

## 이방성 적층복합재 구조에서 AE 발생원 위치표정을 위한 실용적인 방법

### A Practical Method of Acoustic Emission Source Location in Anisotropic Composite Laminates

김정곤\*, 권오양\*\*†, 강용규\*

Jeong-Kon Kim\* and Oh-Yang Kwon\*\*† and Yong-Kyu Kang\*

초 록 이방성 복합재료 적층판에서는 섬유 배향에 따라 탄성계수가 변하므로 속도가 섬유의 방향성에 의존하게 된다. 등방성 속도를 기준으로 도달 시간차를 측정하는 전통적인 2차원 음향방출 위치표정 방법을 그대로 적용할 경우 위치표정의 오차가 매우 커지며, 그 과정이 복잡해지는 것을 피할 수 없다. 본 연구에서는 위치표정의 대상이 되는 관심영역(ROI)를 마치 유한요소법에서 사용하는 메쉬(mesh)처럼 적절한 크기의 정사각형 요소로 나눈 뒤, 각각을 가상의 AE 발생원으로 간주하였으며, 모든 요소에 대해 이방성을 고려한 속도를 기준으로 각 센서와의 도달시간차를 구하였다. 실험적인 검증을 위하여 알루미늄 박판 및 복합재료 적층판에 대해 0° 부터 90°까지의 속도를 측정하고 위치표정을 실시함으로써 이방성 적층복합재료 이루어진 실제 구조물에서의 실시간 활용 가능성을 확인하였다.

**주요용어:** 복합재료 적층판, 음향방출, 위치표정, 유한요소, 도달 시간차, 관심영역(ROI)

**Abstract** Since the velocity is dependent on the fiber orientation in anisotropic composites, the application of traditional acoustic emission (AE) source location techniques based on the constant velocity to composite structures has been practically impossible. The anisotropy makes the source location procedure complicated and deteriorates the accuracy of the location. In this study, we have divided the region of interest(ROI) into a set of finite elements, taken each element as a virtual source, and calculated the arrival time differences between sensors by using the velocities at every degree from 0 to 90. The calculated and the experimentally measured values of the arrival time difference are then compared to minimize the location error. The results from two different materials, namely AA6061-T6 and CFRP(uni-directional; UD, [0]<sub>32</sub>) laminate confirmed the practical usefulness of the proposed method.

**Keywords:** anisotropic composite laminate, acoustic emission, source location, finite element, arrival time difference, region of interest(ROI)

#### 1. 서 론

섬유강화 플라스틱 복합재료(fiber reinforced

plastic: FRP)는 경량구조용 신소재로 최근 각광받는 재료이며 특히 경량화에 대한 요구도가 높은 항공기나 고속전철 또는 자동차에 이르기까지 구

조재로서의 실용화가 날로 확대되고 있다. 이러한 구조재의 파손이 발생된 지점을 찾는 방법의 하나인 돌발형 AE 위치표정 기술은 구조물이 하중을 받았을 때 결합이 발생하는 영역의 탄성장의 변화에 수반되는 AE를 탐지함으로써 구조물내의 결합의 유무, 위치, 종류 및 위험도 등에 관한 정보를 얻을 수 있는 기술이다[1,2]. 국내 상수도 관망은 수도 시설의 중요한 구성요소지만 대부분이 지하에 매설되어 있음으로 배관의 노후상태 파악이 어려워 적절한 시기에 효과적인 유지관리를 받지 못하고 있다[1]. 환경부의 통계에 의하면 2001년 12월 말 기준으로 총 연장 120,405 km 중 11년 이상 경과된 노후관이 거의 52%에 이르고 있으며, 전체 생산량의 약 14%가 누수되어 적지않은 사회 및 경제적 손실이 발생되고 있다[2]. 이러한 지하매설 상수도 배관의 누수 탐지는 육안으로 식별이 곤란하므로 누수로 인한 신호음으로 부터 누수위치를 식별하는 기술이 주로 응용되고 있으며 선진국의 경우 상용화된 제품이 개발된 상태이다[3,4]. 그러나, 누수탐지에 쓰이는 기술의 개략적 방법은 알려져 있으나 실제 상세기술은 공개가 되지 않고 있어 국내의 기술개발이 필요한 실정이다.

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. 이와같은 방법으로 위치표정을 할 때 위치표정의 정확도에 영향을 주는 변수에는 탄성파의 전파속도, 도달 시간차 측정 및 센서 위치의 정확도 등이 있다[3,4].

