

음향방출 계측에 의한 터빈 제어밸브 내부누설 평가연구

Study on Evaluation of Internal Leak of Turbine Control Valve in Power Plant Using Acoustic Emission Signal Measurement

이 상 국
S. G. Lee

(접수일 : 2008년 7월 21일, 수정일 : 2008년 9월 11일, 채택확정 : 2008년 9월 29일)

Key Words : Turbine Control Valve(터빈 제어유 밸브), Internal Leak(내부누설), Acoustic Emission(음향방출), Voltage Analysis(전압신호 분석), FFT Analysis(푸리에 주파수분석), 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 turbine major valves relating to safety for turbine operating and prevention of turbine trouble at nuclear power plants. In this study, acoustic emission tests are performed when the pressurized electro-hydraulic control oil flowed through turbine electro-hydraulic controller oil check valve and turbine power/trip fluid solenoid valve in the condition of actual turbine operating. The acoustic emission method was applied to the valves at the site, and the background noise was measured for the abnormal plant condition. To judge for the leak existence on the object valves, voltage analysis and frequency analysis of acoustic signal emitted from internal leak in the valve operating condition are performed. It was conformed that acoustic emission method could monitor for valve internal leak to high sensitivity.

1. 서 론

발전소 터빈은 증기, 가스와 같은 압축성 유체의 흐름을 이용하여 증동력 또는 반동력으로 회전력을 얻는 기계장치로서, 증기를 이용하는 증기 터빈(steam turbine)과 연소가스를 이용하는 가스 터빈(gas turbine)으로 구분된다. 증기 터빈은 증기의 열 에너지(thermal Energy)를 기계적 에너지(회전력)로 변환시키는 기계장치로서, 터빈 로타는 1,800~3,600 rpm의 고속 회전체이므로 적절한 안전장치인 윤활장치와 비상정지를 위한 제어밸브들로 구성되어 있다. 윤활장치의 상태가 불량하면 터빈에 중대한 고장의 원인이 되고 있다. 터빈에서 윤활 및 제어용 유압을 상실하면 터빈속도 제어 불량 및 베어링의 유막이 파괴되어 터빈에 큰 손상을 초래한다. 그러므로 주 윤활유 펌프계통의 사고 또는 기타 원인으로 윤활유 압력이 규정치 이하로 저하하게 되면 터빈을 정지시켜 2차 사고를 방지하기 위하여

유압저하 보호장치(loss of oil pressure trip)를 설치한다. 또한 터빈의 각 베어링에 공급되는 윤활유 압력이 낮아지면, 1차로 경보가 울리고, 더욱 낮아지면 압력스위치가 저진공 정지장치의 솔레노이드를 동작시켜 터빈을 정지시켜 중대한 사고를 미연에 방지한다. 운전중인 터빈을 긴급하게 정지시키고자 할 때는 솔레노이드 정지(solenoid trip) 장치를 이용하여 증기밸브(MSV, CV, CRV 등) 구동장치에 공급되는 제어유를 차단 및 배출함으로써 증기공급이 차단시켜 터빈을 정지시킨다. 따라서, 터빈에 공급되는 윤활계통 및 정지계통 밸브류에 대한 주기적인 시험을 실시하여 항상 완전한 상태로 유지할 필요가 있다¹⁾. 발전소 핵심설비인 터빈의 고장 또는 결함으로 인한 발전소의 정지는 중대한 안전사고뿐만 아니라 전력의 안정적인 수급 측면에도 타격을 입히게 되므로 발전설비의 품질을 최상으로 유지하고 고장을 예방하는 데 핵심이 되는 터빈설비를 감시할 수 있는 고정밀도를 가진 진단기술이 필요하다.

