

## 음향방출을 이용한 보일러튜브 누설평가

### Leak Detection and Evaluation for Power Plant Boiler Tubes Using Acoustic Emission

이상국  
 Sang-Guk Lee

**초 록** 발전소 보일러튜브는 장시간 동안 고온고압하의 기혹한 조건으로 운전됨에 따라 크리프, 열피로와 같은 각종 열화에 의해 누설손상이 발생하고 있다. 이러한 누설손상을 실시간 감시하고 진단하기 위하여 음향방출기술을 이용한 현장적용 연구를 수행하였다. 또한 고장예측 진단기술, 튜브의 수명관리 및 설비 감시에 활용할 수 있도록 음향방출 진단시스템을 개발하여 현장에 설치하고, 보일러 운전상태에 따른 신호측정 및 평가, 누설위치 판별 등에 대해 고찰하였다. 누설감지는 저주파 및 고주파대역의 누설로 구분하여 음향방출신호를 각각 측정 및 평가하였다. 현장적용 연구결과로부터 실시간으로 보일러튜브 상태감시와 누설위치 추적이 가능하였으며, 향후 본 기술을 이용하면 발전설비 안전운전과 발전소 정지에 따른 경제적 손실 예방에 크게 기여할 것으로 기대된다.

**주요용어:** 보일러 튜브, 누설탐지, 음향방출법, 화력발전소, 누설신호, 음향방출 감시

**Abstract** Boiler tubes in power plants are often leaked due to various material degradations including creep and thermal fatigue damage under severe operating conditions such as high temperature and high pressure over an extended period of time. To monitor and diagnose the tubes on site and in real time, the acoustic emission (AE) technology was applied. We developed an AE leak detection system, and used it to study the variation of AE signal from the on-site tubes in response to the changes in the boiler operation condition and to detect the locations of leakage based on it. Detection of leak was performed by acquiring and evaluating the signals in separate regimes of high and low frequency signal. As a result of these studies, we found that on-line monitoring and detection of leak location for boiler tubes is possible using the developed system. Thus, the system is expected to contribute to the safe operation of power plants, and prevent economic losses due to potential leak.

**Keywords:** boiler tube, leak detection, acoustic emission, power plant, leak signal, AE monitoring

#### 1. 서 론

최근에 건설되는 화력발전소는 기술진보와 함께 단위기 발전용량이 500 MW급 이상으로 대형화되어 가는 추세에 있고 향후 더욱 확대될 전망이다.

설비가 대형화됨에 따라 설비고장에 의한 발전정지에 미치는 영향은 막대하며 경제적 손실 또한 수 억원대에 이르고 있으나 불시정지 없이 지속적으로 설비의 신뢰도를 확보하기란 쉬운 일이 아니다. 그래서 선진 각국의 전력사에서도 불시 고장 예

방과 근절을 위한 신기술 개발에 과감한 투자를 아끼지 않고 있으며, 고장예측 진단기법을 개발하여 설비 운전상태를 상시 감시함은 물론 예방정비 자료로 활용하고 있다[1]. 우리나라에서도 이 분야에 많은 투자를 하고 있으나 보일러 노내의 운전상태를 감시하는 설비인 보일러튜브 누설 감지설비는 전량 수입에 의존하고 있고 아직 검출, 지시 및 기록하는데 불과한 기초단계에 있어 이들에 관한 연구 및 개발이 시급한 실정이다[24]. 비파괴검사법 중 하나인 음향방출법(acoustic emission test, AET)은 대부분의 다른 비파괴적 방법들과는 달리 동적 검사(dynamic inspection)로 구조물이 응력을 받고 있는 상태에서 결함의 성장에 따른 구조물의 반응을 측정할 수 있으며, 복수개의 센서를 사용하여 결함에 대한 정보도 함께 탐지할 수 있는 한편 위치표정(source location)이 가능하여 가장 신속하게 검사가 가능하다[5-8]. 이러한 점에서, 압력용기 및 배관류의 사용중에 사용중단 시간을 최소화하면서 재보증 검사가 가능하며 미지의 결함을 갖는 구조물의 돌발적 파손을 예방할 수 있다. 또한 시스템의 내압시험중 발생할 수 있는 최고 허용압력의 초과를 방지할 수 있는 등 다른 비파괴방법에 비해 실시간 손상측정면에서 우수한 방법이다[9-13].

