

# 음향방출 신호를 이용한 압력용기의 누설 검사기법 개발

이성재\*, 정연식<sup>+</sup>, 강명창<sup>++</sup>, 김정석<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2004. 1. 30, 심사완료일 2004. 5. 4.)

## Leak Detection Technique of Pressure Vessel Using Acoustic Emission Signal

S. J. Lee\*, Y. S. Jung<sup>+</sup>, M. C. Kang<sup>++</sup>, J. S. Kim<sup>+++</sup>

### Abstract

In this study, the leak detection technique of pressure vessel by using acoustic emission(AE) signal is suggested experimentally. The leak of pressure vessel is located at the welding line due to welding defects. we measured the AE signal using R15I sensor, and examined the AE parameters in leak condition. It is investigated that the mean value of AE signal is dependent on leak source location. So the absolute mean value of AE signal is adopted as dominant AE parameter. We proposed leak detection algorithm using AE signal mean value for monitoring the leak source location.

**Key Words :** Pressure Vessel(압력용기), Leak Detection(누설검사), Acoustic Emission Signal(음향방출신호)

## 1. 서론

압력용기란 금속 또는 비금속 소재를 이용하여 비교적 큰 압력에 견딜 수 있게 설계한 밀폐용기로, 사용 목적에 따라서, 유류 저장용, 액화 가스 수송용, 변전기용, 그리고 원자력 발전소용 등으로 나눌 수가 있으며, 산업이 발전할수록 광범위한 분야에서 사용되어지고 있다<sup>(1)</sup>.

압력용기는 주로 압연판재 등을 이용하여 기계가공을 거친 후 용접 가공을 통해서 제작되어진다. 그러나 제작 중에 발생한 잠재적인 용접결합 등으로 인해서 파손이 일어나

며 결과적으로 인명피해와 큰 재산 피해를 유발하게 된다. 파손을 방지하기 위해서 압력용기의 제작완료 시 육안검사 및 수압, 기압 테스트 등으로 누설의 위치를 검사하고, 제품 사용 중에는 초음파 탐상, 자분 탐상검사 등을 이용하여 압력용기의 내부 및 외부의 결함을 검사하고 있다. 이러한 방법들은 검사에 많은 시간이 소비되므로 표본조사를 행하게 되어 전량의 정확한 검사가 힘들며 또한 비용이 많이 드는 단점이 있다. 이러한 이유로 선진국 등에서는 음향방출(Acoustic Emission)신호를 이용한 압력용기의 검사법 개발에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다. 그러나, 대부

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

+ 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

++ 교신저자, 부산대학교 정밀정형 및 급형가공 연구소 (kangmc@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

+++ 부산대학교 기계공학부

본의 연구들은 압력용기의 사용 중에 발생한 결함의 진전 정도 측정에 응용되고 있는 실정이다<sup>(2,3)</sup>.

본 논문에서는 압력용기의 제작 중, 탄소아크 맞대기 용접을 행한 부위에서 발생하는 누설을 음향 방출법을 이용한 검사하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 논문을 위해서 구성된 실험 장치의 개략도를 나타내며, Table 1은 구성된 실험 장비들의 규격을 나타내고 있다.

본 장치에서는 50kHz~20MHz의 고주파 특성을 가지는 음향

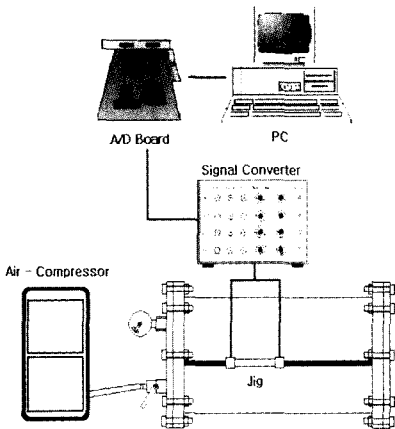


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

Table 1 Specification of experimental instruments

Instrument	Specification
A/D Board	12bit 20MHz(Gagescope CS512)
Pre-Amplifier	1220A(PAC) Band Pass Filter : 100~1200kHz
AE Sensor	Wide Band(PAC) : Resonant type R151 : Internal Pre-Amp. type
Digital Oscilloscope	12bit 400MHz
Multi-RMS Converter	Time constant : 0.25ms

