

음향방출기법을 이용한 열교환기 누설검출시스템 개발

이 민 래* · 이 준 현†

(2001년 7월 16일 접수, 2002년 2월 7일 심사완료)

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

Min-Rae Lee and Joon-Hyun Lee

Key Words: Heat Exchanger(열교환기), Leak Detection(누설탐지), Acoustic Emission(음향방출), Leak Source Location(누설위치표정), PC-Based Leak Detection System(PC-기반 누설 검출 시스템)

Abstract

Acoustic emission(AE) technique has been applied to not only mechanical property testing but also on-line monitoring of the entire structure or a limit zone only. Although several AE devices have already been developed for on-line monitoring, the price of these systems is very high and it is difficult for the field to apply yet. In this study, we developed a specially designed PC-based leak detection system using A/D board. In this paper, AE technique 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 determining for the point of highest signal amplitude by comparing with several fixed sensors. In this paper, AE results are compared with the PC-based leak detection system using A/D board.

1. 서 론

최근 냉장고, 에어컨 등과 같은 냉동기기 및 건조기기의 사용이 급증함에 따라서 이들 제품에 사용되는 열교환기에 대한 설계뿐만 아니라 생산 단계에서 제품의 신뢰성 확보에 대한 관심이 중요하게 대두되고 있다.

일반적으로 에어컨에 사용되고 있는 응축기

(condenser)와 증발기(evaporator)는 대부분 핀-튜브(fin-tube)형의 직교류형 열교환기(cross flow heat exchanger)가 이용되고 있으며 기기의 고효율, 소형화 추세에 따라서 이들 열교환기에 사용되는 튜브도 점차 세경화 되고 있는 추세이다.

핀-튜브형 열교환기는 Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 핀과 구리튜브 및 곡관(U-band)으로 각각 구성되어 있으며, 구리튜브와 U-밴드는 브레이징(brazing) 접합에 의해서 제조된다. 그러나 열교환기의 브레이징 접합 공정 중에 발생하는 접합불량으로 인하여 튜브내의 미소결함에 의해서 누설 불량부가 발생하게 되어 제품의 신뢰성 확보에 큰 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 이

* 부산대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : johlee@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2430 FAX : (051)512-9835

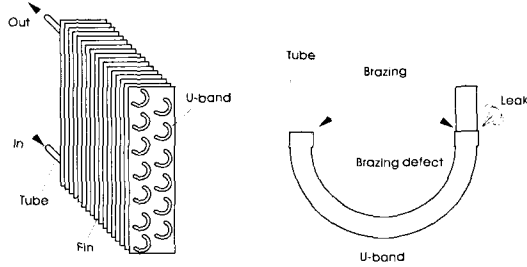


Fig. 1 Fin-tube type heat exchanger

와 같은 구리튜브 접합부에서의 결함 발생, 특히 누설 불량부의 문제점을 해결하기 위한 연구가 필수적이다.

일반적으로 브레이징 접합부에서 발생하는 미소결합의 경우 접합조건의 변화에 따라서 발생하는 결함부의 크기 및 형상 등이 균일하지 않고 특히, 결함 크기가 미소하기 때문에 육안검사로서는 그 검출이 불가능하다. 현재 국내에서는 이와 같은 누설 불량부의 검사를 위해서 침적식 검사 및 가스 검지 방식 등의 기술을 이용하여 누설 불량부의 검출에 노력을 경주하고 있으나 검출능의 확보에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 특히 국내에서 대부분 채택하고 있는 침적식 누설검사 방식의 경우는 검사 소요시간이 길 뿐만 아니라 육안검사에 의한 오차발생률이 높고 또 열교환기 내부에 수분이 침투할 가능성이 있기 때문에 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 검사 기술의 개발이 시급하다.

