

# 음향방출기법을 이용한 열교환기 누설 검출 시스템 개발

이민래\* · 이준현\*\*

## Development of Leak Detection System of Heat Exchanger using Acoustic Emission Technique

Min-Rae Lee, Joon-Hyun Lee

**Key Words:** Heat exchanger(열교환기), Leak detection(누설탐지), Acoustic emission(음향방출), Leak source location(누설위치표정)

### Abstract

In this paper, acoustic emission technique(AE) has been applied to detect leak for heat exchanger by analyzing the characteristics of signal obtained from leak. It was confirmed that the characteristics of the signal generated by the turbulence of gas in the heat exchanger is narrow band signal having between 130-250KHz. Generally, the amplitude of leak signal is increased as the leak size increasing, but showed no significant change at frequency characteristic. Leak source location can be found by searching for the point of highest signal amplitude by comparing with several fixed sensors.

### 1. 서론

최근 냉동, 공조기기(냉장고, 에어컨 등)의 사용이 증가함에 따라서 열교환기에 대한 설계뿐만 아니라 생산단계에서의 신뢰성 확보에 대한 관심이 중요하게 대두되고 있다.

한편 일반적으로 에어컨에 사용되고 있는 응축기(condenser)와 증발기(evaporator)는 대부분 핀-튜브(fin-tube)형의 직교류형 열교환기(cross-flow heat exchanger)가 주로 이용되고 있다. 이와 같은 열교환기의 성능에 영향을 미치는 인자 가운데 하나는 냉매를 수송하는 원형관의 튜브의 신뢰성에 있다.

이러한 튜브는 구리튜브가 가장 많이 사용되고

있으며 기기의 고효율, 소형화의 추세에 따라서 점차 튜브의 직경이 세경화(細徑化)되고 있는 추세이다. 이와 같은 열교환기는 설계시 기하학적, 물리학적 인자들뿐 만 아니라 실제 제조과정에서 발생하는 제품의 신뢰성 확보가 필수적이다.

일반적으로 핀-튜브형 열교환기는 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 핀과 튜브 및 곡관(U-band)으로 각각 구성되어져 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 구리 튜브의 브레이징(brazing) 접합에 따른 접합부에서의 미소결함에 의해서 냉매의 누설부가 발생하게 되어 제품의 신뢰성 확보에 큰 문제점으로 지적되고 있다.

따라서 이와 같은 구리튜브 접합부에서의 결함 발생, 특히 누설 불량부의 문제점을 해결하기 위해서는 다음과 같은 측면에서의 연구가 필수적이다. 즉,

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부

(i) 원천적으로 결합발생을 제거하기 위한 브레이징 접합 기술확립 및 최적접합조건 도출

(ii) 브레이징 접합부에서 발생하는 미소결합, 즉 누설부의 탐지기술 확립에 따른 연구가 필수적으로 대두된다.

그러나 상기 (i)의 경우 원천적인 문제점을 제거하기 위하여 반드시 필요한 부분이나 기술적으로 이 부분을 개선, 확립하기 위해서는 장기적인 기술개발이 요구된다. 따라서 현실적인 단기적인 측면에서 우선 (ii)의 누설부 검출기술의 확립이 필요하며 특히 현재 실제 생산라인에서 채택하고 있는 누설부 검출기술의 문제점들을 해결할 수 있는 신뢰성, 효율성이 높은 새로운 검사 기술의 개발이 시급한 실정이다.

