

발전용 밸브누설 평가를 위한 다중계측 연구 Study on the Multi-measuring Method for Evaluation of Internal Leak of Power Plant Valve

이상국 · 박성근 · 박종혁 · 김광홍 · 김영범

S. G. Lee, S. K. Park, J. H. Park, K. H. Kim and Y. B. Kim

Key Words : Multi-measuring Method(다중계측기법), Power Plant Valve(발전용 밸브), Internal Leak(내부누설), Acoustic Emission Technology(음향방출기술), Thermal Image Measurement(열화상측정), Temperature Difference(ΔT) Analysis(온도차 해석)

Abstract : Leak would happen because of the damage of high temperature and high-pressure valve in nuclear power plant. condition based prevention maintenance is essential by using the suitable method based on local condition. Energy loss prevention can prevent from an accurate test, Local actually and ability. The methods of test for high energy fluid leak at present are analysis of ΔT , AE(Acoustic Emission) analysis, and thermal image. The result for test of secondary system in nuclear power plant Unit reveals that the AE occurred clearly in leakage situation, but thermal image didn't occur. It is identified that leak is occurred when the orifice located front and back of valve operates. It shows that making a impatient judgment by using the single method if it is leakage is containing uncertainty. So we think that using the Multi-Measuring method is more sound judgment than single-measuring method.

1. 서 론

발전용 밸브내부에서 발생하는 유체누설은 발전소 효율저하로 인한 출력손실로 막대한 경제적 손실을 일으킬 뿐만 아니라 캐비테이션(cavitation), 플래싱(flashing), 침식(erosion) 등에 의해 밸브 및 트랩의 핵심 부품이 쉽게 손상되어 기기 성능 저하를 초래하게 되므로 이를 조기에 탐지하고 정량화하여 해당기기의 상태정보 제공을 통한 누설을 최소화하거나 예방하는 기술의 개발이 요구된다^{1~5)}. 고에너지 유체기기의 누설 또는 손상은 원자력발전소 운전 및 정비 과정에서 반복적으로 발생하는 것으로 확인되었으며 이는 국내 원자력발전소 성능(출력)평가 과정에서도 재확인(출력 손실 3~7 MW)된 바 있다. 이와 같이 고에너지 유체기기의 누설 및 손상은 유체누설을 조기에 탐지하고 감시함으로써 예방 또는 최소화가 가능할 것이다.

현재까지 사용되어온 유체누설 탐지기법인 온도차, 음향, 초음파 유량측정기 등에 의한 탐지기법은 계측기 자체의 불확실성 및 누설과 관련된 기기의 종류, 유체종류, 차압조건 등 누설상태에 따른 조건들이 계측방법에 반영되어 있지 않고 정량화가 되어있지 않아 단일적인 계측방식에 의한 누설평가 방법은 현장 적용도 및 활용도가 매우 낮은 실정이다. 본 논문은 국내 원자력발전소 2차계통의 누설발생 또는 내부부품의 손상이 발생할 수 있는 밸브를 대상으로 모의실험을 통해 다중계측기법 즉, 온도차, 음향누설, 열화상이미지 기법을 이용한 진단기법 설정과 데이터 확보를 수행함으로써, 발전소의 고온 고차압 유체의 누설 유무를 정확하게 탐지하고 이를 정량화함으로써 누설에 따른 에너지 손실량을 산출하고 이 기법을 적용하여 누설이 빈번한 기기의 상태정보를 제공하여 예방정비(condition-based PM) 또는 성능개선을 통한 고온 고차압 유체누설을 예방하거나 최소화하는 기술기반 및 평가 시스템을 구축하는 데 있다. 단일 계측방식의 불확실성 결과에 대한 방안 및 건전성을 확보함과 동시에 향후 밸브 설계 및 누설진단에 대한 확대 적용을

접수일 : 2007년 7월 4일, 채택확정 : 2007년 8월 27일
이상국(책임저자): 한전 전력연구원 원자력발전연구소
E-mail : sglee@kepri.re.kr, Tel : 042-865-5635
박성근, 박종혁, 김광홍 : 한전 전력연구원
김영범 : 시스템 디엔디(주) 부설연구소

도모하고자 하는 목적으로 수행한 연구결과를 소개한다.

