한국정밀공학회지 제21권 제8호 (2004년 8월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 8, August 2004.

용접선을 갖는 판재에서 AE 신호원의 위치추정 기법

이성재*, 정연식*, 김정석**, 강명창#, 정규동***

Prediction Technology on the Source Location of Acoustic Emission Signal in Plate with Welding Line

Sung Jae Lee*, Yun Shick Jung*, Jung Suk Kim**, Myung Chang Kang # and Kyu Dong Jung***

ABSTRACT

This study deals with the prediction of defect location which can be occurred in structure. The existing methods was very difficult to be applied to predict it, because of complex numerical formula. The triangulation method proposed in this study can predict the source location easily with small amount of data. The arrival time of wave can be directly converted into the distance between sensors. For this purpose, the propagation velocity was measured by Rayleigh wave, and the propagation behavior was analyzed. The welded workpiece is adapted to investigate for the consideration of jointed part in structure, The propagation velocity of signal was measured in welded workpiece 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. 서론

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 집중하중으로 인해서 수명이 단축될 수 있으며, 결국은 파손을 초래할 수 있다.[1] 이러한 이유로 많은 연구자들은 파괴 및 비파괴 검사기법들을 이용하여 구조물에 존재하는 결함의 발생시기, 발생정도 및 발생 위치를 측정하고 예측하고자 하였다.[2-4] 본 연구에서는 음향방출법(Acoustic Emission, AE)을 이용하여 2차원 평판에서의 신호 발생원 위치 추정을 수행하고자 한다. 이를 위해서 먼저 평판에 하나 이상의 센서를 부착하여 충격하중 및 PLB(Pencil Lead Break)등의 신호원으로부터 발생하는 AE 신호의 전파 거동을 분석하였고,[5] 신호원 위치 추정을 위한 전파 속도를 구하기 위해서 신호를 분리, 적정 전파 모드를 선택하였다.[6-7] 이를 이용하여 사용된 각 센서들의 특성을 파악하였다. 또한, 결함의 발생위치 추정기법을 순수 평판 소재 및 용접부가 존재하는 평판에 대해서 적용하여 제안된 알고리즘의 유용성 검증 및 용접부로 인해 발생할 수 있는 위치추정 오차를 보정하는 기법을 제안하였다.

접수일: 2004년 2월 3일; 게재승인일: 2004년 5월 7일
* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
# 교신저자: 부산대학교정밀정형 및 금형가공연구소
kangmc@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2361
** 부산대학교 기계공학부
*** (주) 고려제강

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 LeCroy사에서 제작된 디지털 오실로스코프 9310A를 사용하였다.

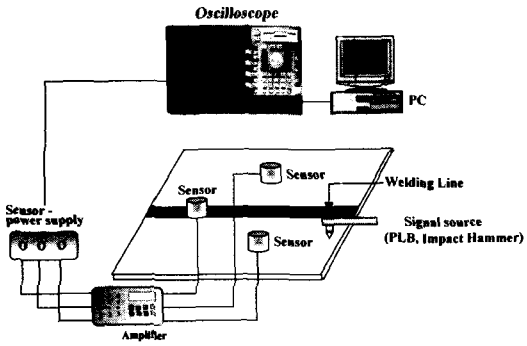


Fig. 1 Experimental set-up for source location

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 : Wide Band type
Pre-Amplifier	1220A(PAC) *Band pass Filter :* 100~1200㎑
RMS Converter	Time constant : 0.25㎳
Power Supply	24V(Switching type)

본 연구에서 사용된 실험 시편은 가로×세로 600㎜×600㎜이고, 두께가 8㎜인 일반 구조용 압연강재를 사용하였고, 소재의 성분은 KS D 3502에 명시되어 있다.

2.2 실험방법

2.2.1 전파모드를 고려한 전파속도 측정 및 센서 특성평가

신호원에 대한 위치추정을 수행하기 위해 사용되어지는 가장 유용한 AE 파라메터는 시간지연이라고 볼 수 있다. 시간지연은 돌발형 신호에서 나타나며, 이를 이용하여 전파속도를 구할 수 있다. 이러한 돌발형 신호를 발생시키기 위해서 신호원으로 PLB를 이용하였다. Fig. 2와 같이 신호원으로부터 100㎜ 떨어진 위치에 WD AF52 센서를 배치하여 트리거 센서의 역할을 하였고, 이로부터 100㎜ 떨어진 위치에 R15I를 배치하여 각 센서의 특성을 평가하였다.

