

일정한 보강섬유 굴곡이 있는 두꺼운 복합재료에서의 초음파 전파에 관한 연구

Ultrasound Wave Propagation in Thick Composites with Uniform Fiber Waviness

전흥재*, 장필성**

Heoung-Jae Chun* and Pil Sung Jang**

초 록 복합재료는 우수한 재료특성을 가지고 있어 기존의 금속 재료를 대신하여 많은 분야에서 사용되고 있다. 최근 들어서 큰 하중을 받는 구조재료 사용이 확대되면서 많은 수의 복합재료 단일층을 두껍게 적층한 두꺼운 복합재료의 사용이 늘어나고 있다. 복합재료를 두껍게 적층하는 경우 성형과정 중에 보강섬유 굴곡이 발생하기 쉬운데 두꺼운 복합재료 내에 발생한 보강섬유의 굴곡은 강성 및 강도를 감소시켜 구조물의 안정성을 저하시킨다. 따라서 두꺼운 복합재료로 만들어진 구조물에 내재된 보강섬유 굴곡의 유무나 정도를 알아내는 것은 구조물의 안전성 확보를 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 초음파를 이용한 비파괴 평가를 위해 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료 내에서 초음파 전파 특성에 대한 연구를 수행하였다. 여러 가지 일정한 굴곡비의 보강섬유 굴곡을 가지는 두꺼운 복합재료에 대해서, 평면파(plane wave) 이론과 파선 추적(ray tracing) 이론을 이용한 수치 해석 방법으로 초음파 전파에서 보강섬유의 굴곡의 영향을 예측하고, 보강섬유 굴곡 정도에 따른 초음파 전파 특성의 변화를 예측하였다. 이론적 해석을 검증하기 위해서 여러 가지 일정한 보강섬유의 굴곡비를 가지는 복합재료 시편을 제작하여, 초음파 투과법(through-transmission) 시험을 수행하였다. 이를 통해 일정한 보강섬유의 굴곡을 가지는 복합재료 내의 초음파 전파 특성과, 보강섬유의 굴곡 정도에 따른 초음파 전파 특성의 변화를 이론적으로 얻어진 결과와 비교하여 두꺼운 복합재료 내에 존재하는 보강섬유의 굴곡이 초음파 전파에 미치는 영향을 알 수 있었다.

주요용어: 보강섬유 굴곡, 초음파, 두꺼운 복합재료

Abstract There has been a growing interest in thick composite materials especially for primary structures. Fiber waviness is one of the manufacturing defects frequently encountered in thick composite structures and affects the mechanical properties such as stiffness and strength significantly. Therefore, nondestructive evaluation technique that can detect fiber waviness of thick composite is very important for the integrity of structures. In this study, efforts were made to understand ultrasonic wave propagation in thick composites with uniform fiber waviness by adopting the ray and plane wave theories. Both theoretical and experimental investigations were conducted to understand the wave propagation in thick composites with uniform fiber waviness. The experiments were conducted on specially fabricated thick composite specimens with various degrees of uniform fiber waviness using the conventional through-transmission method to verify the predicted results. The experimental results showed good agreement with the theoretical predictions.

Keywords: fiber waviness, ultrasonic, thick composites

1. 서 론

두 가지 이상의 서로 다른 재료를 혼합하여 각 재료가 가지는 장점을 극대화한 복합재료는 높은 비강성(specific stiffness), 비강도(specific strength), 내식성(corrosion resistance) 등의 우수한 재료특성을 가지고 있어 기존의 금속재료를 대체하여 많은 산업분야에서 사용되고 있다. 특히 최근에는 이러한 복합재료의 사용이 큰 하중을 받는 구조재로 확대되면서, 많은 수의 복합재료 단일층(lamina)을 겹겹이 쌓아 만든 두꺼운 복합재료의 사용이 급증하고 있다. 그런데 기존에 많이 사용되어온 얇은 복합재료와는 달리 두꺼운 복합재료는 성형과정 중에 굴곡이 생성되는 초기 결함을 내포하게 된다. 두꺼운 복합재료내의 보강섬유가 굴곡 되는 것은 복합재료의 성형과정 중에 발생할 수 있는 초기 결함의 한 종류로, 그 생성 원인은 프리프레그(prepreg)의 국부 좌굴, 복합재료 적층판 사이의 잔류 응력, 필라멘트 와인딩 과정(filament winding process)에서 위쪽으로 감기는 적층부 때문에 안쪽 적층부에 가해지는 압력으로 인한 원주방향 보강섬유의 굴곡 현상 등이 있다. 이러한 보강섬유의 굴곡은 두꺼운 복합재료의 기계적 성질에 영향을 미쳐 강성 및 강도의 저하를 유발함이 밝혀졌다[1-2]. 따라서, 복합재료 내의 보강섬유의 굴곡 유무 및 그 정도를 아는 것은 일차 구조물로 사용되는 두꺼운 복합재료의 안전성 확보를 위하여 매우 중요하다.

초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은 구조물의 결함 판별을 위한 별도의 시편을 필요로 하지 않으므로, 구조물에 손상을 주지 않고 내부의 결함을 진단할 수 있는 장점을 가지고 있어 굴곡진 보강섬유를 가진 두꺼운 복합재료에서의 보강섬유 굴곡을 평가하기 위해 초음파 전파에 관한 몇몇 연구가 시도되었다[3-5]. 1994년 Wooh와 Daniel[3]은 일정한 굴곡비의 보강섬유를 갖는 복합재료에 대하여, 파선 추적(ray tracing) 이론을 이용하여 초음파 전파 경로에 대한 예측을 시도하였으며, McIntyre[4]는 1995년 파동 방정식에 대한 FDM(Finite Difference Method)를 이용하여 파의 진폭 변화에 관한 연구를 하였다. 또한, Kim, Zou, 그리고 Sachse[5]는 1998년에 보강섬유 굴곡의 길이 방향에 대한 파의 경로와 도달 시간에 대한 해석적 정식화에 관한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 평면파 이론과 파선 추적 이론을 이용한 보강섬유의 굴곡이 일정한 복합재료 모델을 사용하여 여러 가지 굴곡비에 대해 초음파 전파 특성을 해석하였다. 보강섬유의 굴곡 정도를 나타낼 수 있는 초음파의 전

파 경로를 고려함으로써 보강섬유의 굴곡비의 변화에 따른 초음파 전파의 변화 특성을 예측하였다. 그리고 보강섬유의 굴곡이 일정한 복합재료 시편을 여러 가지 굴곡비로 제작하고, 투과법 방식의 실험을 수행하여 그 결과를 수치 해석 결과와 비교하였다. 이로부터 이론적으로 예측된 초음파 전파 특성과, 다양한 굴곡비에 따른 특성 변화를 실험적으로 확인하였다.