본 연구는 발전용 보일러튜브의 누설손상을 진단하기 위하여 음향방출 비파괴 측정기술을 현장설비에 적용하기 위한 연구로서, 설비감시, 고장예측 진단 및 열교환기 튜브의 수명관리 등에 활용할 수 있는 음향방출 진단시스템 개발에 관한 연구결과이다. 따라서, 이러한 보일러튜브의 누설손상 측정을 위하여 사전 실험실 및 현장실험 결과를 기초로 현장에 적합한 음향방출 측정시스템을 제작하여 현장에 설치하고, 보일러 운전중 운전상태에 따른 신호 측정 및 평가, 누설위치 판별 등에 대한 특성을 고찰하였다.

## 2. 보일러 튜브 누설감지 시스템의 개요

Fig. 1은 보일러 튜브 누설 감지시스템의 개략도이다. 이 시스템은 보일러와 복수기히터(feedwater heater)로부터의 내부 음향을 실시간으로 측정하여 미리 설정된 한계를 벗어날 때 경고(alarm)를 표시함으로써 누설을 검출한다. 이 시스템은 최대 96개(single band)의 음향센서를 설치할 수 있으며, 일반적인 보일러에는 24개의 센서를 사용하지만 보일러

의 크기와 운전 압력에 따라 달라지게 된다. 이 시스템은 누설에 의해 발생하는 공기, 액체, 고체의 진동을 감지하고 누설시 발생하는 저주파와 고주파의 노이즈 모두에 반응하도록 설계되었다. 증폭-경보 어셈블리는 하나의 센서에서 두 가지 주파수 대역의 신호를 검출할 수 있도록 하여 저주파대는 일반 음향 영역(2 kHz~12 kHz)을 검출하고 고주파대는 초음파 영역(35 kHz~175 kHz)을 검출하도록 하였으며 데이터기록 스펙트럼 분석기는 2.5시간, 24시간, 10일, 30일, 60일 단위로 데이터 저장과 추이를 볼 수 있도록 하였다.

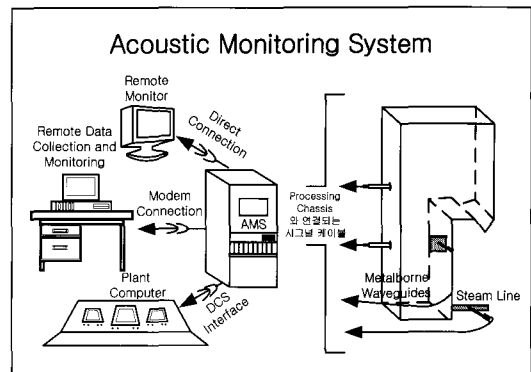


Fig. 1 Schematic diagram of boiler tube leak diagnosis system

## 3. 누설 감지 시스템의 원리

누설에 의해 발생하는 음향신호는 고감도 센서로 검출이 가능하다. 이 센서는 튜브 멤브레인(tube membrane)이나 보일러 벽 근처에 부착하며, 이는 반영구적이어서 정비가 거의 필요가 없고 별도의 냉각공기(cooling air) 또는 세척공기(cleaning air)가 불필요하다. 또한 한 개의 센서와 증폭/필터 모듈(amplifier & filter module)로 고/저 누설잡음을 동시에 검출 가능하며, 누설을 감지하기 위하여 금속 도파관(metal-borne waveguide)과 공기 도파관(airborne waveguide) 두 가지를 모두 사용할 수 있다. 금속 도파관은 수벽면 튜브외면(water-wall tube membrane)에 설치하고, 공기 도파관은 보일러 내부가 개방되어 있는 위치에 설치된다. 증기누설에 의해 발생한 음향신호는 보일러 내부의 가스와 튜브를 통하여 센서에 전달되며 보일러 내부의 가스와 튜브를 통하여 전달되는 누설을 감지해 내기 위하여

음향감지 센서가 부착된 금속 도파관을 사용한다. Fig. 2는 보일러 가스와 튜브를 통하여 전달되는 누설의 검출과정을 나타내었다.

