

발전용 밸브누설 음향 진단 및 감시시스템

Acoustic Valve Leak Diagnosis and Monitoring System for Power Plant Valves

이상국†

Sang Guk Lee

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Valve(밸브), Leak(누설), Power Plant(발전소), Leak Diagnosis System(누설진단시스템), Leak Monitoring System(누설감시시스템)

ABSTRACT

To verify the system performance of portable AE leak diagnosis system which can measure with moving conditions, AE activities such as RMS voltage level, AE signal trend, leak rate degree according to AE database, FFT spectrum were measured during operation on total 11 valves of the secondary system in nuclear power plant. AE activities were recorded and analyzed from various operating conditions including different temperature, type of valve, pressure difference, valve size and fluid. The results of this field study are utilized to select the type of sensors, the frequency band for filtering and thereby to improve the signal-to-noise ratio for diagnosis for diagnosis or monitoring of valves in operation. As the final result of application study above, portable type leak diagnosis system by AE was developed. The outcome of the study can be definitely applied as a means of the diagnosis or monitoring system for energy saving and prevention of accident for power plant valve. The purpose of this study is to verify availability of the acoustic emission in-situ monitoring method to the internal leak and operating conditions of the major valves at nuclear power plants. In this study, acoustic emission tests are performed when the pressurized temperature water and steam flowed through glove valve(main steam dump valve) and check valve(main steam outlet pump check valve) on the normal size of 12 and 18 ". The valve internal leak monitoring 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, frequency analysis, voltage analysis and amplitude analysis of acoustic signal emitted from the valve operating condition internal leak.

1. 서론

운전 중인 밸브 내부누설을 진단 및 평가함으로써 밸브의 신뢰성 확보, 열손실의 극소화 및 설비의 안정적인 운전 확보, 불필요한 정비감소로 인한 경비절감 및 운전/보수계획에 대한 기준 제시 등을 기할 수 있다. 현재까지 이러한 손상방지를 위한 누설검사에는 레벨 감소 체크, 압력계를 이용한 입출구 압력차, 온도 및 습도측정, 내압(가압) 시험 및 진공(감압) 시험 등을 이용하여 왔으나, 미소 누설상태(누설유무, 누설율, 누설속도 및 누설형상 등)의 정보에 대

한 실시간 측정이 불가능하고 측정 신뢰도면에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서 측정이 신속하고 측정 정밀도가 높으며 미소 누설상태의 실시간 측정평가 및 감시(on-line monitoring)이 가능한 음향방출기술에 의한 밸브 누설 감시시스템이 시급히 필요한 실정이다.

발전소 밸브에 음향방출법을 적용하기 위해서는, 적용 밸브의 주변잡음을 파악하고 실험실 실험결과 및 방법에 대한 적정성 여부를 파악하는 것이 필요하다. 따라서, 본 논문은 발전소 정기점검시에 있어서 주변잡음 측정을 행하였으며, 실험실 실험의 결과와 비교하여 음향방출법의 검출능력을 평가하였다. 또한 실기 밸브에 음향센서를 부착하는 방법 및 계측방법의 문제점등에 대해서도 검토한 결과를 서술하고자 한다. 또한 밸브누설의 상시감시 연구를 위하여

† 이상국; 한국전력공사 전력연구원
E-mail : sglee@kepri.re.kr
Tel : (042) 865-5635, Fax : (042) 865-5604

영광원자력발전소에서 운전 중인 밸브 중 누설발생 또는 내부부품 손상이 발생할 수 있는 밸브를 대상으로 밸브누설 및 손상을 진단 및 평가하기 위하여 진단시스템을 현장에 설치하여 시험적으로 데이터를 취득 및 분석함으로써 발전소 밸브에 대한 건전성을 확보함과 동시에 향후 확대 적용을 도모하고자 하는 목적으로 그 결과에 대해 소개하고자 한다.