2. 이 론

2.1. 일정한 보강섬유의 굴곡을 가진 복합재료 모델 (Uniform Fiber Waviness Model)

일정한 보강섬유의 굴곡을 가진 복합재료에서의 초음파 전파 현상을 예측하기 위하여, Fig. 1과 같이 조화 함수(harmonic function)로 표현되는 일정한 굴곡비의 보강섬유로 이루어진 두꺼운 복합재료의 한 주기 부분을 고려하였다. 보강섬유각(θ_f)은 x 축에 따라 변화하나, 미소 체적 내에서 일정한 보강섬유각을 가지는 것으로 고려되었다.

$$\theta_f = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \dots\dots\dots (1)$$

여기서, a 는 보강섬유 굴곡의 진폭이고 λ 는 보강섬유 굴곡의 주기 길이이다. 주어진 보강섬유각에 대해서 비감축(off-axis, $x-y-z$) 응력-변형률 관계는 다음과 같이 변환행렬(transformation matrix $[T]$)를 사용하여 정축(on-axis, 1-2-3) 응력-변형률 관계로부터 얻을 수 있다[7].

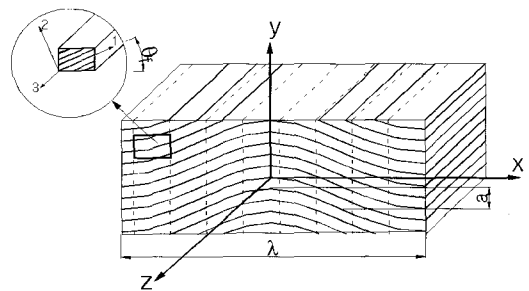


Fig. 1 Schematic drawing of a representative volume of thick composites with uniform fiber waviness

$$[\sigma]_{x,y,z} = [T]^{-1}[C][R][T][R]^{-1}[\varepsilon]_{x,y,z} \dots\dots (2)$$

$$= [C'][\varepsilon]_{x,y,z}$$

여기서,

$$\alpha = \cos \theta_f, \beta = \sin \theta_f$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \alpha^2 & \beta^2 & 0 & 0 & 0 & 2\alpha\beta \\ \beta^2 & \alpha^2 & 0 & 0 & 0 & -2\alpha\beta \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha & -\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta & \alpha & 0 \\ -\alpha\beta & \alpha\beta & 0 & 0 & 0 & \alpha^2 - \beta^2 \end{bmatrix}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

따라서, Fig. 1과 같이 z 축에 대한 회전에 의한 비깁축 강성계수 [C']은 재료의 주축인 정축 강성계수 [C]로 표현된다.

2.2. 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료에서의 파의 전파

2.2.1. 이방성 재료에서의 파의 전파 이론

재료에 가해진 동적 외란에 의하여, 재료의 변형의 전파 현상이 발생하게 된다. 이렇게 발생된 파의 거동은 다음의 파동 방정식에 의해 지배된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, C_{ijkl} 은 강성계수(stiffness components)를 나타낸다. 이의 일반해로써, 정상상태의 평면파(plane wave)의 변위를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_i = A p_i \exp [i(kx_j - \omega t)] \dots\dots\dots (4)$$

여기서, t 는 시간, u_i 는 변위, A 는 변위의 진폭 그리고 p_i 는 입자의 진동 방향(polarization direction)을, 그리고 ω 는 원주각속도를 나타낸다. 파동수(wave number) k 와 위상속도(phase velocity) v 는 전파 방향벡터(wave

normal vector) l_i 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$v = \omega/k, \quad k_i = kl_i \dots\dots\dots (5)$$

파의 지배방정식 식 (3)에 파의 변위를 나타내는 식 (4)를 대입하면, 다음과 같은 고유치 문제가 된다.

$$(C_{ijkl}k_j k_k - \rho \omega^2 \delta_{il}) p_l = 0 \dots\dots\dots (6)$$

식 (4)가 의미 있는 해를 얻기 위해서 다음의 행렬식이 0이 되어야 하며, 이를 Christoffel's equation이라 한다[6].

$$[\Gamma_{il} - \rho \omega^2 \delta_{il}] = 0 \dots\dots\dots (7)$$

여기서, $\Gamma_{il}(= C_{ijkl}k_j k_k)$ 를 Christoffel tensor라 한다. 식 (7)은 재료 내부의 3차원 공간상에서, 주어진 전파 방향에 평행하게 진동하며 전파되는 하나의 종파(longitudinal wave)와 전파 방향에 수직으로 진동하는 두 개의 횡파(transverse wave)에 대한 파속도(wave velocity)로 표현된 해를 갖는다. 각각의 파속도는 식 (7)의 고유치와 관계를 갖으며, 또한 각 고유치에 대응하는 고유벡터는 파의 진동방향 벡터 p_i 를 나타낸다.