FRP 복합재료가 갖는 가장 큰 특징 중의 하나는 이방성(anisotropy)이다. 즉, 탄성계수와 같은 역학적 특성이 섬유배열방향에 따라 현저하게 다르며, 이는 곧 방향에 따라 탄성파의 전파속도가 달라짐을 의미한다[3,5]. 바로 이 때문에 복합재료 구조물에서는 등방성 금속재료의 경우와는 달리 손상부의 위치를 파악하는 것이 매우 어려운 문제로 남아있다.

이방성 적층복합재료 내에서 발생하는 탄성파의 파원위치를 정확하게 결정하려는 연구는 국내·외적으로 매우 다양한 방법을 동원하여 계속적으로 시도되어 왔다[6-16]. Hardy 등[6]은 위치표정 과정에서 average velocity 개념과 탄성파 발생이 유력한 지역(zone)을 결정하는 hit-sequence technique을 도입하였다. Ge와 Hardy[7]는 위치표정의 정확

도 향상을 위해 geometrical spreading과 direction control 및 half space velocity model을 사용하였다. Sachse와 Kim[8]은 다양한 sensor array 및 그에 따른 장·단점을 제시하였고, 새로운 위치표정 알고리즘에서 미리 정해진 source에 대해 비선형방정식의 iteration을 통하여 결과 값이 그 source에 가까이 접근함을 보여주었다. Ge 등[9,10]은 각각의 센서에 도달한 파의 도달시간차 계산에 있어서 P파와 S파를 모두 고려하여 위치표정을 함으로써 위치표정의 정확도를 향상시킬 수 있었으며 이는 캐나다의 광물 탐사에서 실제로 사용되었던 방법이다. Ziola와 Gorman[11]은 특정 주파수 요소의 속도를 사용하였고, cross-correlation method를 통해 위치표정을 수행하였다. Prugger와 Gendzwill[12]은 로켓 모터 케이스에 대해 최소자승법과 절대값방법을 사용하는 위치표정 알고리즘을 제안하였다. Venkatesh와 Houghton[13]은 2차원 위치표정을 위해 back-propagation network(BPN)이라고 하는 iteration method를 알루미늄 판(continuous structure)과 bolted channel structure(discontinuous structure)에 대해 적용하였다. 이종오 등[14]은 다발형 탐촉자를 사용하여 음향방출 신호의 전파방향을 결정하고 두 개의 탐촉자로서 이방성 재료에서 음향 방출원의 위치를 추정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이경주와 권오양[15]은 위치표정 과정에서 문제가 되는 탄성파의 전파속도를 고려하지 않고 음향방출 발생원의 위치를 결정하는 알고리즘을 제안하였다. 많은 연구들 중 특히 Buttle과 Scruby[16]는 복합재료 적층판에 대해 0° 부터 90° 까지 10° 간격으로 속도를 측정하여 보간법에 의한 함수형태로 유도한 후 이를 임의의 point source에서 각각의 센서까지의 도달시간차를 구하는 데 이용하였으며, 또한 위치표정 과정에서 modified Gaussian-Newton 알고리즘과 같은 최소자승법을 이용함으로써 위치표정의 정확도를 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

이와 같이 매우 다양한 방법을 사용하여 이방성 적층복합재료 내에서 발생하는 탄성파 발생원의 위치를 정확하게 결정하려는 연구가 있었으나 앞에서 언급한 이방성의 문제로 인하여 복합재료 구조에서의 위치표정에 대해서 지금까지 어떠한 연구도 실용적인 방법을 제시하지는 못하였다. 이에 본 연구에서는 이방성 적층복합재에서 탄성파 발생원의 위치를 보다 정확히 알아낼 수 있으며 실

시간 활용 가능성이 높은 실용적인 방법을 제안하였다.

2. 위치표정 방법

2.1. 이방성 위치표정 알고리즘

2차원에서 탄성파의 발생위치를 결정하기 위해서는 3개의 센서를 이용하여 삼각형으로 배열하고, 센서 사이의 거리와 각 센서에 도달한 시간을 이용하여 그 위치를 구할 수 있다. 등방성 재료에 대해서는 이러한 방법에 대해 많은 연구가 이루어졌다 [1,3,4,11]. 하지만 이방성 재료의 경우에는 속도가 방향의 함수이므로 이러한 방법으로 탄성파 발생원의 위치를 결정하기는 매우 어렵다.