2. 음향신호 검출방법

2.1 진단 및 감시 밸브

(1) 진단밸브

본 실험에 사용된 진단밸브는 현재 원자력발전소 2차계통에서 사용 중인 누설진단이 필수적인 습분분리 재열기 계통 제어밸브이며 각 밸브에 대한 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications and type of leak diagnosis valve

밸브번호	종류	형태	크기 (inch)	차압 (kg/cm ²)	온도 (°C)	밸브 상태	유체
1	MOV	GB	1	12.1	280	close	증기
2	MOV	GB	1	12.1	280	close	증기
3	MOV	GB	1	12.1	280	close	증기
4	MOV	GB	1	12.1	280	close	증기
5	MOV	GB	1	12.1	280	close	증기
6	MOV	GB	1	12.1	280	close	증기
7	MOV	GT	1	12.1	280	close	증기
8	MOV	GT	1	12.1	280	close	증기
9	MOV	GT	3	12.1	217	close	증기
10	MOV	GT	3	12.1	217	close	증기
11	MOV	GT	3	12.1	217	close	증기

습분분리 재열기계통 밸브는 1,2단 재열기의 배수탱크에서 복수기로 응축수를 배수하기 위한 역할을 하는 밸브들이다. 차압 및 온도는 정상 운전 중 약 10~28.8 kg/cm² 및 217~231 °C의 조건으로 운전되는 소형밸브로 출력에 따라 개폐 제어되는 모터구동밸브(MOV)이다. 주로 닫힘상태에서 운전되며 누설발생시 출력 및 열손실 등에 큰 문제점을 초래하게 된다.

(2) 감시밸브

상시 감시를 위해 실험에 사용된 밸브는 현재 원자력발전소 2차계통에서 사용 중인 대형 증기용 제어밸브와 물용 역지밸브이며 각 밸브에 대한 사양을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Specifications and type of leak monitoring valve

	A group valve	B group valve
valve type	globe valve	check valve
valve name	main steam dump valve	main feedwater pump outlet check valve
diameter(inch)	12	18
pressure class (pound/inch ²)	900	1500
running type	air driving diaphragm type	disc weight
fluids	steam	water
valve symbol	AB-TV 414, 415, 439	AE-V011, 012, 020

주증기 덤프밸브는 정상운전중 터빈 이상 또는 발전소 기동시 주증기를 신속하게 복수기로 보내어 주증기계통의 압력 조절 목적으로 사용되는 증기용 제어밸브이며, 주급수 펌프 출구 체크밸브는 주급수펌프 후단에 설치된 역지밸브로 타 계열 펌프의 기동시 계통급수가 정지된 펌프로의 역류를 방지하는 역지밸브이다.



Fig. 1 Main steam dump valve

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 이동식 밸브누설진단시스템

밸브누설 진단실험을 위해 이동식 밸브누설 진단시스템을 이용하여 각 밸브조건에 따른 음향레벨 및 주변잡음 레벨, 음향레벨 트렌드, 파형분석 및 음향신호의 주파수분석(FFT분석), 누설양 평가 등을 수행하였다. 취득한 음향신호는 시작품에 내장된 조건별 DB와 비교하여 누설상태를 평가하게 된다. 현장 밸브에 대한 누설검출방법은 Fig.3에



Fig. 2 Main water pump outlet check valve

나타낸 것과 같이 2개의 음향센서를 이용하여 누설진단 신호 및 주변잡음 신호를 동시에 검출하였다.

음향센서는 1개 밸브의 측정에 2개를 사용하였다. 누설 검출을 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 크기 정도로 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.

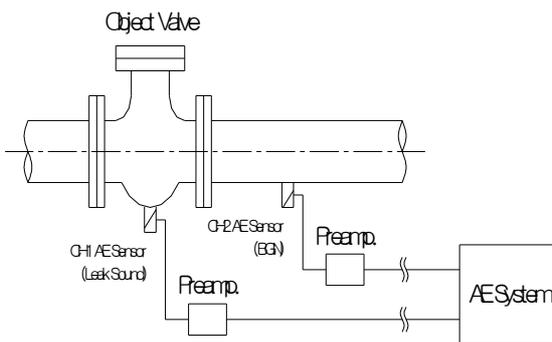


Fig. 3 Layout of experimental setup

밸브 몸체와 배관부 2개의 음향센서의 출력은 음향센서와 근접하여 설치한 전치증폭기(pre-amplifier)로 증폭하여 Fig.4의 이동식 밸브누설 진단시스템에 의해 양 센서의 출력레벨의 상대적인 증가비율과 모의실험 DB와의 비교로부터 누설유무를 판정하였다. 측정치의 음향레벨로부터 누설량을 추정하는 방법은, 동일한 형식의 밸브에 의해 누설시

의 음향출력에 대한 모의실험결과를 적용하되, 동일하지 않은 경우는 유사한 밸브에 대한 모의실험 결과에 의해 추정하였다. 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. 밸브에 음향센서 부착은 두 가지 방식으로 하였다. 밸브 몸체온도에 따라 센서사용온도인 175°C를 기준으로 이하의 온도에서는 자석홀더에 센서를 결합하여 직접 밸브에 부착하였으며, 그 이상의 온도에서는 도파봉에 센서와 자석홀더를 결합하여 밸브에 접촉하여 진단하였다.



