

발전용 밸브누설 실시간 감시기술 연구 Study on the Real-Time Leak Monitoring Technique for Power Plant Valves

이 상 국
S. G. Lee

Key Words : Valve(밸브), Leak(누설), Acoustic Emission(음향방출), acoustic signal level analysis (음향신호 레벨 분석), Frequency Analysis(주파수분석), Amplitude Distribution Analysis(진폭분포분석), Voltage Analysis(전압분석), Power Plant(발전소)

Abstract : 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. 서 론

발전소 안전운전에 큰 영향을 주는 밸브는 동작 건전성 검사 및 밸브 누설검사가 수행 되어야 한다. 밸브 내부누설은 씰(seal)부인 밸브몸체/밸브 시트(seat)면의 이물질 삽입, 빈번한 밸브 개폐에 따른 손상, 밸브몸체/밸브 seat 균열, 밸브 스템 패킹(packings), 용접부 결함 또는 피로균열 등에 의해 발생되고 있다. 이러한 손상으로 인하여 유량증가, 밸브 1차측 압력저하, 냉각기능 상실 및 방사성 물질 방출 등 안전계통에 저하를 가져오는 등 발전소 운전에 막대한 손상 및 사고를 초래하고 있는 실정이다.

발전소에서 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 대한 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 밸브누설 감시시스템이 시급히 필요한 실정이다.

본 논문은 원자력발전소에서 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.

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

2. 실험방법

2.1 대상밸브

본 실험에 사용된 밸브는 현재 원자력발전소 2차 계통에서 사용 중인 대형 증기용 제어밸브와 물용 역지밸브이며 각 밸브에 대한 사양을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications and type of the test valve

	A group valve	B group valve
Valve type	Globe valve	Check valve
Valve name	Main steam dump valve	Main feed water pump outlet check valve
Nominal diameter(inch)	12	18
Pressure class (psi)	900	1500
Operating type	Air operated diaphragm type	Disc weight
Fluid	Steam	Water
Valve symbol	AB TV 414, 415, 439	AE V011, 012, 020

주증기 덤프밸브(dump valve)는 정상운전중 터빈 이상 또는 발전소 기동시 주증기를 신속하게 복수기로 보내어 주증기계통의 압력 조절 목적으로 사용되는 증기용 제어밸브이며, 주급수 펌프 출구 체크밸브(main feed water pump outlet check valve)는 주급수펌프 후단에 설치된 역지밸브로 타 계열 펌프의 기동시 계통급수가 정지된 펌프로의 역류를 방지하는 역지밸브이다.

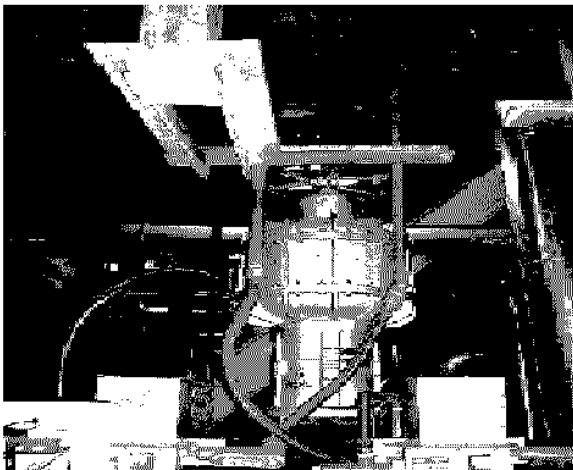


Fig. 1 Main steam dump valve

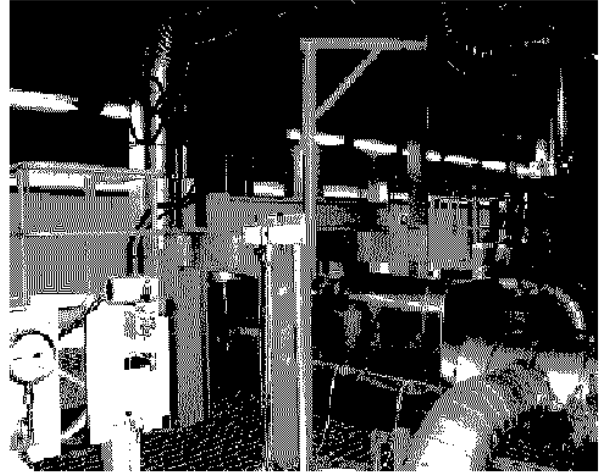


Fig. 2 Main feed water pump outlet check valve

2.2 실험장치

밸브 누설실험을 위해 현장 설치방식 실험장치를 사용하였다. 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. 3과 같다. 실험장치의 음향신호 데이터 취득 및 기능은 다음과 같다.

