

# 이차원 AE음원 위치추정법에 관한 연구 A Study on the 2-Dimensional AE Source Location Methods

장 경 영(한양대 공대), 김 달 중(한양대 대학원)  
Kyung Young Jhang(Hangyang Univ), Dal Jung Kim(Hanyang Graduate School, Hanyang Univ)

## ABSTRACT

In this paper, we propose two methods for AE source location on the material with unknown AE wave velocity. By this method, we can apply this method to arbitrary material of which properties are not known exactly. Also, in this paper, the mechanism of error generation in both methods are discussed and their performances are compared by using computer simulations and experiments which uses a lead break as the AE source on the aluminum plate.

**Key Words** : AE(음향방출), Source Localization(음원 위치검출), Elastic wave propagation velocity (탄성파 전파속도), Triangular method(삼각법)

### 1. 서 론

AE(음향방출)법에 의한 비파괴적 결함 발생 검출 기법은 구조물의 이상유무를 조기에 발견하고 주기적으로 감시할 목적의 모니터링 시스템에 적합하며, 그 효과가 공작기계 공구 파손검출, 회선기계의 이상감지등 여러분야에 걸쳐 입증되고 있다. 대형 탱크의 결함에 따른 누설, 고압탱크의 결함등 그 위치 정보가 중요시되는 경우는 대부분 파손시 대형 사고를 유발할 위험성이 있는 경우에 해당되며, 따라서 결함 발생의 위치정보는 파괴과정의 해석과 분석뿐만 아니라 산업설비의 안전관리에 있어서 매우 중요한 과제가 된다.<sup>[1,2]</sup>

본 논문에서는 이를 개선하여 전파속도를 알 수 없는 재료, 즉 검사대상 재료가 어떤 재료인지 알 수 없는 경우나 전파속도를 별도로 측정하기 곤란한 경우에도 적용할 수 있는 새로운 기법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법도 여러개의 AE센서를 배치하여 두고, 각 센서에 도달하는 AE파의 도착시간차를 측정하여 이용하는 것은 기존의 삼각법에서와 동일하다. 단, 음속을 미지수로 둬서 최종적으로 얻어지는 연립방정식이 비선형적으로 나타나게 되고, 따라서 이 문제는 비선형 연립방정식의 해를 구하는 문제로 귀착된다. 본 논문에서는 이를 해결하는 두가지 접근을 시도한다.

또한 본 논문에서는 통상 AE파가 센서에 도착하는 시간차를 측정하는데 있어 잡음과 기기의 분해능 등의 이유로 발생할 수 있는 오차들에 대한 강인성을 평가하였으며, 각각의 특징에 대해 시뮬레이션과 연립심 파괴를 AE 신호원으로 하는 알루미늄 평판에서의 2차원 AE 발생 위치 검출에 대한 실험을 통하여 비교하였다.

### 2. 벡터법에 의한 음원위치 추정

### 2.1 계측원리

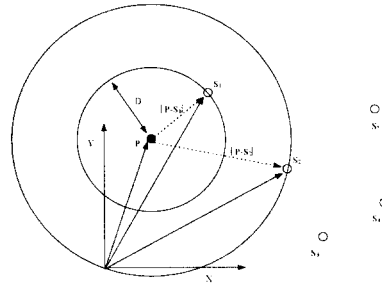


Fig.1 Basic principle of 2D source location in plate with unknown AE wave velocity

우선 전파속도를 알 수 없는 평판에서의 2차원 음원위치 검출을 위한 센서의 배치와 음원과 위치관계를 Fig. 1에 나타낸다. 여기서 P는 음원, S는 센서의 위치이다. 그러면 음원위치 P에서 발생한 AE파가 각각의 수신 센서(S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>, S<sub>5</sub>)에 전파된다고 할때, 기준센서 S<sub>1</sub> 과 타 센서간의 거리 ΔS<sub>i</sub>(i=2~5)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta S_i = (t_i - t_1) \cdot V = \Delta t_{1i} \cdot V \quad (i=2\sim5) \quad (1)$$

여기서 t<sub>1</sub> : 음파가 음원에서 센서 S<sub>1</sub> 에 도달하는 시간

t<sub>i</sub> : 음파가 음원에서 센서 S<sub>i</sub> 에 도달하는 시간

Δt<sub>1i</sub> : 1번 센서와 i 번째 센서에 음파가 도달하는 시간차

V : AE파의 전파속도 (음속)