본 논문은 국내 원자력발전소 2차계통의 증기터빈 주요 제어계통 밸브를 대상으로 음향방출 비파

이상국(책임저자) : 한전 전력연구원 원자력발전연구소
E-mail : sglee@kepri.re.kr Tel. 042-865-5635

괴검사법을 이용한 누설진단을 수행함으로써, 터빈 제어용 핵심밸브에 대한 고압 유체의 누설 유무를 정확하게 탐지할 뿐만 아니라 누설에 따른 터빈 불시정지를 예방하고 터빈 운전을 원활하게 제어할 수 있도록 하기 위한 음향방출 진단기술의 적용결과를 소개한다.

2. 시험 방법

2.1 대상밸브

터빈 제어유 계통의 지속적인 압력감소 원인 규명을 위해 음향방출 누설탐지기를 사용하여 누설의 심 기기인 터빈 제어유계통 역지밸브 및 터빈 비상정지계통 솔레노이드 밸브의 누설상태를 평가함으로써 계통 신뢰성을 확보하고자 하였다. 본 연구의 대상밸브는 현재 국내 원자력발전소 2차 계통 증기 터빈에서 사용 중인 터빈 제어유계통 역지밸브(turbine electro-hydraulic controller oil check valve ; EHC check valve) 및 터빈 비상정지계통 솔레노이드 밸브(turbine power/trip fluid solenoid valve)이며 각 밸브에 대한 운전조건을 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 A와 B밸브는 터빈 제어유계통 역지밸브이며, C와 D밸브는 터빈 비상정지계통 솔레노이드이다.

Table 1 Operating conditions of the control valve

| Valve | Operating Conditions | | Piping Size [inch] | Fluid | |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------|--------------------------------|
| | Differential Pressure ΔP([bar]) | Fluid Temp. [°C] | | | |
| EHC Oil Check Valve | A | Inlet : 69bar Outlet : 1bar | 40 | 2 | Fire Resistant Fluid (EHC Oil) |
| | B | | | | |
| Power/Trip Fluid Solenoid Valve | C | Inlet : 57bar Outlet : 1bar | 40 | 1 | |
| | D | | | | |

Fig. 1의 터빈제어유계통 역지밸브(turbine electro-hydraulic controller oil check valve)는 저온, 중차압(약 40°C, 69 kg/cm²) 조건에서 운전되는 터빈 제어유계통 공통모관 전단 오일용 2인치크기의 역지밸브로서, 터빈의 운전시 개방되고 정지시 차단 상태로 유지되나 계통의 과도현상 또는 진동에 따라 정밀하게 가공된 내장품의 손상, 마모 및

누설이 가끔씩 발생한다. 또한 열림상태에서 불안정한 유량으로 인한 지속적인 작동(미세한 열림/단힘 동작)에 의하여 힌지부의 마모로 인한 파손 및 누설이 발생할 수 있다^{2~5)}. 그리고 Fig. 2는 터빈 정지계통 솔레노이드밸브(turbine power/trip fluid solenoid valve)로써 터빈 정지계통 솔레노이드 밸브는 유체온도 약 40 °C, 차압 약 57 kg/cm²의 조건에서 운전되는 오일용 1인치크기의 솔레노이드 밸브로 터빈의 정지시 개방되고 정상운전시는 차단 상태로 유지되는 터빈의 안전 정지(trip)을 위해 운전되는 밸브이다. 정상 운전시 열림현상이 발생하게 되면 터빈의 불시 정지를 야기시키게 되며, 정상 운전중에 음향방출신호의 감지 및 평가를 통해 밸브 내부의 작동유 누설여부를 주기적으로 감시할 필요가 있다^{1,6)}.