- 모든 센서 상태를 바(bar) 그래프로 지시하며, 알람(alarm) 상태를 컬러(color) 변화로 표시
- 60일, 30일, 10일, 1일, 2.5시간 추이(trend)로 표시
- 실시간 신호레벨(dB) 크기 표시, 평균전압(RMS) 값 및 스펙트럼(spectrum) 분석과 저장
- 센서 위치 및 알람 상태를 보여주는 밸브 위치 표시(valve map display)
- 모든 아날로그 신호(analog signal)을 즉석에서 저장하고 출력
- 고속 PCI 카드내장 음향방출 신호처리 및 분석
- 16 bit, 고속 A/D 변환기
- 1개의 PCI 카드에 4채널 신호취득
- AE(음향방출) 특성 및 파형분석 동시 처리 및 디스플레이
- 시간영역(time domain) 및 주파수영역(frequency domain)에서 AE(음향방출) 신호특징을 실시간 취득 및 해석
- 주파수응답 : 10kHz~2.1MHz

2.3 실험방법

원자력발전소 정기점검기간동안 운전개시시 밸브 운전계획에 따른 밸브누설 시험일정에 따라 출력 및 밸브 개도에 따라 각각 시험을 수행하였다. 음향 신호의 취득방법은 밸브누설 음향진단장치에서 출력되는 신호를 기준으로 분석하였다.

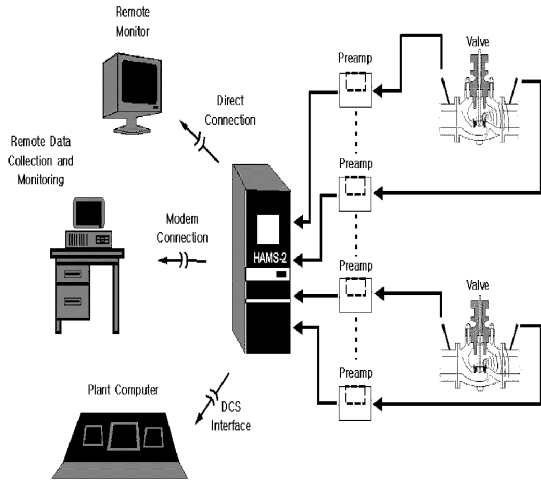


Fig. 3 Layout of experimental setup

Table 2 Sensor array and attachment location

Valve	Symbol	Sensor location	Monitoring channel
Main feed water pump outlet check valve	AE-V 020	Inlet	1
		Outlet	2
	AE-V 012	Inlet	3
		Outlet	4
AE-V 011	Inlet	5	
	Outlet	6	
Main steam dump valve	AB-TV 415	Inlet	7
		Outlet	8
	AB-TV 439	Inlet	9
		Outlet	10
	AB-TV 414	Inlet	11
		Outlet	12

* 입구 : A, 출구 : B

진단하고자 하는 밸브의 입구 및 출구측에 원형 클램프를 각각 설치하고, 이들 각 클램프에 음향 도파봉(waveguide)를 용접하여 외부로 노출시켰다. 노출된 도파봉 상단에 음향센서를 나사 체결하여 신호케이블을 연결하고, 이들 케이블이 전치증폭기 및 필터가 내장된 출력단자함에 접속시켜 전송되는 미약한 음향신호의 진폭을 증폭함과 동시에 원하는 주파수대역만을 여파(filtering)시키게 하였다. 그런

후 이들 음향신호는 최종적으로 밸브누설 음향진단 장치로 전송되도록 하여 신호레벨 및 추이분석 (signal level and trend analysis), 주파수분석 (frequency analysis), 전압분석(voltage analysis), 진폭분포분석(amplitude distribution analysis) 등 각종 신호분석이 수행되도록 구성하였다. 밸브별 음향센서의 부착 배열 및 채널은 Table 2와 같이 총 12개 채널로 구성하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 음향신호 추이분석 결과