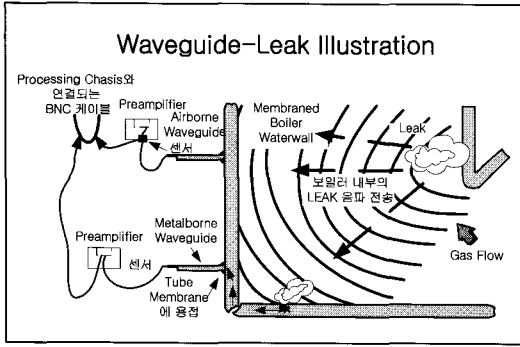


Fig. 2 Leak detection path in boiler tube

3.1. Airborne leak 검출방법(저주파 대역)

과열기(superheater), 재열기(reheater), 절단기(economizer) 등에서와 같이 보일러 내부에 누설이 있다면, 이 누설에 의해 생성된 진동은 음파를 생성시키고, 이 음파가 가스층을 통과하여 보일러의 벽면에 미세한 진동을 발생시키게 된다. 이 벽면이 울림판과 같은 역할을 하며, 센서가 이 진동을 감지하여 얻어진 신호를 증폭, 분리 및 분석하여 일정시간 경보 문턱값(threshold level)을 넘는다면 경보를 발생시킨다.

3.2. Metal-borne leak 검출방법(고주파 대역)

보일러 내부나 외부의 수냉벽에 누설이 발생하면 이 누설에 의하여 생성된 진동은 튜브와 표면을 통하여 센서에 전달된다. 이렇게 전달된 신호를 증폭, 분리 및 분석하여 일정시간 이상의 경보 문턱값을 넘는다면 경보를 발생시키게 된다. 도파관을 수냉벽면에 용접 및 고정시킴으로서 저주파대역(2~12 kHz)과 고주파대역(35~175 kHz)을 모두 검출할 수 있다. 이러한 주파수대역들은 사전 실험실 실험을 통하여 튜브손상별 발생 음향신호의 주파수분석으로 결정된 것이다. 보일러 노내 연소시 주기적으로 발생한 그을음을 노외로 불어내는 과정(soot blowing)시의 음향신호는 고주파대역인 35 kHz 이상이 되지만, 보일러 가스를 통과하는 동안 약해지기 때문에 고주파대역 검출 센서의 신호에는 큰 영

향을 미치지 않게 된다. 따라서 고주파 대역의 감지는 수냉벽 튜브와 표면 등과 같이 서로 연결되어 있는 금속성 경로를 통하여 누설시 발생하는 소음을 감지함으로써 제매하는 동안에 발생하는 누설을 감지해 낼 수 있다. 도파관은 10 mm 두께, 380 mm 길이를 갖는 봉상(round bar type) 스테인레스 강이며 현장에서 용접하여 설치된다.