2.2.2. 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료에서의 파속도 및 모드

정축 강성행렬이 횡등방성(transversely isotropic) 성질을 갖는다면, x-y 평면내에서 전파되는 파에 대하여 비깁축 좌표계로 표현된 Christoffel's equation은 축약 표기법(contract notation)으로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{vmatrix} \Gamma_{xx} - \rho v^2 & \Gamma_{xy} & 0 \\ \Gamma_{xy} & \Gamma_{yy} - \rho v^2 & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_{zz} - \rho v^2 \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

$$\Gamma_{xx} = C_{11}' l_x^2 + C_{66}' l_y^2 + 2C_{16}' l_x l_y$$

$$\Gamma_{yy} = C_{66}' l_x^2 + C_{22}' l_y^2 + 2C_{26}' l_x l_y$$

$$\Gamma_{zz} = C_{55}' l_x^2 + C_{44}' l_y^2 + 2C_{45}' l_x l_y$$

$$\Gamma_{xy} = C_{16}' l_x^2 + C_{26}' l_y^2 + (C_{12}' + C_{66}') l_x l_y$$

x - y 평면내에서 재료의 주축과 평행하지 않게 전파되는 각 파의 위상속도와 이에 대응하는 진동방향 벡터는 식 (8)의 고유치, 고유벡터로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\rho v_{ql,qt}^2 = \frac{\Gamma_{xx} + \Gamma_{yy} \pm \sqrt{(\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy})^2 + 4\Gamma_{xy}^2}}{2} \dots\dots\dots (9)$$

$$\rho v_{pt}^2 = \Gamma_{zz}$$

$$d_{ql,qt}^T = \left(\frac{\Gamma_{xy}}{\sqrt{\Gamma_{xy}^2 + (\rho v_{ql,qt}^2 - \Gamma_{xx})^2}} \cdot \frac{\rho v_{ql,qt}^2 - \Gamma_{xx}}{\sqrt{\Gamma_{xy}^2 + (\rho v_{ql,qt}^2 - \Gamma_{xx})^2}} \cdot 0 \right)$$

$$d_{pt}^T = (0, 0, 1)$$

..... (10)

여기서, 밑첨자 ql, qt 는 각각 준종파(quasi-longitudinal wave)와 준횡파(quasi-transverse wave)를 나타내며, pt 는 순횡파(pure-transverse wave)를 나타낸다. 파의 전파 방향이 재료의 주축과 평행하지 않으므로, x - y 평면내에서 진동하는 파의 속도는 이방성 재료의 전단연성(shear coupling) 효과에 의하여 순수한 종파와 횡파의 모드를 갖지 못하고, 서로 연성이 된다. 이러한 준횡파와 준종파는 Fig. 2 (a), (b)와 같이 전파방향 벡터와 평행, 수직하지 않은 입자 진동방향을 갖게 된다. 반면, 재료의 주축과 동일한 z 방향으로 진동하는 횡파는 다른 모드와 연성되지 않아 Fig. 2 (c)와 같이 전파방향 벡터에 수직관계를 이루게 된다.

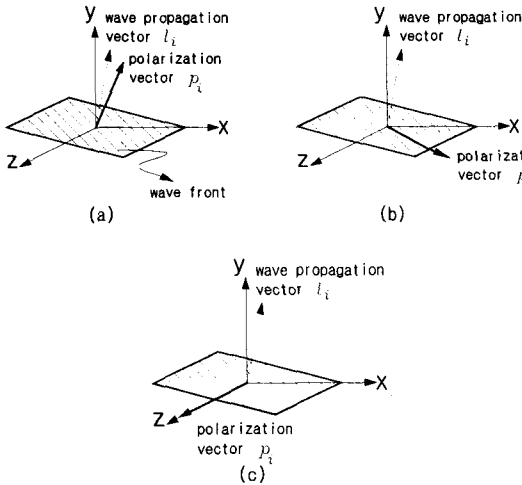


Fig. 2 Schematic drawings of wave modes propagating in symmetric plane of transversely isotropic materials : (a) quasi-longitudinal, (b) quasitransverse and (c) pure-transverse wave

2.3. 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료에서의 파의 전파 경로

2.3.1. 이방성 재료에서의 파의 에너지 전파

파의 에너지는 재료의 관성에 의한 운동에너지와 변형에너지를 구성된다. 이들 에너지 전파 속도를 다음과 같다[6].

$$(v_E)_i = \frac{\bar{F}_i}{E} = \frac{1}{\rho} C_{ijkl} m_k p_j p_l \dots\dots\dots (11)$$

여기서 \bar{F}_i 는 면적에 대한 에너지 유량의 시간 평균이고 E 는 부피에 대한 에너지량의 시간 평균이다. m_k ($= l_k/v$)는 위상속도의 역수인 slowness의 성분이다. 한편, 무한개의 점원에 의해 발생하는 파는 서로 근사한 주파수를 갖게 되며, 따라서 파의 중첩효과에 의해 군파(group wave)를 형성한다. 형성된 군파의 속도는 유사한 주파수를 가진 두 개의 위상파로부터 다음과 같이 정의된다[8].

$$(v_g)_i = \frac{\partial \omega}{\partial k_i} \dots\dots\dots (12)$$

이를 식 (7)에 적용하면, 군속도와 에너지 전파 속도가 일치함을 알 수 있으며, 다음의 위상속도와의 관계를 얻게 된다.

$$(v_g)_i l_i = v \dots\dots\dots (13)$$

즉, 군속도의 전파방향 벡터 방향으로의 정사영이 위상속도가 된다. 따라서, 파가 순수 모드를 갖지 않으면, 파는 전파 방향벡터가 나타내는 방향으로 전파되지 않고 편향되어 Fig. 3과 같이 군속도(group wave)로 전파된다.

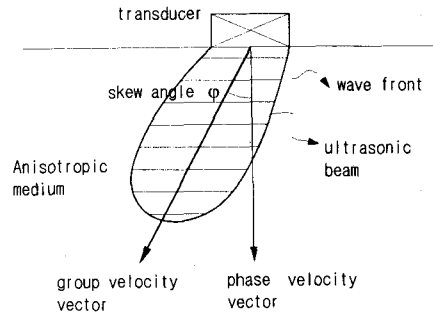


Fig. 3 Schematic drawing of ultrasonic beam skewed from propagation direction

따라서, x - y 평면내에서 전파되는 준종파와 준횡파의 군속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 (v_g)_x &= \frac{1}{\rho} [C_{11}' p_x^2 m_x + C_{12}' p_x p_y m_y + C_{26}' p_y^2 m_y \\
 &\quad + C_{16}' (p_x^2 m_y + 2p_x p_y m_x) + C_{66}' (p_x p_y m_y + p_y^2 m_x)] \\
 (v_g)_y &= \frac{1}{\rho} [C_{12}' p_x p_y m_x + C_{22}' p_y^2 m_y + C_{16}' p_x^2 m_x \\
 &\quad + C_{26}' (p_x^2 m_x + 2p_x p_y m_y) + C_{66}' (p_x^2 m_y + p_x p_y m_x)] \\
 (v_g)_z &= 0
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

2.3.2. 보강섬유 굴곡을 갖는 복합재료에서의 파의 굴절

강섬유 굴곡을 갖는 복합재료는 Fig. 1과 같이 보강섬유의 방향각이 연속적으로 변화하기 때문에, 위치에 따라 재료 물성도 변화한다. 복합재료가 미소체적을 가지는 미소체적요소로 구성되어있다고 가정하면 각 미소체적요소는 비균축 상태에 있다고 볼 수 있다. 임의의 파 진행 경로에 있는 i 와 $i+1$ 번째 점에서 기계적 물성이 달라 경계면에서의 파의 진행 형태가 되므로 Fig. 4에 도시한 바와 같이 가상적인 경계면을 가진 것으로 고려하였다.

