internal leak.

## 1. 서 론

발전소 주요 밸브에서 누설사고가 발생하게 되면 방사성 물질 및 냉각재 누출, 냉각기능 상실 등 안전계통의 손상 및 사고가 발생하게 되며, 증기누설이 발생하게 되면 수많은 에너지를 손실하게 된다. 이러한 누설사고를 예방하기 위한 진단기술의 개발이 시급한 시점에서 음향방출법(acoustic emission testing)에 의한 상시 및 수시 감시기술 개발이 최근 큰 관심을 가지게 되었다. 이러한 음향방출기술을 바탕으로 음향누설 감시시스템을 개발함으로써, 밸브내부 미소 누설의 조기탐지, 조기 누설판단, 누설위치표정 측정기술을 개발하고, 이를 통해 누설량 범위를 예측함으로써, 누설발생시 방사성 물질 및 냉각재 누출, 냉각기능 상실 등 안전계통의 손상 및 사고를 방지하고 증기누설 예방으로 열효율을 증가시켜, 발전소 불시 정지 횟수 감소 및 정비 기간의 단축으로 원전 이용률 및 안정성을 향상시킬 수

있다.

본 논문은 원자력발전소에서 운전 중인 밸브 중 누설발생 또는 내부부품 손상이 발생할 수 있는 밸브를 대상으로 밸브누설 및 손상을 진단 및 평가하기 위하여 이동식 밸브누설 진단시스템(portable valve leak diagnosis system)을 개발하여 원자력발전소 현장에 설치하여 시험적으로 데이터를 취득 및 분석한 결과이다.

이동식 밸브누설 진단시스템은 밸브진단을 위하여 클램프, 도파봉, 센서 등의 구성품을 정기점검동안 보온재를 분해하여 준비하는 별도의 사전 설치작업이 필요하지 않으며 진단이 필요한 밸브에 시간 및 장소에 제한을 받지 않고 진단이 가능하다. 즉, 상시감시(on-line monitoring)가 필요하지 않는 밸브누설 진단에 적합한 시스템으로서, 발전소 밸브에 대한 건전성을 확보함과 동시에 향후 확대 적용을 도모하고자 하는 목적으로 그 결과에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2.1 대상밸브

본 실험에 사용된 밸브는 현재 원자력발전소 2차

접수일 : 2007년 1월 25일, 채택확정 : 2007년 2월 10일  
이상국(책임저자) : 한전전력연구원 원자발전연구소  
E-mail : sglee@kepri.re.kr Tel. 042-865-5650  
박종혁, 유근배 : 한전전력연구원 원자력발전연구소

계통에서 사용 중인 증기용 제어밸브로서, 습분분리 재열기계통 1단재열기 밸브와 주증기 덤프계통 밸브(터빈 Condenser 덤프밸브)이며 각 밸브에 대한 사양을 Table 1에 나타내었다.

습분분리 재열기계통 밸브는 1,2단 재열기의 배수 탱크에서 복수기로 응축수를 배수하기 위한 역할을 하는 밸브들이다. 차압 및 온도는 정상 운전 중 약 10~28.8 kg/cm<sup>2</sup> 및 217~231℃의 조건으로 운전되는 소형밸브로 출력에 따라 개폐 제어되는 모터구동밸브(MOV)이다. 주로 닫힘상태에서 운전되며 누설발생시 출력 및 열손실 등에 큰 문제점을 초래하게 된다.

Table 1 Specifications and type of the test valve

밸브 번호	종류	형태	크기 (inch)	차압 (kg/cm <sup>2</sup> )	온도 (°C)	밸브 상태	유체
1	재열기 계통밸브	GT	4	11.8	187	close	증기
2		GT	4	11.8	187	close	증기
3		GT	4	11.8	187	close	증기
4	주증기 덤프계통 밸브	GB	8	68.9	283	close	증기
5		GB	8	68.9	283	close	증기
6		GB	8	68.9	283	close	증기
7		GB	8	68.9	283	close	증기
8		GB	8	68.9	283	close	증기
9		GB	8	68.9	283	close	증기
10		GB	8	68.9	283	close	증기
11		GB	8	68.9	283	close	증기
12	GB	8	68.9	283	close	증기	

\* GT : Gate Valve, GB : Globe Valve

주증기 덤프계통 밸브(터빈 Condenser 덤프밸브)는 고온 고차압(250℃, 차압 60 kg/cm<sup>2</sup>) 조건으로 운전되는 대형밸브이나 1단 감압 및 고차압(고유속)에 따른 트림부 손상으로 누설이 불가피하다. 또한 급수계통의 정화를 목적으로 발전소 기동시 이용되는 매우 중요한 밸브로 한번 누설되면 트림부의 손상이 지속적으로 확대되며 성능이 저하되고 소음이 매우 높다. 또한 정상운전중 내부누설이 발생하면 후단 배관이 길어서 응축, 기화의 반복과정에 따른 수격작용으로 인한 밸브 및 배관계의 손상을 초래할 수 있다.