Fig. 4 Portable acoustic valve leak detector

3.2 밸브누설 감시시스템

밸브누설 감시실험을 위해 고정식 실험장치를 사용하였다. 고정식 밸브누설 음향 실험장치의 감시범위는 주증기 덤프밸브 3개(A그룹 밸브), 주급수 펌프출구 체크밸브 3개(B그룹 밸브)를 진단하기 위해 각 밸브의 입구 및 출구에 센서 1개씩 모두 12개소를 진단하였다. 또한 설치 위치는 터빈빌딩내 주증기 덤프밸브 옆에 설치하였으며, 실험장치의 구성 개략도는 Fig. 5와 같다. 고정식 실험장치의 음향신호 데이터 취득 및 기능은 다음과 같다.

- 모든 센서 상태를 bar 그래프로 지시하며, alarm 상태를 color 변화로 display
- 60일, 30일, 10일, 1일, 2.5시간 trend
- 실시간 신호레벨(dB) 크기 표시, 평균전압(RMS) 값 및 spectrum 분석과 저장
- 센서 위치 및 alarm 상태를 보여주는 valve map display
- 모든 analog signal을 즉석에서 저장하고 출력(print out)

원자력발전소 정기점검기간동안 운전개시시 밸브운전계획에 따른 밸브누설 시험표에 의거하여 출력 및 밸브 개도에 따라 각각 시험을 수행하였다. 음향신호의 취득방법은 고정식 밸브누설 음향진단장치에서 출력되는 신호를 기준으로 분석하였다. 밸브별 음향센서의 배열 및 채널은 Table 3과 같다.

Table 3 Sensor array and attachment location

밸브명	명칭	위치	채널(Ch)
주급수 펌프 출구 체크밸브	AE-V 020	입구	1
		출구	2
	AE-V 012	입구	5
		출구	6
	AE-V 011	입구	9
		출구	10
주증기 덤프밸브	AB-TV 415	입구	11
		출구	12
	AB-TV 439	입구	13
		출구	14
	AB-TV 414	입구	15
		출구	16

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이동식 밸브누설진단시스템에 의한 실험결과

(1) 주변잡음 측정결과

Fig.5는 No.1~11의 밸브에 대한 음향레벨(AE rms level) 신호 취득시의 주변잡음(background noise, 이하 BGN으로 표기) 신호의 레벨분석 그래프이다. Fig.5에서 No.1~11의 밸브에 대한 음향레벨 신호 취득시 현장의 BGN 신호레벨은 약 0.192~0.215 V이었다. 본 진단시스템의 음향신호 레벨은 평균전압 값인 mV 단위의 RMS값으로 측정되며 5 V를 500 mVrms로 표시하도록 하였으므로, 현장의 BGN에 대한 RMS값은 19.2~21.5 mVrms가 된다.

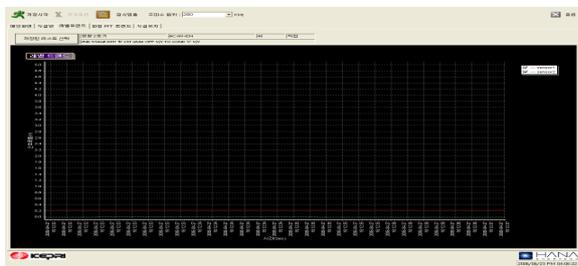


Fig. 5 Background noise level during leak detecting No.1~11 valve

(2) 음향레벨 신호 측정결과

Fig.6은 No.1 밸브에 대해 음향신호를 취득하여 시간

대별 음향레벨의 트렌드(acoustic sound level trend)로 나타낸 그래프이다. 음향레벨(AE rms level) 값은 약 22 mVrms로 이 값은 BGN 레벨인 19.2 ~ 21.5 mVrms와 거의 비슷한 값을 나타내므로 BGN 레벨 수준의 신호로서 누설은 발생하지 않는 것으로 생각된다.