또한, 음원위치 P 에서 각 센서까지의 거리의 관계는 다음 식과 같다.

$$|\vec{S}_i - \vec{P}| = \Delta S_i + D \quad (i=2\sim5) \quad (2)$$

여기서,  $\vec{S}_i$ ,  $\vec{P}$  는 각각 센서의 위치 벡터, 음원의 위치 벡터를 나타내며, D 는 음원과 기준센서  $S_1$  사이의 거리이다. 이 식은  $i=2\sim5$ 에 대한 4개의 식으로 이루어지는 연립방정식을 의미하는데, 기존의 삼각법에서와 같이 음속을 알고 있다고 하면 윗식의 우변이 상수로 주어지게 되고, 따라서 선형연립방정식으로 나타나게 된다. 이 경우 평면 내에서의 AE 발생 위치를 검출하기 위해서는 두 개의 방정식으로 충분하며, 따라서 3개의 AE 센서가 사용된다.<sup>[3]</sup>

그러나 음속이 미지수일 경우 윗식의 우변은 미지수로 남게 되며, 이 미지수를 적절히 소거하지 해야 한다. 본 논문에서는 추가 센서 2개를 이용하여 4개의 방정식을 얻어서 미지수를 소거하였다. 즉, 식 (2)를 양변을 제곱하여 정리하면 다음식을 얻을 수 있으며,

$$\begin{aligned} |\vec{S}_i|^2 - 2\vec{P}^T \vec{S}_i + |\vec{P}|^2 &= D^2 + 2D \cdot \Delta S_i + \Delta S_i^2 \\ &= D^2 + 2D \cdot \Delta t_{1i} \cdot V + (\Delta t_{1i} \cdot V)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

이들 식을 연립하여 D 와 V 를 소거하면 음원의 위치 P가 다음 식 (4)와 같이 구해진다.

$$\vec{P} = A^{-1} \cdot B \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } A &= \begin{bmatrix} D_4 \cdot G_3^T - D_3 \cdot G_4^T \\ D_5 \cdot G_3^T - D_3 \cdot G_5^T \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} D_3 \cdot F_4^T - D_4 \cdot F_3^T \\ D_3 \cdot F_5^T - D_5 \cdot F_3^T \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$D_j = \Delta t_{1j} \cdot \Delta t_{12}^2 - \Delta t_{12} \cdot \Delta t_{1j}^2 \quad (j=3,4,5)$$

$$\begin{aligned} F_j &= (\Delta t_{1j} \cdot |\vec{S}_2|^2 - \Delta t_{12} \cdot |\Delta t_{1j}|^2) \\ &\quad - (\Delta t_{1j} - \Delta t_{12}) \cdot |\vec{S}_1|^2 \end{aligned}$$

$$G_j = (\Delta t_{12} \cdot \vec{S}_j - \Delta t_{1j} \cdot \vec{S}_2) + (\Delta t_{1j} - \Delta t_{12}) \cdot \vec{S}_1$$

따라서, 음원 위치 P는 이미 알고 있는 센서의 위치 벡터  $\vec{S}_i$  ( $i=1\sim5$ )와 측정된 전파 시간차  $\Delta t_{1i}$  ( $i=2\sim5$ )로써 결정될 수 있다.

## 2.2 컴퓨터 시뮬레이션

제한하는 알고리즘의 시간차 측정오차에 대한 강인성을 평가하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 즉, 각각의 센서간 이론 시간차에 어

는 일정 범위내의 오차를 불규칙적으로 발생시킨 후 이를 이용하여 음원위치를 추정하는 것이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta t_{1i} = \Delta t_{1i,real} \pm \Delta t_{1i,random} \quad (5)$$

여기서  $\Delta t_{1i,random}$ 은 컴퓨터에서 난수를 발생시켜 이용하였으며 최대 범위물 0.1 ~ 2 $\mu$ s까지 0.1 $\mu$ s간격으로 증가시켜 가면서 각각의 경우에 대해 음원위치 추정을 실시하였다. 그결과를 Fig. 3에 나타내며, 종축의 오차는 실제 음원위치와 추정 음원위치 사이의 거리를 나타낸다.