## 2.2 실험장치

Fig. 1의 밸브누설 진단시스템을 이용하여 각 밸브조건에 따른 음향레벨 및 주변잡음 레벨, 음향레벨 트렌드, 파형분석 및 음향신호의 주파수분석

(FFT분석), 누설량 평가 등을 수행하였다. 취득한 음향신호는 시작품에 내장된 조건별 DB와 비교하여 누설상태를 평가하게 된다. 현장 밸브에 대한 누설검출방법은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 2개의 음향센서를 이용하여 누설진단신호 및 주변잡음 신호를 동시에 검출하였다. Table 2는 측정기의 사양을 나타낸다.

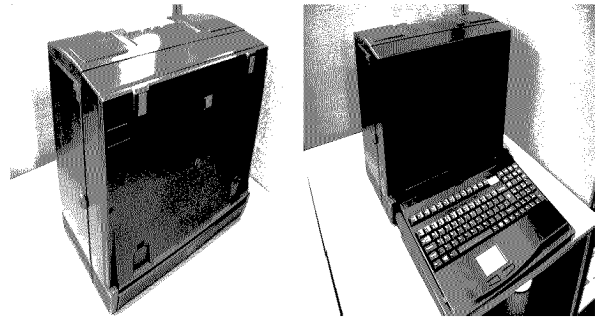


Fig. 1 Valve leak diagnosis system

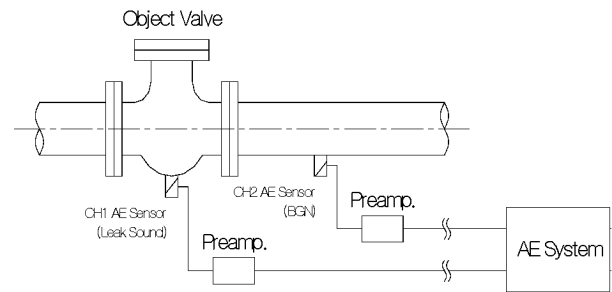


Fig. 2 Layout of experimental setup

## 2.3 실험방법

음향센서는 1개 밸브의 측정에 2개를 사용하였다. 누설검출을 목적으로 하는 음향센서(CH1)는 밸브 디스크에 가까운 밸브 몸체 위치에 부착하고, 다른 1개의 음향센서(CH2)는 주변잡음(background noise)을 검출할 목적으로 밸브로부터 떨어진 위치의 배관부에 부착하였다. 배관부의 음향센서는 밸브의 누설음이 주변잡음의 크기정도로 감쇠하는 위치에 부착하는 것이 좋으나, 실험실 실험밸브 이외의 밸브는 누설음의 거리감쇠의 경향을 파악하지 않는다. 거리감쇠는 밸브종류, 밸브크기에 따라 달라질 것으로 예상되며 밸브의 배치나 배관이 복잡하여 보온재가 있는 경우 등은 충분한 거리를 취할 수 없는 경우도 있다.

밸브 몸체와 배관부 2개의 음향센서의 출력은 음향센서와 가까이 설치한 전치증폭기(pre-amplifier)로 증폭하여 Fig. 1의 밸브누설 진단시스템에 의해 양

센서의 출력레벨의 상대적인 증가비율과 모의실험 DB와의 비교로부터 누설유무를 판정하였다. 측정치의 음향레벨로부터 누설양을 추정하는 방법은, 동일한 형식의 밸브에 의해 누설시의 음향출력에 대한 모의실험결과를 적용하되, 동일하지 않은 경우는 유사한 밸브에 대한 모의실험 결과에 의해 추정하였다.

