

비선형방정식을 이용한 이방성판의 음향방출 위치표정

AE Source Location in Anisotropic Plates by Using Nonlinear Analysis

이경주*, 권오양**

Kyung-Joo Lee* and Oh-Yang Kwon**

초 록 2차원 음향방출 위치표정에서 전통적인 방법으로 문턱 전압값을 설정하여 도달시간차를 측정함으로써 2개의 쌍곡선을 형성하는 데는 해당 구조물에서 직접 측정된 속도를 이용하게 된다. 복합재료 적층판과 같은 이방성 재료에서는 섬유 배향방향에 따라 탄성계수가 변하므로 속도가 섬유의 방향성에 의존하게 된다. 따라서 임의의 위치에서 발생한 탄성파의 도달시간차 측정에 의한 위치표정의 오차가 커지며, 위치표정의 과정이 복잡해지는 것을 피할 수 없다. 본 연구에서는 전통적인 음향방출 위치표정에서 쌍곡선의 2중 교점의 오차를 정정하기 위해 사용되어야 하는 제 4의 센서를 사용하지만 속도변화에 기인하는 위치표정의 오차를 줄일 수 있는 방법으로 수치해석에 의해 비선형방정식을 풀어내는 위치표정 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안된 방법이 전통적인 방법에 비해 이방성 판에서의 2차원 위치표정을 보다 간단하게 수행하고, 정확도를 향상할 수 있는 방법임을 실험적으로 입증하였다.

주요용어: 음향방출, 위치표정, 도달 시간차, CFRP 판, 비선형 방정식, 수치해석

Abstract For the conventional two-dimensional source location of acoustic emission (AE) based on the threshold crossing, wave velocity has to be measured in the actual structure to calculate the arrival-time difference and thus to form the two hyperbolae. Velocity is dependent on the fiber orientation, however, due to the dependence of elastic modulus on fiber orientation in anisotropic materials such as composite plates. This can affect the accuracy of AE source location and make the source location procedure complicated. In this study, we propose a method to reduce the location error in anisotropic plates by using the numerical solution of nonlinear equations, where the velocity term has been removed by employing the fourth sensor. The efficiency and validity of the proposed method has also been experimentally verified.

Keywords: acoustic emission, source location, arrival time difference, CFRP plate, nonlinear equations, numerical analysis

1. 서 론

두 돌발형 AE 위치표정 기술은 한 점에서 발생한 탄성파를 여러 개의 센서에서 감지하여 각각의 센서에 도달하는 파형의 시간차를 통해 발생원의 위치를 측정하는

방법이다. 전통적인 AE 위치표정은 2개의 센서로부터 측정된 신호에서 쌍곡선을 형성하고, 여기에 제 3의 센서를 설정하면 또 다른 쌍곡선을 형성하여 두 쌍곡선의 교점으로부터 음향방출 발생원의 위치를 결정한다. 이와 같은 알고리즘으로 위치표정을 할 때 위치표정 정확도에 영향

을 미치는 변수에는 탄성파의 전파속도, 도달 시간차 측정 및 센서 위치의 정확도 등이 있다. 본 논문에서는 센서의 위치가 정확하다는 가정 하에 이방성 판의 위치표정에서 문제가 되는 탄성파의 전파속도를 측정하거나 계산하지 않고 음향방출 발생원의 위치를 결정하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

등방성 재료에서 전통적인 문턱 전압값 설정에 의한 2차원 위치표정에서는 실제 구조물에서 측정된 속도를 이용한다. 하지만 복합재료 적층판과 같은 이방성 재료로 이루어진 구조물에서는 섬유 방향성에 따라 탄성계수가 변하게 되므로 속도가 각각의 방향마다 달라진다. 따라서 속도의 측정에 의한 위치표정이 어려워지며 쌍곡선법에 의한 위치표정은 매우 부정확해진다. 이와 같은 속도 변화의 문제점을 해결하기 위해서 비선형방정식에 의한 방법을 제안하고, 연필심 파괴에 의한 모의 방출원을 이용한 실험, 결과를 비교하였다.