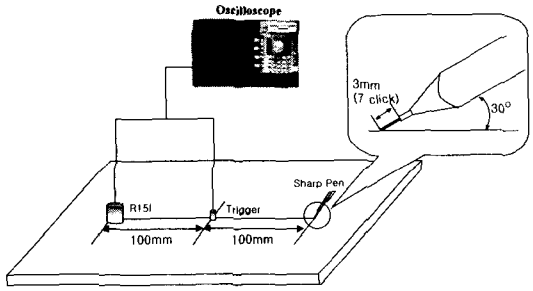


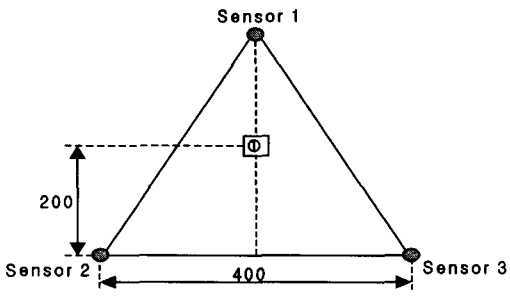
Fig. 2 The combination of AE sensor in PLB source

2.2.2 충격에 의한 음향방출의 전파특성 평가

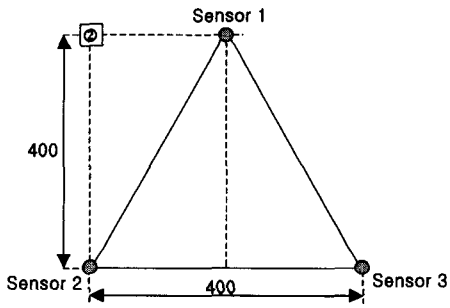
실제 평판으로 구성된 구조물이 받는 충격하중에 의해 발생하는 AE 신호의 전파거동을 관찰하기 위해서 충격망치(Impact Hammer)를 이용하였다. 센서와 충격하중을 가하는 지점과의 사이거리를 50㎜부터 300㎜까지 50㎜ 단위로 증가시켜가며 충격신호의 시간지연 및 전파속도를 측정하였다. 이렇게 발생된 신호로부터 하중과 전파속도와의 관계를 분석하였으며, 본 연구에서 위치추정을 위한 신호원으로 사용되어진 PLB 신호원과 특성을 분석하였다.

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.



(a) Inner source



(b) Outer source

Fig. 3 Two dimensional source location using three sensors

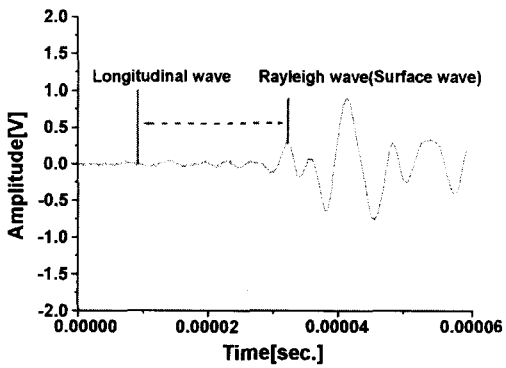
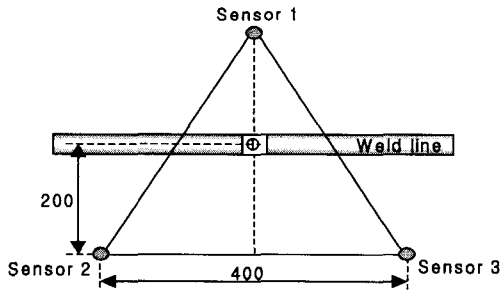