일반적으로 브레이징 접합부에서 발생하는 미소결합의 경우 접합 조건의 변화에 따라서 발생하는 결합부의 크기, 형상등이 균일하지 않고 특히 그 크기가 미소하기 때문에 육안검사로서는 그 검출이 불가능하다. 따라서 현재 국내에서는 이와 같은 누설부의 검사를 위하여 침적식 검사, 가스검지 방식 등의 기술을 이용하여 누설부의 검출에 노력을 경주하고 있으나 검출능의 신뢰성 확보에 많은 어려움을 겪고있는 실정이다. 특히 국내에서 많이 채택하고 있는 침적식 누설검사 방식의 경우 검사소요시간이 길뿐 아니라 육안검사에 의한 오차(error) 발생률이 높고 또 열교환기의 경우 내부에 수분이 침투할 가능성이 있어 생산현장에서의 효율적인 적용을 위하여는 보다 새로운 검사기술개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 앞에서 언급한 침적식 누설검사 방식이 안고 있는 각종 문제점들을 해결하기 위한 새로운 검사기술을 확립하는데 있으며 이를 위하여 비파괴 평가 수단으로서 재료평가 및 온라인(on-line) 모니터링[1-5]에 주로 이용되고 있는 검사방법중의 하나인 음향방출(acoustic emission, 이하 AE)기법[6]을 이용하여 열교환기 누설에 대한 모니터링 기구로서 적합성을 평가하고자 하였다.

한편 음향방출이란 재료의 국부적인 응력변화에 의해 변형에너지가 순간적으로 방출될 때 발생하는 탄성파(elastic wave) 혹은 그 현상자체를 말한다. Fig. 2는 음향방출기법의 개요도를

나타낸 것으로서 그림에 나타나 있는 바와 같이 구리튜브에서 가스 누설시 난류(turbulent) 현상에 기인하여 발생하는 AE신호, 즉 초음파 판파를 AE 압전센서를 이용하여 온-라인 상태에서 누설부에서의 신호를 연속적으로 수신하여 그 신호특성을 분석함으로써 누설 여부를 판별할 수 있는 새로운 기술을 확립하고자 하였다. 이 방법을 기존의 방법들과는 달리 누설 유무를 실시간 판정이 가능하며 육안검사에서 놓치기 쉬운 미세한 누설검사의 자동화가 가능한 장점이 있다. Fig. 3은 핀-튜브 타입의 열교환기 사진을 나타낸 것이다.

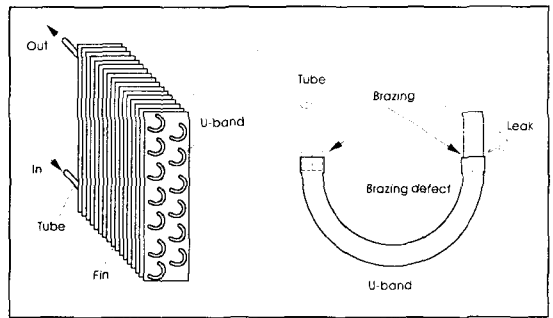


Fig. 1 Fin-tube type heat exchanger

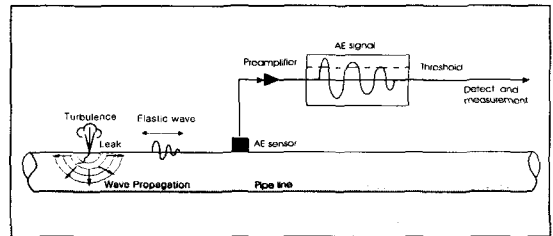


Fig. 2 Basic principle of the acoustic emission method

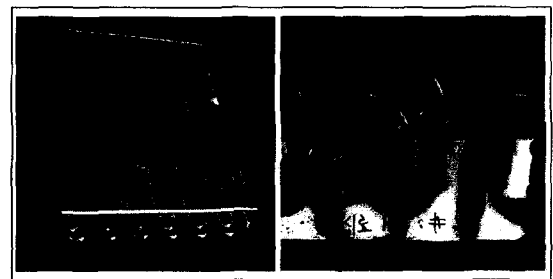


Fig. 3 Photograph of fin-tube type heat exchanger and typical u-band

한편 본 연구에서는 누설평가를 위하여 AE 카운트, AE 에너지 및 RMS값과 같은 AE 파라미터를 이용하여 평가하였다.