Table 2 Specifications of experimental system

Components	Specification	Dimension and Shape
AE sensor	- PZT(ceramic), - Resonant frequency : 30 kHz - Endurance temperature : 175 °C	Height : 22.4 mm Diameter : 19 φ Weight : 41 g
Pre-amplifier	- Frequency band : 20 kHz~2 MHz - Gain : 20, 40, 60 dB (selectable)	110(W)×58(H)×31(D) Weight : 350 g
Waveguide	Stainless steel rod + platewelded	375 mm, 10 φ
Magnetic holder	Sensor fixing hole, inside magnetic	56(W)×44.5(H)×32(D)
Diagnosis system	- Input channel : 4 CH - Frequency band : 25~530 kHz - Gain : 20, 40, 60 dB (selectable)	400(W)×320(H)×200(D) Weight : 9 kg Power source : AC 220V

진단시스템으로 들어오는 신호를 증폭시켜주는 전치증폭기의 내부 필터(filter)는 10 kHz~2.5 MHz이다.

또한 이득(gain)은 20, 40, 60 dB을 선택하도록 되어 있으나, 이들 중 주로 20 dB과 40 dB을 선택하여 사용하였으며 진단시스템의 이득은 16 dB을 사용하였다. 현장 밸브에 사용한 음향센서는 모의실험에서 사용한 것과 동일한 센서를 사용하였다.



Fig. 3 Direct measuring method

밸브에 음향센서 부착은 두 가지 방식으로 하였다. 밸브 몸체온도에 따라 센서사용온도인 175°C를 기

준으로 이하의 온도에서는 Fig. 3과 같이 자석홀더에 센서를 결합하여 직접 밸브에 부착하였으며, 그 이상의 온도에서는 Fig. 4와 같이 도파봉에 센서와 자석홀더를 결합하여 밸브에 접촉하여 진단하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 습분분리 재열기계통 밸브

증기용 밸브 No.1~3의 3개 밸브는 발전소 2차계통 1단재열기(1st reheater)에서 복수기(condenser)로 보내는증기를 제어하는 밸브이다. No.1~3번 밸브는 모터구동밸브(MOV: motor operated valve) 형태의 4인치 크기의 게이트밸브(gate valve)로서 모두 정상운전 중에 닫힘 상태에서 작용되며 차압은 운전조건에 따라 변화하나, 진단시의 차압은 약 11.8 kg/cm<sup>2</sup>이며 밸브 설계온도는 187°C, 밸브 외부면 온도는 28~31°C이었다.

Fig. 5는 No.1~3의 밸브에 대한 음향레벨(AE rms level) 신호 취득시의 주변잡음(background noise, 이하 BGN으로 표기) 신호의 레벨분석 그래프이다. Fig. 5에서 No.1~3의 밸브에 대한 음향레벨 신호 취득시 현장의 BGN 신호레벨은 약 0.23 V의 레벨을 나타내었다. 본 진단시스템의 음향신호 레벨은 평균전압 값인 mV단위의 RMS값으로 측정되며 5 V를 500 mVrms로 표시하도록 하였으므로, 현장의 BGN에 대한 RMS값은 약 23 mVrms가 된다.

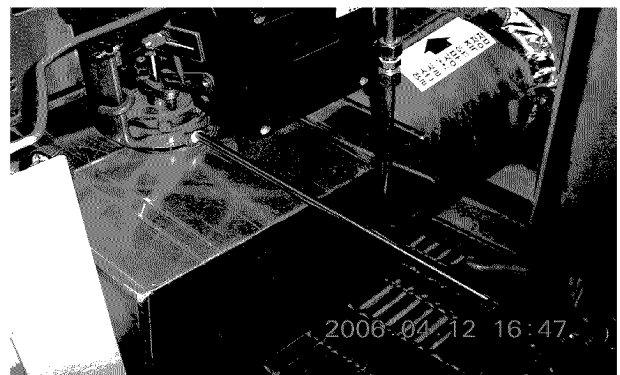


Fig. 4 Measuring method using waveguide

Fig. 6은 No.1의 밸브에 대해 음향신호를 취득하여 시간대별 음향레벨의 트렌드(acoustic sound level trend)로 나타낸 그래프이다. 음향레벨(AE rms level) 값은 약 32 mVrms로 이 값을 BGN 레벨인 23 mVrms 보다 약간 높은 값을 나타내고 있다.