3.1.1 주증기 덤프밸브

Fig. 4는 01:00부터 03:24까지 덤프밸브 415 B(Ch8)의 신호추이를 측정된 결과로서, 40% 출력 및 2nd 주급수 펌프(MFWP : Main Feed Water Pump)가 가동중인 약 02:10부터 덤프밸브가 닫힘(close) 상태에서 20% 열림(open)으로서 음향신호레벨이 크게 증가함을 알 수 있다. 즉 닫힘 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 열림 상태가 되면서 밸브내부의 갑작스럽게 발생된 음향의 공진(resonance)에 기인한 것으로 해석된다.

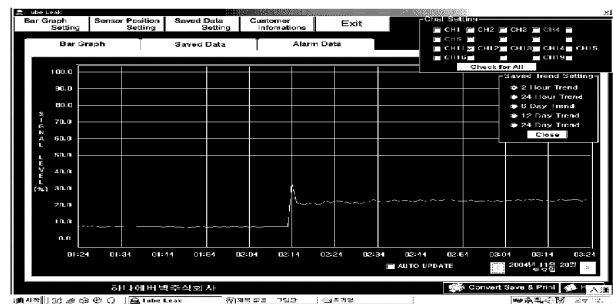


Fig. 4 Display of signal trend analysis for main steam dump valve 415 outlet

3.1.2 주급수 출구 펌프 체크밸브

Fig. 5는 15:29부터 17:29까지의 체크밸브 V020 A, B의 신호추이를 측정된 결과로서, 출력 약 30% 증발중인 약 16:00부터 체크밸브가 닫힘 상태에서 열림 상태가 됨으로서 음향신호레벨이 크게 증가함을 알 수 있다. 즉 닫힘 상태의 음향신호레벨이 약 8%, 13% 이었던 것이 16:00 부근에서 12% 및 17%가 각각 증가된 20% 및 30%의 음향신호레벨을 확

인하였다.

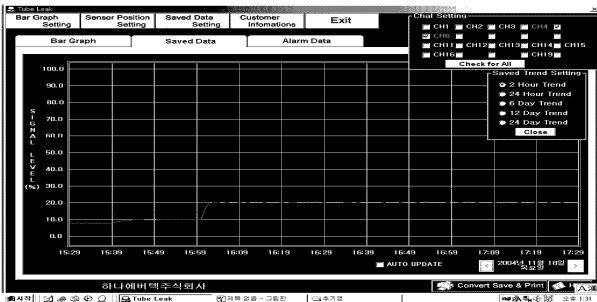


Fig. 5 Display of signal trend analysis for main steam check valve 020 inlet/outlet

3.2 주파수분석 결과

3.2.1 주증기 덤프밸브

Fig. 6은 주증기 덤프밸브가 25% 열림 상태에서 취득한 대표적인 음향신호의 주파수 분석 결과이다. 가로축은 주파수(kHz) 그리고 세로축은 진폭(dB)을 나타내고 있다. 그림에서 보면, 닫힘 상태와 비교하여 높은 최대진폭 주파수(peak frequency)인 170 kHz에서 나타났으며, 또한 50~250 kHz의 범위를 가진 상당히 넓은 주파수대역인 광대역(wide band)를 나타내고 있다. 개도상태가 열림으로 됨에 따라 고주파수 성분이 많이 포함되며 이들 주파수범위는 향후 밸브누설시 누설 판단 식별에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

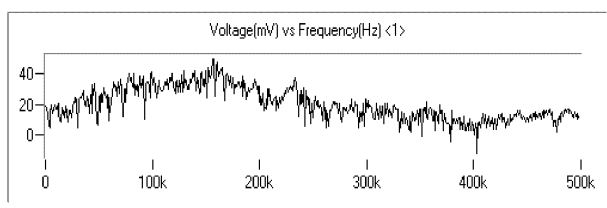


Fig. 6 Result of frequency analysis in 25% open for main steam dump valve

3.2.2 주급수 출구 펌프 체크밸브

Fig. 7은 주급수 출구 펌프 체크밸브가 닫힘 상태인 상태에서 취득한 대표적인 음향신호의 주파수분석 결과이다. 가로축은 주파수(kHz) 그리고 세로축은 진폭(dB)을 나타내고 있다. 그림에서 보면, 25 kHz에서 최대진폭 주파수인 피크를 나타내며 10~70 kHz 범위를 가진 저주파의 협대역(narrow band)를 나타내며 이들 주파수 범위는 주변잡음(background noise)을 포함하고 있다. 따라서 향후 밸브누설 진

단을 위해 주파수분석을 수행할 경우, 이들 주변잡음 레벨은 누설발생 음향과 비교분석시 유효한 자료가 될 수 있다.