Fig. 4는 일반적인 AE신호에 대한 파라미터를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 AE 이벤트는 센서에 도달된 신호의 시작점과 끝점이 기준치를 넘는 범위에서 1개의 AE신호로서 정의하며 링다운 카운트는 기준치를 넘는 모든 진폭에 대한 AE신호의 횟수로 정의한다. AE 에너지는 식(1)과 같이 정의되며 진폭과 상관관계가 있다[7].

$$E_{AE} = \int v^2_{AE}(t) dt \quad (1)$$

여기서,  $v^2_{AE}(t)$ 는 센서의 출력전압이다.

한편 누설에 의해서 발생하는 연속형의 AE신호의 경우 실효전압치(root mean square)값을 적용할 수 있으며 시간축(t)를 기준으로 한 AE파형을  $x(t)$ 로 가정하면 식(2)와 같이 정의된다.

$$RMS = \left( \int^{td} x^2(t) dt \right)^{1/2} \quad (2)$$

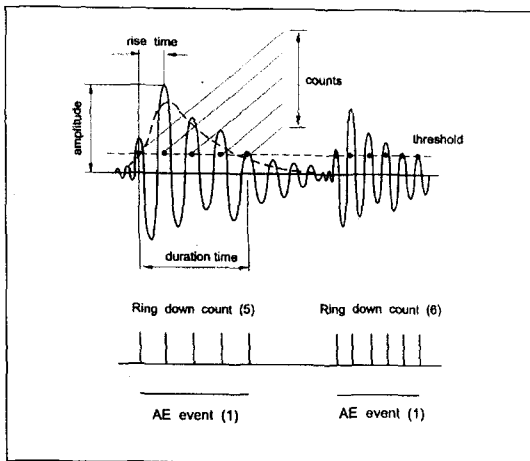


Fig. 4 Definition of AE parameters for simple waveform

## 2. 재료 및 실험방법

본 연구에서는 AE를 이용한 열교환기 누설검사기 개발에 있어서 누설에 따른 AE신호특성 및 AE 적용에 따른 주요인자 선정을 위하여 브레이징 접합부에 40, 50, 60, 100  $\mu\text{m}$ 의 인공결함을 각각 가공하여 결함크기에 따른 AE신호특성을 분석하였다. 먼저 기존의 AE장비를 이용하여 수물 검사시 결함이 검출되는 열교환기 시료를 대상으로 예비실험을 수행하였다.

예비실험에서 핀-튜브형 열교환기의 실제 수물 검사시 결함이 검출된 용접부 용입불량시료와 스모그 검사시 결함이 검출된 불량시료를 사용하여 AE를 이용한 누설검사의 가능성을 평가하고자 하였다. Fig. 5는 실험의 전체적인 개요도를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 누설에 따른 AE측정은 PZT 타입의 센서를 사용하였으며 주파수 특성을 분석하기 위해서 공진 주파수가 각기 다른 4개의 AE센서(R6, R15, Micro 30, WD)를 이용하였다. Table 1은 AE센서의 재원 및 사용주파수를 나타낸 것이다. AE측정은 시험편의 누설부위와 비누설부 곡관 가장자리에 AE 센서를 부착하였으며, AE 센서의 수신감도를 높이기 위해서 시험편에 coupling agent를 바른 후 접촉테이프를 압착하였다. 그리고 기계적 잡음과 같은 불필요한 주변 잡음(background noise)을 제거시키기 위하여 프리앰프(1220A)에서 100~1200kHz의 대역필터 (band pass filter)를 사용하여 필터링 시켰으며 누설 신호에 대한 AE파형 분석을 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310)를 이용하여 각각의 결함신호를 측정하였다.