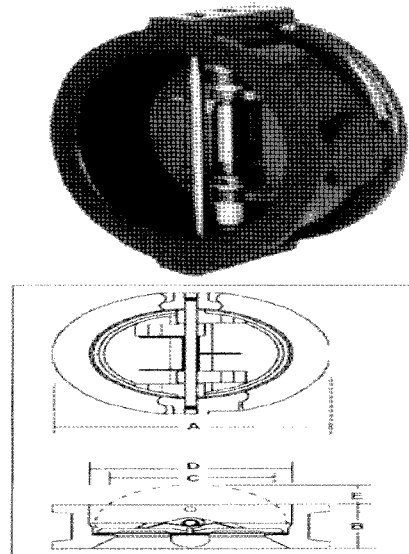


Fig. 1 Turbine electro-hydraulic controller oil check valve (A: 619mm, B: 152mm, C: 480mm, D: 508mm)

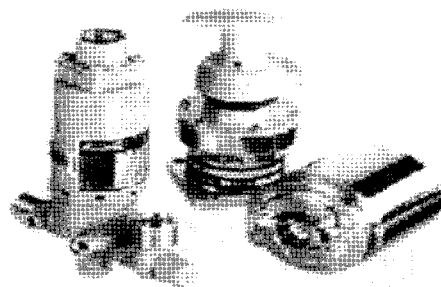


Fig. 2 Turbine power and trip fluid solenoid valve

2.2 시험방법

밸브내부 누설로 발생하는 음향방출 신호는 밸브

외벽에 부착한 음향방출 센서로 검출한다. 음향방출 센서는 PZT 압전소자 타입의 공진형 센서이며, 공진주파수가 143 kHz의 것을 사용하였다. 음향방출 센서로부터의 출력은 전치증폭기(pre-amplifier)에서 20 dB 또는 40 dB로 증폭시킨 후 주증폭기(main amplifier)에서 20 dB 증폭시켰다. 전치증폭기의 주파수대역은 20 kHz에서 2 MHz이며, 또한 음향방출(AE, Acoustic Emission) 측정장치의 주파수대역은 1 kHz에서 1 MHz이며, 신호의 문턱값(threshold level)은 26 dB로 고정하였으며 샘플링 주파수(sampling rate)는 100 kS/sec으로 하였다. 사용된 음향방출 측정장치의 사양을 Table 2에 나타낸다.

Table 2 Specifications of AE measuring instrument

| Components | Specifications |
|-----------------|--|
| AE Sensor | Resonance Frequency 143 kHz, Operating Temperature 150 °C under |
| Pre-amplifier | Frequency Band 20 kHz ~ 2 MHz, Gain 20, 40, 60 dB selectable |
| Local Processor | Frequency Range 1 kHz ~ 1 MHz, Cut-off Frequency THRU-THRU, Gain 20 dB |

각 밸브에 대한 측정은 입구 및 출구 모두 수행되었으며, 터빈 제어유계통 역지밸브중 A밸브는 운전중 닫힘(close) 상태에서, 그리고 터빈 제어유계통 역지밸브중 B밸브는 열림(open) 상태에서 각각 진단을 수행하였다. 또한 터빈 정지계통 솔레노이드밸브중 C밸브와 D밸브 둘 다 닫힘(close) 상태에서 진단을 수행하였다.

시험시 감도조정을 위해 전치증폭기의 이득(gain)을 20 dB 및 40 dB로 설정하여 각각 신호취득하였다. 밸브 누설진단을 위한 음향방출 신호분석은 전압분석(voltage analysis)에 의해 주변잡음(background noise) 또는 누설에 따른 신호형태 인가를 판별하였으며, 주파수분석(frequency analysis)에 의해 측정된 FFT(Fast Fourier Transform) 주파수분석을 통하여 주변잡음 또는 누설발생에 따른 주파수성분이 존재하는지를 분석하였다. 주변잡음 측정은 Fig.3과 같이, A 및 B밸브의 경우 밸브를 중심으로 좌, 우 약 2 m 떨어진 위치의 배관 표면에 센서를 부착하여 측정하였으며, C 및 D밸브는 Fig.4와 같이, 밸브를 보호하고 있는 외함(box) 상단표면에 센서를 부착하여 측정하였다.