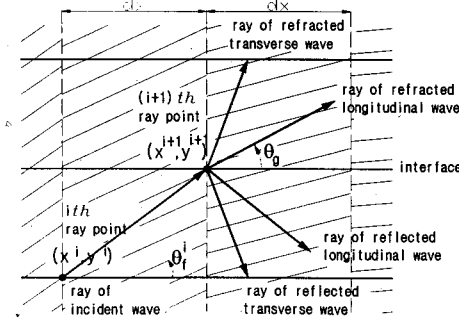


Fig. 4 Schematic drawing of analytical model for refraction of insonified wave

x - y 평면에 수직으로 진동하는 순횡파(puretransverse wave)는 다른 파와 비연성 되어 순수 모드를 가지므로, 이의 위상파와 군파(group wave)는 일치한다. 따라서, x - y 평면내에서 진동하는 모드를 가진 준종파와 준횡파의 경로점은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x^{i+1} = x^i + \Delta \cos \theta_g^i, \quad y^{i+1} = y^i + \Delta \sin \theta_g^i \tag{15}$$

여기서, x , y 는 파의 경로점의 좌표를 나타내며, 위첨자 i , $i+1$ 은 경로점의 순번을 뜻한다. 그리고 Δ 는 경로의 미소 증가량을 나타내며 θ_g^i 는 i 번째 경로점에서의 군파의 전파방향각을 나타낸다.

파가 기계적 물성이 다른 두 개의 매질의 경계면을 거쳐 전파되는 경우, 경계면에서 굴절(refraction)과 반사(reflection) 현상이 발생하게 된다. 이러한 현상은 경계면에서의 변위 및 경계면에 수직인 응력의 연속조건으로부터 모든 파의 경계면에 평행한 slowness 벡터 성분 ($m_x = k_x/\omega$)이 동일하다는 스넬(Snell)의 법칙을 적용함으로써 해석할 수 있다[9]. 따라서, 굴절과 반사에 의해 발생하는 모든 파의 경계면에 수직인 slowness 벡터 성분 ($m_y = k_y/\omega$)은 식 (7)을 다음과 같이 slowness의 항으로 표현함으로써 얻을 수 있다.

$$|C_{ijk} m_j m_l - \rho \delta_{il}| = 0 \tag{16}$$

식 (16)을 Fig. 1의 모델에 적용함으로써 준종파와 준횡파가 연성되어 있는 다음의 4차 방정식을 얻게 되며, 입사파의 경계면에 평행한 slowness 성분 m_x 를 알고 있으므로 각각 굴절 및 반사된 준종파와 준횡파의 경계면에 수직인 slowness 성분에 해당하는 두 개의 양과 음의 근을 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
 &(C_{22}' C_{66}' - C_{26}'^2) m_y^4 + 2(C_{16}' C_{22}' - C_{12}' C_{26}') m_x m_y^3 \\
 &+ [(C_{11}' C_{22}' + 2C_{16}' C_{26}' - C_{12}'^2 - 2C_{12}' C_{66}') m_x^2 - \rho(C_{22}' + C_{66}')] m_y^2 \\
 &+ [2(C_{11}' C_{26}' - C_{12}' C_{16}') m_x^3 - 2\rho(C_{16}' + C_{66}') m_x] m_y \\
 &+ (C_{11}' C_{66}' - C_{16}'^2) m_x^4 - \rho(C_{11}' + C_{66}') m_x^2 + \rho^2 = 0
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

3. 실험

3.1. 굴곡진 보강섬유를 가진 두꺼운 복합재료 시편

본 논문에서는 Hexcel사의 DMS 2224 graphite/epoxy를 실험재료로 하여 제작된 보강섬유의 굴곡을 가진 두꺼운 복합재료 시편을 사용하였다. 실험에 사용한 시편은 Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 0.011, 0.034 및 0.059의 보강섬유의 굴곡비를 갖는다. 시편의 λ 는 모두 0.020m로 제작하였다. 각 시편은 프리프레그(pregreg)를 [0₇₃],

[0₈₁], [0₉₈]로 적층되었으며, 이를 두꺼운 복합재료 제작용 몰드(mold)와 조화함수 형태의 표면 굴곡을 가지는 알루미늄 몰드(mold)를 이용하여 오토크레이브(autoclave) 성형방법으로 제작되었다[10]. 또한, 정축 강성계수를 얻기 위하여, 위와 동일한 조건으로 제작된 보강섬유의 굴곡이 없는 일방향 기준 시편을 사용하였다.