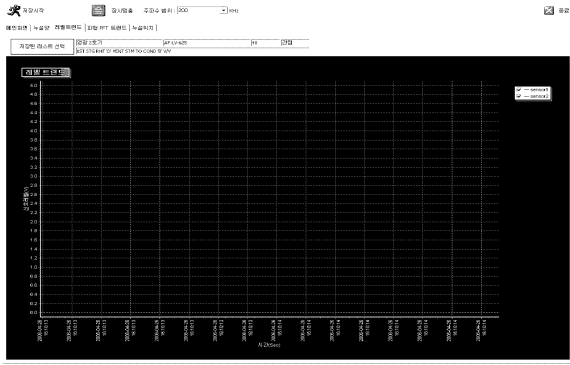


Fig. 5 Background noise signal around No.1~3 valve in power plant

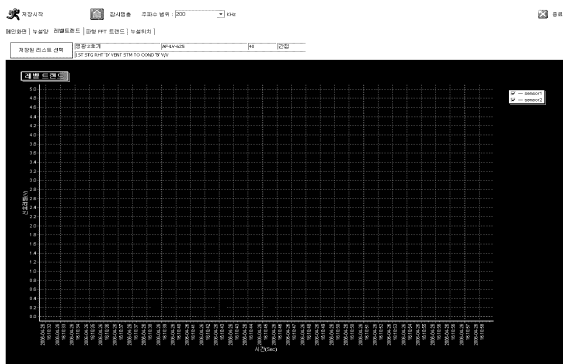


Fig. 6 Acoustic signal level in No.1 valve in case of using waveguide

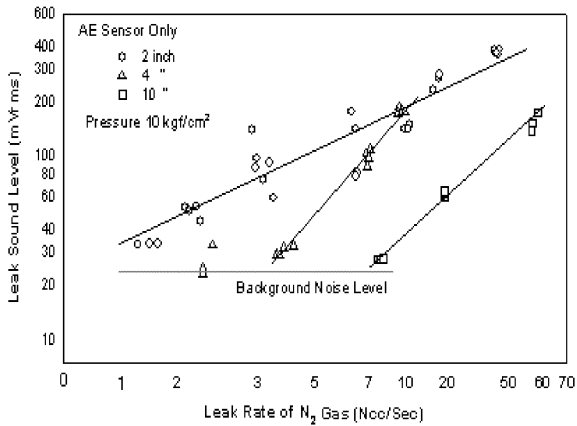


Fig. 7 Acoustic signal level in the condition of small opening(N<sub>2</sub> gas, inlet pressure 10 kgf /cm<sup>2</sup>)

No. 12 밸브는 4인치, 게이트밸브, 차압 11.8 kg/cm<sup>2</sup>으로서 밸브 모의누설실험 조건과 거의 유사한 조건인 2인치, 게이트밸브, 차압 10kg/cm<sup>2</sup>에 대한 밸브 모의누설실험의 결과인 Fig.7의 미소개도상태의

누설음 크기(질소가스, 입구압력 10 kg/cm<sup>2</sup>)와 비교하면, 모의실험시의 BGN 레벨인 23~ 26 mVrms 보다 약간 상회하는 값을 나타내므로 No.1 밸브에서 미소한 누설이 발생하고 있는 것으로 예측된다.

모의실험 결과를 기준으로 비교해보면 약 3.1cc/sec 즉, 밸브크기(inch) 및 분(minutes)당 누설량으로 환산하면 46.5cc/ min/inch의 증기가 누설되는 것으로 예측되지만, 이는 MSS-SP1 6(미국기계학회 유체기계 시험기준)기준에 의해 허용되는 공기에 의한 밸브시트 누설량(50 cc/ min/inch)과 비교하면 허용 누설량 이내에 있음을 알 수 있다.

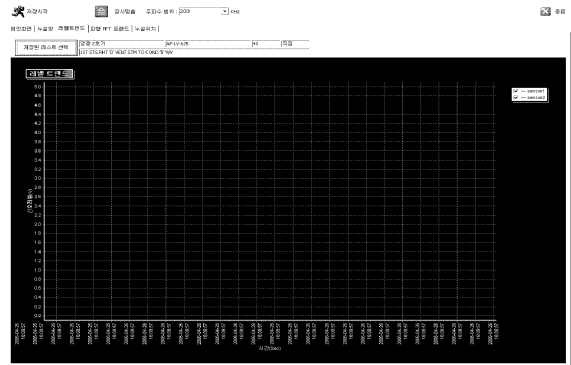


Fig. 8 Acoustic signal level in No.1 valve in case of using AE sensor only

Fig. 8은 No.1의 밸브에 대해 도파봉(waveguide)을 매개하여 취득한 음향레벨의 트렌드 그래프이다. 음향레벨(AE rms level) 값은 약 25 mVrms로 이 값 역시 현장 BGN과 비슷하며, 센서 직접부착시보다 음향레벨(AE rms level) 값이 약 20%정도로 감쇠(attenuation)하였다. 이 경우는 모의실험시의 BGN과 거의 유사하여 증기누설이 없는 것으로 판단된다.