방출 신호를 처리하기 위해서 고속, 대용량의 샘플링이 가능한 대용량 A/D 변환기를 이용하여 1MHz로 샘플링 주파수를 정하였다. 그리고, 신호원으로부터 발생한 신호의 증폭 및 주변 환경의 영향들로 인해서 발생한 잡음을 제거하기 위해서 전치증폭기와 센서의 측정 주파수에 대응하는 필터를 이용하였다. 또한, 곡률을 가진 압력용기의 외벽에 센서를 부착하기 위해서 센서의 크기 및 부착위치를 고려한 마그네틱 지그(Magnetic Jig)를 제작하여 센서의 접촉을 원활하게 하였다.

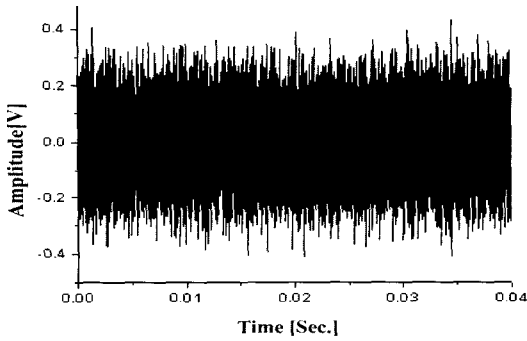
### 2.2 실험방법

본 논문을 수행하기 위해서 외경 206mm, 높이 350mm, 두께 6.5mm의 프로토타입 압력용기를 제작하였고, 실험의 정확성을 위해서 용접부위 내부에 존재하는 기공(blowhole)과 같은 결함들은 그라인딩을 행한 후 재용접을 통해서 제거하였다. 이러한 용접 라인 상에 누설 신호를 획득하기 위해서  $\Phi 1.7\text{mm}$ 의 임의 누설공을 가공하였다. 그리고, 압축기를 사용하여 압력용기의 헤드 부분에 부착된 흡입공을 통해서 압축공기를 압력용기로 유입시켰으며, 압력용기 내부의 압력을 측정하기 위해서 압력용기의 상단에 압력계를 장착하였다. 그리고, 센서와 측정 부위표면 사이에 그리스를 도포하여 신호원으로부터 발생한 신호의 충분한 전달을 기하였다.

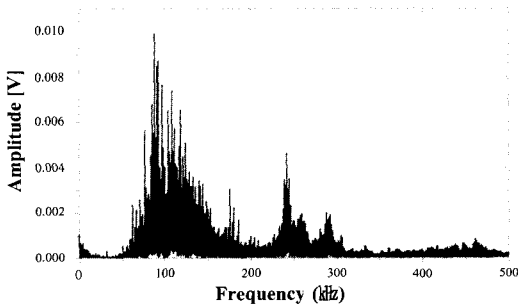
음향 방출법을 이용하여 대상체를 검사하기 위해서는 대상체에서 발생하는 결함의 종류와 결함이 가지는 음향방출 신호의 주파수를 먼저 측정 하는 것이 중요하다. 그 이유는 음향방출 신호의 주파수를 측정하여 주주파수 영역에서 공진을 하는 센서를 선정하여야 측정하고자 하는 결함에 대해 보다 정확한 측정이 가능하기 때문이다.

따라서, 광대역 센서를 이용하여 이미 제작된 누설 결함에 대한 신호를 획득하고, 주파수를 측정하였다. Fig. 2의 (a)는 측정된 누설 신호를 나타내고, (b)는 상용프로그램을 통해서 주파수 분석을 행한 결과를 나타내고 있다.

압력용기 상에서 전파되는 누설신호의 특성을 파악하기 위해서 누설 위치로부터 압력용기의 외벽의 각 부분들을 세분하여 누설 신호를 측정하였고, 용접 라인 상에도 동일하게 신호 측정을 행하였다. 그리고, 압력용기 내부의 압력 변화에 따른 신호의 감도를 측정하여 누설신호를 획득하기 위한 적정 내부 압력을 정하였다. 또, 압력의 충전 중에 발생된 누설의 신호를 관찰하기 위해서 누설을 밀폐한 후 적정 압력에서 밀폐를 제거하여 신호를 획득하였다.