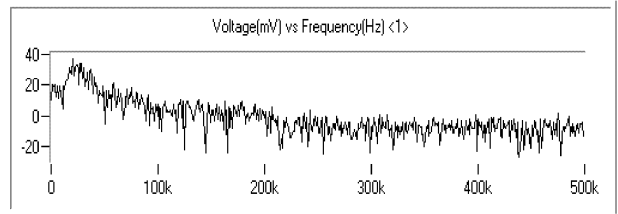


Fig. 7 Result of frequency analysis in close condition for main steam check valve

3.3 전압분석 결과

3.3.1 주증기 덤프밸브

Fig. 8은 주증기 덤프밸브가 닫힘 상태에서 취득한 대표적인 음향신호의 전압분석 결과이다. 가로축은 시간(sec) 그리고 세로축은 전압진폭(mV)을 나타낸다. 그림에서 보면, 약 20 mV의 낮은 최대 전압진폭(peak voltage)을 나타내고 있다. 또한 신호형태는 잡음신호 형태인 화이트 노이즈(white noise) 신호형태를 나타내고 있어, 향후 밸브누설 진단시 잡음신호에 대한 기본 전압신호의 자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

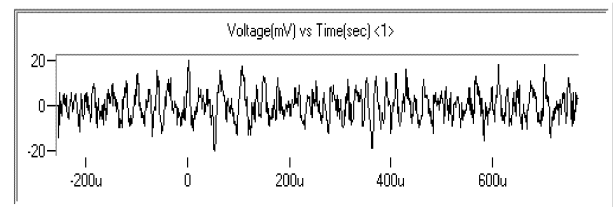


Fig. 8 Result of voltage analysis in close condition for main steam dump valve

3.3.2 주급수 출구 펌프 체크밸브

Fig. 9는 주급수 출구 펌프 체크밸브가 열림 상태에서 취득한 대표적인 음향신호의 전압분석 결과이다. 가로축은 시간(sec) 그리고 세로축은 전압진폭(mV)을 나타낸다. 그림에서 보면, 닫힘 상태보다 높은 약 100 mV의 최대 전압진폭(peak voltage)을 나타내고 있다. 또한 신호형태는 주증기 덤프밸브의 열림 상태에서 취득한 신호와 동일하게 닫힘 상태의 화이트 노이즈(white noise) 신호가 아닌 누설신호의 전형적인 신호형태인 연속형 신호(continuous type signal)를 나타내고 있어, 향후 밸브 누설진단시 잡

음신호와 누설신호와의 식별할 수 있는 기본 전압신호의 자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

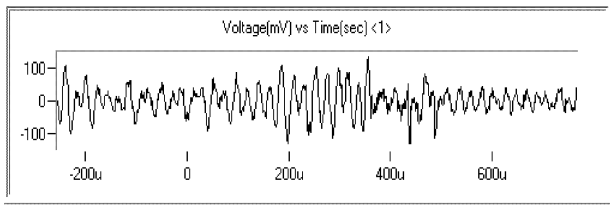


Fig. 9 Result of voltage analysis in open condition for main steam check valve

3.4 진폭분포 분석 결과

3.4.1 주증기 덤프밸브

10은 주증기 덤프밸브가 열림 상태에서 취득한 대표적인 음향신호의 진폭분포 분석결과이다. 가로축은 진폭분포(dB) 그리고 세로축은 음향방출 신호 발생 횟수(hits : number)을 나타낸다. 그림에서 보면, 44~66 dB의 닫힘 상태와 비교하여 넓은 진폭분포와 높은 빈도의 음향방출 신호발생을 나타내고 있다.