4. 하드웨어 설계

하드웨어는 크게 음향방출센서, 전치증폭기(pre-amplifier), 주증폭기 및 필터모듈(main amplifier & filter module), 인터페이스 보드(interface board) 및 A/D 보드 등을 현장조건에 맞도록 설계 제작하였다. 음향방출센서는 일렉트릭 콘덴서 마이크로폰 방식을 기본으로 하여 설계하였으며, 또한 일렉트릭 콘덴서 마이크로폰을 스테인레스 하우징(stainless housing)에 내장시켜 외부의 충격에 강하고 온도의 영향을 최대한 받지 않도록 하였다. Fig. 3은 금속형 음향방출센서의 구조를 나타내고 있으며, 보일러 내부가 개방되어 있는 비교적 낮은 온도 부분에 설치된 케이스에 마이크로폰을 내장시켜, 케이스 주변에 냉각 및 세척공기를 공급하도록 되어 있는 공기형에 비하여 금속형은 외부의 충격에 강하며 또한 사용온도가 -73℃~260℃이므로 공기형보다 내구성이 강하다. 금속형은 저주파(2~12 kHz)와 고주파(35~175 kHz)를 동시에 검출할 수 있다. 또한 보일러 내부와 외부의 누설을 동시에 검출할 수 있으므로 금속형으로 제작하여 보일러 튜브 표면에 설치함으로써 튜브의 절단 없이 설치함으로써 공기형과 같이 별도의 냉각 또는 세척 공기가 필요 없도록 하였다. 금속형은 공기형 보다 감도가 탁월하기 때문에 직경 15 m 이내에서 발생하는 누설을 모두 감지할 수 있다.

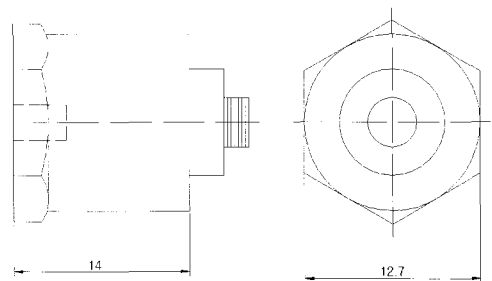


Fig. 3 Acoustic Emission sensor

음향방출센서에서 검출되는 신호는 미약하여 그 신호를 바로 입력시켜 사용하지 못한다. 이러한 것을 보완하기 위하여 신호를 적당한 레벨까지 올리기 위하여 사용된다. 또한 신호가 증폭기까지 전송 도중에 노이즈의 영향을 받지 않도록 하기 위하여 반파 정류(half-wave rectifier)기법[4]을 사용하여 신호 전달이 450 m까지 가능하도록 하였다. 또한 본 논문에서는 1개의 모듈로 2개(single band)시 4개의 음향방출 센서를 감시할 수 있도록 하였다. 필터 모듈에서는 4개의 대역 필터가 가능하게 하였으며, 실시간으로 4개의 센서를 체크할 수 있도록 4개의 평균전압 변환기(RMS converter) 기능을 포함하였다. 증폭기 모듈에서 가변이 가능한 주파수 범위는 100 ~ 500 kHz로 설계하였다[4]. 그리고 신호처리에 있어서, 입력된 아날로그 신호를 데이터 로깅 스펙트럼 분석기(data logging spectrum analyzer)에서 인식할 수 있도록 A/D 보드를 이용하여 디지털 신호로 변환하였다. 또한 보일러에서 제매가 작동할 때 제매에 따른 신호가 센서에 입력되어 누설로 오판되는 것을 방지하기 위하여, 보조 입출력 모듈을 제작하여 제매 고유 주파수대역을 필터링되도록 하였다. 또한 인터페이스 보드(interface board)를 이용하여 원격진단이 가능하도록 하였으며, 진단시스템에서 문제가 발생할 경우 외부에서도 알 수 있도록 설계하였다.

## 5. 소프트웨어 설계

소프트웨어부분은 데이터 로깅 스펙트럼 분석기능(data logging spectrum analyzing function), 트렌드 기능(trending function) 및 실시간 스펙트럼 분석기능(real time spectrum analyzing function) 등이다. 개발 시스템의 주, 보조 및 설정 메뉴는 음향방출센서에서 들어오는 신호를 분석하고 현재의 상태를 데이터화한 후, 각 채널에 대한 신호 주파수 또는 크기 등의 값을 설정할 수 있으며 각 채널에 대한 주파수를 개별적으로 설정할 수 있도록 함으로써 센서에서 들어오는 신호를 최상의 상태로 분석하여 누설감지의 성능을 발휘할 수 있도록 하였다. 또한 보조입력을 선택할 수 있도록 하여 주변의 조건과 통신에 관한 조건까지도 설정할 수 있도록 하였다. 각 센서에 대한 신호를 분석하여 누설을 감지할 수 있도록 하기 위하여 각 센서에서 들어오는 신호를 분석하여 막대 그래프로 표시되