Fig. 4 Separation of two AE propagation mode

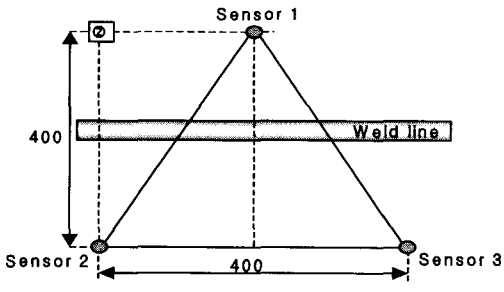
Fig. 4에서 보는 바와 같이 R15I를 이용하여 PLB 신호원을 검출하였을 때, 신호가 센서에 입력된 초기(Trigger)의 신호를 분석하면, 전파속도가 빠른 종파의 시작부와 종파에 비해서 전파속도가 느린 표면파의 시작부를 분리할 수 있다. 본 실험에 사용된 소재에 대한 종파의 이론적인 속도는 5400m/s이고, 표면파의 속도는 3000m/s이다. 신호원 위치추정을 위한 전파속도는 신호의 진폭이 크고, 전파속도가 느린 표면파를 취하였다. 표면파를 검출하기 위해서 하중 발생 지점에 트리거 센서를 부착하여 표면파의 시작 시점과 검출위치에서의 도착시점을 구분하였고, 이러한 시점들에 대한 시간차를 이용하여 전파속도를 구하였다.

2.2.4 용접부가 있는 소재에서의 신호원 위치 추정

실제 구조물에서 접합부는 AE 신호의 전파에서 감쇠를 일으키는 큰 변수로 작용한다. 용접부가 존재할 때의 이차원 신호원 위치추정은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 센서배치를 이용하였고, 평판에서의 신호원 위치추정법과 동일한 방법으로 실험을 수행하였다. 이를 통해서 신호원 위치추정에서 용접부로 인한 오차를 계산하고, 오차를 최소화할 수 있는 방법을 제시하였다.



(a) Inner source



(b) Outer source

Fig. 5 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, 설정값(threshold)을 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 속도이다.

Table 2 Mean velocities of longitudinal mode and Rayleigh mode

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

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

3.2 충격에 의한 음향방출의 전파특성 평가

실제 구조물에서 발생할 수 있는 충격력에 대한 AE 신호의 전파를 관찰하기 위해서 충격망치를 이용하여 용접부가 없는 소재 평판에 대해서 충격하중을 가하였다. Fig. 6은 충격망치로 충격하중을 가했을 때, 발생되는 AE의 전파거동을 나타내며, 센서에서 측정되는 AE 신호의 시간지연은 하중의 크기에 의한 함수가 아니고 하중을 가한 지점과 센서와의 거리에 대한 함수임을 알 수 있다.

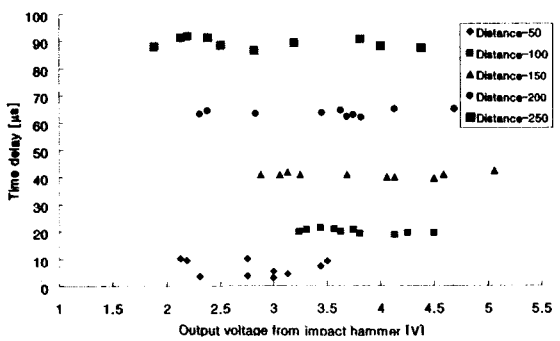
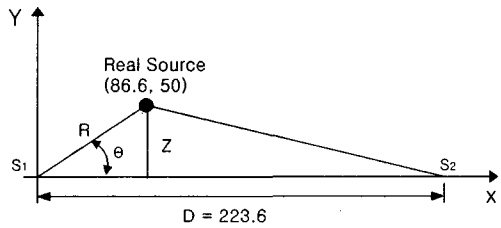


Fig. 6 Relation with impact force and time delay

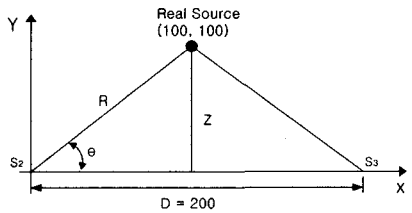
충격신호에 대한 AE 신호의 평균 전파속도는 2767m/s로 PLB 신호원에 비해서 느린 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 전파 거동은 PLB 신호원과 유사한 형태를 나타내므로, 신호원 위치추정에 대한 신호원으로 실제적인 충격신호를 사용하지 않고 PLB 신호원으로 대체 사용하여도 무방함을 알 수 있다.

3.3 용접부가 없는 소재에 대한 신호원의 위치 추정

Fig. 3의 (a) 신호원에 대해 센서 두 개를 사용한 2차원 위치추정을 하기 위해 센서 1과 2를 사용할 때와 센서 2와 3을 사용할 경우를 분류하였다.