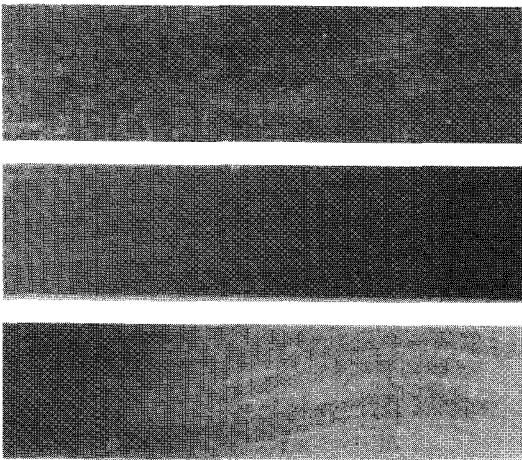


Fig. 5 Pictures showing specimens with various fiber waviness ratios (a) $a/\lambda=0.011$, (b) $a/\lambda=0.034$, (c) $a/\lambda=0.059$

3.2. 초음파를 이용한 일방향 복합재료의 특성 실험

초음파를 이용한 비파괴적인 방법으로 특성값을 얻기 위하여, 일방향 기준 시편을 다이아몬드 톱을 이용하여 재료의 정축(1-2-3)에 대하여 0° 기울어진 직육면체(9×9×10mm)와 17° 기울어진 직육면체(5×10×10mm) 형상으로 가공하였다. 시편의 밀도 ρ 는 1513.5 kg/m³이고 파속도는 각각 두 개의 종파용 탐촉자와 횡파용 탐촉자를 이용한 투과법 방식으로 측정하여 4개의 독립 강성계수 (C_{11} , C_{22} , C_{44} , C_{55})를 얻었다. 시편의 제작과정에서 일방향 기준 시편의 2, 3방향으로의 강성계수가 달라질 수 있으나, 파속도 측정 결과 거의 일치함을 보여 시편이 횡등방성을 갖는다고 고려할 수 있었다.

마지막 독립 강성계수 (C_{12})는 1-2 평면내에서 비깃축에 대한 파속도에서 얻을 수 있으므로, 17° 기울어진 직육면체 시편에 대한 초음파 시험에서 얻을 수 있다[11].

$$v_{qt} = \left(\frac{\Gamma_{11} + \Gamma_{22} \pm \sqrt{(\Gamma_{11} - \Gamma_{22})^2 + 4\Gamma_{12}^2}}{2\rho} \right)^{1/2} \quad v_{pt} = \sqrt{\frac{\Gamma_{33}}{\rho}}$$

$$\Gamma_{11} = C_{11}l_1^2 + C_{55}l_2^2 \quad \Gamma_{12} = (C_{12} + C_{55})l_1l_2$$

$$\Gamma_{22} = C_{55}l_1^2 + C_{22}l_2^2 \quad \Gamma_{13} = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\Gamma_{33} = C_{55}l_1^2 + C_{44}l_2^2 \quad \Gamma_{23} = 0$$

비깃축으로 전파된 파는 재료의 이방성으로 인하여 균파를 형성하지만, 평행한 면을 가진 시편에 대해서는 위상속도를 직접 측정할 수 있으므로, 이에 대한 고려가 필요치 않게 된다.

Fig. 6은 설명된 투과법 방식으로 사용된 종·횡파용 탐촉자를 이용하여 파속도 측정을 통한 비파괴적 특성 실험 과정을 보여주며, Fig. 7은 실험에 사용된 초음파 실험 장비를 보여준다.

측정된 파속도로부터 얻어진 일방향 기준 시편의 정축 강성계수는 Table 1에 나타내었다.

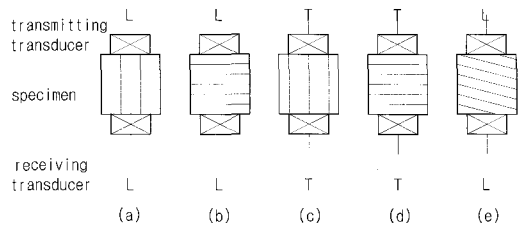


Fig. 6 Schematic drawings showing ultrasonic characterization test procedures for determining (a) C_{11} , (b) C_{22} , (c) C_{55} , (d) C_{44} and (e) C_{12} (L : longitudinal transducer, T : transverse transducer)

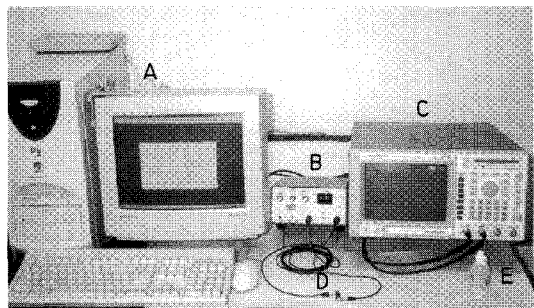


Fig. 7 Picture showing experimental-setup for ultrasonic test (A : PC, B : Pulsar/Receiver, C : Digital Oscilloscope, D : transducers and specimen, E : Couplant)

Table 1 Stiffnesses of DMS 2224 graphite/epoxy unidirectional composites

Stiffness	Value
C_{11}	129.74 GPa
C_{12}	6.38 GPa
C_{22}	14.04 GPa
C_{44}	3.45 GPa
C_{55}	6.12 GPa

이로부터 계산된 탄성계수와 포아송비(Poisson's ratio)를 Table 2에 도시하였다.

초음파 시험을 통해 얻어진 특성값과 비교하기 위해 인장/압축 시험을 수행하였다. 인장/압축 시험은 하중 방향에 대해 보강섬유가 0°, 90°, 10°의 각을 가지는 세 가지 시편을 만능 인장 시험기(MTS 810.23)를 사용하여 수행되었다. 초음파를 이용한 시험에서 재료에 입사되는 파의 응력 크기가 매우 작기 때문에, 비선형 거동을 하는 복합재료의 기계적 특성값은 응력-변형을 곡선[10]에서 초기의 기울기 값으로 결정하였다. 이렇게 얻어진 기계적 특성값은 초음파를 이용한 특성 시험값과 함께 Table 2에 도시하였다.

Table 2 Comparison of mechanical properties of DMS 2224 graphite/epoxy composites between mechanical and ultrasonic tests

	Ultrasonic test	Mechanical test[11]
E_1	125.89 GPa	130 GPa
E_2	10.34 GPa	10.37 GPa
G_{12}	6.12 GPa	5.93 GPa
ν_{12}	0.301	0.282

두 가지 방법으로 얻은 기계적 특성값이 유사함을 볼 수 있다. 따라서, 이후의 계산에서 초음파를 이용하여 얻은 정축 강성계수를 사용하였다.