(a) AE raw signal



(b) FFT analysis

Fig. 2 Characteristic of AE signal by pressure vessel leak

### 3. 실험결과 및 고찰

음향방출 신호는 연속형과 돌발형으로 분류할 수 있는데, Fig. 2의 (a)에서 관찰된 압력용기의 누설신호는 전형적인 연속형의 형태를 나타내고 있다. 그리고, 측정된 신호의 주파수는 약 100kHz임을 알 수 있다. 따라서, 누설 신호를 측정하기 위해서 많이 사용되고 있는 150kHz에서 공진 주파수를 가지는 R151(PAC사)를 선택하여 신호를 측정하였다.

측정된 누설 신호는 연속형으로 시간차를 이용하여 신호원 위치추정을 할 수가 없다. 따라서, 누설 위치로부터 측정 지점까지의 신호전파 특성을 확인하기 위해서 신호의 절대 평균값을 위치추정용 변수로 선정하였다. 음향방출 신호의 절대 평균값은 에너지를 사용하는 것에 비해서 낮은 신호값에서, 즉 신호원에서 센서까지 비교적 먼 거리에서도 신호의 측정이 가능하기 때문에 더 효과적이다.

음향 방출법을 이용하여 누설신호를 획득하기 위해서 압력용기 내부의 압력 및 압력조건을 적절하게 선택하는 것이 필요하다. 만일 내압이 너무 낮으면, 음향방출 신호가 발생

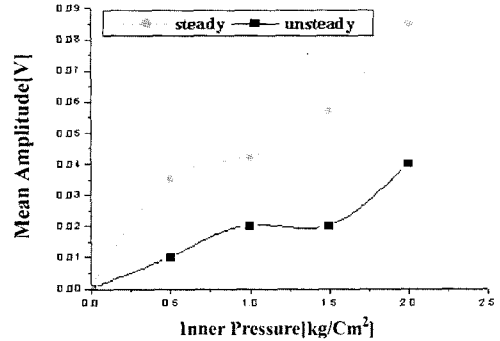


Fig. 3 AE mean amplitude according to inner pressure state of vessel

하지 않고, 내압이 너무 높으면, 내압의 충전 시간이 너무 길어서 검사 시간을 증가시키고, 검사 도중 압력용기의 파손을 유발할 수도 있다. 적정 내압의 조사를 위해서 누설부로부터 외경 방향으로 50mm 떨어진 곳에 센서를 부착하여 신호를 획득하였고, 유입 공기의 양과 누설 공기의 양이 같아서 내압이 균일하게 유지될 때를 정상상태(steady)로 하고, 누설만 존재하고 유입되는 압력이 없을 때를 비정상상태(unsteady)로 정의하였다. Fig. 3에는 음향방출 신호의 절대평균 값을 나타내었고, 정상상태일 때가 비정상상태에 비해서 낮은 내압에서도 높은 신호값을 나타내고 있다.

이러한 이유는 정상상태를 유지하기 위해서 압축공기를 유입할 때 발생하는 신호와 누설 시에 발생하는 신호가 중첩이 되기 때문이며, 비정상상태에서는 내압이 2.0kg/cm<sup>2</sup> 이상이 될 때, 흡입 공기에 의한 신호의 증가가 없는 신뢰성이 있는 신호를 획득할 수가 있었다. 따라서, 누설 실험들은 비정상상태, 2.0kg/cm<sup>2</sup>의 내압에서 수행되었다.

압력용기 상에서 전파되는 누설신호의 특성을 파악하기 위해서 신호원으로부터 압력용기 외부에 부착된 센서까지의 거리를 변화시켜서 신호를 측정하고 분석한 결과, 측정된 신호의 절대 평균값이 신호의 전파거리와 누설량과의 관계를 잘 나타내는 변수임을 알 수 있었으며, 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 나타난 바와 같이 신호의 전파거리, 즉 신호원으로부터 측정 거리가 멀어짐에 따라서 압력용기가 가지는 곡률에 의해서 평균값이 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이러한 이유는 신호가 전파 매질을 통해서 전파될 때, 매질 내부의 조직 및 형상 등에 의해서 분산, 감쇠, 반사되기 때문이며<sup>(4-6)</sup>, 거리가 150mm 이후에서는 거의 변화가 없고 이것은 본 연구를 위해서 만들어진 압력용기 외벽의 곡

를로 인한 신호의 감쇠로 누설에 의한 신호의 측정 한계를 나타내고 있다.