(a) Between sensor 1 and sensor 2



(b) Between sensor 2 and sensor 3

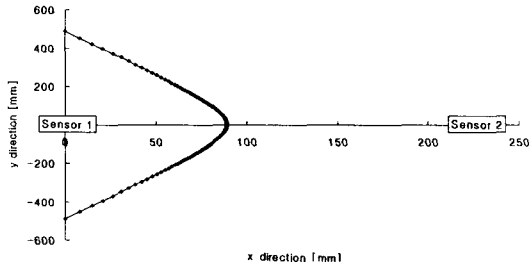
Fig. 7 Real coordinates of two sensor method

Fig. 7은 각각의 경우에 대한 신호원의 위치를 나타내고 있으며, 2개의 센서를 사용할 때 평판상에서 신호발생원의 좌표를 결정할 수가 있다. Fig. 6의 (a)의 센서 1과 신호원까지의 거리를 R이라 하면 다음과 같은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

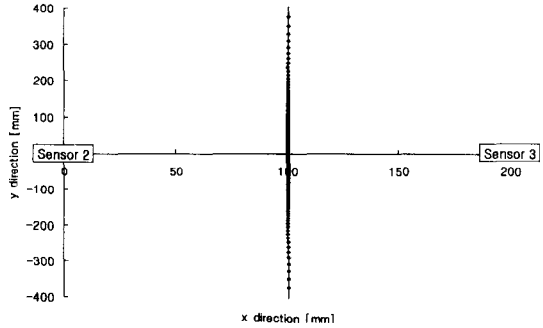
$$R = \frac{1}{2}\frac{D^2 - V^2\Delta t^2}{V\Delta t + D\cos\theta} \quad (1)$$

여기서, D 센서간의 거리, V 음향방출 신호의 전파속도, θ 신호원과 센서 1,2,3간의 각, Δt 센서간의 신호획득 시간차

위식을 이용하여 계산한 X, Y좌표의 값을 Fig. 8에 나타내었다.



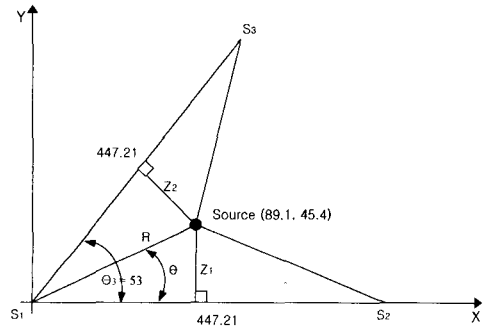
(a) Between sensor 1 and sensor 2



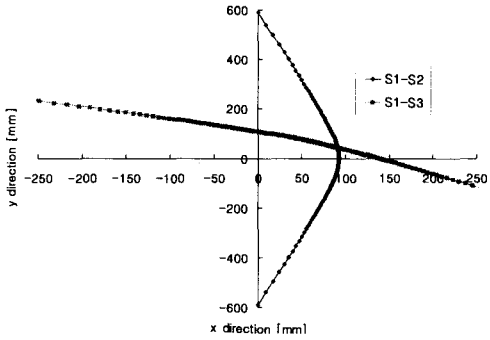
(b) Between sensor 2 and sensor 3

Fig. 8 Results of two sensors method

이 결과에서 보이듯이 이차원 위치추정을 하기 위해서는 2센서법이 한계가 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 (a)는 Fig. 3의 (a)는 내부에 신호원이 있는 경우에 대해 3센서법을 사용했을 때 신호원의 좌표이며, (b)는 계산된 X, Y 좌표를 출력한 위치추정 결과를 나타내고 있다.