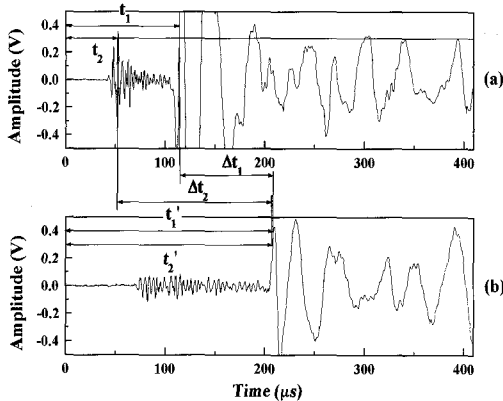


Fig. 1 Waveforms depicting the erroneous measurement of arrival time difference for plate(Lamb) wave at (a) sensor 1 and (b) sensor 2 in a CFRP plate

박판 구조물을 전파하는 판파(plate wave 또는 Lamb wave)에는 매질입자가 탄성파의 진행 방향으로 진동하며 대칭이고 감쇠(attenuation)가 크지만 분산(dispersion)의 영향은 심하지 않은 팽창파(extensional wave, S-mode) 성분과 진행 방향에 수직인 두께방향으로 진동하며 비대칭이고 분산에 의해 크게 영향을 받는 굽힘파(flexural wave, A-mode) 성분이 존재한다[1-3]. Fig. 1에서 보듯이 판파에서 이 두 파형 요소의 존재는 문턱 전압값의 수준에 따라서 전파속도가 다른 두 파형으로부터 도달시간차가 측정되어 매우 큰 오차를 발생하게 한다[4,5]. 이

문제점을 해결하기 위해 AE 신호처리에 웨이블릿 변환(wavelet transform)을 도입함으로써 상대적으로 크기가 작고 고주파수인 팽창파 성분을 제거할 수 있음은 이미 보고한 바 있다[6]. 또한 보다 정확한 도달 시간차를 얻기 위해 웨이블릿 변환에 의한 디노이징 기법을 도입, 측정된 판파에서 팽창파 요소를 제거함으로써 Fig. 1에서와 같은 측정 오차를 방지하고 박판에서의 AE 위치표정의 정확도를 향상 할 수 있음은 이전 연구로부터 확인하였다[7].

이번 연구에서는 제안한 알고리즘의 신뢰성 확인에 초점을 맞췄으며, 팽창파에 의한 도달 시간차 측정의 오류를 제거하기 위해서 문턱 전압값을 팽창파보다 큰 값인 0.2V로 설정하여 제안한 알고리즘에 의한 위치표정 결과를 팽창파의 영향을 받는 문턱 전압값인 0.05V의 결과와 비교하였다.

2. 이 론

2.1. 비선형 위치표정 알고리즘

Fig. 2에서와 같이 임의의 점에서 음향방출이 발생했을 때 탄성파는 모든 방향으로 전파하여 각 센서에 도달한다. 4개의 센서에 도달한 파형에서 임의의 문턱값을 설정하여 도달시간을 구한다.

$$v_n \times t_n = r_n (n=1,2,3,4) \dots\dots\dots (1)$$

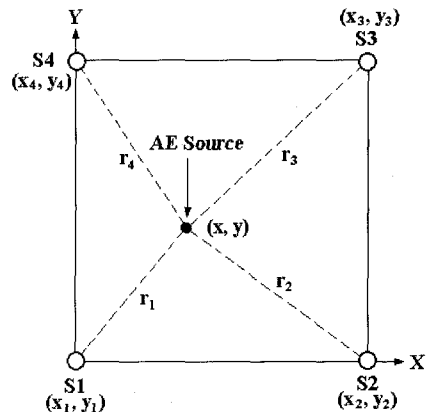


Fig. 2 Coordinate system employed for AE source location

v_n 은 모의 발생원에서 센서에 도달하는 파형의 속도, t_n 는 n번째 센서에 도달하는 시간, r_n 는 모의 발생원에서 n번째 센서까지의 거리이다. 식 (1)에서 1번 센서를 기준으로 식을 연립하면 다음과 같은 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} (t_2 - t_1)v_n &= r_2 - r_1 \\ (t_3 - t_1)v_n &= r_3 - r_1 \dots\dots\dots (2) \\ (t_4 - t_1)v_n &= r_4 - r_1 \end{aligned}$$

r_n 을 (x, y)좌표계로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} \\ r_2 &= \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} \dots\dots\dots (3) \\ r_3 &= \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} \\ r_4 &= \sqrt{(x-x_4)^2 + (y-y_4)^2} \end{aligned}$$