따라서 본 연구의 목적은 앞에서 언급한 침적식 누설검사 방식이 안고 있는 각종 문제점들을 해결하기 위한 새로운 검사기술을 확립하는데 있으며 이를 위하여 비파괴 평가수단으로 재료평가^(1,2) 및 온-라인 모니터링⁽³⁻⁸⁾에 주로 이용되고 있는 검사 방법 중의 하나인 음향방출(acoustic emission, AE) 기법⁽⁹⁾을 이용하여 열교환기 누설 불량부에 대한 모니터링 기구로서 타당성을 평가하고자 하였다.

2. 누설검사기법

음향방출(AE)기법은 비파괴 평가기법의 한 방법으로서 외란으로 인한 재료의 변형이나 파괴시에 발생하는 AE신호를 분석하여 결함검출 및 파

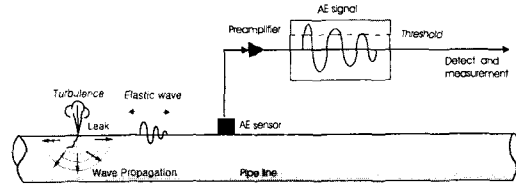


Fig. 2 Basic principle of the acoustic emission

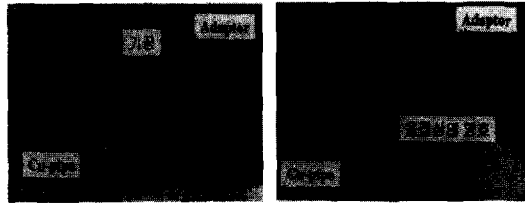


Fig. 3 Photograph of typical brazing defect

괴기구 규명과 같은 재료물성평가 뿐만 아니라 배관이나 압력용기등의 누설상태를 진단하고 안정성을 평가하는 온-라인 모니터링에 주로 이용되고 있다.

본 연구에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 열교환기의 브레이징 접합 불량에 의한 구리 튜브누설 불량부에서 냉매가스 누설시 발생하는 AE신호를 이용하여 누설 여부를 평가하고자 하였다. 즉, 누설 불량부에서 냉매가스 누설시 난류(turbulent)현상에 기인하여 구리 튜브상에 탄성파(elastic wave)를 유발시키게 되는데 이 때 발생하는 초음파 신호를 AE 압전센서를 이용하여 온-라인 상태에서 누설 불량부에서의 신호를 연속적으로 수신하여 그 신호특성을 분석함으로써 누설 여부를 판별할 수 있는 새로운 기술을 확립하고자 하였다. 이 방법은 기존의 방법(침적식, 가스 검지식)과는 달리 육안 검사에서 놓치기 쉬운 미세한 누설검사 뿐만 아니라 누설 유무에 대한 실시간 판정 및 검사 자동화가 가능한 장점이 있다. Fig. 3은 브레이징 용접에서 발생하는 전형적인 결함형태를 나타낸 사진이다.

한편 AE기법은 측정된 AE신호에 대해서 여러 가지 AE파라미터⁽¹⁰⁾를 이용하여 분석하는 방법으로서 AE카운트(AE count), AE이벤트(AE event), AE에너지(AE energy), AE진폭(AE amplitude) 및 AE상승시간(AE risetime) 등이 사용된다. AE신호는 일반적으로 돌발형 신호와 연속형 신호로 나눌 수 있는데 누설신호와 같은 연속형 신호의 경

우는 상기 AE파라미터를 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 따라서 이러한 경우에는 실효전압치(RMS, root mean square)값을 이용하여 평가하는 것이 일반적이다.⁽³⁾ 본 연구에서는 누설 불량부를 평가하기 위해서 AE카운트, AE에너지 및 RMS값과 같은 파라미터를 이용하여 평가하였다.

Fig. 4는 일반적인 AE신호에 대한 각각의 파라미터를 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 AE이벤트는 센서에 도달된 신호의 시작점과 끝점이 기준치를 넘는 범의에서 1개의 AE신호로서 정의하며 링다운 카운트(ringdown count)는 기준치를 넘는 모든 진폭에 대한 AE신호의 횟수로 정의한다. AE에너지는 식 (1)과 같이 정의되며 AE진폭과 상관관계가 있다.