이방성 재료에서 탄성파의 발생위치를 결정하기 위해 임의의 발생원 P(x,y)에서 탄성파가 발생하여 각 센서에 도달한 시간을  $t_i$  ( $i=1,2,3$ ), 센서의 좌표를  $(x_i, y_i)$ 라고 하면, 식 (1)과 같이 시간에 대해 식을 표현할 수 있다[16].

$$t_i = \frac{1}{v} \{ (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \}^{1/2} \quad (1)$$

$(i=1, 2, 3)$

여기서,  $t_1$  값을 구하기 위해 식 (1)에서 미지수인  $v$  (velocity)에 대한 정의가 필요하다.

각 발생원과 센서를 이은 직선이 x축 방향과 이루는 각(단,  $90^\circ$  이하의 각)을 각각  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 로 둘 수 있다. 그러면 임의의 발생원에 대해  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  를 식 (2)에서와 같이 구할 수 있다.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[ \frac{(x - x_i)}{(y - y_i)} \right] \quad (2)$$

$(i=1, 2, 3)$

여기서 식 (1)의  $v$ 는 각각의  $\theta$ 에 대한 함수인  $v(\theta)$ 가 된다. 이 속도값은 실험에 의해 직접 측정할 수 있고 data table( $\theta$ 값에 따른  $v(\theta)$ )형태 또는 함수형태로 표현이 가능하다.

본 연구에서는 위와 같은 알고리즘을 실제 구조물의 실시간 평가에 활용하기 위해서 Fig. 1에서와 같이 임의의 크기의 시편을 적당한 크기의  $n$ 개의

정사각형 유한 요소로 나눈다. 그리고 각각의 사각형의 중심점을 선택한 후 그 점들을 가상의 AE 발생원으로 가정한다. 그러면 식 (1)을 이용하여  $n$ 개의 요소에서의  $t_1, t_2, t_3$  를 구할 수 있으며, 이는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta t_{12,n} &= |t_1 - t_2| \\ \Delta t_{13,n} &= |t_1 - t_3| \end{aligned} \quad (3)$$

(n번째 요소에 대해)

또한, 모든  $n$ 개의 요소에 대해서는 식 (4)의 형태로 표현된다.

$$\begin{aligned} (\Delta t_{12,1}, \Delta t_{13,1}), (\Delta t_{12,2}, \Delta t_{13,2}), \dots, \\ (\Delta t_{12,n}, \Delta t_{13,n}) \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 위의 식 (4)를 이용해 ROI에 포함된 유한 요소별로 Table 1과 같이 도달시간차를 미리 계산하여 둘 수 있고, 이는 이방성 적층복합재 구조의 적층방식 혹은 기하학적 형상에 따라 분류하여 만들어 질 수 있다.

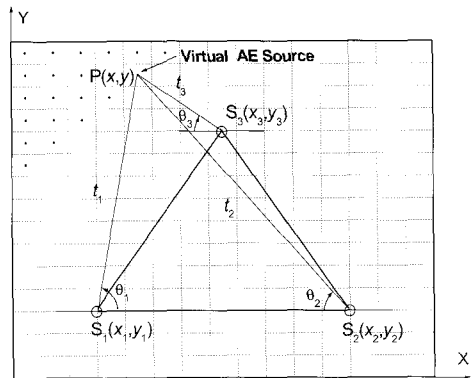


Fig. 1 Source location method with finite elements in ROI as the virtual AE sources

한편, 임의의 점에서 음향방출이 발생했을 때 탄성파는 모든 방향으로 전파하여 각 센서에 도달한다. 각 센서에 도달한 파형에서 임의의 문턱값을 설정하여 도달시간을 구한다. 여기서 하나의 도달시간차의 쌍( $\Delta t_{12}, \Delta t_{13}$ )이 구해질 수 있다. 따라서, 임의의 위치에서 발생한 탄성파의 도달시간차와 모든 요소에 대해서 구해져 있는 도달시간차, 즉 Table 1을 비교했을 때 ( $\Delta t_{12,n} - \Delta t_{12}$ )와 ( $\Delta t_{13,n} - \Delta t_{13}$ )

와의 절대값이 최소가 되는 요소를 선택하면 그 점이 실제 음향방출 발생원이 된다.

이와같은 방법은 실제 구조물을 평가할 때 구조물의 특성, 즉 적층방식 및 기하학적 형상이 정해지면 미리 관심영역을 설정하고 적절한 크기의 mesh로 나눈 다음 각 요소에 대하여 계산해 놓은 도달시간차 table을 이용함으로써 실시간으로 위치표정이 가능하게 한다.