식 (2)에서의 변수는 시간차와 속도 v_n 이다. 속도의 항을 소거하기 위해 등방성이라 가정하고, 연립하면 식 (4)가 된다. 속도를 알고 있을 경우에 센서 3개면 위치표정이 가능하다. 센서를 4개 이용하면, 이방성(anisotropic)재료와 같이 속도를 알기 힘든 경우 위치표정이 가능하며, 3개의 센서를 이용할 때에 비해 오차를 줄일 수 있다[8].

$$\begin{aligned} (1-A)r_1 &= r_2 - Ar_3 \dots\dots\dots (4) \\ (1-B)r_1 &= r_2 - Br_4 \end{aligned}$$

여기서, A와 B는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= \frac{(t_2 - t_1)}{(t_3 - t_1)} \dots\dots\dots (5) \\ B &= \frac{(t_2 - t_1)}{(t_4 - t_1)} \end{aligned}$$

식 (4)는 비선형 방정식이며, 간단히 표현하면 식(6),(7)과 같다.

$$f(x, y) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$g(x, y) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

따라서, 음향방출 발생원의 위치는 비선형 연립방정식인 식 (6),(7)을 통해 구하며, 식 (8)의 Newton-Raphson method을 이용하여 풀 수 있다.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \dots\dots\dots (8)$$

각각의 비선형식에 대해 Taylor급수 전개를 하면 식 (9),(10)과 같다.

$$f_{i+1} = f_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\partial f_i}{\partial x} + (y_{i+1} - y_i) \frac{\partial f_i}{\partial y} \dots\dots (9)$$

$$g_{i+1} = g_i + (x_{i+1} - x_i) \frac{\partial g_i}{\partial x} + (y_{i+1} - y_i) \frac{\partial g_i}{\partial y} \dots (10)$$

f_{i+1} 와 g_{i+1} 가 0에서 근을 가지므로 0을 대입하면 식 (9)와 (10)은 선형 연립방정식이 된다. 여기서, 변수는 x_{i+1} 과 y_{i+1} 이며 풀어서 다시 정리하면 식 (11),(12)이다. 이 두 변수가 음향방출 발생원이다.

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f_i \frac{\partial g_i}{\partial y} - g_i \frac{\partial f_i}{\partial y}}{\frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial g_i}{\partial y} - \frac{\partial f_i}{\partial y} \frac{\partial g_i}{\partial x}} \dots\dots\dots (11)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f_i \frac{\partial g_i}{\partial x} - g_i \frac{\partial f_i}{\partial x}}{\frac{\partial f_i}{\partial x} \frac{\partial g_i}{\partial y} - \frac{\partial f_i}{\partial y} \frac{\partial g_i}{\partial x}} \dots\dots\dots (12)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1. 시편 및 실험장치

속도 측정 실험과 위치표정 실험은 알루미늄6061 박판과 각각 32-ply로 적층한 직교 적층판(cross-plyed, [0/90]8S), 일방향 적층판(uni-directional, [0]32)에서 수행하였으며, 판의 크기는 약 900×900mm, 두께는 약 3mm이었다. 속도 측정과 위치표정에 이용되는 탄성파는 표준 연필심(HB ϕ 0.5; JSNDI-006) 파괴를 이용하여 발생시켰다. 4개의 광대역(broadband; 50kHz~2MHz) 고성능 압전센서(B1025; Digital Wave)가 정사각형을 형성하는데 사용되었다. 센서들은 고진공 그리스(grease)를 접촉매질(couplant)로 하여 판 위에 고정되었다. 탐지된 신호는 전치증폭기(pre-amplifier)에 의해 40dB 증폭되고, 그 후에 신호조정모듈(FTM4000)으로 들어간다. 파형신호는 PC에 있는 A/D 보드(CS225; Gage)를 통해 5MHz로 샘플링되어 저장된다. 저장된 신호를 텍스트로 변환하고, 도달시간차를 구하기 위해 각각의 파형에서 임의의 문턱값을 이용하여 시간을 측정하였다. 각 방향마다 속도를 측정하기 위해서 0°에서 90°까지 5° 간격으로 실험을 하였

다. 위치표정은 임의의 5개의 점으로부터 탄성파를 발생시키고, 파형을 획득하여 식 (6),(7)의 비선형 연립방정식을 Matlab[®]을 통해 프로그램하여 계산하였다. Fig. 3은 실험장치에 대한 구성도를 보여준다.