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

여기서, $v(t)$ 는 센서의 출력전압이다. 한편 누설신호에 의해서 발생하는 연속형의 AE신호의 경우에는 앞서 언급한 바와 같이 실효전압치(RMS) 값을 적용할 수 있으며 시간축 (t)를 기준으로 한 AE파형을 $x(t)$ 로 가정하면 식 (2)와 같이 정의된다.

$$RMS = \sqrt{\int x^2(t)dt} \quad (2)$$

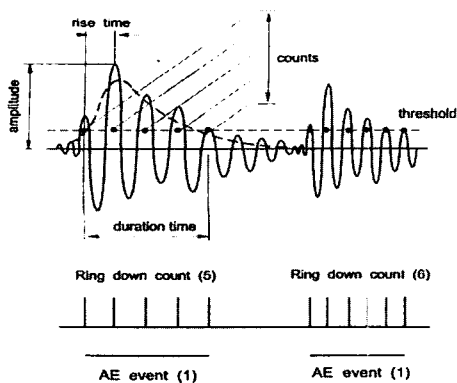


Fig. 4 Definition of AE parameters for simple waveform

3. 재료 및 실험방법

3.1 재료 및 실험방법

본 연구에서는 음향방출을 이용한 열교환기 누설검사기 개발에 있어서 누설에 따른 AE신호특성 및 AE적용의 주요인자 선정을 위하여 브레이징 접합부에 각각 40, 50, 60, 100 μ m의 인공결함을 가공하여 결함크기에 따른 AE신호 특성을 분석하였다. 먼저 기존의 AE장비를 이용하여 수물검사시 결함이 검출되는 열교환기 시료를 대상으로 예비실험을 수행하였다. Fig. 5는 열교환기 시료를 나타낸 그림이다.

예비실험에서 핀-튜브형 열교환기의 실제 수물

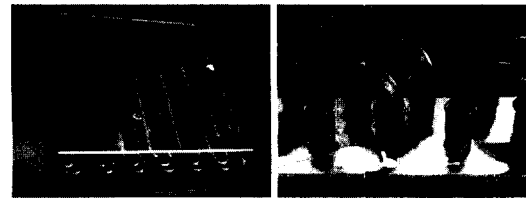


Fig. 5 Photograph of fin-tube type heat exchanger and typical U-band

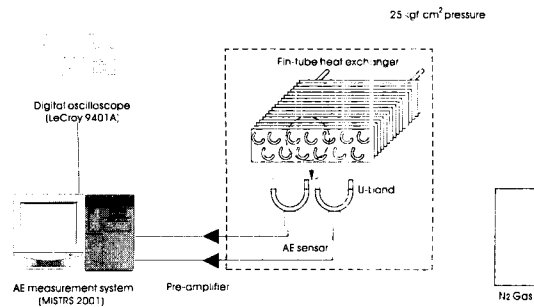


Fig. 6 Schematic diagram of instrumentation for leak test

Table 1 Specification and sensitivity of AE sensors

구 분	RESONANCE			WIDEBAND	
	R6	R15	PICO	MICRO30	WD
사용주파수 (kHz)	35-100	50-200	200-750	00-600	100-1000
공진주파수 (kHz)	90	150	500	300	650
센서직경 (mm)	19	18	5	10	18

검사시 결함이 검출된 용접부 용입불량시료와 스모그 검사시 결함이 검출된 불량시료를 사용하여 AE를 이용한 누설검사의 가능성을 평가하였다. Fig. 6은 실험의 전체적인 개요도를 나타낸 것으로서 그림에 나타난 바와 같이 누설 불량부에서 발생하는 AE신호 측정은 AE압진센서(PZT, piezoelectric type)를 사용하였으며 주파수 특성을 분석하기 위해서 공진 주파수가 각 기 다른 4개의 AE센서(R6, R15, Micro-30, WD)를 이용하였다. Table 1은 AE센서의 제원 및 사용주파수를 나타낸 것이다.