측정항목은 우선적으로 밸브주변 주변잡음을 측정하고, 밸브 입구 및 출구측 음향방출신호의 FFT(주파수) 분석을 수행하였으며 최종적으로 밸브 주변 잡음의 음향방출신호와 밸브 입구 및 출구 음향방출신호의 FFT 분석결과와의 비교분석함으로써 누설유무를 평가하였다.

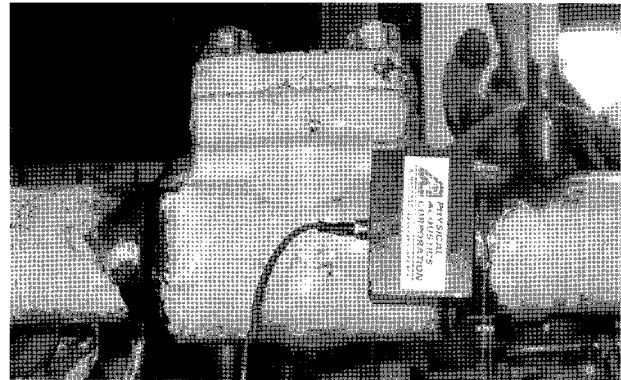


Fig. 3 Attachment method of AE sensor for A and B sensor

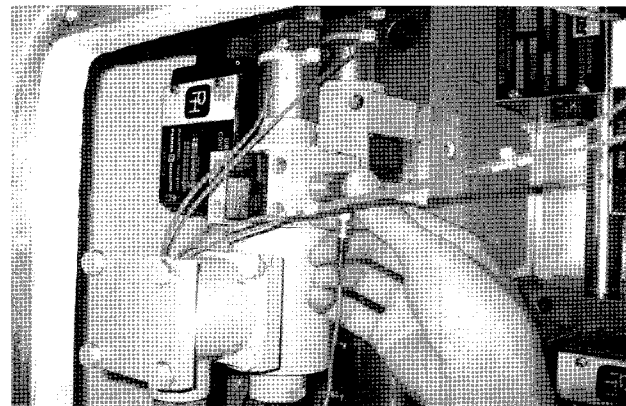


Fig. 4 Attachment method of AE sensor for C and D sensor

3. 결과 및 고찰

3.1 A 밸브

A밸브에 대한 주변잡음 신호측정을 위해 수행한 전압분석 결과를 Fig. 5에 나타낸다. Fig. 5에서 보면, 세로축 시간에 따른 전압신호의 수신 주기(cycle)가 거의 일정한 돌발형(burst type) 신호를 나타내므로 누설이 없는 상태의 주변잡음 신호형태로 평가된다. 또한 주파수분석(FFT) 결과에서도 약 25 kHz에서 최대주파수 성분(그림중 화살표)을 가지는 주변 설비에서 발생하는 누설이 없는 상태의 기준 음향방출 신호임을 알 수 있다.

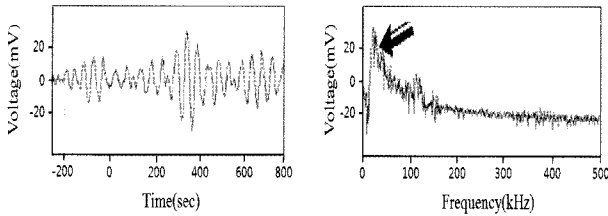


Fig. 5 Background noise signal of A valve

A밸브의 입구 및 출구측에 대한 누설신호 측정을 위해 수행한 전압 및 주파수분석 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타낸다. Fig. 6과 Fig. 7에서보면, 입구 및 출구측 모두 세로축 시간에 따른 전압신호의 수신 주기가 거의 일정한 돌발형 신호를 나타내므로 누설이 없는 상태의 주변잡음 신호와 동일한 파형을 나타내고 있다. 주파수분석 결과를 보면, 주변잡음과 거의 유사한 약 25 kHz에서 최대주파수 성분(그림중의 화살표) 발생으로 누설징후가 없음을 알 수 있다.