록 하여 누설상태를 알 수 있도록 하였으며, 누설 경보 설정점(leak alarm set point)을 설정하여 주고, 이 설정점 이상의 신호가 발생되어 얼마간의 시간이 경과하면 누설로 간주하여 외부로 정보를 발생시키도록 하였다.

신호추이를 알 수 있도록 누설이 발생되었을 경우 누설시작 시점에 대한 사항을 분석할 수 있도록 하였다. 각 센서에서 들어오는 신호를 파일 데이터(file data)로 저장하여 주고, 이 저장한 데이터를 운용자가 원할 때 화면에 보여줌으로서 누설이 확대되기 전에 미리 예방 할 수 있도록 하였다. 각 채널에 대한 신호를 분석하여 누설이 확대되어 보일러에 문제가 발생하기 전에 운용자가 대처할 수 있도록 1일에 대한 신호의 상태를 한 화면에 표시되도록 하였으며 경보점(alarm point)이 설정이 되어 있어 누설이 발생되었을 경우 누설 발생 시간을 알 수 있도록 하였다.

그리고 보일러에 설치된 각 센서의 위치를 보여 줌으로써 누설 발생시 누설 위치를 알려주는데 목적이 있으므로 보일러에 설치된 모든 센서의 위치를 화면에 보여줌으로써 누설이 발생되었을 경우 누설 위치를 운전자에게 알려주도록 하였으며, 누설의 범위가 어느 정도인지를 알 수 있도록 하였다. 또한 정확한 누설판별을 위한 부가기능으로, 보일러튜브 누설로 인하여 주변 설비의 유량 또는 압력의 변동이 일어날 수 있는 신호를 보조입력으로 받아 들여 신호분석시 활용하도록 설계하였다.

## 6. 실험결과 및 고찰

현장실험시의 진단조건은 예비실험(실험실 실험 및 현장 사전실험)을 통하여 발전소 주변잡음(background noise level), 보일러의 정상운전시 음향레벨 및 센서와 진단시스템까지의 거리에 따른 신호증폭범위, 제매시 음향특성 등을 기초로 하였다. 현장실험시 센서설치는 Table 1 및 Fig. 8과 같은 배열로 설치하고 각 센서들은 3.1과 3.2에서 설명한 방법으로 부착하였다. 진단시스템은 운전 제어실 및 현장 제어실에 각 1대씩 설치한 상태에서 운전중 각 위치에서 수신되는 음향신호에 대한 측정실험을 수행하였다. 현장실험 결과, Fig. 4와 같은 화면을 얻을 수 있었다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이, 가로축으로 표시되어있는 수치는 센서에서 들어오는 신호의 세기를 나타내는 것이며 신호

범위는 106 dB에서 최대 146 dB까지 변환되어 질 수 있다. 가로축으로 표시된 수치는 선택된 보일러의 채널번호를 지시하며 각 막대그래프는 센서신호의 세기를 나타낸다. 고/저주파대 두 가지를 동시에 감지할 때는 막대가 두 개로 나뉘어 왼쪽은 저주파대, 오른쪽은 고주파대를 나타낸다.

Fig 5 및 Fig. 6은 10일 및 30일간에 대한 추이를 각각 나타낸 화면으로 추이를 보여주는 화면에서 세로축은 신호레벨을 나타내고 가로축은 시간을 나타

낸다. 시간은 24시간, 10일, 30일, 60일 단위로 변경할 수 있다. 경보가 발생할 때는 가로축방향 하단부분에 막대를 나타내고, 화면의 우측상단부분에 어떤 것에 대한 추이를 화면에 나타내는지 표시한다.