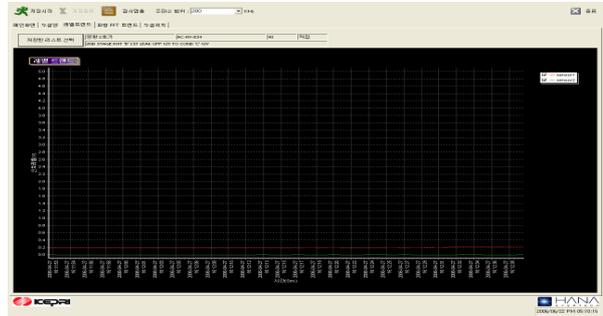


Fig. 6 AE rms level trend of No.1 valve

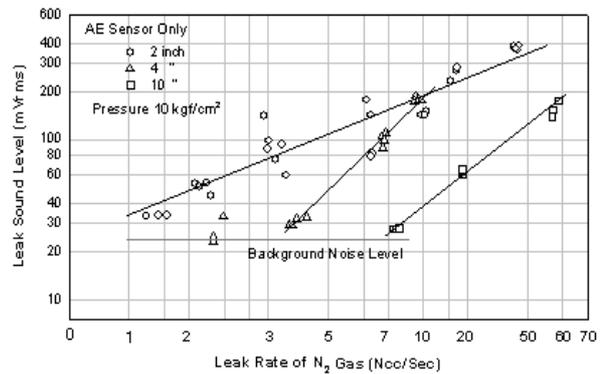


Fig. 7 AE rms level in valves of small opening condition (N_2 gas, differential pressure 10 kg/cm^2)

No.1 밸브는 1인치, 글로브밸브, 차압 12.1 kg/cm^2 로서 유사한 조건인 2인치, 게이트밸브, 차압 10 kg/cm^2 에 대한 밸브 모의누설실험의 결과인 Fig.7의 미소개도상태의 누설음 크기(질소가스, 입구압력 10 kg/cm^2)와 비교하면, 모의실험시의 BGN 레벨인 23~26 mVrms와도 유사한 값을 나타내므로 No.1 밸브에서는 누설이 발생하지 않는 것으로 판단된다. Fig.8은 No.7 밸브에 대해 음향신호를 취득하여 시간대별 음향레벨의 트렌드(acoustic sound level trend)로 나타낸 그래프이다. 음향레벨(AE rms level) 값은 약 34.0 mVrms로 이 값은 BGN 레벨인 19.2~ 21.5 mVrms 보다 높은 값을 나타내고 있다. No.7 밸브는 1인치, 게이트밸브, 차압 12.1 kg/cm^2 로서 유사한 조건인 2인치, 게이트밸브, 차압 10 kg/cm^2 에 대한 밸브 모의누설실험의 결과인 Fig.5와 비교하면, 모의실험시의 BGN 레벨인 23~26mVrms 보다도 높은 값을 나타내므로 No.7 밸브에서는 누설이 발생하고 있는 것으로 판단된다.

모의실험 결과를 기준으로 비교해보면, 0.9 cc/sec 즉, 밸브크기(inch) 및 분(minutes)당 환산하면 54 cc/min/inch의 증가가 미소 누설되는 것으로 예측된다. 이는 MSS-SP16(미국기계학회 유체기계 시험기준)으로 허용되는 공기에 의한 밸브 시트 누설량(50 cc/min/inch)과 비교하면, 허용 누설량과 거의 비슷한 값으로 누설허용범위 이내에 있음을 알 수 있다. 또한, 모의실험결과 동일한 압력(차압)에서 밸브크기가 감소하면 동일 음향레벨에서 누설량은 감소하므로, 모의실험밸브 2인치보다 작은 1인치의 No.7 밸브 누설량은 54 cc/min/inch 보다 적을 것으로 예측된다.