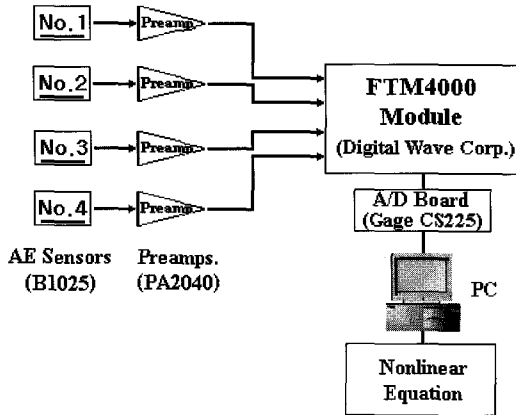


Fig. 3 A schematic diagram of experimental setup

3.2. 센서 어레이와 발생원의 좌표

4개의 센서로 센서간 거리 300mm의 정사각형을 만들었다. 전통적인 쌍곡선형성에 의한 AE 위치표정에서는 최소한 3개의 센서로 이루어진 어레이를 필요로 한다. 그리고 쌍곡선 알고리즘에 의해 발생하는 2중 위치표정의 오류를 보정하기 위해 또 하나의 센서를 추가하게 된다. 비선형 알고리즘을 적용시키기 위해서는 쌍곡선 알고리즘과 마찬가지로 4개의 센서를 사용한다. 센서의 좌표는 Table 1과 같다.

발생원은 0에서 4번까지 5개의 좌표를 임의로 설정하였다. 모의 발생원의 정확한 위치는 Table 2와 같다.

Table 1 The nominal coordinates of AE sensors

Sensor No.	Coordinate	(x, y)
1		(0, 0)
2		(300, 0)
3		(300, 300)
4		(0, 300)

Table 2 The exact coordinates of AE sources

Source No.	Coordinate	(x, y)
0		(150, 150)
1		(200, 200)
2		(60, 180)
3		(150, 75)
4		(100, 100)

4. 결과 및 고찰

4.1. 속도측정

실험에 사용한 복합재료 적층판에서 방향에 따라 얼마나 속도가 변하는지 알아보기 위해 속도측정 실험을 하였다. Fig. 4(a)는 직교 적층판의 결과를, 그리고 Fig. 4(b)는 일방향 적층판의 결과를 0°~90°까지 각도에 따라 속도가 변하는 것을 보여준다. 직교 적층판에서는 각이 올라감에 따라 점점 감소하다가 45°에서 최소값 1489.6m/s를 나타내었으며, 다시 조금씩 증가하여 90°에서는 0°에서의 최대값인 1632.2m/s와 거의 유사한 값인 1630.4 m/s를 보였다. 이것은 섬유 방향이 0°와 90°로 향하고 있기 때문에 이 두 방향에서 탄성계수가 대각선에 비해서 크다. 따라서 상대적으로 큰 속도값을 가지게 된다.

Fig. 4(b)는 일방향 적층판의 속도측정 결과를 나타낸다. 섬유의 방향인 0°에서 최대속도 1754.4m/s를 나타내었으며, 각이 올라감에 따라 점점 감소하여 90°에서 1407.1m/s로 약 350m/s감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 섬유에 수직인 방향으로 갈수록 점차 탄성계수가 감소하기 때문이다. 따라서, 이방성 판의 위치표정에서 임의의 점으로부터 탄성파가 발생되었을 때, 각 방향으로 전파하는 탄성파의 속도가 다르기 때문에 일반적인 쌍곡선 알고리즘을 이용할 경우에 속도를 보정해 가면서 위치표정을 해야하며, 이로 인한 계산의 복잡성을 피할 수 없다.

