

음향방출 신호원의 위치추정 기법

이성재*, 김정석*, 강명창*, 정연식**,정규동***

Prediction technology on the source location of acoustic emission signal

S. J. Lee*, J. S. Kim+, M. C. Kang+, Y. S. Jung**, K. D. Jung***

Abstract

This study deals with the source location method of defect which can be occurred in structure. The existing methods was very difficult to be applied to predict it, because of using very complex numerical formula.

The triangulation method which was proposed in this study can predict the source location predicted easily with small amount of data. Wave arrival time data can be directly converted into source-sensor distance is known. For this purpose, the propagation velocity was measured by Rayleigh wave, and the propagation behavior was analyzed. For the consideration of jointed part in structure, the source location method was applied to the welded workpieces. The signal propagation velocity was measured in welding part for the purpose of application to the part, and the revised algorithm of source location was proposed.

Key Words : AE Signal(음향방출 신호), Pencil Lead Break Signal(PLB 신호), Source Location(신호원 위치)

1. 서 론

많은 구조물들은 판재를 변형 또는 가공하여 제작되어지고 있다. 그리고, 이러한 구조물들의 제작 과정에서 발생할 수 있는 미세한 결함 또는 파손 등은 구조물의 사용 중에 가해지는 피로하중 및 집중

하중으로 인해서 수명이 단축될 수 있으며, 결국은 파손을 초래할 수 있다⁽¹⁾. 이러한 이유로 수년 전부터 많은 연구자들은 파괴 및 비파괴 검사기법들을 이용하여 구조물에 존재하는 결함의 발생시기, 발생정도 및 발생 위치를 측정하고 예측하고자 하였다⁽²⁻³⁾. 본 연구에서는 음향방출법(Acoustic Emission, AE)을 이용하여 2차원 평판에서의 신호 발생원 위치 추정을 수행하고자 하였다. 이를 위해서 먼저 평판에 하나 이상의 센서를 부착하여 충격하중 및 PencilLead Break(Hsu-Neilsen Source) 등의 신호원으로부터 발생하는 AE 신호의 전파

* 주저자, 부산대학교 정밀기계공학과(leesj-59@hanmail.net)
주소: 606-735 부산시 금정구 장전동 산 30번지
+ 부산대학교 기계공학부
++ 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
+++ (주)고려제강

거동을 분석⁽⁴⁾하였고, 신호원 위치 추정을 위한 전파 속도를 구하기 위해서 신호를 분리⁽³⁾, 적정 전파모드를 선택하였다. 이를 이용하여 사용된 각 센서들의 특성을 파악 하였다. 또한, 결함의 발생위치 추정기법을 순수 평판 소재 및 평판에 용접부가 존재하는 평판에 대해서 적용하여 제안된 알고리즘의 유용성 검증 및 용접부로 인해 발생할 수 있는 위치 추정 오차를 보정하는 기법을 제안하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구를 위해서 구성된 실험 장치의 개략도를 나타내며, 본 장치에서는 고주파 특성을 가지는 음향방출 신호를 처리하기 위해서 고분해능·대용량의 A/D 변환장치가 필요하며 이를 위해서 르크로이(LeCroy)사에서 제작된 디지털 오실로스코프 9310A를 사용하였다.

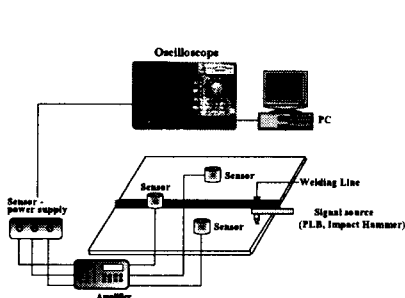


Fig. 1 Experimental set-up for source location

Table. 1은 구성된 실험 장비들의 사양을 나타내고 있다.

Table 1 Specifications of experimental instruments

Instrument	Specification
Digital Oscilloscope	LeCroy 9310A
AE Sensor	R15I : Resonant type WD AF52 : WideBand type
Pre-Amplifier	1220A(PAC) Bandpass Filter : 100~1200kHz
RMS Converter	Time constant : 0.25ms
Power Supply	24V(Switching type)

본 연구에서 사용된 실험 시편은 가로×세로 600mm×600mm이고, 두께가 8mm인 일반 구조용 압연 강재를 사용하였고, 소재는 KS규격 D 3502로 명시되어 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 전파모드를 고려한 전파속도 측정 및 센서 특성평가

신호원에 대한 위치추정을 수행하기 위해 사용되는 가장 유용한 AE 파라메타는 시간지연이다. 시간지연은 돌발형 신호에서 보여지며, 시간지연을 이용하여 전파속도를 구할 수가 있다.