Table 1 Arrival time difference between sensors for every finite element within ROI

Element No.	Coordinate (x,y)	Arrival Time Difference	
		$\Delta t_{12}$	$\Delta t_{13}$
1	(a <sub>1</sub> ,b <sub>1</sub> )	$\Delta t_{12,1}$	$\Delta t_{13,1}$
2	(a <sub>2</sub> ,b <sub>2</sub> )	$\Delta t_{12,2}$	$\Delta t_{13,2}$
3	(a <sub>3</sub> ,b <sub>3</sub> )	$\Delta t_{12,3}$	$\Delta t_{13,3}$
...	...	...	...
n	(a <sub>n</sub> ,b <sub>n</sub> )	$\Delta t_{12,n}$	$\Delta t_{13,n}$

2.2. 속도입력방법

본 연구에서는 복합재료 적층판(UD, [0]<sub>32</sub>)을 사용하여 0° 에서 90° 까지 5° 간격으로 속도를 직접 측정하였다. 이렇게 측정한 속도를 위치표정 알고리즘, 즉 식 (1)에서 사용하기 위해서는 입력방식에 대한 고려가 필요하다. 첫째,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  모두에 대해 각도별로 구한 data를 table형태로 만든 후 각각을 직접 대입하는 가장 간단한 방법이 있다. 둘째, 속도를 각도에 따른 함수의 형태로 입력하는 것이다[16]. 이번 연구에서는 이러한 두 가지 방법을 모두 적용하여 실험을 하였으며, 함수 형태의 적용에 있어서는 Buttle과 Scruby[16]의 cubic spline curve 혹은 polynomial curve 이외에 UD 적층판에 대해서 Fig. 2에서와 같이 타원형태로 유도하여 사용하였다. 실제로 UD 적층판에서 파동이 전파되는 wavefront의 형태를 보면 이는 타원형의 형태임을 알 수 있고 이러한 사실은 이미 보고된 바 있다[5].

Fig. 2에서와 같이  $v(\theta)$ 를 타원방정식의 정의에 근거하여 polar coordinates 형태로 유도하면 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 계산상의 편의를 위해 1사분면만을 고려한다.

$$\frac{x^2}{v_0^2} + \frac{y^2}{v_{90}^2} = 1 \tag{5}$$

$$y = x \tan \theta \tag{6}$$

식 (6)을 (5)에 대입하고 x에 대해서 정리하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \sqrt{\frac{v_{90}^2 \times v_0^2}{v_{90}^2 + v_0^2 \tan^2 \theta}} \tag{7}$$

여기서 구한 x와 식 (6)의 y를 이용하면  $v(\theta)$ 에 대한 표현을 얻을 수 있다.

$$v(\theta) = R = x \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \tag{8}$$

따라서, 식 (8)을 이용하면 0° 에서 90° 까지 모든 각도에 대한 속도분포를 입력값으로 하는 위치표정 알고리즘의 실제 적용이 가능하게 된다.

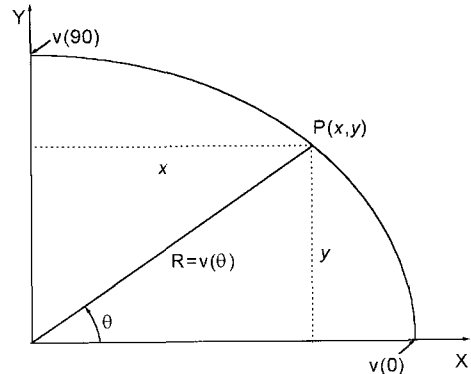


Fig. 2 Coordinate system employed for the velocity function

3. 실험장치 및 방법

3.1. 시편 및 실험장치

속도측정 실험과 위치표정 실험은 오차비교를 위한 reference material로서 1200×1000×3 mm 크기의 알루미늄(AA6061-T6)판과 이방성 재료로서 900×900×3 mm 크기의 탄소섬유 복합재료 적층판(CFRP UD, [0]<sub>32</sub>)에서 수행하였다. 속도 측정과 위치표정에 이용되는 탄성파는 표준 연필심(φ0.5 HB; JSNDI-006) 파괴를 이용하여 발생시켰다. 4개

의 광대역(50 kHz ~ 2 MHz) 고성능 압전센서 (B1025; Digital Wave)로 두 개의 인접하는 삼각형 센서 배열을 형성하는데 사용되었다.