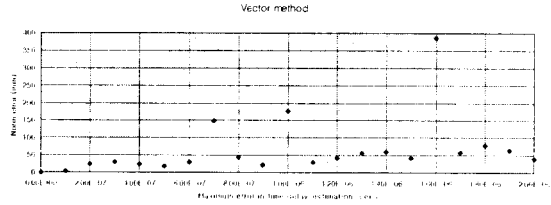


Fig. 3 Error of source location by vector method due to the estimation error of time delay

Fig. 3의 결과는 시간차 측정 최대오차 범위물 0.1 ~ 2 $\mu$ s까지 0.1 $\mu$ s간격으로 변화시켜 갈 때 각각에 있어서 15가지의 음원위치와 20가지의 불규칙오차로 된 총 300가지 경우에 대한 위치추정오차를 평균하여 나타낸 것이다. 오차범위가 커질수록 위치추정오차도 증가해 감을 알 수 있으며, 그 크기는 수십mm로 비교적 큰 오차임을 알 수 있고, 간혹 수백mm의 오차도 발생할 수 있음을 보여준다. 이 이유는 제안된 방법의 원리상 (4)식에서 만들어지는 두 직선의 기울기가 비슷한 값을 가질 경우, 특이점에 가까워지므로 이 둘 기울기의 약간의 변동에도 교점의 위치가 크게 변할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

## 2.3 실험장치 및 시험편

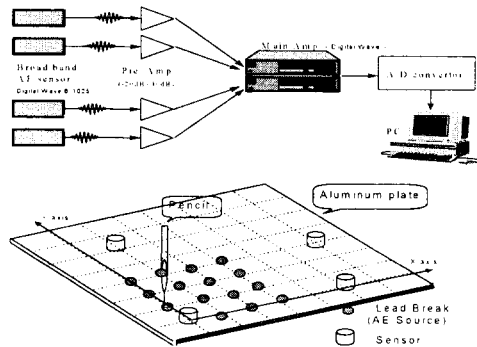


Fig. 4 Experimental System for AE source location

제안하는 방법의 유효성을 검증하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였다. AE 음원은 400 x 400 x 1.5mm 크기의 알루미늄판 위에서 연필심(0.3mm) 파괴에 의해 발생시켰으며, 주파수 범위 1KHz ~ 1.5 MHz 의 광대역AE 센서로 수신하였고, 수신된 신호는 Digital Wave사의 AE 신호처리장치에 의해 처리되었다.

## 2.4 실험결과

Fig. 5에 수신신호 파형의 예를 나타내었다. 각 센서간의 상대적인 AE파 도달 시간차는 상관해석으로 추정하게 되는데, 이 때 각 센서의 수신 신호 중에서 가장 먼저 도달한 Extensional Wave 성분만을 추출하여 사용하였다.<sup>[4,5]</sup>

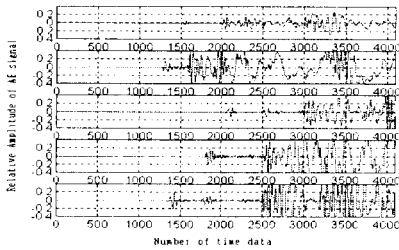


Fig. 5 AE signals sampled at each sensor from 1.2mm thick plate of aluminum when a lead break was used as a AE source.

Table. 1은 측정된 시간차로부터 음원의 위치를 추정한 결과를 실제 음원위치와 함께 보여주고 있으며, Norm Error란 실제좌표와 추정좌표 사이의 거리차를 오차로 나타낸 것이다. 2. 3mm정도의 거리오차로 위치가 추정된 경우도 있으나 전반적으로 위치추정오차가 크며, 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 시간차 추정 오차가 예상보다 큰 것에 기인하는 것으로 사료된다.