3.3. 초음파를 이용한 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료의 실험

굴곡진 보강섬유를 갖는 복합재료에서의 초음파 전파 특성의 실험을 위해, 펄서/리시버(pulser/receiver 5072PR, Panametrics, Inc.)와 송파를 송·수신하는 두 개의 탐촉자(transducer with 10MHz central frequency and 8mm diameter, Panametrics, Inc.)를 Fig. 8과 같은 투과법 방식으

로 사용하였다. 탐촉자와 시편의 사이에는 커플런트(couplant)를 도포하여 접촉면의 미세한 간격이나, 공기층에 의해 탄성파가 시편으로 입사되지 못하는 현상을 방지하였다. 펄서로부터 나온 전기적 신호는 송신 탐촉자의 기계적 진동을 야기시키며, 발생된 초음파는 복합재료 시편에 입사된다. 시편의 양쪽 면에 장착된 수신 탐촉자가 시편을 거쳐 전파된 탄성파를 다시 전기적 신호로 바꾸어준다. 이렇게 수신된 전기적 신호는 리시버에서 증폭된 후, 디지털 오실로스코프(digital oscilloscope Scopestation 140 with 200MS/sec, LeCroy, Inc.)에서 디지털 신호로 바뀌어 컴퓨터에 저장된다.

세 가지의 다른 보강섬유의 굴곡비를 갖는 시편에 대해서, 송신 탐촉자의 위치를 고정된 후, 수신 탐촉자를 Fig. 9와 같은 좌표계에서 x 방향으로 1mm 간격으로 이동하며 얻어진 파형을 저장하였다. 또한, 송신 탐촉자도 x 방향으로 1mm 간격으로 이동하여가면서 이와 같은 실험을 반복하였다. 검출된 파의 에너지 P는 식 (19)와 같이 파의 진폭 s(t)를 시간에 대해 적분하여 얻었다. 그리고, 검출된 파의 에너지 중 가장 큰 것을 기준으로 하여 상대적인 값으로 표현하였다.

$$P = \int |s(t)| dt \dots\dots\dots (19)$$

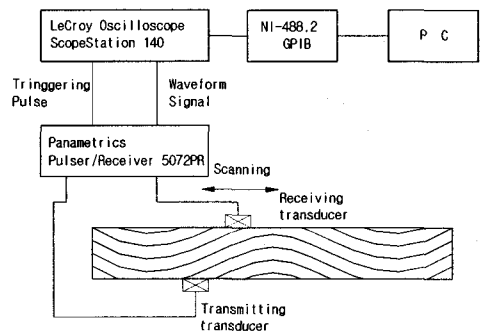


Fig. 8 Schematic drawing of through-transmission mode ultrasonic test for detecting fiber waviness

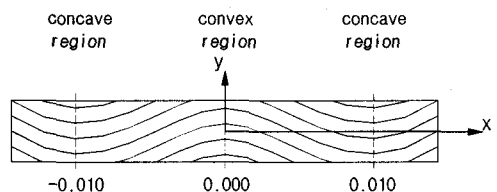


Fig. 9 Schematic drawing showing the locations of transmitting and receiving transducers (unit : m)

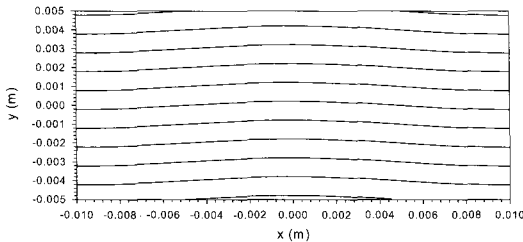
4. 결과 및 고찰

4.1. 수치 해석의 결과

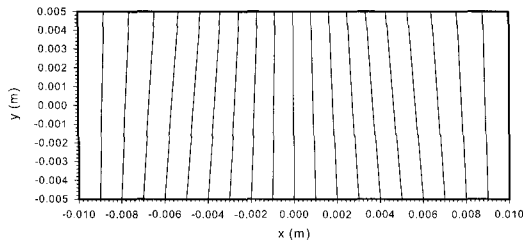
제작된 시편의 보강섬유 굴곡비를 갖는 세 가지의 모델에 파선 추적 이론을 적용하여, 준종파와 준횡파의 전파 경로를 고려하여 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료 내에서 파 전파 특성을 예측하였다. 또한, 보강섬유의 굴곡비에 따른 파의 진행 경로의 변화 특성도 살펴보았다.

Figs. 10-12는 여러 가지 일정한 보강섬유의 굴곡을 가진 복합재료에서의 예측된 파 전파 경로를 보여준다. 시편의 밑면에서 면에 수직으로 입사된 파의 전파 경로는

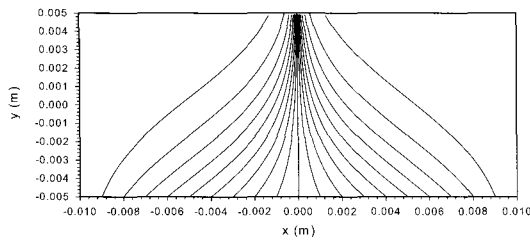
보강섬유의 굴곡비가 증가할수록 곡선의 형태를 나타내었다. 산 영역(convex region, $x=0.000\text{m}$) 근방에서 입사된 파는 곧바로 맞은편 윗면의 산 영역으로 전파되고, 골 영역(concave region, $x=\pm 0.010\text{m}$) 부근에서 입사된 파도 이웃한 산 영역으로 전파되는 특성을 나타내었다. 즉, 입사된 파는 보강섬유 굴곡의 산과 골 사이인 1/2 주기 내에서만 전파되며, 입사된 반대쪽 산 영역으로 수렴하는 현상을 나타내었다. 이러한 현상은 보강섬유의 방향 변화에 따라 섬유방향에 수직인 방향으로의 위상속도의 변화가 매우 심하기 때문에 군파의 방향이 급격하게 변화하여 파의 경로가 큰 영향을 받게 되기 때문이다. 특히 준횡파의 위상속도 변화가 크므로, 보강섬유의 적은 변화에도 준횡파의 경로 변화가 심하게 나타났다.