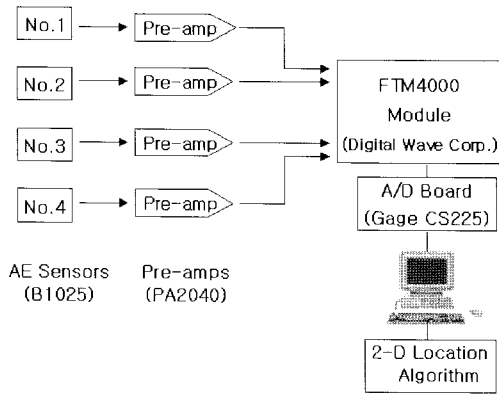


Fig. 3 A schematic diagram of experimental setup

센서들은 고진공 그리스(grease)를 접촉매질로 하여 판 위에 고정되었다. 탐지된 신호는 전치증폭기 (pre-amplifier)에 의해 40 dB 증폭되고, 그 후에 신호조정모듈(FTM4000)으로 들어간다. 파형신호는 PC에 있는 A/D보드(CS225; Gage)를 통해 5 MHz로 샘플링되고, 디지털화 되어 저장된다. Fig. 3은 실험장치에 대한 구성도를 보여준다. 도달시간차를 구하기 위해 각각의 파형에서 임의의 문턱 전압값을 이용하여 시간을 측정하였다. 각 방향마다 속도를 측정하기 위해서 0°에서 90°까지 5° 간격으로 실험을 하였다. 위치표정은 센서 배열의 위치를 고려하여 8개의 점으로부터 탄성파를 발생시키고, 파형을 획득하여 식 (1), 즉 위치표정 알고리즘에서 가정한 모든 요소에 대한 발생원과 센서 간의 도달 시간차는 Microsoft Excel<sup>®</sup> 및 Matlab<sup>®</sup>을 통해 프로그램하여 계산되었다.

### 3.2. 센서 Array와 Source의 좌표

Fig. 4에서와 같이 4개의 센서를 이용하여 삼각형 두 개로 이루어진 array를 만들었다. 센서의 정확한 x-y 평면상의 좌표는 알루미늄과 CFRP에 대해서 동일하다. 두 재료 모두에 대해 센서 array는 한 번의 길이가 300 mm인 정삼각형 형태이다. 전통적인 쌍곡선 알고리즘에서는 2중 위치표정의 오류를 보정하기 위해 제 4의 센서를 추가한다[3]. 본 연구에

서는 제안한 위치표정 알고리즘을 적용하기 위하여 쌍곡선 알고리즘과 마찬가지로 4개의 센서를 사용한다. 센서의 좌표는 Table 2에서 나타내었고, 모의 발생원은 센서 array의 위치를 고려하여 1번에서 8번까지 8개의 좌표로 설정하였다. Table 3은 모의 발생원의 정확한 좌표이다.

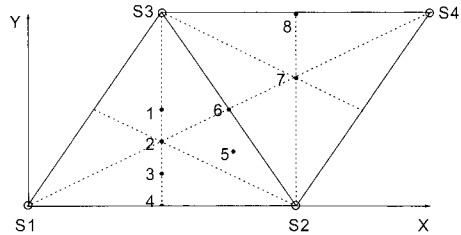


Fig. 4 Array of AE sensors and the position of simulated sources

Table 2 The nominal coordinate of AE sensors

Sensor No.	Coordinate (x, y)
S1	(0, 0)
S2	(300, 0)
S3	(150, 260)
S4	(450, 260)

Table 3 The exact coordinate of AE sources

Source No.	Coordinate (x, y)
1	(150, 130)
2	(150, 87)
3	(150, 43.5)
4	(150, 0)
5	(230, 73.5)
6	(225, 130)
7	(300, 173)
8	(300, 260)

3.3. 속도측정

실험에 사용한 알루미늄 박판과 복합재료 적층판에서 방향에 따른 속도의 변화를 알아보기 위해 0° 에서 90° 까지 일정한 각도 간격으로 속도를 측정하였다. 실험에서는 1차원 위치표정의 원리를 이용하여 두 센서 사이의 도달 시간차를 구하여 2차원 위치표정에 필요한 속도를 결정하였으며 그 과정에서 판파(Lamb wave)의 두 가지 성분, 즉 팽창파(extensional wave, S-mode)와 굽힘파(flexural wave, A-mode) 성분 중, 굽힘파 성분을 사용하였다.