먼저 AE센서는 열교환기의 누설 불량부와 U밴드 사이의 가장자리에 부착하였으며 AE수신감도를 높이기 위하여 시험편에 접촉매질(coupling agent)를 바른 후 접착테이프로 압착하였다. 그리고 기계적인 잡음과 같은 불필요한 주변잡음(background noise)을 제거시키기 위하여 프리앰프(1220A)에서 100-1200kHz/100-300kHz의 대역필터(bandpass filter)를 사용하여 필터링 시켰으며 누설신호에 대한 AE파형 분석을 위해 디지털 오실로스코프를 이용하여 각 각의 결합신호를 측정하였다.

한편 AE측정은 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 질소압력용기로부터 질소가스를 25kgf/cm²의 압력으로 열교환기 내부에 주입시킨 후 열교환기 내부압력이 충분히 안정된 상태에서 측정하였다. 문턱값(threshold level)은 가스 주입전과 가스 주입후에 각각 잡음레벨을 측정하여 28dB(2.37mV)로 설정하였으며 예비실험을 통하여 최소 누설검출한계크기는 45-50 μ m이상임을 확인하였다.

Fig. 7은 누설판정을 위한 전체적인 알고리즘을 나타낸 것이다.

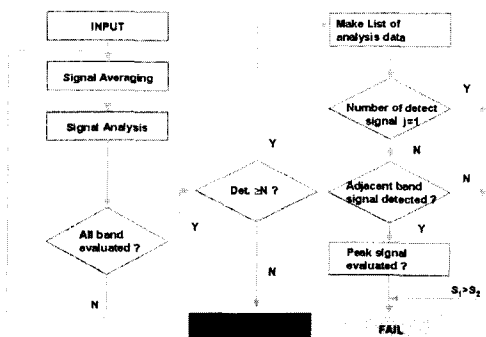


Fig. 7 Algorithm of acoustic emission leak test

3.2 누설검사기 시스템 구성

본 연구에서는 음향방출기법을 이용한 누설검사를 개발하고자 하였으며 Fig. 8은 A/D보드(Analog/Digital board)를 이용한 누설검사 시스템의 전체적인 개요도를 나타낸 것이다. 먼저 AE센서를 이용하여 측정된 누설신호는 프리앰프를 통하여 40dB로 증폭시켰으며 주변잡음을 제거하기 위하여 100-300kHz의 대역필터를 통하여 필터링 시켰다. 그런 다음 20MHz 샘플링의 고속 A/D보드를 통하여 신호를 취득한 후 누설신호에 대한 AE카운트, AE에너지 및 RMS값과 같은 AE파라미터들을 분석하여 누설여부를 평가하였다.

시스템의 전체 구성은 1)신호입력부, 2)신호증폭부 및 3)신호처리부로 구성하였으며 실제 구현된 신호입력부에서는 공압지그를 제작하여 열교환기와 AE센서를 고정하였으며 주위잡음 및 외부진동을 제거하기 위하여 방진 설계된 검사 테이블을 구현하였다.

4. 실험결과

4.1 거리 및 압력에 따른 AE신호특성

먼저 누설 불량부 위치와 센서간 거리 및 압력에 따른 RMS값과 주파수 변화특성을 분석하기 위하여 결함의 크기가 100 μ m인 경우에 대해서 결함으로부터 센서의 위치를 20, 50, 100mm로 변화시켜가면서 AE신호를 측정하였다.