Fig. 7은 24시간동안에 발생한 경보발생 상황을 보여준다. 가로축에 표시된 것은 채널을 나타내고 세로축에 표시된 것은 24시간까지의 시간을 나타낸다. 채널을 표시한 숫자 위의 박스는 그 해당 채널의 지정시간에 경보가 발생 이력과 지정된 시간에 예비 경보가 있었음을 나타내며 좌/우 화살표를 사용하여 최대 30일간의 정보를 볼 수가 있다. Table 1과 Fig. 8은 보일러 위치별 설치센서와 설비를 각각 나타낸 것이다. 운전중 시스템의 실험중 오른쪽 노벽 방향의 질탄기(right wall, economizer)가 설치된 17번 센서에서 누설을 감지할 수 있었으며 그 결과를 Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11에 각각 나타내었다.

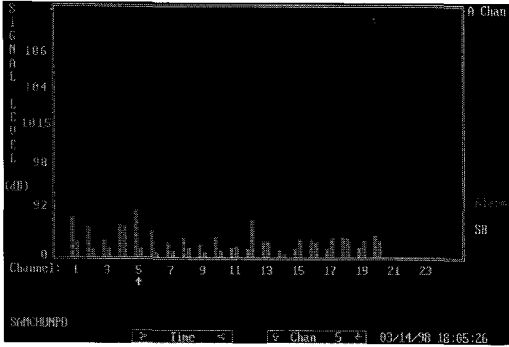


Fig. 4 Bar graph for leak detection

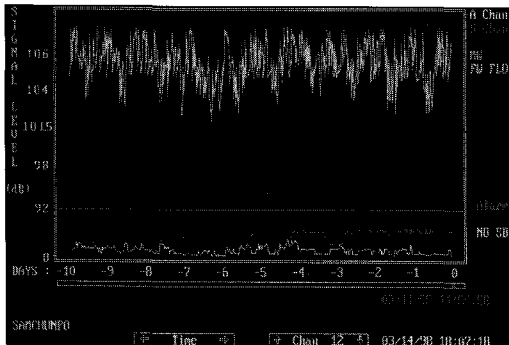


Fig. 5 10-day trend of AE signal level

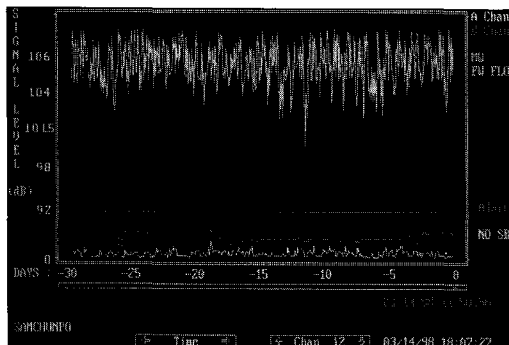


Fig. 6 30-day trend of AE signal level

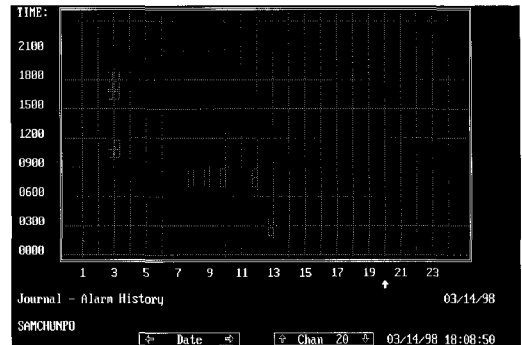


Fig. 7 Alarm history in each channels

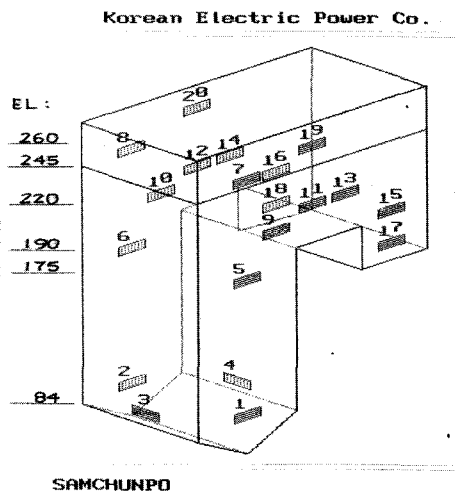


Fig. 8 Sensor array map in boiler

Fig. 9는 각 센서 위치별 시간(가로축)에 대한 신호레벨을 나타낸 것으로 Table 1과 Fig. 8에 나타낸 것과 같이, 17번 센서가 설치된 오른쪽 노벽 방향의 절탄기에서 오전 12시 45분경에 AE신호 레벨이 설정 문턱값을 상회하여 나타난 누설경보를 알리는 음향신호레벨을 나타낸 것이며, Fig. 10은 3차원 그래프에 의해 추이를 나타낸 그림이다. 그리고 Fig. 11은 17번 센서가 설치된 오른쪽 노벽 방향의 절탄기에서 오후 3시16분경에 나타난 누설신호를 나타낸 것이다.