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 압력용기에서 질소가스를 25kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 열교환기에 주입시킨 후 열교환기 내부 압력이 충분히 안정된 후에 AE측정을 수행하였다. 문턱값(threshold level)은 가스 주입전과 가스주입후에 각각 잡음레벨을 측정하여 28dB(2.37mv)로 설정하였으며 Fig. 6은 본 실험의 전체적인 진행절차에 대해서 나타내고 있다. 예비실험을 통하여 최소 누설검출한계크기는 45-50  $\mu\text{m}$  이상임을 확인하였으며 누설판정은 Fig. 7의 알고리즘을 통하여 누설여부 및 누설위치를 분석하였다.

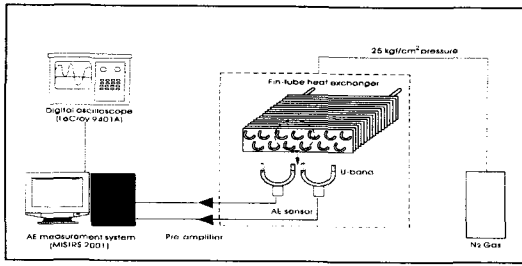


Fig. 5 Schematic diagram of instrumentation for leak test

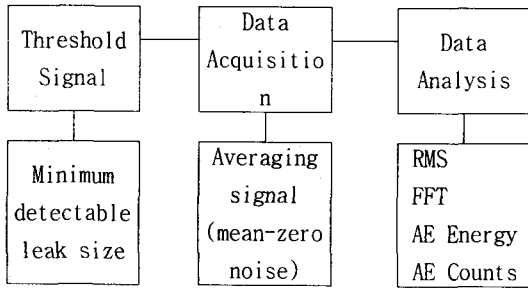


Fig. 6 Proceeding block diagram of acoustic emission leak test

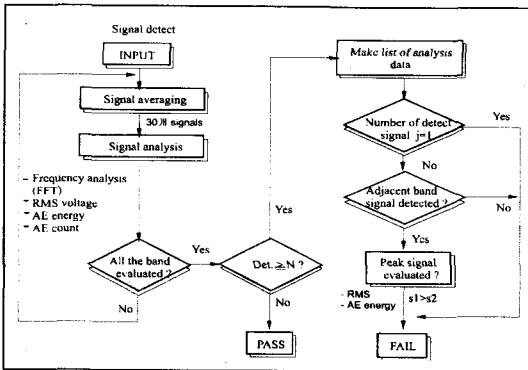


Fig. 7 Algorithm of acoustic emission leak test

Table 1 Specification and sensitivity of AE sensors

구분	RESONANCE			WIDEBAND
	R15	PICO	MICRO-30	WD
사용주파수	50-200kHz	200-750kHz	100-600kHz	100-1000kHz
공진주파수	150kHz	500kHz	300kHz	650kHz
센서크기	∅ 18mm	∅ 5mm	∅ 10mm	∅ 18mm

## 2.2 누설검사기 시스템 구성

본 연구에서는 음향방출기법을 이용한 누설검사를 개발하고자 하였으며 Fig. 8은 AD 보드를 이용한 누설검사 시스템의 전체적인 개요도를 나타낸 것이다. 먼저 AE센서를 사용하여 측정된 신호는 프리앰프를 통하여 40dB로 증폭시켰으며 주변잡음을 제거하기 위하여 100-300kHz의 대역필터를 통하여 필터링 시켰다. 그런 다음 20MHz 샘플링의 고속 AD보드를 통하여 신호를 획득한 후 누설신호에 대한 AE 카운트, AE 에너지 및 RMS값과 같은 AE 파라미터를 통하여 분석하였다.