Fig. 9는 R15공진형 센서를 사용하여 거리에 따른 AE신호 및 주파수 특성을 분석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 누설 불량부 위치로부터 거리가 멀수록 AE진폭이 점차적으로 감소하

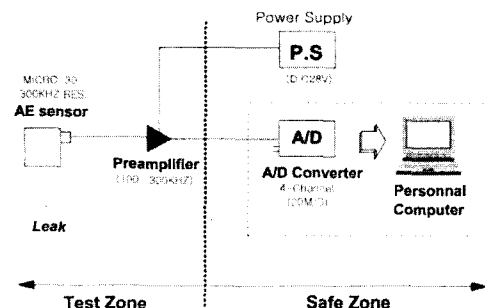


Fig. 8 Multichannel acoustic emission leak detection system

는 반면 FFT결과, 누설위치에 상관없이 누설주파수 특성은 130kHz와 250kHz의 특성을 나타내었다. 한편 40, 50, 60 μ m 경우 100 μ m와 마찬가지로 거리에 따른 AE진폭은 감소하지만 누설주파수 특성을 동일한 특성을 나타내었다. Fig. 10, 11은 렉변화에 따른 각 센서에서의 누설신호에 대한 누설 불량부와 AE센서 거리 및 열교환기 내부압 RMS값을 나타낸 것이다. Fig. 10의 결과에서 보는 바와 같이, 거리에 따른 감쇠영향으로 전반적으로 RMS값이 감소함을 알 수 있으며 공진형 센서가 광대역 센서보다 누설에 따른 검출능이 우수함을 알 수 있다. 한편 내부압력변화에 따른 누설신호는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 내부압력이 높을수록 검출능은 증가하였지만 일정 압력 이상(25kgf/cm²)에서는 뚜렷한 구분이 발생하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 시스템 구성시 누설신호측정은 공진형 타입의 Micro-30센서와 열교환기 내부 충전 압력은 현장에서 사용되고 있는 25kgf/cm²로 설정하였다.

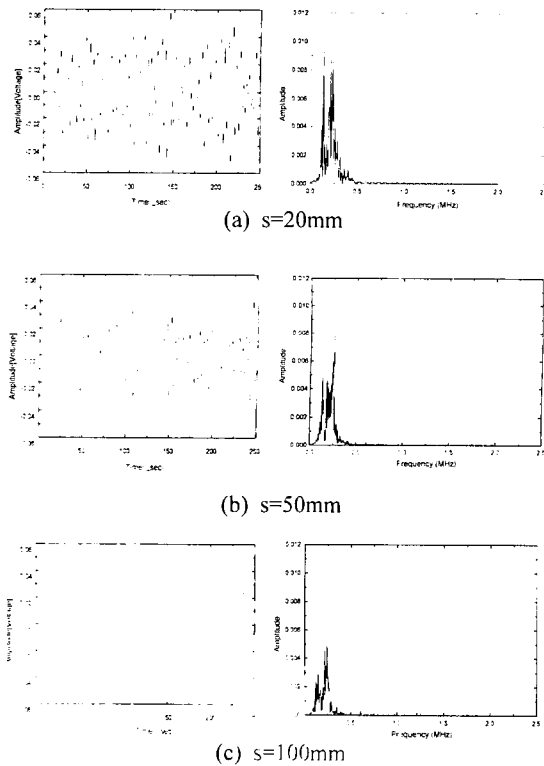


Fig. 9 Waveform and their FFT following to the distance between the leak point and sensor

4.2 누설 불량부 크기에 따른 AE신호특성

Fig. 12는 누설 불량부 크기 즉, 인공결함의 크기에 따른 AE신호 파형 및 주파수 분석결과이다. Fig. 12(a)의 경우는 누설 불량부 결함크기가 100 μ m인 경우로서 AE진폭이 큰 연속형 신호가 검출되었으며 누설 불량부의 크기가 작을수록 그림에 나타난 바와 같이(Fig. 12(b,c)) AE진폭이 감소함을 알 수 있다. 그리고 이에 대한 각 누설 불량부의 크기에 따른 주파수 특성을 살펴보면 누설 크기에 관계없이 130kHz, 250kHz의 특성을 나타내었다. 이는 앞선 4.1의 결과와 같이 누설위치뿐만 아니라 누설크기에 상관없이 누설주파수 특성은 일정함을 알 수 있다. 한편 본 연구에서는 누설 불량부의 결함크기가 50 μ m이하에서는 검출능이 현저하게 저하됨을 알 수 있었다.

