

초음파를 이용한 두꺼운 복합재료의 보강섬유 굴곡 평가

장필성* · 전홍재**

Nondestructive Evaluation of Fiber Waviness in Thick Composites by Ultrasonics

P. S. Jang, H.-J. Chun

Key Words: Ultrasound, Fiber waviness, Thick composites

Abstract

In this study, the numerical and experimental investigations were conducted to understand ultrasonic wave propagation and to evaluate the degree of fiber waviness in thick composites nondestructively. The path, energy and traveling time of insonified wave were predicted by adopting the ray and plane wave theories. In the analysis, the composites were assumed to have continuous fiber with sinusoidal waviness in a matrix and were modeled as stacks of infinitesimally short length off-axis elements with varying fiber orientation along the length direction. From the experiments on the specially fabricated thick composite specimens with various degrees of uniform fiber waviness, the energy distributions of received wave were obtain for the various positions of transmitter. It was observed that the energy of wave was converged to the adjacent peaks of fiber waviness. The location where maximum energy of wave was detected from the experiments showed good agreement with the location obtained from theoretical predictions. Finally, the test procedure was proposed to evaluate fiber waviness in thick composites by considering the energy of wave and relative distance between transmitter and receiver.

1. 서 론

보강섬유의 굴곡은 성형과정 중에 생성되는 초기결합의 한 종류로써, 두겹게 적층된 복합재료 내에 발생될 수 있다. 이러한 굴곡진 보강섬유는 두꺼운 복합재료의 기계적 성질에 영향을 미쳐 강성 및 강도의 저하를 유발한다[1]. 따라서, 일차 구조물로 사용되는 두꺼운 복합재료의 안정성 확보를 위하여, 복합재료 내의 보강섬유의 굴곡 유무 및 굴곡 정도를 아는 것이 중요하다고 할 수

있다. 초음파를 이용한 비파괴 평가 방법은 구조물의 결합 판별을 위한 별도의 시편을 필요치 않으므로, 구조물에 손상을 주지 않고 내부의 결합을 진단할 수 있다. 이러한 장점을 이용하기 위해, 굴곡진 보강섬유를 가진 복합재료에서의 초음파 전파에 관한 몇몇 연구가 시도되었다[2-4].

본 논문에서는 두꺼운 복합재료의 안정성 문제를 해결하기 위하여, 굴곡진 보강섬유를 갖는 복합재료에서의 초음파의 전파 현상에 대한 해석을 수행함으로써 보강섬유의 굴곡비에 따른 초음파 전파 특성을 밝혀보았다. 또한 여러 가지 굴곡비로 일정한 보강섬유의 굴곡을 갖는 복합재료 시편을 제작하여 투과(through-transmission) 방식으로 시험을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 이로부터, 일정한 보강섬유의 굴곡을 갖는 복합재

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계·전자공학부

료의 특성을 밝히고, 실험적으로 보강섬유의 굴곡비를 얻을 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 이 론

재료에 침투된 초음파의 거동은 다음과 같은 파동 방정식에 의해 표현된다.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (1)$$

이의 일반해로써, 정상상태의 평면 파(plane wave)의 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$u_i = A p_i \exp[i(k_i x_i - \omega t)] \quad (2)$$

여기서, t 는 시간, u_i 는 변위, A 는 변위의 진폭 그리고 p_i 는 입자의 진동 방향(polarization direction)을, ω 는 원주각속도를 나타낸다. 또한, 파동수(wave number) k 와 위상파속(phase velocity) v 는 전파 방향벡터(wave normal vector) l_i 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$v = \omega/k, k_i = kl_i \quad (3)$$

Fig. 1은 조화함수(harmonic function)로 표현된 일정한 굴곡비의 보강섬유로 이루어진 두꺼운 복합재료의 한 주기 부분을 나타낸다. 보강섬유각(θ_f)은 x 축에 따라 변화하나, 미소 체적 내에서는 일정한 보강섬유각을 가지는 것으로 고려될 수 있다.

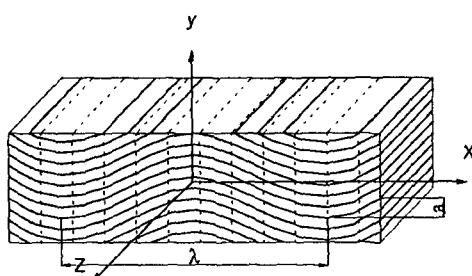


Fig. 1 Schematic drawing of a representative volume of composite materials with fiber waviness

$$\theta_f = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (4)$$

여기서, a 와 λ 는 각각 굴곡의 진폭과 주기를 나타낸다. 주어진 보강섬유각(θ_f)에 대해서 응력-변형률 변환관계를 사용하여 비김축(off-axis) 강성 험렬 C'_{ijkl} 을 정축(on-axis) 강성 험렬 C_{ijkl} 로 나타낼 수 있다[4]. 정축 강성 험렬이 횡동방성(transversely isotropic) 성질을 갖는다고 고려되었다.