용접라인 상에서 누설로부터의 거리에 따른 신호를 획득한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다.

Fig. 4, 5의 결과에서 용접라인 상에서 전파되는 신호는 외벽의 신호에 비해서 거리에 따라서 경향이 보임을 알 수 있다. 그리고 압력용기에서 누설이 주로 발생하는 곳이 용접라인이기 때문에 누설 검사를 위한 센서 부착위치를 용접라인 상으로 정하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

Fig. 5의 결과를 곡선 보간하여 센서로부터 신호원까지의 거리  $y$ 를 계산하는 식을 정리하면 다음과 같다.

$$y = 302.86 - 3.865 \times 10^4 x + 2.58 \times 10^6 x^2 - 6.399 \times 10^7 x^3 \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 AE 절대 평균값[V],  $y$ 는 거리[mm]

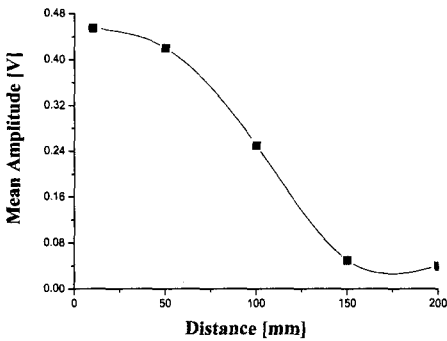


Fig. 4 Measured AE mean amplitude on the outer wall of pressure vessel

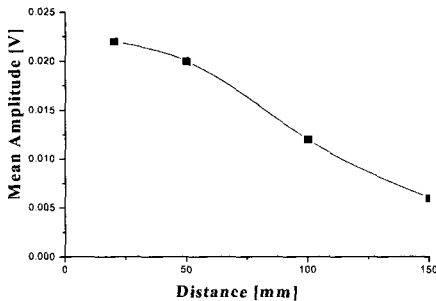


Fig. 5 Measured AE mean amplitude on the weld line

용접라인 상에서 전파되는 신호는 외경 방향으로 전파되는 신호에 비해 감쇠가 크게 발생하여 평균값이 낮게 나타나지만, 압력용기 형상의 영향을 적게 받아서 신호중첩 등이 없이 누설 신호만을 측정할 수 있다. 따라서, Fig. 6에서 보여지는 것과 같은 2-센서 부착법을 사용하여 누설시의 AE신호를 측정하였으며, Fig. 7과 같은 누설 검사 알고리즘을 구성하였다.

알고리즘의 구성원리는 센서 1과 2사이 거리에 대한 누설 신호 감쇠의 설정값(Threshold)을 사전에 정의하고, 센서들에서 측정되는 절대 평균값과 비교하여 누설의 위치를 판단하게 된다.

Case 1(센서들 사이에 존재) : 최소값 < 설정값

Case 2(센서들 외부에 존재) : 최소값 > 설정값

Case 3(센서들 중앙에 존재) : 최소값 = 최대값

Case 4(누설이 없음) : 최대값 = 최소값 = 0

그리고, 이렇게 분류된 각 경우들에 대해서 식(1)을 이용하여 누설의 위치를 계산한다.

알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여 Fig. 6에서 센서 1로부터의 거리 L1을 변화시켜서 실험을 행하였고, 그 결과는 Table 2와 같다.