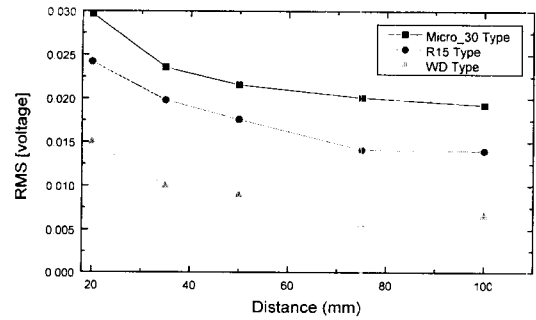


Fig. 10 RMS value variation following to the pressure and distance between the leak point and sensor (pressure=25kgf/cm²)

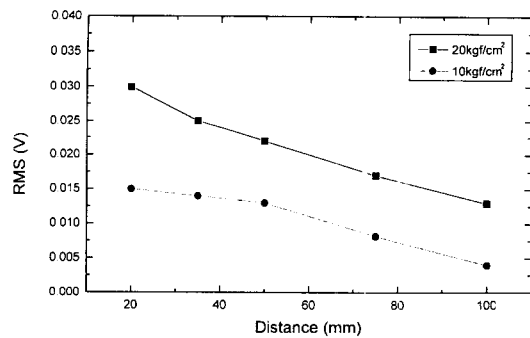


Fig. 11 RMS value variation following to the pressure and distance between the leak point and sensor

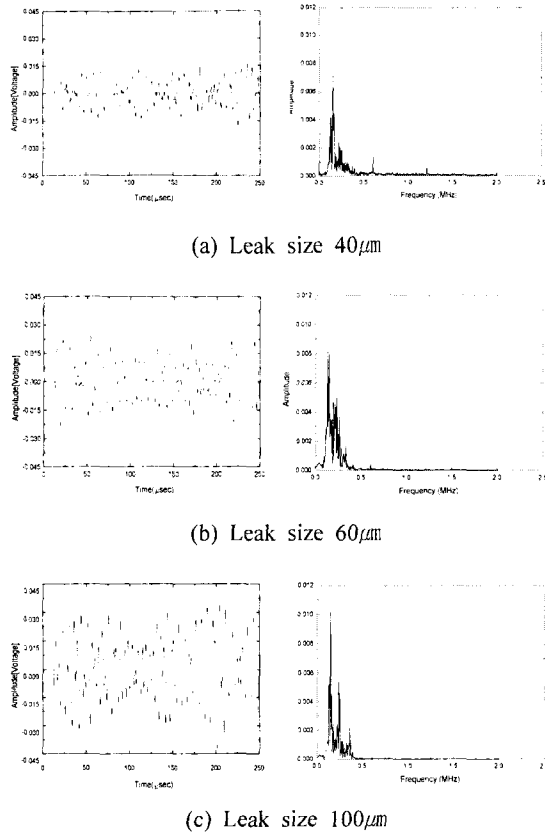


Fig. 12 Waveform and their FFT following to the leak size

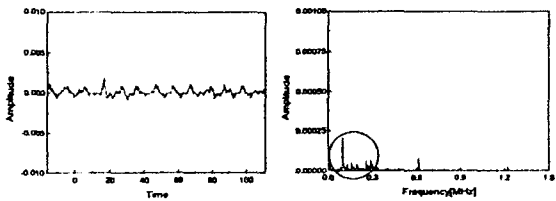


Fig. 13 Waveform and their FFT of background noise

Fig. 13은 주변잡음 성분에 대한 AE파형과 주파수분석 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 노이즈로 인한 AE진폭은 아주 미세하였으며, 주파수특성은 누설 불량부에 대한 주파수특성과 비교해 볼 때 약 100kHz 부근에서 최대치를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 전자 현미경을 이용한 누설 불량부의 인공결합크기를 나타낸 사진이다.