2. 실험방법

2.1 대상밸브

본 연구의 대상밸브는 현재 국내 원자력발전소 2차 계통에서 사용 중인 주증기 덤프 밸브(main steam dump valve)이며 각 밸브에 대한 사양을 Table 1에 나타내었다.

주증기 덤프 밸브는 정상운전 중 터빈 이상 또는 발전소 기동시 주증기를 신속하게 복수기로 보내어 주증기계통의 압력조절을 목적으로 사용되는 제어 밸브이며 고온/고차압(290 °C, 차압 76 bar) 조건으로 운전되는 밸브로 설계구조상 1단 감압 및 고차압에 따른 트립부의 손상, 누설이 불가피 하며 부품 교체주기가 짧다. 주증기 계통의 압력조절에 이용되는 매우 중요한 밸브로 한번 누설되면 차단이 불가능하여 트립부의 손상이 지속적으로 확대되어 누설량이 증가하여 출력손실을 야기 시키는 특징을 가지고 있다.

Table 1 Specifications and type of the control valve

	Main Steam Dump Valve
System	AC (Main steam)
Valve No	3 EA(A, B, C)
MFR	Fisher
Vale Size	50.8 mm
Valve type	Globe
Material	A217 WC9
Seat size	48 mm
Leakage Level	V
Limit Noise	85 dB
Trim Specific	On-off
Fluids	Steam

2.2 시험방법

Fig. 1은 고온고압 유체유동설비를 나타내며 동설비를 이용하여 밸브 누설시험을 수행하였다. 유체 최대 내부압력은 70 bar이며 온도는 250 °C까지 실험이 가능하다. 대상밸브에 특성을 면밀히 파악하여 현장적용성이 가장 적절한 다중계측기법을 적용하였으며 시험절차는 실제 발전소의 대상기기에 온도

변화가 없는 밸브에 대한 기준으로 1차적으로 적외선온도계를 이용하여 ΔT 를 측정한다. 온도 변화에 의심이 가는 대상밸브를 중점으로 2차적으로 음향누설측정을 실험계획법에 따라 반복적으로 수행하였다. 온도 변화가 뚜렷하거나 누설이 의심되는 계통의 기기가 확정되면 보온재(insulation)를 제거하여 방사율을 사전 주위온도 및 테이프(tape)를 부착하는 방법으로 보정한 후 열화상카메라를 이용한 상세 누설점검을 실시하여 결과를 비교하였다.

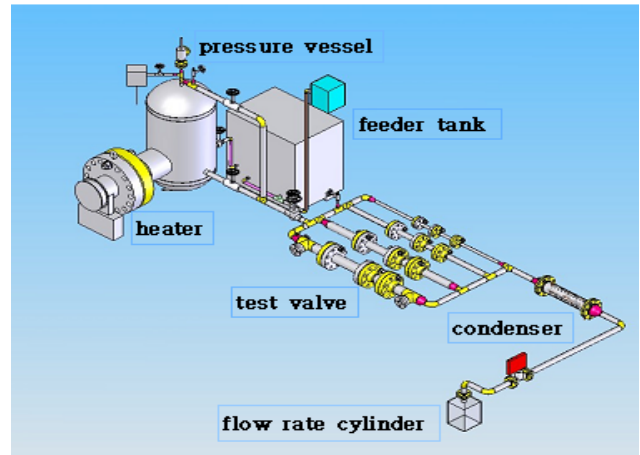


Fig. 1 High temperature fluid loop system

2.2.1 온도차 측정

온도차 기법에 사용한 장비는 흑체 복사 이론에서 모든 온도를 가지는 물체는 자체에서 일정한 파장의 적외선을 방출하며 이 때 방출되는 파장은 온도에 반비례한다는 원리를 이용하는 적외선 온도계를 이용하였다. 장비에 대한 특성 및 사양은 Table 2와 같다.