(a) thick composites with fiber waviness

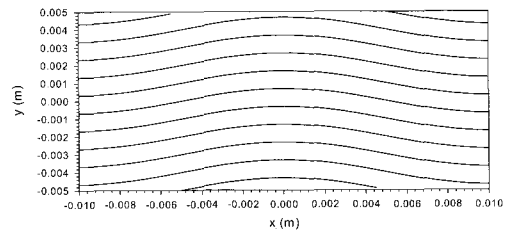


(b) quasi-longitudinal wave mode

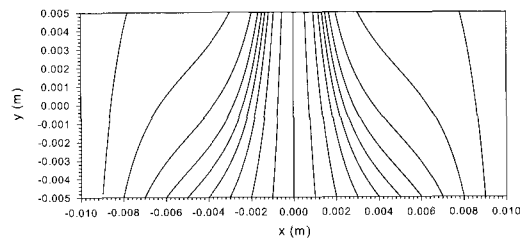


(c) quasi-transverse wave mode

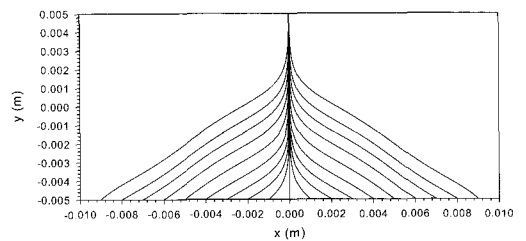
Fig. 10 Predicted ray paths in thick composites with fiber waviness(a/λ) of 0.011



(a) thick composites with fiber waviness

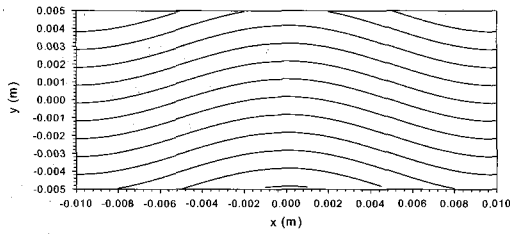


(b) quasi-longitudinal wave mode

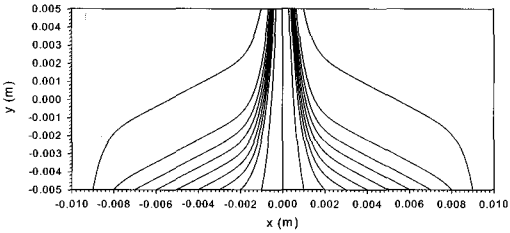


(c) quasi-transverse wave mode

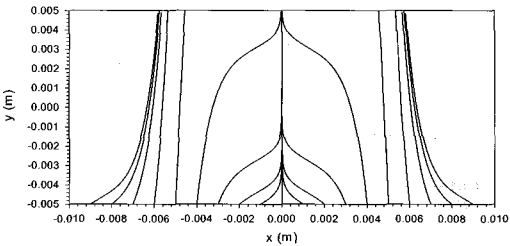
Fig. 11 Predicted ray paths in thick composites with fiber waviness(a/λ) of 0.034



(a) thick composites with fiber waviness



(b) quasi-longitudinal wave mode

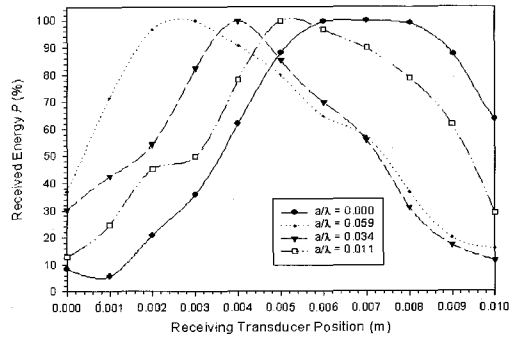


(c) quasi-transverse wave mode

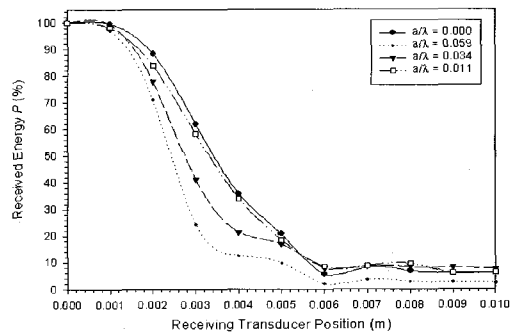
Fig. 12 Predicted ray paths in thick composites with fiber waviness (a/λ) of 0.059

4.2. 일정한 보강섬유 굴곡을 가진 복합재료에서 초음파 전파 특성 시험

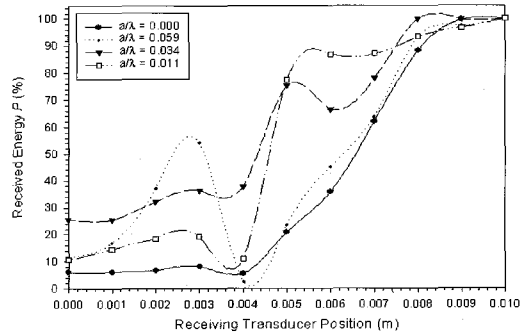
세 가지 시편에 대한 초음파 전파 실험에서, 수치 해석 결과와 같이 입사된 종파는 공통적으로 시편의 반대 면에서만 검출되었다. 각 시편에서 고정된 송신 탐촉자에 대하여 여러 위치에서 검출된 파의 에너지 중, 가장 큰 값을 가지는 것을 기준으로 상대적인 값으로 계산하여 Fig. 13과 같이 도시하였다. T 는 Fig. 9에 설정된 좌표계에서 송신 탐촉자의 위치를 나타낸다. Fig. 13에서 입사되는 위치에 따른 파의 에너지 감쇠 현상이 경로 의존적임을 확인하였다.



(a) $T=0.007$



(b) $T=0.000$



(c) $T=0.010$

Fig. 13 Received energy at some typical position for thick composites with various fiber waviness (T : transmitting transducer position [m])

일방향 기준시편에서는 수신 탐촉자가 고정된 송신 탐촉자와 같은 위치에 있을 때 가장 큰 에너지를 가진 파가 검출되었고, 송신 탐촉자에서 멀어질수록 검출되는 파의 에너지가 감소하는 현상이 좌·우 대칭적으로 나타났다.