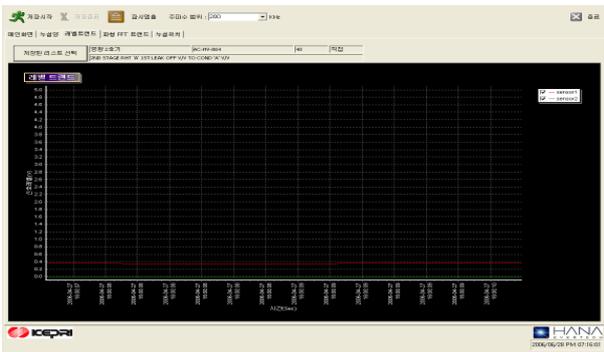


Fig. 8 AE rms level trend of No.7 valve

Fig.9는 No.9 밸브에 대해 음향신호를 취득하여 시간대별 음향레벨의 트렌드(acoustic sound level trend)로 나타낸 그래프이다. 음향레벨(AE rms level) 값은 약 39.0 mVrms로 이 값은 BGN 레벨인 19.2 ~ 21.5 mVrms 보다 높은 값을 나타내고 있다. No.9 밸브는 3인치, 게이트밸브, 차압 12.1 kg/cm²으로서 유사한 조건으로 2인치와 4인치, 게이트밸브, 차압 10 kg/cm²에의 두 가지 조건에 대한 밸브 모의누설실험의 결과인 Fig.7 및 Fig.10의 균열손상(V노치)에 따른 누설음의 크기(질소가스, 입구압력 7~10 kgf/cm²)와 비교하면, 모의실험시의 BGN 레벨인 23~26 mVrms보다 높은 값을 나타내므로 No.9 밸브에서는 누설이 발생하고 있는 것으로 평가된다.

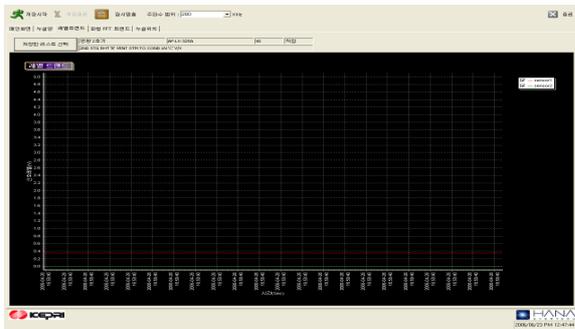


Fig. 9 AE rms level trend of No.9 valve

모의실험 결과를 기준으로 비교해보면, 2인치와 비교할 경우 1.6 cc/sec 즉, 밸브크기(inch) 및 분(minutes)당 누설량으로 환산하면 48 cc/min/inch의 증가 누설이 예측되나, 동일한 압력(차압)에서 밸브크기가 증가하면 동일 음향레벨에서 누설량은 증가하므로, 모의실험밸브 2인치보다 큰 3인치의 No.9 밸브 누설량은 48 cc/min/inch 보다 상회할 것으로 예상된다. 그리고, 4인치와 비교할 경우 4.2cc/sec로 밸브크기(inch) 및 분(minutes)당 누설량으로 환산하면 63 cc/min/inch의 증가가 누설되는 것으로 생각되나, 동일한 압력(차압)에서 밸브크기가 감소하면 동일 음향레벨에서 누설량은 감소하므로, 모의실험밸브 4인치보다 작은 3인치의 No.9 밸브 누설량은 63 cc/min/inch 보다 적을 것으로 예상된다. 따라서, No.9 밸브의 누설량은 48~63 cc/min/inch 사이의 값일 것으로 생각된다. 이는 MSS-SP16 (미국기계학회 유체기계 시험기준)으로 허용되는 공기에 의한 밸브 시트 누설량(50 cc/min/inch)과 비교하면, 허용 누설량 범위와 유사한 것으로 판단된다.

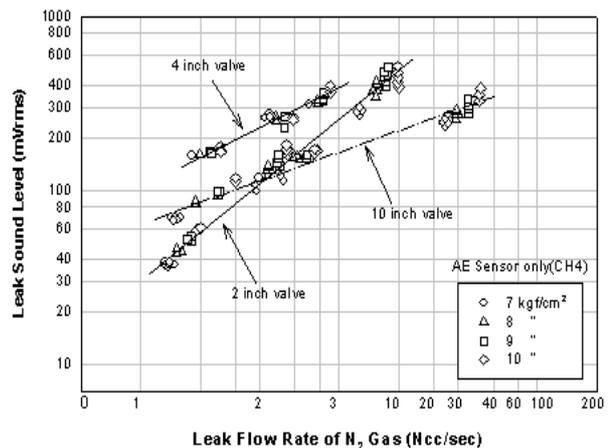


Fig. 10 AE rms level in valves including crack damage (V-notch) (N² gas, differential pressure 7~10 kg/cm²)

4.2 밸브누설 감시시스템에 의한 실험결과

(1) 주증기 덤프밸브 측정결과

Fig. 11은 01:00부터 03:24까지 dump valve 415 B(Ch12)의 신호추이를 측정된 결과로서, 40% 출력 및 2nd 주급수 펌프(MFWP : Main Feed Water Pump)가 가동중인 약 02:10부터 dump valve가 close 상태에서 20% open함으로서 음향신호레벨이 크게 증가함을 알 수 있다. 즉 close 상태의 음향신호레벨이 약 7% 이었던 것이 13:00 부근에서 23%가 증가된 30%의 음향신호레벨을 확인하였다. 이때 초기에 30% 증가 후 다시 22%를 유지하고 있는 것을 알 수 있는데, 초기의 30% 증가 현상은 open 상태가 되면서 밸브내부의 갑작스럽게 발생된 음향

의 공진(resonance)에 기인한 것으로 해석된다.