Table 2 ΔT Equipment of specification

	specification
Model	Testo 860
Range	-30 ~ + 900 °C
Accuracy	± 0.75%, ± 2 °C
resolving power	0.1 °C
Test method	infrared light

온도차 기법의 신뢰성을 제고하기 위해 시험 밸브가 설치된 배관 및 밸브의 온도 센서 설치 위치를 배관의 직경(D)에 비례한 거리로 선택하였으며, Fig. 2와 같은 위치에 설치된 센서를 이용하여 온도 변화가 있는 기기의 ΔT 를 측정하였다. 밸브 몸체

(valve body) 1, 2를 중심으로 유체입구 방향으로 배관 직경 D 의 2배, 3배 및 4배의 길이에 해당하는 위치를 $2D$, $3D$ 및 $4D$ 로 하고, 유체 출구 방향으로 배관 직경 D 의 2배, 3배 및 4배의 길이에 해당하는 위치를 $2D-1$, $3D-1$ 및 $4D-1$ 으로 하여 측정하였다. 그림중의 밸브 몸체중 1번은 유체 입구방향이며 2번은 유체 출구방향, 3번은 플랜지(flange) 부분이다.

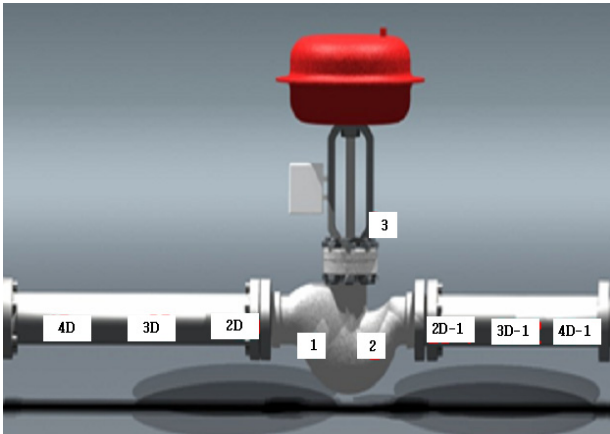


Fig. 2 Point of ΔT leak monitoring

2.2.2 음향누설신호의 전압 및 FFT 파형 측정

밸브 시트면에 있어서 누설로 발생하는 음향은 밸브외벽에 부착한 음향센서로 검출한다. 음향센서는 PZT 압전소자 타입의 공진형 음향센서이며, 공진주파수가 143 kHz의 것을 사용하였다. 음향센서로부터의 출력은 전치증폭기(preamplifier)에서 20 dB로 증폭시킨 후 주증폭기(main amplifier)에서 20 dB 증폭시켰다. 전치증폭기의 주파수대역은 20 kHz에서 2 MHz이며, 또한 AE 측정장치의 주파수대역은 1 kHz에서 400 kHz이다. 사용된 음향측정장치의 사양을 Table 3에 나타낸다.

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, 밸브입구의 압력은 20과 40 bar의 두 가지로 변화시켰다. 밸브 누설발생을 모의하기 위한 디스크에 대한 균열손상은 밸브 하부의 시트 방향면(Fig. 3의 "A" 표시 부분)에 V노치 손상을 절삭용 바이트로 가공하였다. V노치의 최초 손상깊이는 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. 3은 밸브 디스크 및 밸브 시트형상과 V노치가공 위치를 나타낸다.