Table 3 Acoustic level measuring results for No. 1~3valve

Valve number	Differential pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Acoustic level (mVrms)	Leak rate estimate (cc/min/inch)
1	11.8	65	46.5
2	11.8	25	0
3	11.8	27	0

### 3.2 주증기 덤프계통 밸브

증기용 밸브 No.4~12의 9개 밸브는 발전소 2차 계통 급수계통(feeder water system)의 정확도를 목적

으로 고온 고차압의 조건으로 운전되는 대형밸브이다. No.4~12번 밸브는 공기구동형 밸브(AOV : air operated valve) 형태의 8인치 크기의 글로브밸브(globe valve)로서 모두 정상운전 중에 닫힘 상태에서 작용되며 차압은 운전조건에 따라 변화하나, 진단시의 차압은 약 68.9 kg/cm<sup>2</sup>이며 밸브 설계온도는 283 °C, 밸브 외부면 온도는 220~234°C이었다.

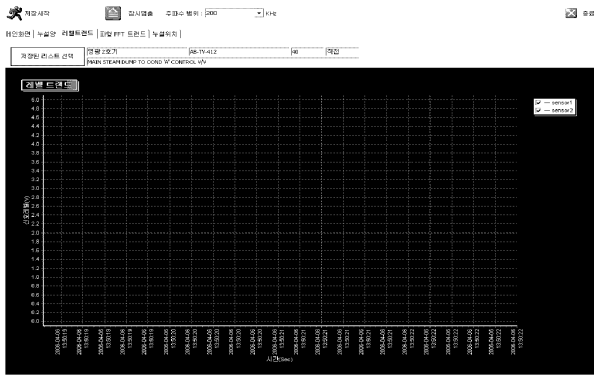


Fig. 9 Background noise signal around No.4~12 valve in power plant

Fig.9는 No.4~12의 밸브에 대한 음향레벨(AE rms level) 신호 취득시의 주변잡음(background noise, 이하 BGN으로 표기) 신호의 레벨분석 그래프이다. Fig.9에서 No.4~12의 밸브에 대한 음향레벨 신호 취득시 현장의 BGN 신호레벨은 약 0.245~0.250 V로 측정되었다. 본 진단시스템의 음향신호 레벨은 평균전압 값인 mV 단위의 RMS값으로 측정되며 5V를 500 mVrms로 표시하도록 하였으므로, 현장의 BGN에 대한 RMS값은 24.5~25.0 mVrms가 된다.

Fig. 10은 No.4의 밸브에 대해 음향신호를 취득하여 시간대별 음향레벨의 트렌드(acoustic sound level trend)를 BGN 레벨과 함께 나타낸 그래프이다. 음향레벨(AE rms level) 값은 약 42 mVrms로 이 값은 BGN 레벨인 24.5~25.0 mVrms 보다 훨씬 높은 값을 나타내고 있다.

No. 4 밸브는 8인치, 글로브밸브, 차압 68.9 kg/cm<sup>2</sup>으로서 밸브 모의누설 실험결과 중에서 가장 근접한 실험조건인 10인치, 글로브밸브, 차압 10 kg/cm<sup>2</sup>에 대한 밸브 모의누설실험의 결과인 Fig. 7의 미소개도상태의 누설음 크기(질소가스, 입구압력 10 kg/cm<sup>2</sup>)와의 직접비교는 할 수 없으나, 대략적인 누설양 범위를 평가하기 위해서 비교하였다.

음향레벨(AE rms level) 값이 약 42 mVrms로 모의실험시의 BGN 레벨인 23~26 mVrms 보다 상회하는 값을 나타내며 Fig.8에서 42 mVrms를 기준으로 밸브크기별 누설량은 2인치 1.7 cc/sec, 4인치 4.2 cc/sec, 10인치 12 cc/sec이므로 측정밸브 8인치는 6.8 cc/sec로 비례적으로 예측된다.