Fig. 5(a)는 알루미늄 박판에서의 속도분포를 나타낸다. 알루미늄 판에서의 속도는 각각 0° (압연방향), 45°, 90° 방향에 대해 측정하였으며 박판의 경우 압연에 의해 제조되므로 미시적으로 집합조직이 나타나서 각 방향으로 탄성파의 속도차이가 있을 수 있으나[4], 실험에서는 등방성 재료로 간주하기에 충분한 오차범위에 속하였기 때문에 평균속도 2864 m/s를 사용하였다.

Fig. 5(b)는 복합 적층판(UD, [0]<sub>32</sub>)에서 0° 부터 90° 까지 5° 간격으로 측정된 속도의 분포를 보여주고 있다. 섬유 방향인 0° 에서 최대속도 1724 m/s를 나타내었으며, 각이 올라감에 따라 점점 타원의 형태를 따라 감소하여 90° 에서 1351 m/s로 20%이상 감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 섬유에 수직인 방향으로 갈수록 점차 탄성계수가 감소하기 때문이다.

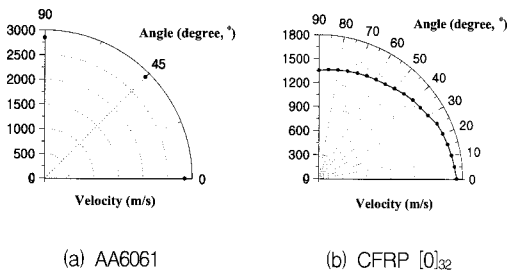
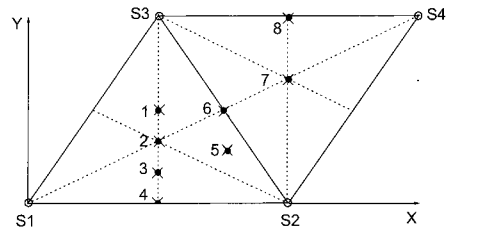


Fig. 5 Experimentally measured wave velocity with different angles at 5° interval; (a) AA6061-T6 and (b) CFRP laminate (UD, [0]<sub>32</sub>)

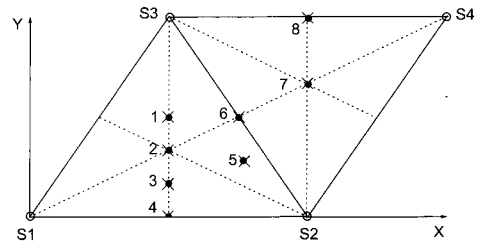
4. 위치표정결과 및 고찰

알루미늄 박판(AA6061-T6) 및 복합적층판(UD, [0]<sub>32</sub>)에 대해서 위치표정 과정을 수행하였는데, 도

달시간차 측정을 위한 문턱 전압값( $V_{th}$ )는 8개의 모의 발생원에 대해 0.05V로 모두 동일하게 적용하였다.



(a) AA6061



(b) CFRP laminate (UD, [0]<sub>32</sub>)

Fig. 6 Results of source location by using the new location algorithm; (a) AA6061-T6 and (b) CFRP laminate (UD, [0]<sub>32</sub>)

Fig. 6은 두 가지 재료에 대한 위치표정의 결과를 보여주고 있으며 여기서 사용한 요소의 크기는 2×2mm이다. 이 결과를 보다 상세하게 비교할 수 있도록 전통적인 쌍곡선 방법과 새로운 방법에 의한 결과를 Table 4와 5에는 알루미늄 판에 대하여, Table 6과 7에는 복합재료 적층판에 대하여 각각의 방법에 의한 위치표정 결과의 오차를 비교하였다. Table 5와 Table 7에서의 오차는 실험에 의해서 구한 하나의 정사각형 요소의 중점에서 연필심 파괴에 의한 모의 AE 발생원까지의 대각선의 길이를 의미한다. 두 재료 모두 새로운 방법에 의한 평균 오차는 1.3 mm이었다.