이러한 돌발형 신호를 발생시키기 위해서 신호원으로 Pencil Lead Break(PLB)를 이용하였다. Fig. 2와 같이 신호원으로부터 100mm 떨어진 위치에 WD AF52 센서를 배치하여 트리거 센서로써 이용하였고, 트리거 센서로부터 100mm 떨어진 위치에 R15I를 배치하여 각 센서의 특성을 평가하였다.

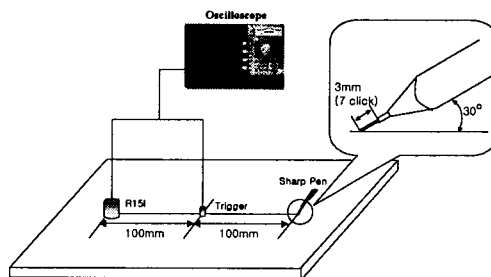


Fig. 2 characteristics of R15I sensors using PLB source

2.2.2 충격하중의 전파특성 평가

실제 평판으로 구성된 구조물이 받는 충격하중에 의해 발생하는 AE 신호의 전파거동을 관찰하기 위해서 충격망치(Impact Hammer)를 이용하였다. 센서와 충격하중을 가하는 지점과의 사이거리를 50mm부터 300mm까지 50mm 단위로 증가시켜가며 신호를 측정하여 충격신호의 시간지연 및 전파속도를 측정하였다. 이렇게 발생한 신호로부터 주파수 및 하중과 전파속도와의 관계를 분석하였으며, 본 연구에서 위치추정을 위한 신호원으로 사용되어진 PLB 신호원과 특성을 비교, 분석하였다.

2.2.3 용접부가 없는 소재에 대한 신호원 위치추정 평판에서의 이차원 신호원 위치추정을 위해서 Fig. 3에 나타난 것과 같이 센서들을 배열시키고 (a)와 같이 신호원이 배열 내부에 존재할 때와 (b)와 같이 외부에 존재할 때의 경우로 나누어서 실시하였다.

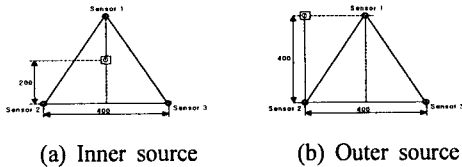


Fig. 3 Two dimensional source location using 3 sensors

신호의 분석을 종파와 표면파로 분리하여서 수행하였고, 신호원 위치추정을 위한 전파속도는 표면파의 것을 취하였다. 표면파를 검출하기 위해서 하중 발생 지점에 트리거 센서를 부착하여 표면파의 시작시점과 검출위치에서의 도착시점을 구분하였고, 이러한 시점들에 대한 시간차를 이용하여 전파속도를 구하였다.

2.2.4 용접부가 있는 소재에서의 신호원 위치추정

실제 구조물에서 접합부는 AE 신호의 전파에서 감쇠를 일으키는 큰 변수로 작용한다. 용접부가 존재할 때의 이차원 신호원 위치추정은 Fig. 4에 나타난 것과 같은 센서배치를 이용하였고, 평판에서의 신호원 위치추정법과 동일한 방법으로 실험을 수행하였다. 이를 통해서 신호원 위치추정에서 용접부로 인한 오차를 계산하고, 오차를 최소화할 수 있는 방법을 제시하였다.

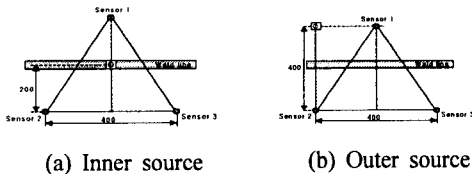


Fig. 4 Two dimensional source location on welded plate

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전파속도의 측정 및 센서특성 평가

실제 소재가 가지는 AE 전파속도는 이론적인 값과

다른 경향을 보인다. 그 이유는 센서마다 다른 증폭률을 가지며, 설정값을 0.1V로 할 때, 센서의 감도에 따라서 신호의 입력시점을 다르게 인식하기 때문이다. 그러므로 각 센서에 대한 평균속도를 구할 필요가 있다. Table 2는 각 센서들의 종파와 표면파 속도에 대한 평균값을 취한 것이다.