Table 3 Specifications of measuring instrument

Measuring instrument	Type and specifications
AE Sensor	Resonance frequency : 143 kHz
	Operating temperature : 150°C under
Pre-amplifier	Frequency band : 20 kHz~2 MHz
	Gain : 20, 40, 60dB selectable
Local processor	Frequency range : 1~400 kHz
	Cut-off frequency : THRU-THRU
	Gain : 20 dB

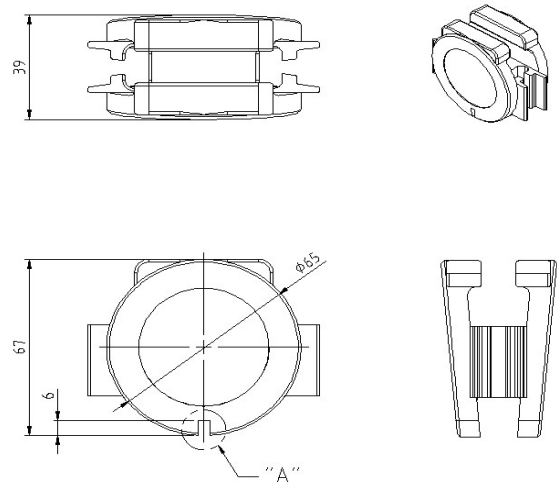


Fig. 3 Shape of valve disk and seat

2.2.3 열화상이미지

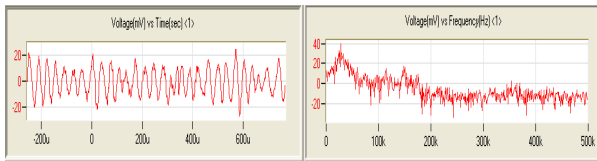
열화상이미지 기법을 적용하기 위해서 사전에 복잡한 절차를 거쳐야 하는 번거로움이 수반된다. 또한 밸브 바디의 재질에 따른 방사율이 다르므로 사전에 주위온도 및 반사 보정용 테이프(tape)를 부착하여 보정을 해야만 한다. 본 연구에서 사용된 열화상카메라는 NEC사의 TH 9100 PRO를 이용하였다. 열화상 카메라의 주요 기능은 Table 4와 같다.

Table 4 Specifications of thermal image camera

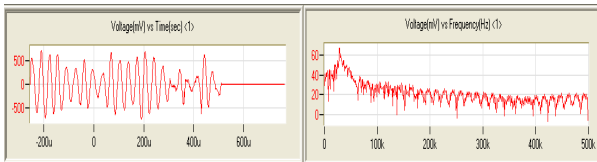
		TH9100PRO
Measuring range	Range 1 Range 2 Range 3	-40 to 120 °C 0 to 500 °C 200 to 2000 °C
Resolution	Range 1	0.08 °C, 0.03 °C
Accuracy	± 2 °C or ± 2 % of reading whichever greater	
Pixels	0.41 Mega	
Effective image	752 (H) x 480 (V) Pixels	
Field of view	30.1° (H) x 22.7° (V)	
Sensitivity	1 Lux	
Focusing distance	30 cm to infinity	
Auto exposure	Provided	
Video signal	NTSC/PAL	