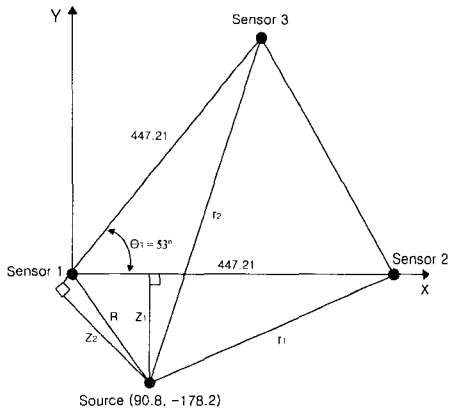
(a) Real coordinates



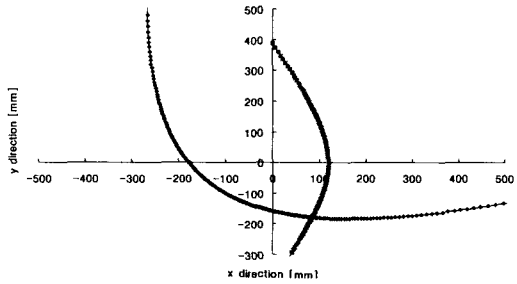
(b) Result of source location

Fig. 9 Two dimensional source location using three sensors for inner source

Fig. 10의 (a)는 Fig. 3 (b)의 외부에 신호원이 있는 경우에 대해 3센서법을 사용했을 때의 경우로서 (a)는 실제 좌표이고, (b)는 계산된 위치추정 결과이다.



(a) Real coordinates



(b) Result of source location

Fig. 10 Two dimensional source location using three sensors for outer source

Table 3과 Table 4는 실제의 결함위치와 위치추정한 결과를 비교한 것이다.

Table 3 Results of source location for inner source

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

Table 4 Results of source location for outer source

Coordinates	Real [㎜]	Prediction [㎜]	Error [%]
X	90.8	86.1	5.2
Y	-178.2	-174.5	2.08

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

3.4 용접부가 있는 소재에 대한 신호원의 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.

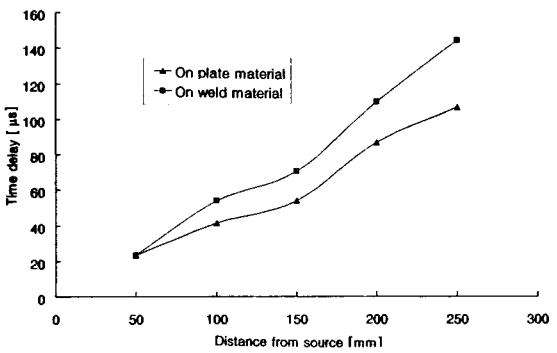


Fig. 11 Wave velocities at each materials

그 결과 Fig. 11에 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.

그리고, AE 신호의 용접부 통과에 대한 실험의 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

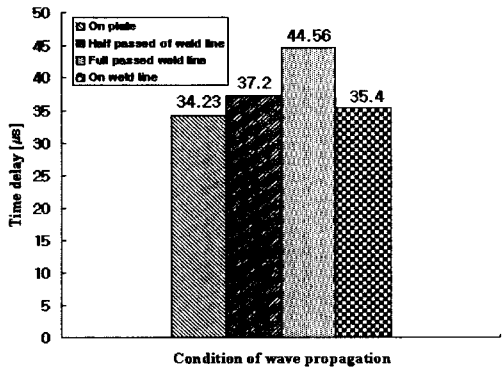


Fig. 12 Time delay each conditions of wave propagation

그림에서 보여지듯이 용접부의 계면을 통과할수록 신호의 시간지연이 더 커짐을 알 수 있다. 그러나, 순수 용접라인 상에서 측정한 값보다 적다. 계면의 반사에서 보다 순수 용접부에서 감쇠가 더 크게 발생함을 보여준다. 따라서, 이러한 부분에서의 감쇠를 고려하여 용접부가 존재하는 평판에서의 신호원 위치추정을 해야한다.

우선, 감쇠를 고려하지 않고 앞 절의 방법과 동일하게 3센서법을 이용하여 신호원 위치를 추정하여 Table 5와 6에 위치추정 결과에 대한 오차를 기록하였다.