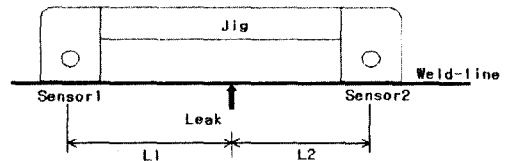


Fig. 6 Leak detection using two-sensors

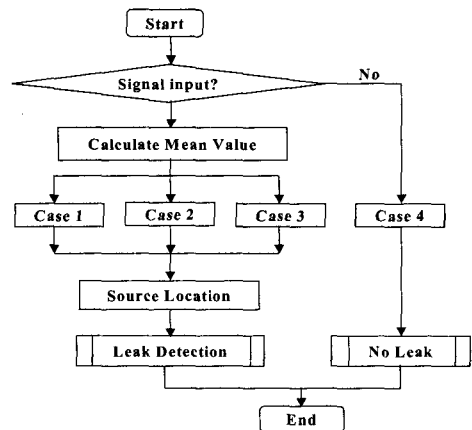


Fig. 7 Leak detection algorithm

Table 2 Results of leak prediction

	Experiment	Prediction	Error(%)
Distance(mm)	50	44.8	10.40
	100	99.5	0.52
	200	198.7	0.65

센서 1과 2사이의 거리를 150mm로 하였고, 센서 2의 신호를 이용하여 누설위치의 방향을 결정하였다. 계산된 식들의 결과는 실제값보다 적게 나타났고, 실제 거리가 50mm일 때 가장 큰 오차를 나타내고 있다. 이것은 계산식을 측정거리가 150mm일 때를 기준으로하여 보간하였기 때문인 것으로 사료된다.

본 논문에서는 내압을 2.0kg/cm<sup>2</sup>으로 하여 누설을 만들었기 때문에, 미약한 신호의 감쇠가 크게 발생한 것이며, 실제 현장에서는 본 연구에 사용되었던 압력용기에서보다 큰 12 kg/cm<sup>2</sup>정도의 내압으로 기압시험을 행하고 있다. 따라서, 실제 제품 시험검사에 본 연구에서 개발된 알고리즘을 적용한다면, 오차율이 줄어 들 것으로 사료된다. 그리고, 용접부에 하나의 누설이 존재할 때만을 예측한 것인데, 만일 누설이 여러 개가 존재한다면, 신호의 값들이 중첩 등에 의해서 신호의 경향이 복잡하게 나타날 것이며, 각 부위에 더 많은 센서들을 부착하여 신호원 위치 추정 실험을 행해야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 논문을 통해서 얻어진 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 압력용기의 누설에 대한 음향방출 주파수는 100kHz이고, 연속형의 신호형태를 가진다.
- (2) 제작된 압력용기에서 음향방출 신호를 측정하기 위한 적정 내압은 2.0kg/cm<sup>2</sup> 이상이다.
- (3) 누설을 검사하기 위한 음향방출 신호의 변수로 절대 평균값이 타당하다.
- (4) 누설 신호의 감쇠에 대한 보간식을 구하여 신호원 추정

이 가능함을 보였다.

- (5) 음향방출 신호의 감쇠는 외경의 곡률에 대해서 많은 영향을 받는다.
- (6) 누설 신호를 획득하기 위해서 검사 기법 및 알고리즘을 개발하였으며, 유용성 검사를 통해서 오차율이 만족할 수준에 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

- (1) Fouler, T. J., 1988, "Acoustic Emission Testing of Vessel," *Chemical Engineering Progress(CEP)*, Vol. 84, No. 9, pp. 59~70.
- (2) Bhuyan, G. S., Sperling, E. J., and Shen, G., 1999, "Prediction of Failure Behavior of a welded Pressure Vessel Containing Flaws During a Hydrogen-Charged Burst Test," *ASME*, Vol. 121, pp. 246~251.
- (3) Surgeon, M., and Wevers, M., 1999, "One sensor linear location of acoustic emission using plate wave theories," *Journal of Materials Science & Engineering*, A265, pp. 254~261.
- (4) Choi, N. S., and Takahashi, K., 1998, "Effects of Wave Attenuation on the Acoustic Emission Amplitude Distribution of Injection-Molded Fiber/Plastic Composites," *Journal of Ultrasonics*, Vol. 18, pp. 1~9.
- (5) Maji, A. K., and Kratochvil, T., 1997, "Acoustic Emission Source Location Using Lamb Wave Modes," *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 154~161.
- (6) Lu, X. and Grabec, I., 1998, "Use of an automatic modeled and a small receiver array for acoustic emission (AE) source location," *Journal of Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 539~547.