Table 2 Mean velocities of longitudinal mode and Rayleigh mode

속도 \ 센서	EZ57	EZ85	FA24
종파의 속도 [m/s]	4910	4939	4871
표면파의 속도 [m/s]	2923	2964	2877

각 센서들의 표면파 평균속도는 2921m/s로 하여 신호원 위치추정을 수행하였다.

3.2 충격하중의 전파특성 평가

실제 구조물에서 발생할 수 있는 충격력에 대한 AE 신호의 전파를 관찰하기 위해서 충격망치를 이용하여 용접부가 없는 소재 평판에 대해서 충격하중을 가하였다. Fig. 5는 충격망치로 충격하중을 가했을 때, 발생하는 AE의 전파거동을 나타내며, 센서에서 측정되는 AE 신호의 시간지연은 하중의 크기에 의한 함수가 아니고 하중을 가한 지점과 센서와의 거리에 대한 함수임을 알 수 있다. 충격신호에 대한 AE 신호의 평균 전파속도는 2767m/s로 PLB 신호원에 비해서 느리다. 그러나, 전파 거동은 PLB 신호원과 유사한 형태를 나타내므로, 신호원 위치추정에 대한 신호원으로 실제적인 충격신호를 사용하지 않고 PLB 신호원으로 대체 사용하여도 무방함을 알 수 있다.

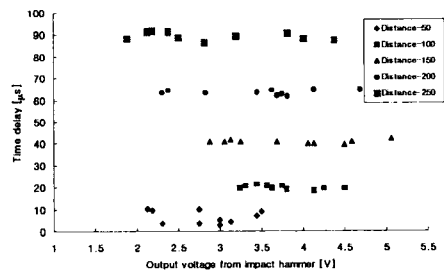


Fig. 5 Relation with impact force and time delay

3.3 용접부가 없는 소재에 대한 신호원 위치추정

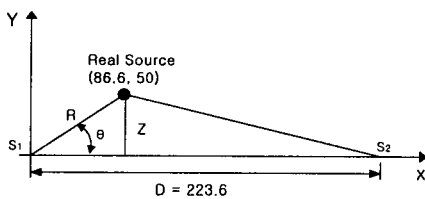
용접부가 없는 소재에 대한 선형 위치추정기법의 그 결과값들을 Table 3에 정리하였다. 결과에서 보여 지듯이 센서 배열 내부의 신호원에 대해서는 대체적으로 오차율이 만족할만한 수준임을 알 수 있다.

Table 3 Results of linear source location on unwelded plate

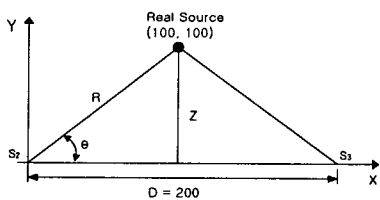
Real [mm]	Prediction [mm]	Error [%]
50	61.73	23.46
100	104.37	4.38
150	147.04	1.98
250	196.59	21.38
300	196.7	34.43
350	197	43.72

그리고 이러한 오차율을 좀더 줄이기 위해서 센서의 크기, 실험 소재에서의 감쇠 등을 고려하여 센서들을 배치하여야 한다⁽⁶⁾.

두 번째로, Fig. 3의 (a) 신호원에 대해 센서 두 개를 사용한 이차원 위치추정을 하기 위해 센서 1과 2를 사용할 때와 센서 2와 3을 사용할 경우로 분류하였다. Fig. 6은 각각의 경우에 대한 실제 신호원의 위치를 나타내며, Fig. 7은 실제 계산을 하여 x, y 좌표를 포물선으로 출력한 결과이다.