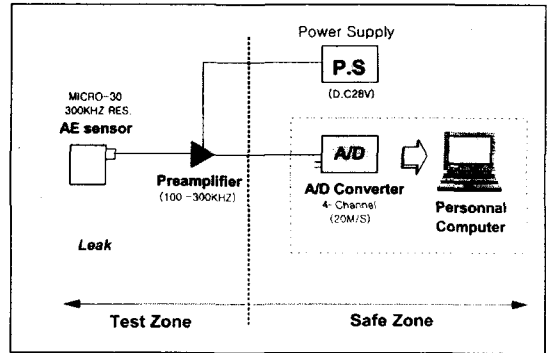


Fig. 8 Multichannel acoustic emission system

## 3. 실험결과

### 3.1 거리 및 압력에 따른 AE신호특성

먼저 누설위치와 센서간 거리 및 압력에 따른 RMS값과 주파수 변화특성을 분석하기 위하여 결합 크기가 100 μm인 경우에 대해서 결합으로부터 센서의 위치를 20, 50, 100mm로 변화시켜가면서 AE신호를 측정하였다. Fig. 9는 R15 공진형 센서를 사용하여 거리에 따른 AE신호특성 및 주파수 분석 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 누설위치로부터 거리가 멀어질수록 AE진폭이 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 한편 FFT결과 누설신호는 130kHz와 250kHz의 주파수 특성을 나타내었다.

Fig. 10은 내부압력 및 거리에 따른 각 센서에서의 누설 신호에 대한 RMS값을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 거리에 따른 감쇠영향으로 RMS값이 저하됨을 알 수 있으며 내부압력이 높을수록 그리고 광대역 센서보다 공진형 센서가

누설에 따른 검출능이 우수함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 시스템 구성시 Micro-30의 공진형 센서를 사용하였다.

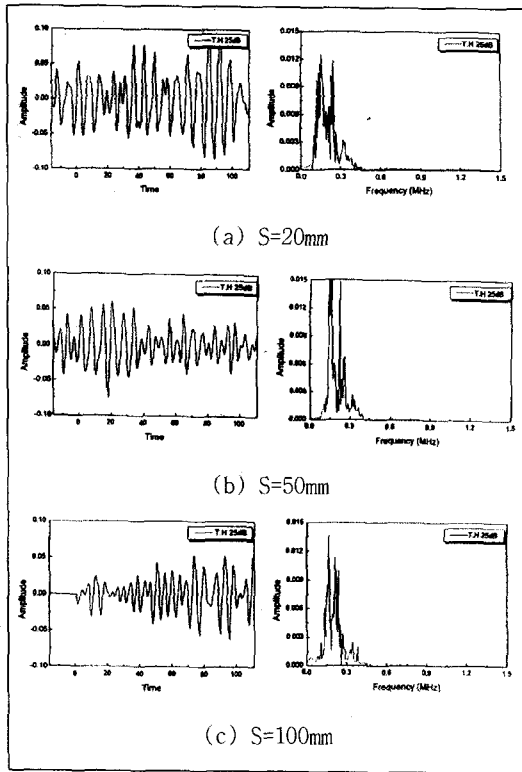


Fig. 9 Waveform and their FFT following to the distance between the leak and sensor distance.

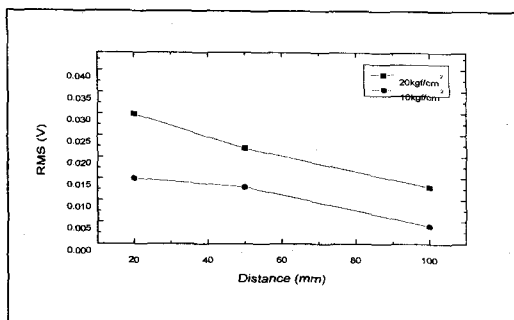


Fig. 10 RMS value variation following to the pressure and distance between the leak and sensor distance