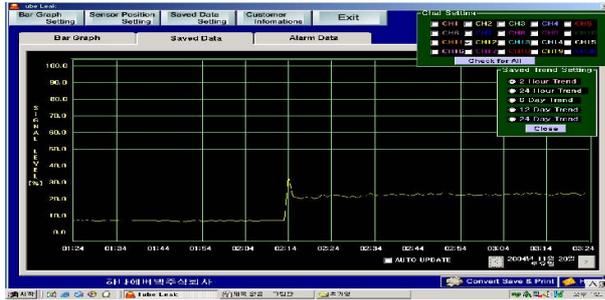


Fig. 11 Display of signal trend analysis for main steam dump valve 415 outlet

(2) 주급수 출구펌프 체크밸브 측정결과

Fig. 12는 15:29부터 17:29까지의 check valve V020 A, B의 신호추이를 측정된 결과로서, 출력 약 30% 증발 중인 약 16:00부터 check valve가 close 상태에서 open됨으로서 음향신호레벨이 크게 증가함을 알 수 있다. 즉 close 상태의 음향신호레벨이 약 8%, 13% 이었던 것이 16:00 부근에서 12% 및 17%가 각각 증가된 20% 및 30%의 음향신호레벨을 확인하였다.



Fig. 12 Display of signal trend analysis for main steam check valve 020 inlet/outlet

5. 결 론

- 1) 누설검사 대상밸브의 주변잡음의 측정결과로부터, 밸브 종류의 차이는 있으나 실험실에서 있어서 동일 크기 실증시험 밸브와의 비교에 의해, 대상밸브의 누설발생시 검출 가능한 누설량을 추정된 결과, 증기용 밸브의 경우 밸브 차압이 10 kg/cm² 이상일 때 43.5 cc/min/inch 이상부터의 누설량이 검출 가능한 것으로 추정되었다.
- 2) 누설검사시의 주변잡음 레벨은 주변기기의 환경에 따라 변화하며, 단순한 음향레벨의 상대비교만으로는 누설검출 신뢰성은 충분하지 않으나, 대상밸브를 진단하기 이전에 대상밸브에 대한 주변잡음 범위 및 음향레벨 기준치를 진

단시스템에 의해 DB화하여 관리한다면 누설검출에 대한 신뢰성은 매우 높음을 알 수 있었다. 건전 밸브에 대한 음향레벨 수준을 기준값으로 정하고, 향후 음향레벨의 변화에 따른 누설여부 판단이 가능하다.

3) 실제 발전소에의 적용결과 대상밸브에 차압을 작용시키는 조작이 용이하지 않는 점 등 때문에 현재 상태에서는 음향법의 적용밸브는 비교적 한정될 수 있으나, 보다 폭 넓은 모의실험 또는 현장밸브의 데이터취득 및 이력관리 등을 통하여 적용 대상밸브의 범위를 확대시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4) 현장조건에 맞는 일정한 Gain 설정으로 밸브 개도에 따른 음향레벨의 명확한 변화를 확인하였다.

5) 건전 밸브에 대한 음향레벨 수준을 기준값으로 정하고, 향후 음향레벨의 변화에 따른 누설여부 판단을 위한 상시 감시가 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) Kitazima, A., 1988, "Acoustic Leak Detection in Piping System(Part 1)", *CREIPI Report No. 277059*, pp.21~32.
- (2) Kitazima, A., 1986, "Monitoring of Valve Operation conditions by Acoustic Method", *CREIPI Report No. 285089*, pp.1~33.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Allen, J. W., Hartman, W. F. and Robinson, J. C., 1988, "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves", *EPRi Report, NP-2444*, pp.22~30.
- (6) Hartman, W. F., 1980, "Acoustic Monitoring of Relief Valve Position", *EPRi Report, NP-1313*, pp.1~42.