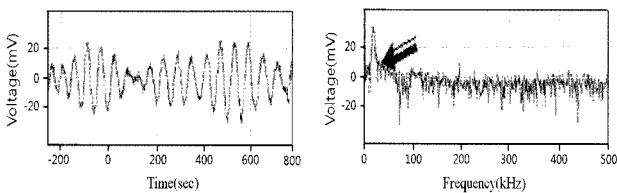


Fig. 6 Voltage and FFT analysis for AE signal at A valve inlet side

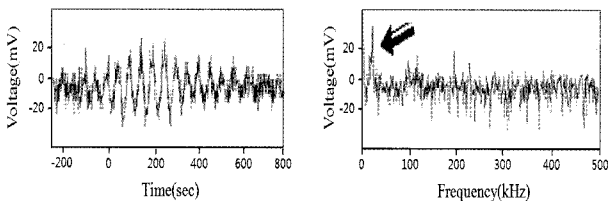


Fig. 7 Voltage and FFT analysis for AE signal at A valve outlet side

3.2 B 밸브

B밸브에 대한 주변잡음 신호측정을 위해 수행한 전압분석 및 주파수분석 결과 A밸브와 동일하게 세로축 시간에 따른 전압신호의 수신 주기가 거의 일정한 돌발형 신호를 나타내므로 누설이 없는 상태의 주변잡음 신호파형으로 평가되었으며, 주파수분석 결과에서도 약 25 kHz에서 최대주파수 성분을 가지는 주변 설비에서 발생하는 누설이 없는 상태의 기준 음향방출신호임을 알 수 있었다.

B밸브의 입구 및 출구측에 대한 누설신호 측정을 위해 수행한 전압 및 주파수분석 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 9에서보면, 입구 및 출구측 모두 세로축 시간에 따른 전압신호의 수신 주기가 거의 불규칙하게 나타내는 전형적인 연속형(continuous type) 신호를 나타내므로 유체 이동에 따른 신호파형으로 평가된다. 또한 주파수분석 결과를 보면, 약 25 kHz에서 최대주파수 성분을 가지는 주변설비에서 발생하는 누설이 없는 상태의 기준 음향방출 신호와 비교하여, 밸브 입구 및 출구측 모두 약 25~170 kHz까지의 광대역(broadband)으로 최대주파수가 넓게 분포하고 있으므로 밸브내부에는 터빈 제어유의 유동이 있음을 알 수 있다.

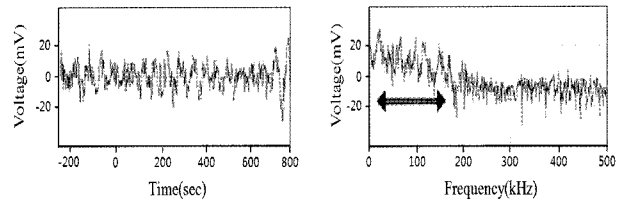


Fig. 8 Voltage and FFT analysis for AE signal at B valve inlet side

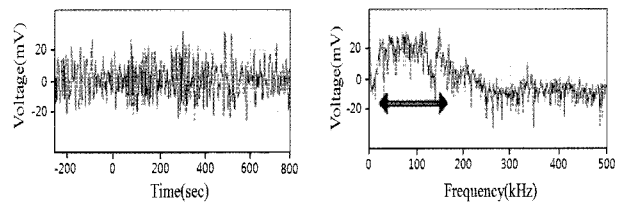


Fig. 9 Voltage and FFT analysis for AE signal at B valve outlet side

3.3 C 밸브

C밸브에 대한 주변잡음 신호를 측정하여 이를 기준으로 음향방출신호와의 비교에 의해 누설상태를 평가하기 위해 수행한 전압분석 및 주파수분석 결과를 Fig. 10에 나타낸다. Fig. 10에서보면, 세로축 시간에 따른 전압신호의 수신 주기가 거의 일정한 돌발형 신호를 나타내므로 누설이 없는 상태의 주변잡음 신호파형으로 평가된다. 또한 주파수분석 결과에서도 약 25 kHz에서 최대주파수 성분(그림중 화살표)을 가지는 주변 설비에서 발생하는 누설이 없는 상태의 기준이 되는 음향방출 신호임을 알 수 있다.