### 3.2 누설부 크기에 따른 AE신호특성

Fig. 11은 누설부 크기 즉, 인공결함의 크기에 따른 AE신호 파형 및 주파수 분석결과이다. Fig. 11(a)의 경우는 누설부 결함크기가  $100\ \mu\text{m}$ 인 경우로서 AE진폭이 큰 연속형 신호가 검출되었으며 누설부의 크기가 작을수록 그림에 나타나 있는 바와 같이(Fig. 11(b,c)) AE진폭이 감소함을 알 수 있다. 한편 각 누설부 크기에 따른 주파수 특성을 살펴보면 누설의 크기에 관계없이 130kHz, 250kHz에서 최대치를 나타내는 특성을 보였다. 본 연구에서는 누설부 크기가  $50\ \mu\text{m}$ 이하에서는 검출능이 현저하게 저하되었다. Fig. 12는 비누설부에 대한 노이즈 성분의 AE파형과 주파수 분석결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 노이즈 성분의 AE진폭은 아주 미세하였으며, 주파수특성은 누설부와 비교해 볼 때 100kHz 부근에서 최대치를 나타내는 특성을 보였다. Fig. 13은 전자현미경을 이용한 누설 크기를 나타낸 사진이다.

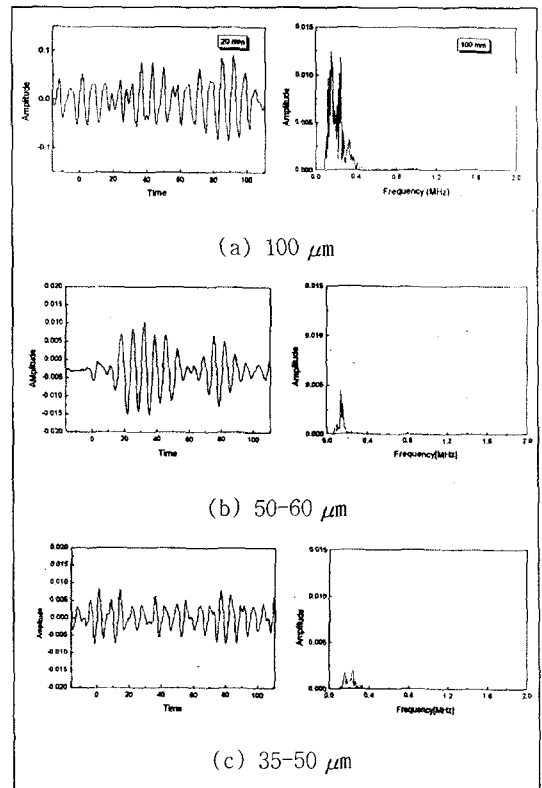


Fig. 11 Waveform and their FFT following to the leak size

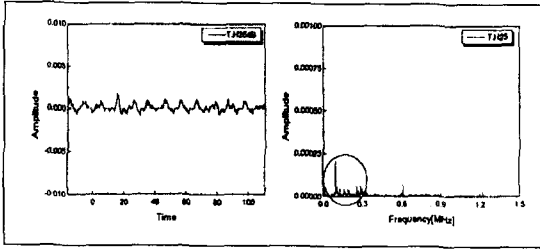


Fig. 12 Waveform and their FFT of back-ground noise

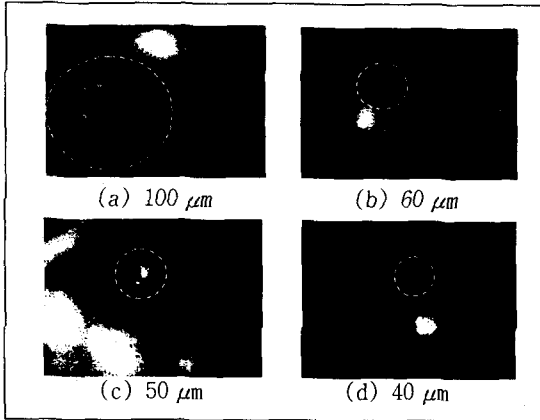


Fig. 13 Typical micrographs of the leak size

한편 누설부 크기가 45-60  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 이웃하는 비누설 밴드에서 AE영향은 미치지 않지만 60  $\mu\text{m}$ 이상의 누설부에서는 이웃밴드에도 누설에 따른 AE 신호가 감지되었다. Fig. 14는 누설부 크기가 60  $\mu\text{m}$ 이상인 경우에 각 밴드에서 측정된 AE 파라미터의 관계를 나타낸 것으로서 비누설 밴드에서 발생하는 신호의 크기는 누설밴드에서 발생하는 신호보다 60-70%정도 낮게 발생하였다.