Table 1. Experimental Results of AE source location by Vector Method

Given Position		Estimated Position		Vector Method
X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	Norm Error (mm)
50	0	5.3	-49.1	66.40
100	0	188.0	231.4	250.40
150	0	149.0	3.7	3.74
0	50	2.1	47.8	3.02
50	50	38.2	44.1	12.18
100	50	92.1	41.6	11.53
150	50	150.4	43.4	6.61
0	100	48.4	108.7	49.17
50	100	87.3	103.2	7.21
100	100	178.7	116.5	80.54
150	100	163.4	95.9	14.01
0	150	9.6	142.6	19.28
50	150	33.4	142.6	9.21
100	150	95.7	141.1	8.20
150	150	147.3	140.0	7.74
Average				36.96
Standard Deviation				39.46

## 3 오차최소화법에 의한 음원위치 추정

### 3.1 계속원리

Fig. 6 과 같이 2개의 센서가 평판 위에 있을 때, 음향 방출이 평판

에서 일어나 일정한 속도로 전방향으로 퍼져 나간다고 가정하자. 이 때 음원의 위치와 센서간 거리의 관계식은 음원위치 ( $X_s, Y_s$ )를 통과하는 쌍곡선의 식으로 다음과 같이 유도된다.<sup>[4]</sup>

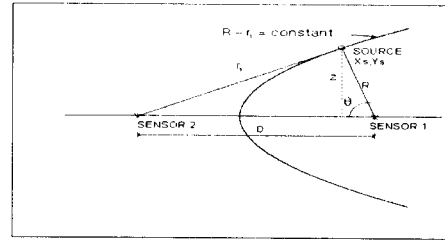


Fig. 6 Trace of points where the difference of flight time from source to two sensors becomes to be constant

$$r_1 - R = \Delta tV \quad (6)$$

여기서 R과  $r_1$ 은 각각 음원과 센서사이의 거리이며, V는 전파속도,  $\Delta t$ 는 센서간 상대적인 전파시간차이다. 이것은 센서1과 2로 부터의 거리차가 일정한 점들의 집합, 즉 쌍곡선을 형성하게 된다. 따라서 세 개의 센서를 이용하면 이러한 쌍곡선 두 개를 얻을 수 있고, 그 교점이 찾고자 하는 음원 위치가 된다.

그러나 전파속도를 모르는 경우에는 쌍곡선 궤적을 그릴 수 없다. 따라서 본 논문에서는 1개 센서를 추가하여 3개 쌍곡선 궤적을 그리도록 하는데, 단 전파속도를 일정범위내에서 변화시켜 가면서 축차대입할 때 세 쌍곡선의 교점으로 만들어지는 삼각형의 면적이 최소가 되는 속도를 구하고 그 때의 음원위치를 찾는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 이 방법을 오차최소화법이라고 하였다.

### 3.2 컴퓨터 시뮬레이션

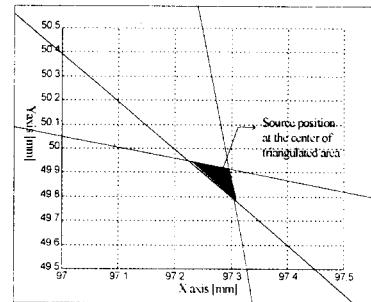


Fig. 7 (a) Simulation results of error minimization method

Fig.7(a)은 제안하는 방법의 원리를 예시하기 위한 시뮬레이션 결과로, 음원 위치 P의 좌표가 (100,50), 4개 센서의 위치가 각각  $S_1=(0,0)$ ,  $S_2=(250,0)$ ,  $S_3=(50,250)$ ,  $S_4=(300,150)$ , 전파속도가 5300m/sec인 경우에

대하여, 각 센서간 상대적인 탄성파의 도달시간차를 이론적으로 계산한 후, 전파속도를 4000에서 7000m/sec까지 100m/sec간격으로 증가시키면 교점이 이루는 삼각형의 면적변화를 평판 위에 나타낸 것이다.

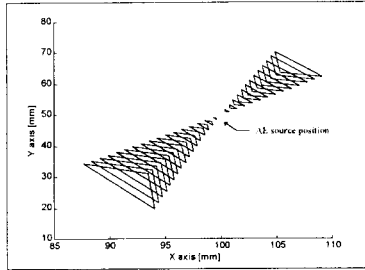


Fig. 7 (b) Variation of area and position of triangles due to the change of propagation velocity

두 번째 시뮬레이션은 오차강인성을 평가하기 위한 것으로, 벡터법에서와 같은 방식으로 수행하였다. 그 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 센서간 상대시간차 추정치의 최대오차범위가 증가함에 따라 서서히 음원 위치추정 오차도 증가해 가는데 그 크기가 검색구간에서 평균14mm 이하로 작고, 오차증가율도 벡터법에서처럼 크지 않으며 전반적으로 안정되어 있는 것으로 나타났다. 이것은 시간차오차가 Fig.6의 쌍곡선 궤적을 수평적으로 이동시키는 효과가 있기 때문에 교점의 이동 또한 급격히 커지지는 않는다는 점을 반증하는 것이기도 하다.