특히 전통적인 방법에서는 탄성파의 발생원이 삼각형의 센서 array의 외부로 갈수록 이방성 재료의 특성상 파의 분산과 감쇠가 심해져 위치표정의 정확도가 급격히 떨어지는 결과를 보이지만 본 연구에서 제안한 방법을 사용하면 Fig. 6에서 볼 수 있

듯이 탄성파의 발생원이 센서 S1, S2, S3가 이루는 삼각형의 외부에 있을 때에도 오차가 있어서 삼각형의 내부에 비해 별다른 차이가 없다. 또한 전통적인 방법에서는 발생원이 센서 부근에 있을 때에 도달시간차의 측정에 기인하여 오차가 커지지만 Fig. 6의 발생원들 중 5번을 보면 센서와 가까운 위치에 있음에도 불구하고 다른 것들과 오차가 거의

동일하다. Table 5와 Table 7을 통해 등방성 재료와 이방성 재료에서 위치표정 결과의 정확성이 별로 다르지 않음을 알 수 있고, 이는 제안한 위치표정 방법이 어떠한 재료에도 적용될 수 있음을 보여준다.

오차의 원인으로서는 속도측정, 모의 발생원에서 획득한 파형의 도달시간차 측정, 센서위치와 연결심 파단위치 등을 꼽을 수 있지만 가장 주요한 원인은

Table 4 Coordinate of detected source and location error by using the conventional threshold method in AA6061-T6 plate

Source No.	Coordinate (x, y)	Error (mm)
		AA6061
1	(153.2, 132.8)	4.3
2	(152.4, 88.4)	2.8
3	(153.0, 46.1)	3.9
4	(158.3, -18.1)	19.0
5	(239.2, 75.2)	9.3
6	(215.4, 139.0)	13.8
7	(297.3, 168.5)	5.2
8	(290.0, 271.3)	15.1
mean	-	9.2

Table 6 Coordinate of detected source and location error by using the conventional threshold method in CFRP laminate (UD, [0]<sub>32</sub>)

Source No.	Coordinate (x, y)	Error (mm)
		CFRP ([0] <sub>32</sub> )
1	(153.0, 128.5)	3.4
2	(153.3, 67.7)	21.0
3	(132.5, 14.1)	34.2
4	(138.5, -37.3)	39.0
5	(206.9, 49.2)	33.5
6	(202.1, 113.7)	28.1
7	(292.3, 183.3)	12.9
8	(297.0, 298.4)	38.5
mean	-	26.3

Table 5 Coordinate of detected source and location error by using the new location method in AA6061-T6 plate

Source No.	Coordinate (x, y)	Error (mm)
		AA6061
1	(151.0, 131.0)	1.4
2	(151.0, 87.0)	1.0
3	(149.0, 43.0)	1.1
4	(149.0, 1.0)	1.4
5	(231.0, 73.0)	1.8
6	(225.0, 131.0)	1.0
7	(299.0, 175.0)	1.0
8	(299.0, 261.0)	1.4
mean	-	1.3

Table 7 Coordinate of detected source and location error by using the new location method in CFRP laminate (UD, [0]<sub>32</sub>)

Source No.	Coordinate (x, y)	Error (mm)
		CFRP ([0] <sub>32</sub> )
1	(149.0, 131.0)	1.4
2	(149.0, 87.0)	1.0
3	(149.0, 43.0)	1.1
4	(149.0, 1.0)	1.4
5	(229.0, 75.0)	1.1
6	(225.0, 129.0)	1.0
7	(299.0, 173.0)	2.2
8	(299.0, 259.0)	1.4
mean	-	1.3

사용된 요소의 형태가 한 변의 길이가 최소 2 mm 인 정사각형이었고, 가상의 AE 발생원을 그 사각형의 중심으로 잡았기 때문에 나타나는 기하학적인 요소에 의한 것으로 볼 수 있다. 즉, 유한 요소를 한 변의 크기가 5 mm인 정사각형으로 잡은 경우보다 2×2 mm로 잡은 경우에 오차가 훨씬 줄어들었고, 이는 사용하는 요소의 크기가 위치표정의 정확도에 미치는 영향이 크다는 것을 말해준다. 그러나 요소의 크기를 무한히 줄여나간다 하더라도 위치표정의 오차는 어떤 한계 이상으로는 줄어들지 않을 것이므로 최적의 요소크기를 선택하는 것은 매우 중요하다. 실용적인 측면에서 사용하는 센서의 크기와 사용된 탄성파의 파장은 요소의 크기를 선택하는 데 있어서 중요한 인자로 고려할 수 있으며, 요소의 크기가 줄어드는 것과 동시에 늘어나는 계산량 또한 반드시 고려되어야 할 요소이다.