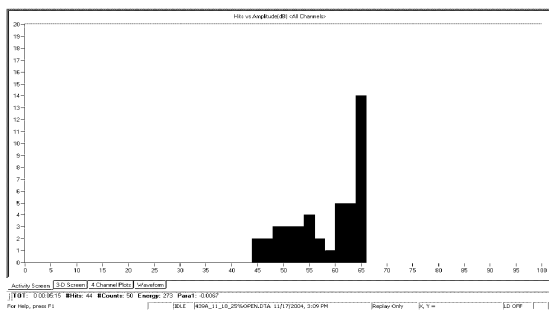


Fig. 10 Result of amplitude analysis in open condition for main steam dump valve

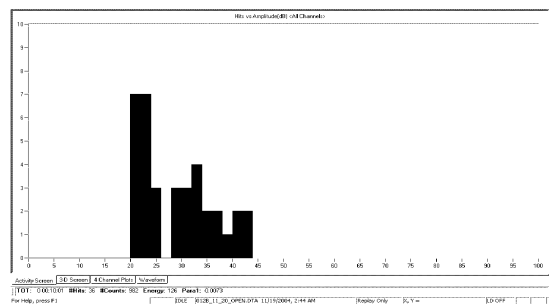


Fig. 11 Result of amplitude analysis in open condition for main steam check valve

3.4.2 주급수 출구 펌프 체크밸브

Fig. 11은 주급수 출구 펌프 체크밸브가 열림 상

태에서 취득한 대표적인 음향신호의 진폭분포 분석 결과이다. 가로축은 진폭분포(dB) 그리고 세로축은 음향방출 신호발생 횟수(hits: number)을 나타낸다. 그림에서 보면, 20~44 dB의 닫힘 상태와 비교하여 넓은 진폭분포와 높은 빈도의 음향방출 신호발생을 나타내고 있다.

5. 결 론

발전소에서 운전중인 주요 밸브를 대상으로 밸브 내부 누설상태를 음향방출기술을 이용하여 평가하고 실시간 감시하기 위한 현장적용 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현장조건에 맞는 일정한 이득(gain) 설정으로 밸브 개도에 따른 음향레벨의 명확한 변화를 확인하였다.
- 2) 건전 밸브에 대한 음향레벨 수준을 기준값으로 설정했을 때, 향후 음향레벨의 변화에 따른 누설 여부 판단이 가능하다.
- 3) 밸브 및 개도상태별로 고유한 주파수대역과 최대 진폭 주파수를 가지며 뚜렷한 변화를 나타내었다.
- 4) 또한 최대 주파수와 주파수범위의 분석에 의해서도 밸브 개폐 정도를 확인할 수 있었다. 즉 누설여부에 따라 발생하는 음향신호의 주파수 성분이 변화함을 알 수 있었다.
- 5) 향후 현장시험 주파수 분석결과를 활용하여 밸브 및 개도상태별 고유 주파수 대역과 최대 진폭 주파수 특성 파악으로 누설평가 적용이 가능한 것으로 판단된다.
- 6) 밸브별 및 개도 상태별로 고유한 최대 진폭 전압을 가지며 뚜렷한 변화를 나타내었다. 또한 개도상태에 따라 닫힘 상태에서는 전압 신호형태는 잡음신호 형태(white noise)를 나타내며, 열림 상태에서는 누설발생시 나타나는 전형적인 연속형 신호(continuous type signal)을 각각 나타내는 것으로부터 신호형태를 평가함으로써 누설 평가시 검증이 가능할 것으로 판단된다.
- 7) 밸브별 및 개도 상태별로 고유한 진폭분포 범위를 가지며 열림 상태에서 넓은 분포를 나타내어 다양한 진폭의 신호가 많이 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 진폭범위의 변화 정도로부터 누설상태의 평가가 가능하다.

참고 문헌

1. 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
2. Kitazima, A., 1986, "Monitoring of Valve Operation conditions by Acoustic Method", CREIPI Report No. 285089, pp. 1-33
3. Kitazima, A., 1988, "Acoustic Leak Detection in Piping System(Part 1)", CREIPI Report No. 277059, pp. 21-32
4. 이상국, 추기영, 2005, "원자력발전소 대형밸브의 음향방출 누설진단기술 적용연구", 한국동력기계 공학회 2005 춘계학술대회 논문집, pp. 180-185