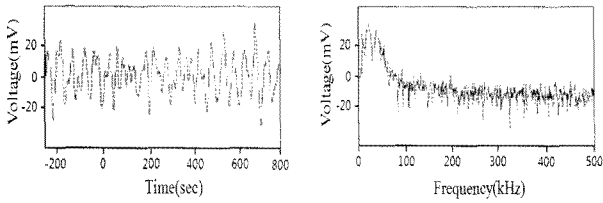


Fig. 10 Background noise signal of C valve

C밸브의 입구 및 출구측에 대한 누설 신호측정을 위해 수행한 전압분석 및 주파수분석 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타낸다. Fig. 11과 Fig. 12에서 보면, 입구 및 출구측 모두 세로축 시간에 따른 전압신호의 수신 주기가 거의 일정한 돌발형 신호를 나타내므로 누설이 없는 상태의 주변잡음 신호파형으로 평가된다. 주파수분석 결과에서도 주변잡음과 거의 유사한 약 25 kHz에서 최대주파수 성분(그림중의 왼쪽 화살표) 발생하므로 누설징후가 없는 것으로 판단되나, 고주파성분(그림중의 오른쪽 화살표)이 간헐적으로 혼입되어 있으므로 외부 전자파 또는 화이트 노이즈(white noise)의 영향을 받는 것으로 판단된다.

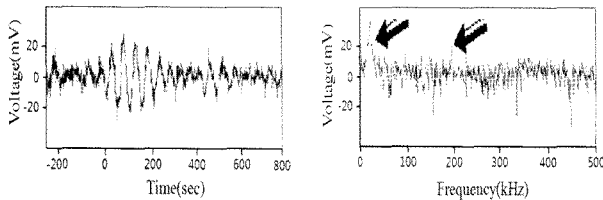


Fig. 11 Voltage and FFT analysis for AE signal at C valve inlet side

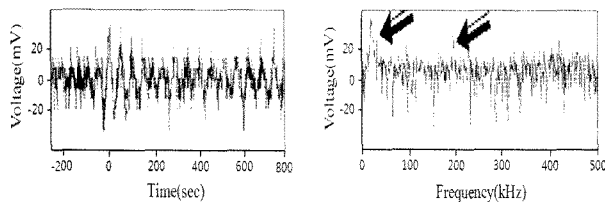


Fig. 12 Voltage and FFT analysis for AE signal at C valve outlet side

3.4 D 밸브

D밸브에 대한 주변잡음의 전압 및 주파수분석 결과도 C밸브와 동일한 누설이 존재하지 않는 상태의 음향방출 신호파형을 나타내었다. Fig. 13과 Fig. 14는 D밸브의 입구 및 출구측에 대한 누설신호 측정을 위해 수행한 전압분석 및 주파수분석 결과를 나타낸다. Fig. 13과 Fig. 14에서 보면, 입구 및 출구측

모두 세로축 시간에 따른 전압신호가 돌발형으로 나타나는 것으로부터 누설이 없는 상태의 주변잡음 신호파형으로 평가된다. 주파수분석 결과를 보면, 주변잡음과 거의 유사한 약 25 kHz에서 최대주파수 성분(그림중의 왼쪽 화살표) 발생으로 누설징후가 없는 것으로 평가되며, C밸브와 유사하게 고주파성분(그림중의 오른쪽 화살표)이 간헐적으로 혼입되어 있다.