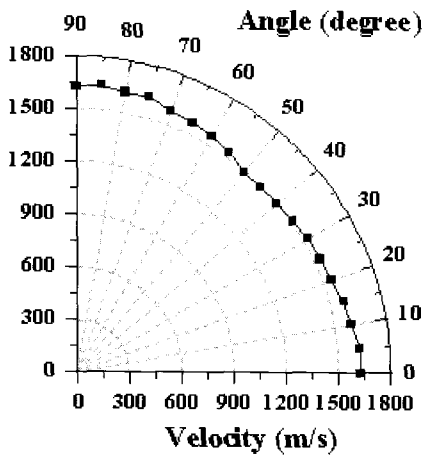
4.2. 위치표정

제안한 비선형방정식을 이용하여 전통적인 문턱 전압

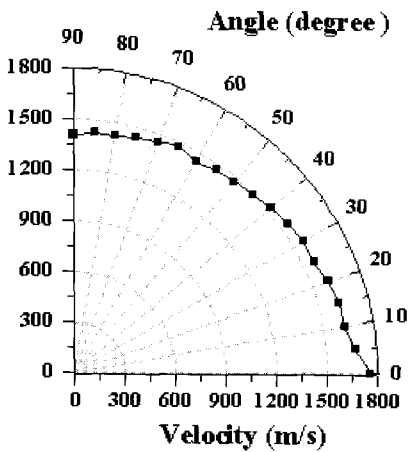
값 설정 방법으로 위치표정을 하여 결과를 비교하였다. 실험에서는 문턱 전압값 설정에 의한 도달시간 측정 오차의 주요 원인인 팽창과의 영향을 제거하기 위해 문턱 전압값을 0.2V로 설정하여 0.05V의 결과와 비교하였다.

먼저 제안한 비선형 알고리즘의 신뢰성을 확인하기 알루미늄 박판에서의 비선형 알고리즘에 의한 위치표정의 결과를 이전의 쌍곡선 교점에 의한 방법과 비교하였다. 정확한 알고리즘 간의 결과 비교를 위해 오차가 발생할 수 있는 팽창과를 문턱 전압값 0.2V로 하여 제거하였으

며, 계산한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. Table 3에서는 두 방법에 의한 결과의 오차를 비교하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 각각의 방법의 평균 오차가 매우 유사함을 알 수 있으며, 따라서 제안한 알고리즘은 신뢰성 있다고 할 수 있다.



(a) [0/90]8s



(b) [0]32

Fig. 4 Experimentally measured wave velocity with different angle to fiber direction

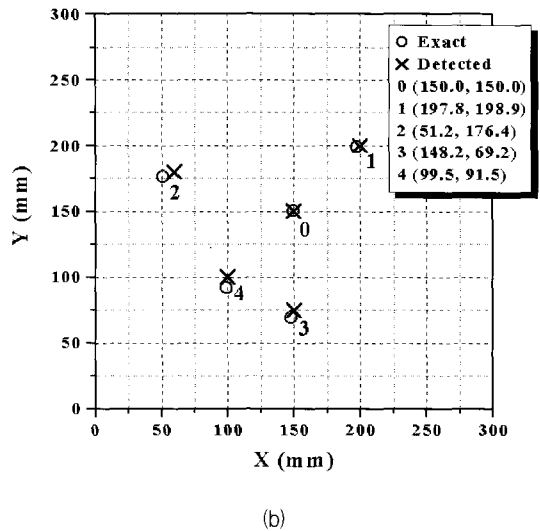
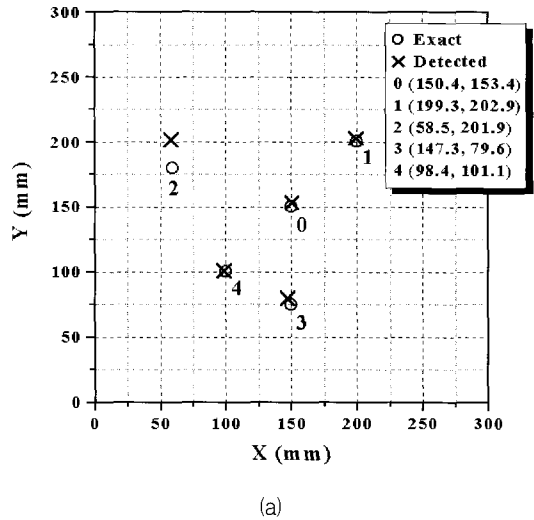


Fig. 5 Comparison of the results of source location by using (a) the conventional threshold analysis and (b) the threshold crossing method with nonlinear analysis performed on Al6061 plate with $V_{th}=0.2V$

Table 3 Comparison of errors in hyperbola method and nonlinear method

Source No.	Error (mm) Hyperbola Method	Error (mm) Nonlinear Method
0	3.4	0.0
1	3.0	2.5
2	21.9	9.5
3	5.3	6.1
4	1.9	8.5
mean	7.1	5.3