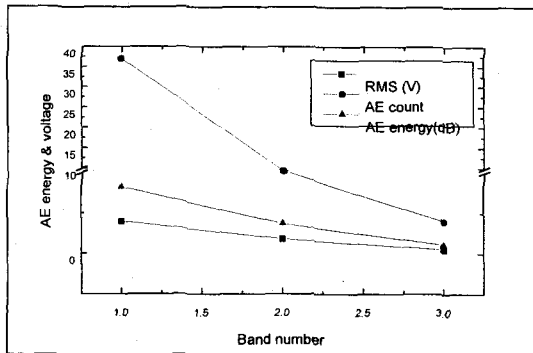


Fig. 14 Results of RMS, AE energy, and AE count value following to the leak size.

### 3.3 AD보드를 이용한 AE시스템 개발

본 연구에서는 음향방출을 이용한 열교환기 누설검사를 위해서 실제 현장에서 적용 가능한 AE 시스템을 개발하였다. 기존의 AE장비는 대단히 고가일 뿐만 아니라 실제 현장에서 적용하기에는 설치에 따른 어려움과 낭비적인 요소가 많다. 따라서 본 연구에서는 A/D보드를 이용한 누설 검사 시스템을 구축하였다. 개발한 시스템은 신호를 입력하기 위한 입력부와 입력된 신호를 증폭하기 위한 증폭부, 그리고 획득한 신호를 처리하기 위한 신호처리부로 각 각 구성되어 있다. 신호 입력부에 해당하는 AE센서는 공진형(Micro-30)센서를 사용하였으며 증폭부에 해당하는 프리앰프는 기존의 프리앰프(1220A)에 외부 전원(28V)을 통하여 기존의 AE장비와 동일한 수신감도를 지니도록 제작하였다. 그리고 전기적인 노이즈를 제거하기 위하여 프리앰프는 시일딩 처리를 하였다. 한편 프리앰프에서 증폭된 신호를 A/D보드에서 아날로그 신호를 디지털 신호로 처리한 후 컴퓨터를 이용하여 신호를 분석하였다. Fig. 15는 AE시스템과 A/D보드사이의 오차정도를 측정하기 위하여 함수발생기(function generator)를 사용하여 임의의 파형(정현파)를 입력시켜 각 각 두 시스템에서 출력되는 신호의 크기를 비교한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, AE 시스템을 통한 출력값이 A/D보드를 이용한 출력값보다 약 4dB정도 높게 나타났다. Table 2는 AE측정장비 및 A/D보드를 이용하여 측정된 누설신호에 대해서 비교하여 나타낸 결과이다.

Table 2 AE parameter results obtained the AE system and the A/D board

System	AE system	A/D board
RMS	2.95E-02	1.88E-02
AE counts	51	35
AE energy	10.03	6.928

실제로 불량시료에서 발생하는 누설신호에 대해서 측정된 결과 AE시스템에서 계산된 데이터와 A/D보드를 이용하여 측정된 데이터는 위의 결과 다소 차이가 발생하지만 이는 장비 내에 내장되어 있는 소프트웨어적인 오차인 것으로 판단되며

이에 대한 보완적인 연구가 필요하며 수행중에 있다.