Table 5 Results of source location for inner source

Coordinates	Real [㎜]	Prediction [㎜]	Error [%]
X	89.1	81.88	8.1
Y	45.4	37.67	17.1

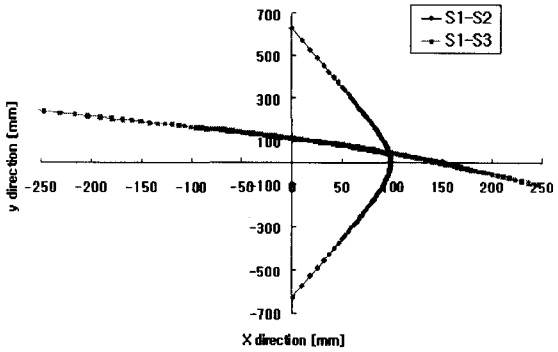
Table 6 Results of source location for outer source

Coordinates	Real [㎜]	Prediction [㎜]	Error [%]
X	90.8	74.93	17.5
Y	-178.2	-230.6	29.4

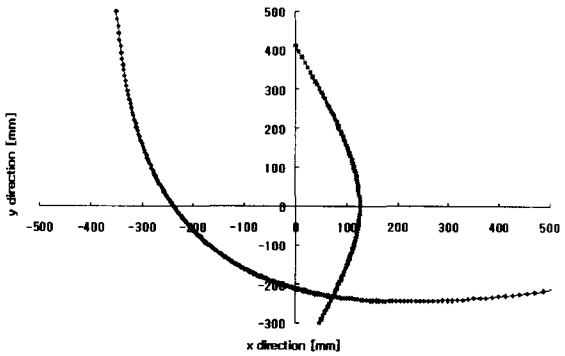
위의 결과에서 보듯이 용접부가 존재할 때의 경우에 동일한 방법으로 신호원 위치추정을 하기에는 부적절하다. 따라서, 용접부에 대한 고려를 하여 Fig. 5의 센서 1과 2, 센서 1과 3사이의 시간지연 차를 보정해줄 필요가 있는데, 용접부를 완전히 통과할 때 시간지연은 10.33μs 더 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 센서 1로부터 신호원까지의 거리 R을 다음과 같은 식 (2)로 보정하였다.

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

위 식을 이용하여 용접라인이 있는 평판에 대해서 적용하였고, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Table 7과 Table 8은 실제의 용접결함 위치와 위치추정한 결과를 비교한 것이다.



(a) Inner source



(b) Outer source

Fig. 13 Results of source location with calibrated data

Table 7 Results of source location for inner source

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

Table 8 Results of source location for outer source

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

Table 3, 4와 Table 7, 8에서 보이는 바와 같이 추정된 모든 신호원의 위치에 대한 오차율이 10% 미만임을 알 수 있다. 그러나 용접부가 있는 신호원의 위치추정 결과(Table 7, 8)는 용접부가 없는 평판에 대한 추정결과(Table 3, 4)보다 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. 그래서 보다 정밀하게 보정하기 위해서는 신호가 용접부를 통과할 수 있는 다양한 각도에 대해서 시간지연을 측정하여서 유효한 보정값을 사용해야 할 것이다.

4. 결론

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

(1) 신호원 위치추정을 위해서 AE 원신호를 종파와 표면파로 분리하여 비교적 높은 신호값을 가지는 표면파의 전파속도를 구하였다.

(2) 용접부가 존재하지 않는 평판에서 선형 및 삼각법을 이용한 이차원 위치추정법의 유효성을 검증하였다.

(3) 용접부가 존재하는 평판에서 AE 신호 전파에 대한 용접부의 영향을 고려하여 적용할 수 있는 신호원 위치추정 기법을 제안하고 그 유효성을 확인하였다.

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

참고문헌

1. Asher, M. S., Maryak, I., "Neural network approach to locating acoustic emission sources in non-destructive evaluation," Journal of Sound and Vibration Vol.211, pp.133-143, 1996.
2. Surgeon, M., Wevers, M., "One sensor linear location of acoustic emission using plate wave theories," Journal of Materials Science & Engineering, A265, pp.254-261, 1999.
3. Maji, A. K., Kratochvil, T., "Acoustic emission source location using Lamb wave modes," Journal of Engineering Mechanics, pp.154- 161, 1997.
4. Seo, J. W., Seok, C. S., Kim, Y. J., Park, J. W., "Evaluation of Fracture Behavior of High Tension Steel by AE Amplitude Distribution," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 175-185, 1999.
5. Xiaorong, L., Igor, G., "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.
6. Pantani, L., "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.
7. Malcolm, H., Arye, N., "Effects of sensor placement on acoustic vector-sensor array performance," IEEE Journal of Materials & Engineering, Vol.24, No.1, pp.33-40, 1999.