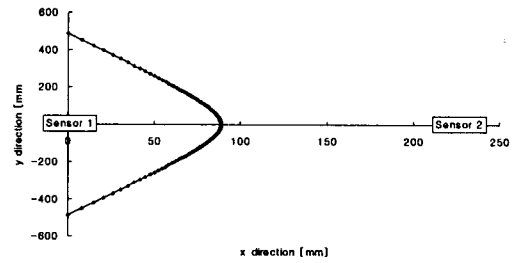


(a) Between sensor 1 and sensor 2

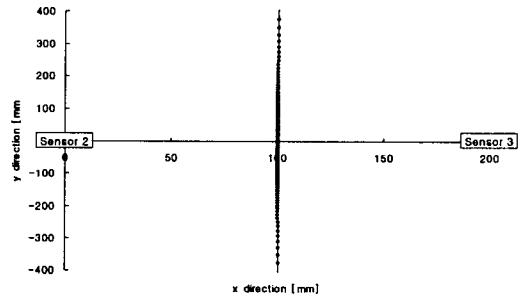


(b) Between sensor 2 and sensor 3

Fig. 6 Real coordinates of 2 sensor method



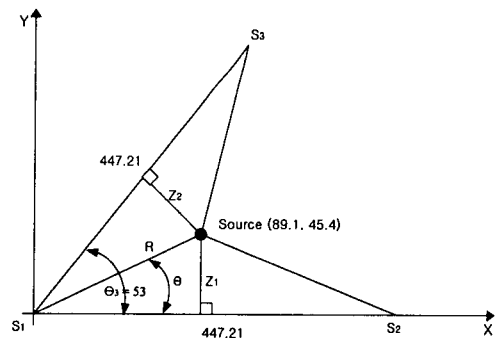
(a) Between sensor 1 and sensor 2



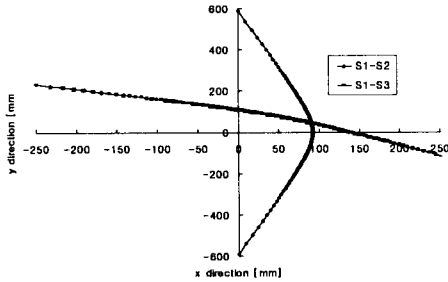
(b) Between sensor 2 and sensor 3

Fig. 7 Results of 2 sensors method

결과에서는 두 가지 조건에서 포물선 위의 좌표를 모두 만족 하지만 이차원 위치추정을 하기 위해서는 2센서법이 부적절함을 알 수 있다. Fig. 8의 (a)는 Fig. 3의 (a) 신호원에 대해 3센서법을 사용했을 때 신호원의 실제 좌표이며, (b)는 실제 계산된 x, y 좌표를 출력한 위치추정 결과를 나타내고 있다. 그리고, Table 4는 위치추정의 결과이다.



(a) Real coordinates



(b) Result of source location

Fig. 8 Two dimensional source location using 3 sensors

Table 4 Results of source location for inner source

Coordinates	Real [mm]	Prediction [mm]	Error [%]
X	89.1	90.67	1.76
Y	45.4	44.53	1.92

이상의 결과에서 소재 평판에 용접부와 같은 결합부로 인한 계면이 존재하지 않을 때에는 앞 절에서 제안된 신호원 위치추정 기법을 사용하여 만족할만한 수준의 결과를 도출하였다. 그리고, 2센서법에 비해서 3센서법의 결과는 신호원의 위치를 두 포물선이 접하는 한 점에서 추정이 가능하고, 오차를 또한 적음을 알 수 있다.

3.4 용접부가 있는 소재에 대한 신호원 위치추정
소재 평판에 용접부가 존재할 때, 소재와 용접부 사이의 계면이 발생한다.

AE 신호가 계면을 통과할 때, 신호의 반사 및 감쇠 현상이 발생하고 그로 인해서 정확한 신호원에 대한 위치추정이 불가능할 수도 있다.

용접부의 AE 신호전파에 대한 영향을 평가하기 위해서 용접 라인 상에서 신호의 시간지연을 측정하였다. 그 결과 Fig. 9에 나타난 것과 같이 용접부에서의 신호전파가 평판 소재에서의 신호전파보다 느린 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 용접부의 미세입자(Grain)가 미세한 페라이트격자구조로 된 평판소재에 비해서 조대하여 이로 인한 신호의 감쇠 및 전파의 지연이 크게 발생함을 알 수 있다.

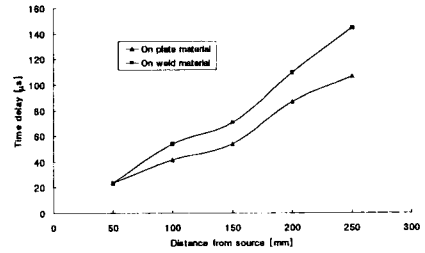


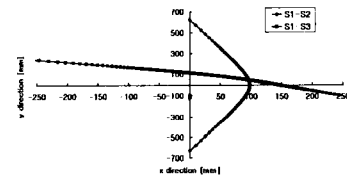
Fig. 9 Wave velocities at each materials

따라서, 용접부에 대한 고려를 하여 Fig. 4의 센서 1과 2, 센서 1과 3사이의 시간지연 차를 보정해 줄 필요가 있기 때문에 센서 1로부터 신호원까지의 거리(R)를 다음과 같이 보정하였다.