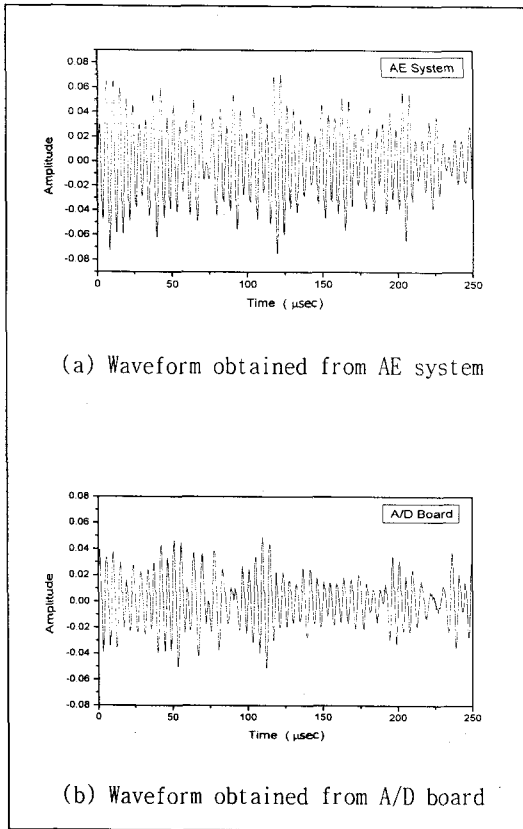


Fig. 15 AE waveform obtained the AE system and the A/D board

#### 4. 결론

본 연구에서는 음향방출(AE)기법을 이용하여 열교환기 누설검사를 위한 평가기법 및 그에 따른 누설검사기를 개발하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구에서는 열교환기 누설검사시 누설부의 여러 가지 결함크기에 따른 누설신호를 측정하는데 있어서 광대역 센서보다 공진형 센서를 사용하는 것이 더 타당함을 알 수 있었다. 또한 누설부에 대한 판정 알고리즘을 적용하는데 있어서 AE energy, AE count, 및 RMS값이 매우 유용한 AE 파라미터임을 확인하였으며 이에 대한 주파수 성분을 분석함으로써 보다 정확한 누설 발생원을

규명할 수 있었다. 개발된 AE시스템은 기존의 AE 시스템과 수신감도 및 안정성면에서 크게 차이가 나지 않았으며 향후 다양한 데이터 베이스로부터 보다 신뢰성 있는 시스템 구축을 위하여 알고리즘의 지속적인 보완이 요구된다. 본 연구에서 열교환기 누설검사를 위한 평가기술 방법 및 그에 따른 시스템을 개발하여 기존의 침지식 방식을 거치지 않고 온-라인 상태에서 누설여부를 모니터링 할 수 있음을 입증하였고 이를 이용한 평가법의 실제 현장 적용을 통하여 열교환기 품질 향상을 꾀할 수 있는 가능성을 제시하였다.

#### 참고문헌

- [1] 이민래, 이준현, 1999, "배관의 누설탐지를 위한 음향방출기법 적용에 관한 연구". 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A, pp. 284~289.
- [2] John Reason, 1987, "Acoustic Leak Detection Provides Early Warning of Piping Failure", in Power, pp. 372~373.
- [3] A.E. Lord, Jr., J.N. Densher, and R.M. Koerner, 1976, "Attenuation of Elastic Waves in Pipelines as Applied to Acoustic Emission Leak Detection", J. of Materials Evaluation, pp. 49~60.
- [4] J.M. Rajtar, R. Muthiah, 1997, "Pipeline Leak Detection System for Oil and Gas Flowlines", J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 105~109.
- [5] A.A. Pollock and S.Y. Hsu, 1982, "Leak Detection Using Acoustic Emission", J. of Acoustic Emission, Vol. 1, No. 4, pp. 237~240.
- [6] Nondestructive Testing Handbook Vol. 5, "Acoustic Emission testing", pp. 12~19, American Society for Nondestructive Testing. (1991)
- [7] 정희돈, 1994, "음향방출법의 공학적 이용을 위한 기초" 대한기계학회지 제 34권 제 1호, pp. 20~28.