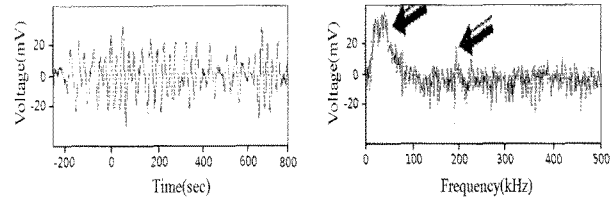


Fig. 13 Voltage and FFT analysis for AE signal at D valve inlet side

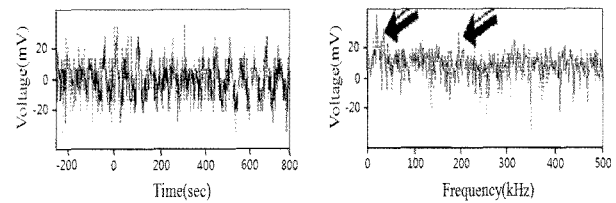


Fig. 14 Voltage and FFT analysis for AE signal at D valve outlet side

4. 결 론

원자력발전소 2차계통 터빈제어용 핵심설비인 터빈 제어유계통의 지속적인 압력감소 규명을 위해 음향방출 측정장치를 사용하여 누설이 의심되는 기기인 터빈 제어계통의 역지밸브 및 터빈정지계통의 솔레노이드 밸브의 내부누설을 측정 및 감시하기 위한 음향방출기술 적용 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 음향방출 신호의 전압 및 주파수분석을 통하여 터빈 제어계통의 역지밸브 및 터빈정지계통의 솔레노이드 밸브 누설유무를 평가할 수 있었다.
- 2) 밸브내부에 유동하는 작동 및 제어유의 유체유동 상태를 음향방출 신호에 의해 높은 감도로 감시가 가능함을 알 수 있다.
- 3) 대상밸브에서 누설징후가 없음을 확인하고 음향방출 측정장치가 접근할 수 없는 최종 누설의심 기기인 터빈제어장치 내부에 설치된 서보밸브를 분

해하여 분석한 결과, 서보밸브의 내부부품 손상으로 내부누설이 발생하여 터빈 제어유계통의 압력을 감소시켰음을 확인하였다.

4) 이들 결과로부터, 음향방출 측정기법은 터빈 제어유계통 밸브누설 발생여부를 정밀하게 평가하고 누설 의심기기에 대한 진단범위를 신속하게 줄여주는 유효한 방법임을 알 수 있었다.

5) 또한, 터빈제어유계통 밸브의 건전성 확보를 위하여 지속적인 진단 및 감시가 필요하며 밸브계통에 상시 감시시스템(on-line monitoring system)을 구축한다면 누설 및 손상추이 평가와 해석이 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

1. 한국전력공사, 1996, 표준경수로 계통설비(하), pp. 235~250.
2. Hartman, W. F., 1980, "Acoustic Monitoring of Relief Valve Position", EPRI Report, NP-1313, pp. 1~42.
3. Allen, J. W., Hartman, W. F. and Robinson, J. C., 1988, "Acoustic Monitoring of Power Plant Valves", EPRI Report, NP-2444, pp. 22~30.
4. Lee, S. G. and Park, J. H. et al., 2006, "Evaluation of Internal Leak in Valve Using Acoustic Emission Method", Key Engineering Materials, Vol. 326~328, No. 1, pp. 661~664.
5. Lee, S. G., JH Park, J. H. and Yoo, G. B., 2007, "Study on Evaluation of the Leak Rate for Steam Valve in Power Plant", The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 45~50.
6. Lee, S. G., 2008, "Study on the Acoustic Emission Measuring for Evaluation of Internal Leak of Turbine Control Oil Valve in Power Plant", The Korean Society for Power System Engineering, Proceedings of 2008 Spring Conference, pp. 189~195.