그러나, 보강섬유의 굴곡이 있는 세 가지의 시편에서는 이와 상당히 다른 경향이 나타났다. 송신 탐촉자가 보강섬유 굴곡의 산과 골 사이($T = 0.007m$)에 위치한 Fig. 13 (a)에서는 최대 에너지를 가진 파가 검출되는 수신 탐촉자의 위치가 보강섬유 굴곡비가 커짐에 따라 반대쪽 산 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있는데 이는 Figs. 10-12에 나타난 수치 해석에서의 결과와 일치한다. 또한, 검출된 파의 에너지 분포가 송신 탐촉자를 기준으로 좌측(시편 윗면의 산 영역)에서 집중적으로 나타남을 확인 할 수 있다. 그러나, 보강섬유 굴곡의 산을 넘어선 좌측 영역($x < 0.000m$)에서는 거의 파가 검출되지 않는데, 이는 파가 산과 골 사이인 1/2 주기 내에서만 전파됨을 입증한다. 보강섬유 굴곡의 골이나 산에 송신 탐촉자가 위치한 Fig. 13 (b), (c)의 경우, 수신 탐촉자가 역시 동일한 위치에 있을 때 가장 큰 에너지를 가진 파가 검출되었으나, 수신 탐촉자가 이동함에 따라 검출된 파의 에너지 분포는 일방향 기준시편과 큰 차이를 보이고 있다. 수치적 해석에서와 같이 보강섬유의 굴곡비가 클수록 입사된 파는 보강섬유 굴곡의 산 영역으로 집중되어, 수신 탐촉자가 이로부터 멀어짐에 따라 검출된 파의 에너지가 급격히 감소하는 특징을 Fig. 13 (b)에서 확인할 수 있다. Fig. 13 (c)는 산에 위치한 송신 탐촉자에서 시편으로 입사된 파가 보강섬유의 굴곡으로 인하여 전파 경로가 변화되며, 보강섬유의 굴곡비가 클수록 이웃한 윗면의 산 영역으로 파가 전파되고, 결국 송신 탐촉자와 멀리 떨어진 곳에서도 상당한 에너지를 가진 파가 검출되는 현상을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 평면파 이론과 파선 추적 이론을 이용하여 일정한 보강섬유의 굴곡을 갖는 복합재료에서의 초음파 전파 현상을 해석하기 위한 수치 해석 모델을 제시하였다. 수치 해석에서 재료에 입사된 파의 전파 경로를 고려함으로써, 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료 내에서 전파 특성을 예측하고, 이의 보강섬유 굴곡비와의 연관 관계를 밝혔다. 그리고, 여러 가지의 일정한 보강섬유의 굴곡비를 가진 두꺼운 복합재료 시편을 제작하고, 이에 대하여 투과법 방식의 실험을 수행하여, 그 결과와 수치 해석에서 얻어진 예측 결과를 비교하였다.

일정한 보강섬유 굴곡비를 가진 복합재료 모델에 파선 추적 이론을 이용한 파의 전파 경로 예측 결과, 보강섬유의 굴곡이 파의 전파 경로에 큰 영향을 미쳐, 입사된 반

대편의 보강섬유 굴곡의 산 영역으로 집중되었고, 이러한 현상은 굴곡비가 증가할수록 심화되었다. 세 가지의 일정한 보강섬유 굴곡비를 갖는 시편에 대한 투과법 방식의 실험을 통하여 수치 해석에서 예측된 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

일정한 보강섬유 굴곡비를 갖는 복합재료에서의 초음파 전파 특성은 다음과 같다.

1. 입사 위치에 따라 전파 경로는 변화하며, 입사된 반대편의 산 영역으로 전파되는 경향을 보인다.
2. 보강섬유의 굴곡비가 증가할수록, 전파 경로의 변화가 심화되어, 여러 위치에서 입사된 파가 집중되며, 에너지가 집중되는 영역이 산 쪽으로 이동된다.
3. 준종파와 준횡파는 보강섬유의 굴곡비의 영향을 크게 받으며, 특히 보강섬유 방향에 따라 위상속도의 변화가 큰 준횡파가 굴곡 변화가 크게 나타난다.
4. 입사된 파는 보강섬유 굴곡의 산과 골 사이의 1/2 주기 내에서만 전파되고, 산이나 골을 지나 전파되지는 못한다.

참고문헌

- [1] S.-Y. Lou and T.-W. Chou, "Non-Linear Elastic Behaviors of Flexible Fibre Composites," *Composites*, Vol. 18, No. 1, pp. 25-33, (1988)
- [2] H.-J. Chun, J.-Y. Shin and I. M. Daniel, "Nonlinear Behaviors of Thick Composites with uniform Fiber Waviness," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 10, pp. 1949-1955, (2000)
- [3] Shi-Chang Wooh and Isaac M. Daniel, "Wave Propagation in Composite Materials with Fibre Waviness," *Ultrasonics*, Vol. 33, No. 1, pp. 3-10, (1995)
- [4] Joseph S. McIntyre, Charles W. Bert and Ronald A. Kline, "Wave Propagation in a Composite with Reinforcing Fibers," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 14, pp. 1311-1318, (1995)
- [5] Kwang Yul Kim, Wei Zou and Wolfgang Sachse, "Wave Propagation in a Wavy Fiber-Epoxy Composite Material : Theory and Experiment," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 103, No. 5, pp. 2296-2301, (1998)

-
- [6] Fedor I. Fedorov, "Theory of Elastic Waves in Crystals," Plenum Press, New York, (1968)
- [7] Isaac M. Daniel and Ori Ishai, "Engineering Mechanics of Composite Materials," Oxford University Press, (1994)
- [8] B. A. Auld, "Acoustic Fields and Waves in Solids Vol. I," New York, (1973)
- [9] Edmund G. Henneke II, "Reflection-Refraction of a Stress Wave at a Plane Boundary between Anisotropic Media," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 51, pp. 210-217, (1972)
- [10] 신재윤, "굴곡진 보강섬유를 가진 두꺼운 복합재료의 비선형 거동에 관한 연구," 연세대학교 석사학위 논문, (1998)
- [11] J. E. Zimmer and James R. Cost, "Determination of the Elastic Constants of a Unidirectional Fiber Composite using Ultrasonic Velocity Measurements," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 47, No. 3, pp. 795-803, (1969)