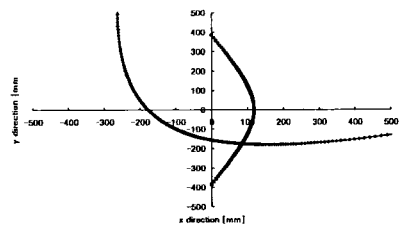
$$R = \frac{1}{2} \frac{D^2 - V^2(\Delta t + 10.33)^2}{V(\Delta t + 10.33) + D \cos \theta}$$

여기서, D: 센서간의 거리, V: 음향방출신호의 전파속도, θ : 신호원과 센서 1, 2사이의 각, Δt : 센서간의 신호획득 시간차를 나타낸다.

위 식을 이용하여 용접라인이 있는 평판에 대해서 적용하였고, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 또한 추론된 위치에 대한 오차를 Table 5와 6에 정리하였다.



(a) Inner source



(b) Outer source

Fig. 10 Results of source location with calibrated data

Table 5 Results of source location for inner source

Coordinates	Real [mm]	Prediction [mm]	Error [%]
X	89.1	92.65	3.98
Y	45.4	46.38	2.16

Table 6 Results of source location for outer source

Coordinates	Real [mm]	Prediction [mm]	Error [%]
X	90.8	85.23	6.13
Y	-178.2	-172.75	3.06

위의 표에서 보듯이 추정된 모든 신호원의 위치에 대한 오차율이 10% 미만임을 볼 수 있다. 하지만, 용접부가 없는 평판에 대한 추정결과보다 오차율이 큰 것을 알 수 있다. 이러한 이유는, 용접부에 대한 신호의 전파를 수직으로 가정하였는데, 실제로는 신호의 전파거동이 용접부에 대해서 수직이 아니기 때문이고, 이로 인해 용접부를 사이에 두고 있는 센서들의 배열에서 용접라인에 의한 시간지연이 달라지기 때문이다. 이를 보다 정밀하게 보정하기 위해서는 신호가 용접부를 통과할 수 있는 다양한 각도에 대해서 시간지연을 측정하여서 유효한 보정값을 사용하는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 구조물에서 발생할 수 있는 결함에 대해서 음향방출법을 이용하여 그 발생위치를 추정하고자 하였으며 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 신호원 위치추정을 위해, AE 원신호를 종파와 표면파로 분리하여 비교적 높은 신호값을 가지는 표면파의 전파속도를 구하였다.
- (2) PLB 신호원과 충격망치에 의한 신호원의 발생 주파수 및 전파속도의 비교를 통해서 PLB 신호원의 타당성을 밝혔다.
- (3) 용접부가 존재하지 않는 평판에서 선형 및 삼각법을 이용한 이차원 위치추정법의 유효성을 검증하였다.
- (4) 용접부가 존재하는 평판에서 AE 신호 전파에 대한 용접부의 영향을 고려하여 적용할 수 있는 신호원 위치추정 기법을 제안하고 그 유효성을 확인하였다.

(5) 보정된 수식을 이용한 신호원 위치 추정은 주어진 실험시편에 대해서 모두 오차율 10% 이내의 값을 가지며, 만족할만한 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

참고문헌

1. M. S. Asher and I. Maryak, "Neural network approach to locating acoustic emission sources in non-destructive evaluation", *Journal of Sound and Vibration* Vol.211, pp.133-143, 1996
2. M. Surgeon and M. Wevers, "One sensor linear location of acoustic emission using plate wave theories", *Journal of Materials Science & Engineering*, A265, pp.254-261, 1999
3. A. K. Maji and T. Kratochvil, "Acoustic emission source location using Lamb wave modes", *Journal of Engineering Mechanics*, pp.154- 161, 1997
4. Xiaorong Lu and Igor Grabec, "Use of an automatic modeled and a small receiver array for acoustic emission (AE) source location", *Journal of Ultrasonics*, Vol.36, pp.539-547, 1998
5. L. Pantani, "A Coherent-pulse superposition technique for velocity measurements on surface elastic wave", *IEEE Trans. on Sonic & Ultrasonics*, Vol.19, No.3, pp.384-386, 1972
6. Malcolm Hawkes and Arye Nehorai, "Effects of sensor placement on acoustic vector-sensor array performance", *IEEE Journal of Materials & Engineering*, Vol.24, No.1, pp.33-40, 1999