## 5. 결론

본 연구는 이방성을 가지는 적층복합재 구조에서 각각의 방향으로의 탄성파 전파 속도를 모두 고려하는 위치표정 알고리즘 통해 실용적인 해법을 제시한 것으로 지금까지의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 적층복합재 구조의 적층방식 혹은 기하학적 형상에 따라 분류하여 유한 요소별로 도달시간차를 미리 계산하여 table 형태로 만들 수 있으므로 이방성 적층복합재료 내에서 발생하는 탄성파의 파원위치를 보다 정확하게 결정할 수 있다.
- (2) 가상의 AE source를 선정하기 위해 사용하는 요소의 크기는 위치표정의 정확도 및 실용적인 측면을 고려하여 최적의 크기로 선택하여 사용해야 한다.
- (3) 이방성에 기인하는 속도의 변화에 의한 음향방출 위치표정 알고리즘의 문제점을 해결하기 위해 도입한 새로운 방법의 신뢰도를 모의 발생원을 통한 위치표정 실험을 통해 확인하였으며, 필요한 계산량이나 계산속도를 고려할 때 실제 구조물에서 충분히 실시간으로 활용할 수 있다.

## 후기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2002-041-D00010)

## 참고문헌

- [1] M. Ge and G. Song, "A Precise AE Source Location Technology for Aerospace Industry," Part of the SPIE Conference on Nondestructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, and Aerospace Hardware III, SPIE Vol. 3586, pp. 110-117, (1999)
- [2] O. Y. Kwon, D. J. Yoon, H. Jeong and W. M. Cho, "Acoustic Emission Testing of Filament Wound CFRP Pressure Vessels," Proc. 8th Asia-Pacific Conference on NDT, pp. 47-54, (1995)
- [3] R. K. Miller and P. McIntire, "Nondestructive Testing Handbook," ASNT, Vol. 5 Acoustic Emission Testing, pp. 92-154 & pp. 418-568, ASNT, (1987)
- [4] O. Y. Kwon, K. J. Lee and Y. C. Joo, "An Improved AE Source Location by Wavelet Transform De-noising Technique," KSNT, Vol. 20, No. 6, pp. 490-500, (2000)
- [5] Y. H. Kim and S. S. Lee, "Simulation of Elastic Wave Propagation in Anisotropic Materials," KSNT, Vol. 17, No. 4, pp. 227-236, (1997)
- [6] H. R. Hardy, R. M. Belesky and M. Ge, "Acoustic Emission/Microseismic Source Location in Geotechnical Applications," Proc. 29th U.S. Symp. on Rock Mechanics, pp. 3066-3075, (1988)
- [7] M. Ge and H. R. Hardy, "Design of 3-dimensional AE/MS Transducer Arrays: Theory and Strategy," World Meeting on Acoustic Emission, pp. 32-37, (1988)
- [8] B. Castagnede, W. Sachse and K. Y. Kim, "Location of Point-like Acoustic Emission Sources in Anisotropic Plates," Materials Science Center Report, No. 6540, (1989)
- [9] M. Ge and P. K. Kaiser, "Interpretation of Physical Status of Arrival Picks for Microseismic Source Location," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 80, No. 6, pp. 1643-1660, (1990)
- [10] M. Ge and P. Mottahed, "An Automated



- AE/MS Source Location Technique Used by Canadian Mining Industry," Progress in Acoustic Emission VII The Japanese Society for NDI, pp. 417-424, (1994)
- [11] S. M. Ziola and M. R. Gorman, "Acoustic Emission Source Location in Thin Plates Using Cross-correlation," Proc. 4th AE from Composite Materials, ASNT, pp. 411-417, (1992)
- [12] A. Prugger and D. Gendzwill, "Micro-earthquake Location: a Nonlinear Approach That Makes Use of a Simplex Stepping Procedure," Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 85, No. 1, pp. 375-377, (1995)
- [13] V. Venkatesh and J. R. Houghton, "Neural Network Approach to Acoustic Emission Source Location," J. of Acoustic Emission, Vol. 14, No. 2, pp. 61-68, (1996)
- [14] J. O. Lee, J. K. Lee and C. H. So, "AE Source Location of Unidirectional GFRP," KSNT, Vol. 21, No. 3, pp. 277-280, (2001)
- [15] O. Y. Kwon and K. J. Lee, "AE Source Location in Anisotropic Plates by Using Nonlinear Analysis," KSNT, Vol. 21, No. 3, pp. 281-287, (2001)
- [16] D. J. Buttle and C. B. Scruby, "Acoustic Emission Source Location in Fiber Reinforced Plastic Composites," J. of Acoustic Emission, Vol. 7, No. 4, (1988)