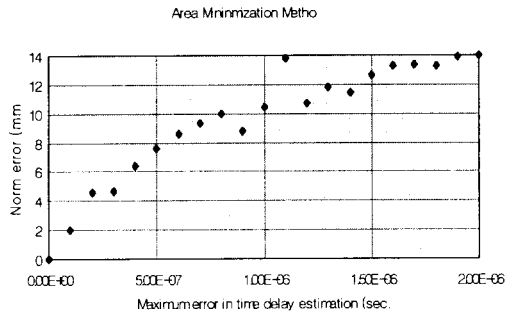


Fig. 8 Error of source location by error minimization method due to the estimation error of time delay

### 3.3 실험결과

앞의 실험에서 얻어진 시간차 추정결과를 그대로 이용하여 오차최소화법을 적용하여 음원위치 추정을 실시하였다. 그 결과를 Table.2에 나타낸다. 위치추정오차는 벡터법에서 보다 대폭 개선되었음을 알 수 있다. 단, 음원좌표가 (0,100)인 경우에 대해서는 추정위치가 평판의 외곽에 있게 되는데, 이는 시간차 추정에 비정상적으로 큰 오차가 내포되었기 때문인 것으로 사료된다.

Table 2. Experimental Results of AE source location by Error Minimization Method

Given Position		Estimated Position		Area Min. Method
X	Y	X	Y	Norm Error [mm <sup>2</sup> ]
50	0	56.90	14.62	18.17
100	0	103.24	16.74	17.05
150	0	153.27	2.31	4.01
0	50	15.35	54.42	15.99
50	50	54.48	55.37	7.00
100	50	97.38	50.12	2.62
150	50	146.74	52.62	4.18
0	100	-60.34	103.04	60.42
50	100	34.48	100.53	15.52
100	100	96.97	103.81	4.87
150	100	157.14	99.25	7.18
0	150	4.00	152.00	diverge
50	150	61.04	138.38	16.02
100	150	98.74	149.39	1.40
150	150	146.64	139.13	11.37
Average				13.13
Averaged Deviation				8.91

### 4. 결 론

- (1) 2차원 평면에서 AE파의 전파속도를 모르는 경우에도 AE발생 위치를 검출할 수 있는 새로운 두 가지 방법 (벡터법과 오차최소화법)을 제안하였으며, 구체적인 알고리즘을 제시하였다.
- (2) 두 방식의 성능과 오차강인성을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 평가하였으며 오차의 발생 메카니즘을 규명하였다. 그 결과 벡터법은 오차요인이 적은 환경에서 매우 정확한 해를 구할 수 있는 반면 오차최소화법은 오차요인에 보다 강인한 것으로 나타났다.
- (3) 제안하는 알고리즘의 유효성은 알루미늄 평판위에서의 연필심 파괴를 이용한 실험에 의해 검증하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] Tatro, C. A., Brown, A. E., Freeman, T. H., and Yanes, G., "On-Line Safety Monitoring of a Large High Pressure High Temperature Autoclave," ASTM STP 697
- [2] Nondestructive Testing Handbook 2nd ed, Vol. 5 Acoustic Emission Testing, ASNT 141-153
- [3] A. Tobias, 1976, "Acoustic-Emission Source Location in Two Dimensions by an Array of Three sensors," Non-Destructive Testing 9, 9-12
- [4] Steven M. Ziola and Michael R. Gorman, "Source Location in thin plates using cross-correlation," J. Acoust. Soc. Am. 90(5). 2551-2556
- [5] D. E. Newland, 1993, An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, 3rd ed., Longman Scientific & Technical
- [6] Alan V. Oppenheim, R.W. Schaffer, 1989, Discrete-time Signal Processing, Prentice Hall