Table 1 Sensor and components map in boiler

AE Sensor	Elevation (ft)	Components
1	84	Right Wall, Lower Furnace
2	"	Left Wall, Lower Furnace
3	"	Front Wall, Lower Furnace
4	"	Rear Wall, Lower Furnace
5	186	Lower Primary Superheater
6	"	Lower Primary Superheater
7	245	Upper Primary Superheater
8	"	Upper Primary Superheater
9	208	Right Wall, Reheater, Front
10	"	Left Wall, Reheater, Front
11	220	Right Wall, Reheater, Rear
12	"	Left Wall, Reheater, Rear
13	"	Right Wall, Hi-Temp Superheater
14	"	Left Wall, Hi-Temp Superheater
15	190	Right Wall, Low-Temp Superheater
16	"	Left Wall, Low-Temp Superheater
17	175	Right Wall, Economizer
18	"	Left Wall, Economizer
19	260	Right Wall, Penthouse
20	"	Left Wall, Penthouse

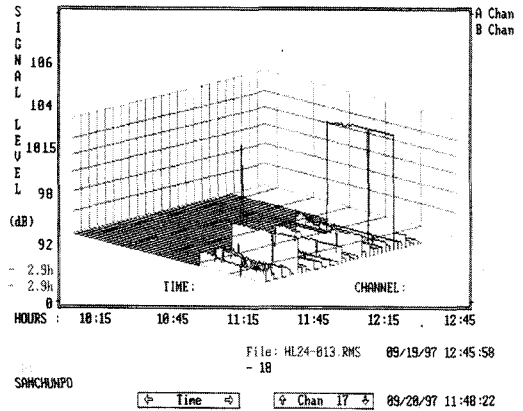


Fig. 10 3D graph of leak signal level in economizer (sensor No.17) at about 12:45 A.M

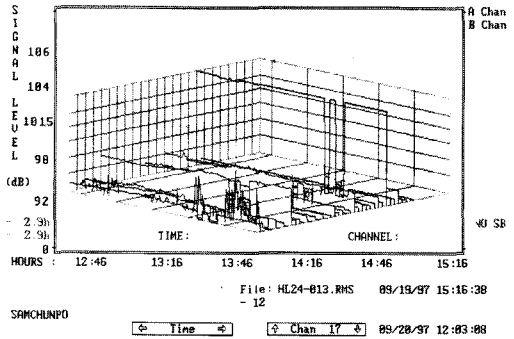


Fig. 11 3D graph of leak signal level in economizer (sensor No.17) at about 3:16 P.M