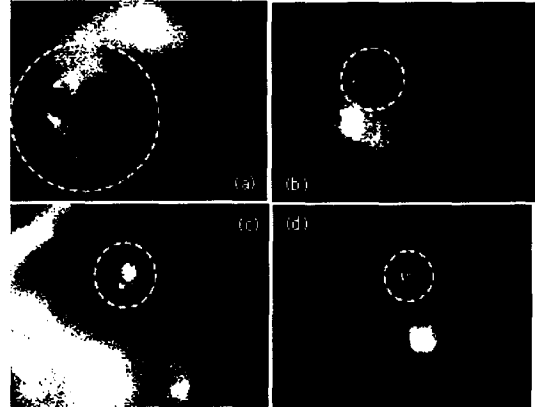


Fig. 14 Typical micrographs of the leak size: (a) 100µm (b) 60µm (c) 50µm (d) 40µm

4.3 A/D보드를 이용한 AE시스템 개발

본 연구에서는 음향방출기법을 이용하여 열교환기 누설검사를 위한 현장 적용형 AE시스템을 개발하였다. 기존의 AE장비는 대단히 고가일 뿐만 아니라 실제 현장에서는 적용하기에는 설치에 따른 어려움과 낭비적인 요소가 많다.

따라서 본 연구에서는 A/D보드를 이용한 누설검사 시스템을 구축하였다. 개발된 시스템은 신호를 입력하기 위한 입력부와 입력된 신호를 증폭하기 위한 증폭부, 그리고 획득한 신호를 신호를 처리하기 위한 신호처리부로 각각 구성되어 있다. 신호입력부에 해당하는 AE센서는 공진형센서(Micro-30, R15)를 사용하였으며 증폭부에 해당하는 프리앰프는 기존의 프리앰프(1220A)에 외부 전원(28V)를 공급하여 기존의 AE장비와 동일한 수신감도를 나타내도록 하였다. 그리고 전기적인 노이즈를 제거하기 위하여 프리앰프는 시일딩 처리를 하였다. 한편 프리앰프에서 증폭된 AE신호는 A/D보드를 통하여 AE파형 및 주파수특성을 분석하여 누설 알고리즘을 통하여 누설판정여부를 평가하였다. Fig. 15는 기존의 AE시스템과 A/D보드사이의 오차정도를 측정하기 위하여 함수발생기(function generator)를 사용하여 임의의 파형을 입력시켜 각각의 시스템에서 출력되는 신호의 크기를 분석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 AE시스템을 통한 출력값이 A/D보드를 이용하여 구축한 시스템 출력값보다 약 4dB 정도 높게 나타났으며 이는 실제 동일 누설 불량부 측

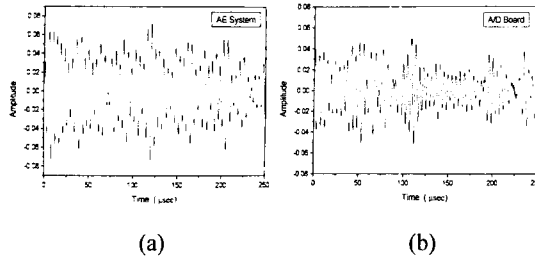


Fig. 15 Waveform obtained from (a) AE system and (b) A/D board

Table 2 AE Parameters results in AE system and A/D board

Sensor	AE System	A/D Board
RMS	2.95×10^{-2}	1.88×10^{-2}
AE Counts	51	35
AE Energy	10.03	6.928

정시에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

Table 2는 동일 누설 불량부에 대해서 기존의 AE측정장비와 A/D보드를 이용하여 측정한 AE파라미터 비교분석결과의 한 예(누설결함크기: 60 μm)이다. 실제 기존의 AE시스템에서 계산된 데이터와 다소 차이는 발생하지만 이는 장비내의 소프트웨어적인 오차인 것으로 판단되며 이에 대한 보완적인 연구가 필요하며 현재 수행 중에 있다.