Fig. 6은 직교 적층판에서 전통적인 문턱값 설정에 의한 방법의 결과를 나타낸다. 문턱 전압값이 0.05V일 때에는 결과가 매우 좋지 않은데, 이것은 문턱 전압값과 만나는 파형의 종류, 파형의 감쇠에 의한 각각의 센서에서 측정하는 시간 오차가 주요 원인이다. 이 결과 문턱 전압값을 올려줌으로써 팽창파에 의해 야기되는 도달시간 측정의 오차를 배제함으로써 Fig. 6(b)와 같이 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 이와 같이 음향방출 위치표정에서 문턱 전압값의 설정은 사용자의 경험에 의존하게 되므로 박판 구조물의 실제 위치표정에서는 많은 오차의 가능성을 내재하게 된다. 게인(gain)이나 문턱 전압값 설정에 의한 도달시간 측정의 오차를 제거하기 위해서 신호처리의 한 방법인 웨이블릿 변환 디노이징을 도입하면, 위치표정의 도달 시간 측정 오차의 한 원인인 팽창파를 제거, 상대적으로 큰 진폭을 가지고 멀리까지 전파하는 굽힘파에 문턱 전압값을 집중시킬 수 있다[7].

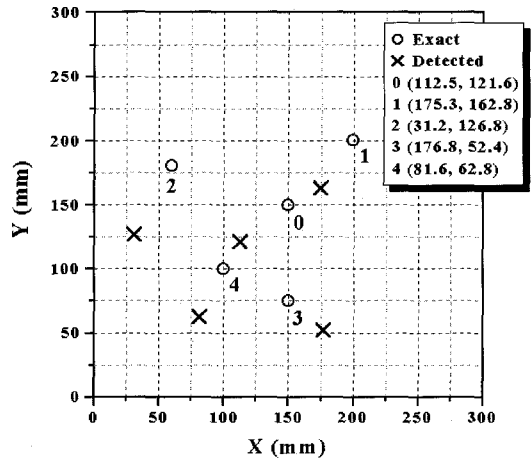
직교 적층판에 비해 상대적으로 방향마다의 속도의 변화가 심한 일방향 적층판에 대해 위치표정을 한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 6에서와 마찬가지로 문턱 전압값을 높게 설정했을 때에는 팽창파의 영향을 배제하여 양호한 결과를 얻을 수 있다.

Table 4에서는 Fig. 6, 7에서 계산한 위치표정 결과의 오차값들을 비교하였다. 오차값은 모의 발생원과의 거리이다.

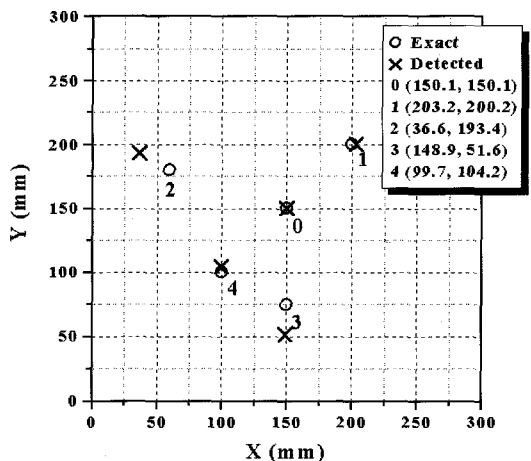
5. 결 론

이방성을 가지는 판재 형태의 재료에 위치표정을 위해서 변수의 하나인 탄성과 전파 속도를 소거한 비선형방

정식을 제안하였으며, 이와 같은 방법을 통해 이방성 판의 위치표정에 적용할 수 있음을 보였다. 직교 적층판과 일방향 적층판에서 속도측정을 통해 기준된 임의의 점으로부터 각각의 방향마다 속도가 틀려짐을 실험적으로 확인하였으며, 이와 같은 속도의 변화에 의한 음향방출 위치표정 알고리즘의 복잡성을 해결하기 위해 제안한 비선형 방정식 알고리즘이 매우 신뢰성 있음을 모의 발생원