3. 실험결과 및 고찰

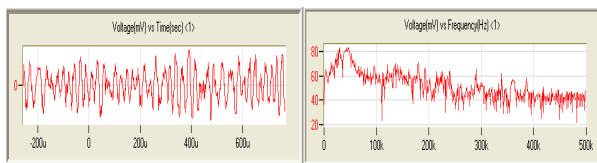
3.1 음향누설신호 측정 결과



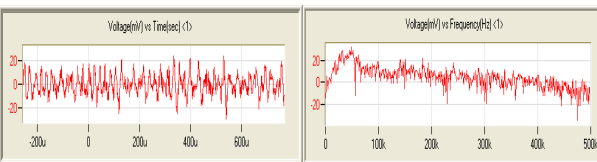
(a) 20 bar no leak



(b) 40 bar no leak



(c) 5.0 mm, 20 bar leak



(d) 5.0 mm, 40 bar leak

Fig. 4 Voltage and FFT waveform analysis

Fig. 4의 (a)~(d)는 밸브 증기 누설실험에서 밸브

디스크 균열손상 크기를 0.5 mm로 하였을 때, 입구 압력 변화 및 누설상태에 따른 압전소자형(PZT) 음향센서 각각으로부터 취득한 음향신호에 대한 전압 및 FFT 주파수분석 파형을 분석한 결과이다. Fig. 4의 (a)~(d)에서 시간에 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, 20 bar의 조건에서 누설이 없을 때인 그림의 (a)와 누설이 발생할 때의 그림의 (c), 그리고 40 bar의 조건에서 누설이 없을 때인 그림의 (b)와 누설이 발생할 때의 그림의 (d)에 알 수 있듯이 압력증가에 따라 서 거의 유사한 25 kHz의 최대주파수(peak frequency)를 나타내지만, 누설이 발생함에 따라 최대주파수(peak frequency)가 고주파대역으로 이동하며 Y축의 전압 진폭(voltage amplitude) 크기 또한 40 mV에서 60 mV로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이들 결과를 이용하여 향후 밸브 및 트랩 등의 유체기기의 유체누설시 누설유무를 판단함으로써 유체누설을 예방하거나 최소화하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 온도차 측정 결과

대상밸브를 대상으로 적외선 온도계를 이용하여 밸브 몸체(valve body)를 중심으로 유체 입구방향으로 배관 직경 D 의 2배, 3배 및 4배의 길이에 해당하는 위치와 유체 출구 방향으로 배관 직경 D 의 2배, 3배 및 4배의 길이에 해당하는 위치에 대한 각각의 온도를 측정하였으며 그 결과를 Table 5에 나타낸다. Table 5에서 보면, A 밸브의 몸체 1, 2번 위치를 2회 측정한 온도측정 결과를 보면, 첫 번째 측정에서 출구측 2번의 온도(133.8 °C)가 입구측 1번의 온도(110.2 °C)보다 높음을 알 수 있으며, 두 번째 측정에서는 입구측 1번의 온도(101.9 °C)가 출구측 2번의 온도(82.1 °C)보다 높음을 알 수 있다. 또한 플랜지(flange) 부분의 3번의 입구측 온도(99.6 °C)는 출구측 온도(54.8 °C) 보다 높게 나타났다. 이는 고온 증기유체의 유동이 불균일하여 위치별로 온도차가 발생한 것으로 생각된다. 또한 배관직경 D 에 따른 온도변화를 보면, A 밸브의 첫 번째 측정에서는 입구측과 출구측 모든 온도가 유사한 값을 나타내지만 두 번째 측정에서는 입구측 온도들이 출구측보다 모두 높게 나타내는 경향을 보이고 있다. 이는 실제 발전소에서 운전중인 밸브에 대한 온

도를 측정한 결과로써, 증기 유체의 유동이 계속 변화하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 온도계측의 단일방법의 적용은 복잡한 결과를 나타내므로 타 기법과의 보완적용이 바람직할 것으로 생각된다.

Table 5 Temperature difference measurement result of target components

Valve	Temperature(°C)					
	1	2	3	2D	3D	4D
				2D-1	3D-1	4D-1
A	110.2	133.8	99.6 54.8	52.7 52.1	48.8 48.7	48.6 48.5
	101.9	82.1	155.6 50.2	57.3 53.0	52.6 43.5	60.6 46.6
B	162.3	68.6	43.6 41.9	50.0 49.2	65.3 44.7	57.9 50.5
	158.3	63.8	43.2 44.8	48.6 47.0	42.3 39.2	41.0 39.3
C	49.0	58.6	42.6 41.6	45.1 42.0	44.7 40.1	47.6 42.0
	43.4	49.0	43.9 42.9	44.1 41.0	42.1 42.1	41.5 41.5

3.3 열화상이미지 측정 결과

본 연구의 대상 밸브 “A” 밸브에 대한 열화상 측정한 대표적인 열화상이미지는 Fig. 5와 같다.