5. 결론

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

본 연구에서는 열교환기 누설검사시 누설부의 여러가지 결함크기에 따른 누설 신호를 측정하는데 있어서 광대역 센서보다 공진형 센서를 사용하는 것이 더 타당함을 알 수 있었다. 또한 누설 불량부에 대한 판정 알고리즘을 적용하는데 있어서 AE에너지, AE카운트 및 실효전압치(RMS)값이 매우 유용한 AE 파라미터임을 확인하였으며

또한 누설신호에 대한 주파수 성분을 분석함으로써 보다 정확한 누설 발생원을 규명할 수 있었다.

개발된 AE 시스템은 기존의 AE 시스템과 수신감도 및 안정성 면에서 크게 차이가 나지 않았으며 향후 다양한 데이터 베이스로부터 보다 신뢰성 있는 시스템 구축을 위하여 알고리즘의 지속적인 보완이 요구된다.

본 연구에서 열교환기 누설검사를 위한 평가기법 및 그에 따른 시스템을 개발하여 기존의 침적식 방식을 거치지 않고 온-라인 상태에서 누설여부를 모니터링 할 수 있음을 입증하였고 이를 이용한 새로운 누설평가법의 실제 현장 적용을 통하여 열교환기 품질향상을 꾀할 수 있는 가능성을 제시하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 성균관 대학교 산업설비 안전성 연구센터의 논문 지원비에 의하여 수행된 연구결과임.

참고문헌

- (1) 이진경, 이준현, 이민래, 최홍섭, 2000, "Cocure/Precure 경화공정에 의해 제조된 Carbon/Epoxy 복합재료의 미시적 파손거동에 대한 AE특성," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 24, No. 10, pp. 2520~2528.
- (2) 이진경, 송상현, 이준현, 2001, "알루미늄 세라믹에 대한 열충격 손상의 비파괴적 평가," 대한기계학회 논문집 A권, Vol. 25, No. 8, pp. 1189~1196.
- (3) 이민래, 이준현, 1999, "배관의 누설탐지를 위한 음향방출기법 적용에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회 논문집 A권, pp. 284~289.
- (4) 이준현, 이민래, 손명환, 권영길, 2000, "음향방출기법을 이용한 극저온 환경하에서 초전도체자코일의 웬칭탐지 적용에 관한 연구," 대한기계학회논문집 A권, Vol. 24, No. 4, pp. 858~865.
- (5) John Reason, 1987, "Acoustic Leak Detection Provides Early Warning of Piping Failure," in *Power*, pp. 372~373.

- (6) Lord, A.E., Jr., Densher, J.N. and Koerner, R.M., 1976, "Attenuation of Elastic Waves in Pipelines as Applied to Acoustic Emission Leak Detection," *J. of Materials Evaluation*, pp. 49~60.
- (7) Rajtar, J.M. and Muthiah, R., 1997, "Pipeline Leak Detection System for Oil and Gas Flowlines," *J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 105~109.
- (8) Pollock, A.A. and Hsu, S.Y., 1982, "Leak Detection Using Acoustic Emission," *J. of Acoustic Emission*, Vol. 1, No. 4, pp. 237~240.
- (9) Nondestructive Testing Handbook Vol. 5, 1991, "Acoustic Emission Testing," pp. 12~19, American Society for Nondestructive Testing.
- (10) 정희돈, 1994, "음향방출기법의 공학적 이용을 위한 기초," 대한기계학회지 제 34권 제 1호, pp. 20~28.