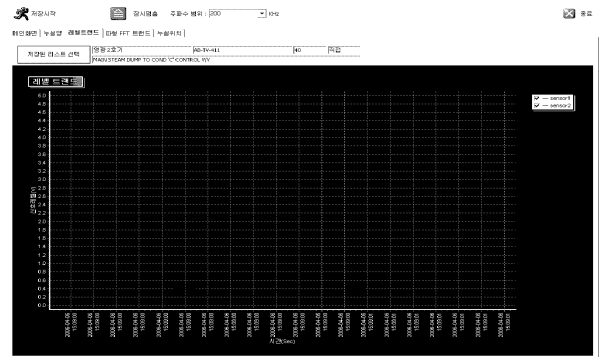


Fig. 10 Acoustic signal level trend in No.4 valve

또한 차압이 증가할수록 누설량은 증가하는 점을 고려하면, 최소 약 6.8 cc/sec이상 즉, 밸브크기 (inch) 및 분(minutes)당 누설량으로 환산하면 51 cc/min /inch 이상의 증기가 누설되는 것으로 예측된다. 이는 MSS-SP16(미국기계학회 유체기계 시험기준)기준에 의해 허용되는 공기에 의한 밸브 시트 누설량(50 cc/min/inch)과 비교하여, 허용 누설량 보다 많을 것으로 예측된다.

Table 4 Acoustic level measuring results for No. 4~12 valve

Valve number	Differential pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Acoustic level (mVrms)	Leak rate estimate (cc/min/inch)
4	68.9	42.0	51.0이상
5	68.9	24.8	0
6	68.9	32.0	45.0이상
7	68.9	25.0	0
8	68.9	25.0	0
9	68.9	31.0	43.5이상
10	68.9	24.5	0
11	68.9	24.8	0
12	68.9	25.0	0

#### 4. 결 론

개발된 밸브누설 진단시스템을 이용하여 모의실

험에서 사용한 밸브와 동일하거나 유사한 밸브 중에서 발전소에서 열손실 예방측면에서 정밀진단이 필요하거나 주기적 누설 및 손상관리가 수행되고 있는 밸브들을 대상으로 현장적용 연구를 수행하였다. 현장적용시험을 통하여 얻은 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 누설검사 대상밸브의 주변잡음의 측정결과로부터, 밸브 종류의 차이는 있으나 실험실에서 있어서 동일 크기 실증시험 밸브와의 비교에 의해, 대상밸브의 누설발생시 검출 가능한 누설량을 추정한 결과, 증기용 밸브의 경우는 밸브 차압이  $10\text{kg/cm}^2$  이상일 때  $43.5\text{ cc/min/inch}$  이상부터, 그리고 물용 밸브의 경우는 밸브 차압이  $10\text{kg/cm}^2$  이상일 때 약  $23\text{ cc/min/in}$  이상부터의 누설량이 검출 가능한 것으로 추정되었다.
- 2) 누설검사의 주변잡음 레벨은 주변기기의 환경에 따라 변화하며, 단순한 음향레벨의 상대 비교만으로는 누설검출 신뢰성은 충분하지 않으나, 대상밸브를 진단하기 이전에 대상밸브에 대한 주변잡음 범위 및 음향레벨 기준치를 진단시스템에 의해 DB화하여 관리한다면 누설검출에 대한 신뢰성은 매우 높음을 알 수 있었다.
- 3) 주변잡음 및 음향레벨에 대한 트렌드를 진단시스템에서 진단 일시별로 저장 및 비교를 수행하면 밸브누설에 관리가 용이하다.
- 4) 실제 발전소에의 적용결과 대상밸브에 차압을 작용시키는 조작이 용이하지 않는 점 등 때문에 현재 상태에서는 음향법의 적용밸브는 비교적 한정될 수 있으나, 보다 폭넓은 모의실험 또는 현장밸브의 데이터취득 및 이력관리 등을 통하여 적용 대상밸브의 범위를 확대시킬 수 있을 것으로 생각된다.

Evaluation for Application of the Detection Method of Internal valve Leak Using Acoustic Method", CREIPI Report No. T89011, pp.1-12.

4. 이상국, 박종혁, 2006, "발전용 증기밸브 누설진단 및 평가에 관한 연구", 한국동력기계공학회 2006 추계학술대회 논문집, pp. 255-260.

## 참고 문헌

1. Hartman, W. F., 1980, "Acoustic Monitoring of Relief Valve Position", EPRI NP-1313, pp.1-42.
2. Allen, J. W., Hartman, W. F. and Robinson, J. C., 1988, "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves", EPRI NP-2444, pp.22-30.
3. Kumagai, H. and Suzuki, A., 1990, "The