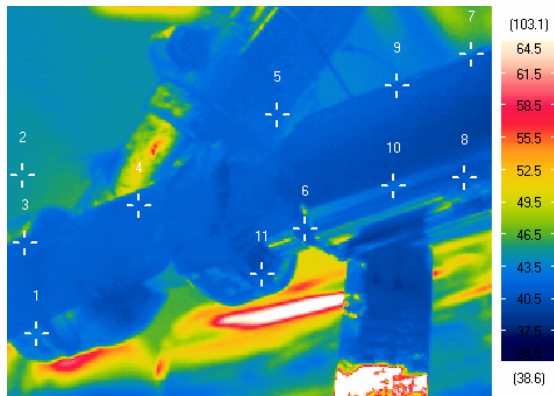


Fig. 5 Thermal image of valve A

진단결과 밸브 A는 현재 닫혀있는 밸브로 현재 누설이 발생하지 않고 있음을 보여준다. 온도가 감지되는 부분은 열의 전도와 복사로 인하여 다른 밸브와 주위 온도가 측정되었음을 확인할 수 있다. 하지만 음향측정 결과에서 뚜렷한 누설현상이 발생한 이유는 밸브 A는 바이패스(by-pass)에 의한 진동이나 다른 매개체에서 발생하는 음향이 누설로 측정되었기 때문이다. 따라서 이러한 음향누설 신호는

다중계측을 통한 판정으로 보다 정밀한 분석을 통하여 불확실성을 줄여야 할 것이며 무엇보다 먼저 계통의 시스템을 잘 살펴서 반복 현장시험을 통한 데이터의 정립을 하지 않고서 사전에 누설여부를 선급하게 결정하는 것은 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

발전용 밸브 내부누설을 측정할 수 있는 다중계측 측정방법의 적용성을 검토하기 위하여 실제 원자력발전소 2차 계통에 사용되고 있는 밸브를 이용한 밸브누설 모의실험을 통하여 음향법, 온도차법 및 열화상분석법 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전압파형 분석의 경우, 밸브 누설여부에 상관없이 모두 전형적인 연속형 신호를 나타며, FFT 주파수 파형분석의 경우는 밸브 디스크 균열손상에 따른 누설이 발생하게 되면 최대주파수(peak frequency)는 고주파대역으로 이동함을 알 수 있었다. 그러나 일정 균열크기에서 음향신호가 포화되는 상태를 확인할 수 있었다.

2) 배관 전·후단에 메모리 온도계를 부착하여 작동주기를 파악하여 음향계측의 불확실도와 변별력을 보정하고 열화상카메라의 신뢰성을 재검증할 필요가 있다.

3) 열화상이미지에서는 열의 전도와 복사로 인하여 다른 밸브와 주위 온도가 측정되는 현상을 고려하여 타 기법으로 보완할 필요가 있다.

4) 단일 방법보다는 다중계측(multi-measuring) 기법을 적용하는 것이 진단의 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 또한 이처럼 판단오차를 줄이기 위해 다중계측기법을 적용하여 누설여부 평가를 정밀하게 진단할 필요가 있다.

5) 본 논문에서 분석한 다중계측(multi-measuring) 기법의 결과를 보다 보완하여 활용한다면 향후 밸브 및 트랩 등의 유체기기의 유체누설시 누설 유무의 판단이 가능하므로, 유체누설을 예방하거나 최소화하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 전력기반조성사업센터 주

관 전력산업연구개발사업의 지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

1. J. W. Allen et al., 1988, "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves", EPRI Report, NP-2444, pp. 22~30.
2. Kitazima A., 1988, "Acoustic Leak Detection in Piping System(Part 1)", CREIPI Report No. 277059, pp. 21~32.
3. Kitazima, A., 1986, "Monitoring of Valve Operation conditions by Acoustic Method", CREIPI Report No. 285089, pp. 1~33.
4. Kumagai, H. et al., 1988, "The Availability of the Detection Method of Internal Valve Leakage Using Acoustic Method", CREIPI Report No. T87112, pp. 1~42.
5. Hartman, W. F., 1980, "Acoustic Monitoring of Relief Valve Position", EPRI Report, NP-1313, pp. 1~42.