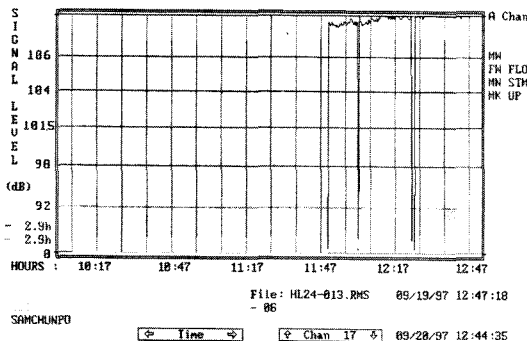


Fig. 9 Leak signal graph in economizer(sensor No.17) at about 12:45 A.M

이러한 운전중 누설신호 실험결과로부터 누설위치, 시간 및 신호크기에 따른 누설손상 형태 예측 등이 가능하였으며, 동 누설탐지의 발견으로 발전소 보일러 주말정지 보수를 통하여 수행하여 주위 보일러튜브 파손방지, 발전정지 예방, 인적/물적 손해를 사전방지 할 수 있었으며, 차후 정확한 누설 손상 종류, 증기유동, 복수기 복수유동 및 노내 압력 등의 기능을 보완하게 되면 본 시스템의 활용성 증대가 기대된다.

### 7. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 누설시 발생하는 저주파, 고주파 노이즈에 모두 반응할 수 있는 음향방출센서를 설계 및 제작하였으며, 센서에서 들어오는 미약한 신호를 주진

단시스템까지 전송할 수 있도록 증폭기능을 가진 전치증폭기를 제작하여 450 m까지 신호전송이 가능하였다.

- (2) 전치증폭기에서 보내진 신호를 증폭 및 필터링하기 위하여 주진단 시스템에 필터 모듈을 제작하여 설치하였으며 보일러 튜브누설판별에 필요한 주파수대(저주파: 1.7 kHz, 고주파: 20 kHz)를 동시에 측정 할 수 있었다.
- (3) 보일러튜브누설 분석이 원활하도록 60일, 30일, 10일, 1일, 2.5시간에 대한 추이를 나타낼수 있는 소프트웨어를 개발하여, 각 센서 위치를 나타냄으로서 빠른 시간 안에 누설지점을 찾을 수 있었다.
- (4) 현장적용 연구결과, 음향방출기술을 이용하여 보일러 튜브누설감지의 실용성을 확인하였다.

#### 참고문헌

- [1] J. A. Kleppe, "Engineering Application of Acoustics", Artech House Press, pp. 14-16, (1989)
- [2] 火力·原子力·化學 Plant機器·構造部材の 經年劣化と壽命豫測, Japan Realize Inc. pp. 13, (1980)
- [3] 이상국, "초음파법을 이용한 Cr-Mo강 고온배관 재료의 크리프손상 평가", 비파괴검사학회지, 제 24권 제1호, pp. 18-26 (2000)
- [4] 이상국, 정창덕, 서장석, "보일러튜브 누설감지 설비 국산화 개발", 한전 전력연구원 연구보고서, 96C09, pp. 1-170, (1998)
- [5] 이상국, 정민화, 남기우, "음향방출법에 의한 보일러튜브 누설평가", 비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, KSNT/FC00010, pp. 64-69, (2000)
- [6] ボイラ非破壊検査技術の最近動向, 火力原子力發電, Vol. 48, No. 8, (1997)
- [7] Acoustic Emission, American Society for Testing and Materials, (1971)
- [8] Jack C. Spanner, "Acoustic Emission: Technology and Applications", IPC, (1974)
- [9] ASTM STP505, "Acoustic Emission", (1972)
- [10] P. G. Bently, "A Review of Acoustic Emission for Pressurized Water Reactor Applications", NDT Int., Vol. 14, pp. 313-360, (1981)
- [11] A. Kitajima, N. Naohara and A. Aihara, "Acoustic Leak Decton in Piping Systems", CRIEPI Research Report No. 283006, (1984)
- [12] B.R.A. Wood, R.W. Harris, "Pipeline Leak Detection with Acoustic Emission", AWR Doc.97-9-84, (1984)
- [13] E. M. Stevens, D. M. Schlader, "Acoustic Leak Detection in Fossil Boilers", World Conf. of NDT, pp. 1510-1517, (1985)