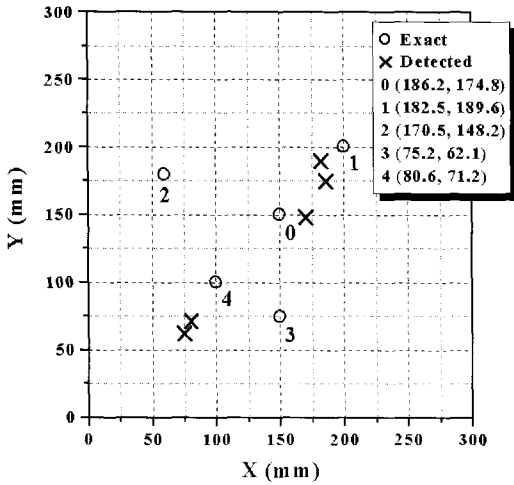


(a)

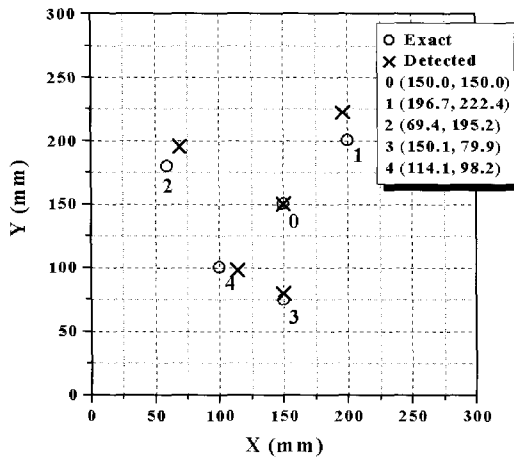


(b)

Fig. 6 Results of source location based on the threshold crossing method by using nonlinear analysis for [0/90]8S plate; (a) Vth=0.05V and (b) Vth=0.2V



(a)



(b)

Fig. 7 Results of source location based on the threshold crossing method by using nonlinear analysis for [0]32 plate; (a) Vth=0.05V and (b) Vth=0.2V

Table 4 Comparison of errors in CFRP plates

Source No.	Error (mm) Vth=0.05V		Error (mm) Vth=0.2V	
	[0/90]8S	[0]32	[0/90]8S	[0]32
0	47.0	43.9	0.1	0.0
1	44.7	20.4	3.2	22.6
2	60.5	114.9	26.9	17.9
3	35.1	75.9	23.4	4.9
4	41.5	34.7	4.2	14.2
mean	45.7	57.9	11.6	11.9

을 통한 위치표정 시물레이션을 통해 확인하였다. 다만 속도의 향을 소거한다해도 실제로 속도의 영향은 도달시간에 남아있으므로 실제 위치표정에서 오차의 원인으로 작용하게 된다. 따라서 이방성에 기인하는 속도의 차가 도달시간 측정에 미치는 영향을 보정해주는 연구는 계속 되어야 할 것이다.

후 기

이 논문 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음.(KRF99-005-E00006)

참고문헌

- [1] R. K. Miller and P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook," Vol. 5, *Acoustic Emission Testing*, pp. 92-120 & pp. 135-154, ASNT, (1987)
- [2] D. E. Bray and R. K. Stanley, "Nondestructive Evaluation: A Tool in Design, Manufacturing, and Service," CRC Press, Revised Edition, pp. 71-85, (1997)
- [3] M. R. Gorman, "Plate wave acoustic emission," *J. of Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 1, pp. 358-364, (1991)
- [4] S. M. Ziola and M. R. Gorman, "Acoustic Emission Source Location in Thin Plates Using Crosscorrelation," Proc. of AECM-4, pp. 411-417, ASNT, (1992)
- [5] M. R. Gorman and W. H. Prosser, "AE Source Orientation by Plate Wave Analysis," *J. of Acoustic Emission*, Vol. 9, No. 4, pp. 283-288, (1990)
- [6] O. Y. Kwon and Y. C. Joo, "Source Location in Highly Dispersive Media by Wavelet Transform of AE Signals," Proc. of FENDT'97, pp. 219-228, KSNT, (1997)
- [7] 이경주, 권오양, 주영찬, "웨이블릿 변환 노이즈 제거에 의한 AE 위치표정," *비파괴검사학회지* 제 20권, 제 6호, pp. 490-500, (2000)
- [8] J. A. Greene, T. A. Tran, V. Bhatia, M. F. Gunther, A. Wang, K. A. Murphy and R. O. Claus, "Optical fiber sensing technique for impact detection and location in composites and metal specimens," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 4, pp. 93-99, (1995)