파가 $x-y$ 평면에서 전파될 때, 식 (1)과 (2)로부터 다음의 Christoffel's equation을 얻을 수 있다.

$$|\Gamma_{ij} - \rho v^2 \delta_{ij}| = 0 \quad (5)$$

여기서, Γ_{ij} 는 강성 험렬과 전파 방향 벡터로 표현되는 Christoffel's tensor이다. 이로부터 주어진 전파 방향벡터에 대해 식 (5)의 고유치(eigenvalue)로 위상 파속을 얻을 수 있으며, 이에 대응하는 고유벡터(eigenvector)로써 파의 진동방향 벡터를 얻을 수 있다.

이방성 성질을 지닌 복합재료의 $x-y$ 평면에서 전파되는 파는 이방성 재료의 전단 연성(shear coupling) 현상으로 인하여 종파와 $x-y$ 평면내에서 진동하는 횡파가 전파 방향에 수평, 수직하지 않게 된다. 따라서, $x-y$ 평면에 수직으로 진동하는 파만이 전파 방향에 수직한 진동 방향을 가진 순수 모드(pure-mode)가 되며, $x-y$ 평면내에서 진동하는 두 개의 파는 서로 연성되어 준종파(quasi-longitudinal) 혹은 준횡파(quasi-transverse)의 형태를 갖게된다. 이 경우, 파는 위상파 전파 속도와 방향과 달리 다음과 같은 군파속(group velocity)로 편향되어 전파된다[5].

$$(v_g)_i = \frac{1}{\rho} C_{ijkl} m_k p_j p_l \quad (7)$$

여기서 $m_k (= l_k/v)$ 은 slowness의 성분이다. 따라서, 미소 길이의 증가량에 대해서 군파의 전파 방향으로 경로를 결정할 수 있다. 파가 전파됨에 따라, $x-y$ 평면 내에서 재료의 주방향(principal direction)이 연속적으로 변화하므로, $i, i+1$ 번째 위치에서의 재료의 기계적 물성이 달라지게 된

다. 따라서, 스넬(Snell)의 법칙에 의하여 두 경로 점 사이에서 굴절(refraction) 및 반사(reflection)가 발생한다고 고려되었다. 이의 계면에 평행한 slowness 성분은 입사파의 계면에 평행한 성분과 같으므로 전파 방향을 알 수 있다[6].

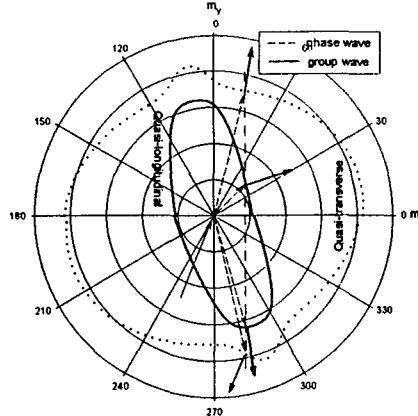


Fig. 2 Slowness curves of quasi-longitudinal and quasi-transverse wave at i , $i+1$ path points

한편, 계면에서의 변위 및 응력의 연속조건으로부터 입사파의 진폭에 대한 모드 변환된 파의 진폭비를 얻을 수 있다. 이로부터 시간에 대한 파의 평균 에너지 유량(energy flux)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{F}_i = -\sigma_{ij} \dot{u}_j = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 (v_g)_i \quad (10)$$

이로부터 계면에서 발생된 각 파가 갖는 에너지 유량을 얻을 수 있다.

3. 실험

본 연구에서는 사인함수 형태의 표면형상을 가지는 몰드(mold)를 이용하여 굴곡비(a/λ)가 0.011, 0.034 그리고 0.059로 일정한 보강섬유 굴곡을 가지는 두꺼운 복합재료를 오토크레이브 성형방법으로 만들었으며, 실험재료로 Hexcel사의 DMS 2224 graphite/epoxy를 사용하였다. 또한, 같은 조건에서 제작된 일방향 기준 시편으로부터 일반적인 초음파를 이용한 방법으로 Table. 1과 같은 재료의 주좌표계(principal axes)에 대한 강성계수를 얻었다. 이 결과는 굴곡진 보강섬유를

가진 복합재료의 주좌표계에 대한 강성계수로 가정되어 수치적 해석에 사용되었다.

Table 1. Stiffnesses of standard composites (GPa)

C_{11}	C_{12}	C_{22}	C_{33}	C_{55}
129.74	6.38	14.04	7.13	6.12

굴곡진 보강섬유를 갖는 복합재료에서의 초음파 전파 특성의 실험을 위해, Pulser/Receiver (Panametric 사 5072PR)와 10MHz의 공진 주파수, 8mm의 지름을 갖는 탐촉자(transducer)를 Fig. 3와 같이 투과법 방식으로 사용하였다. 고정된 트랜스미터(transmitter)에 대해 리시버(receiver)를 시편의 길이방향으로 1mm 간격으로 변화시키며 얻어진 파형을 디지털 오실로스코프(LeCroy사 ScopeStation 140)으로 포착하여 개인용 컴퓨터(PC)에 저장하였다. 이로부터 시편을 통과하여 각 위치에 따라 검출된 파의 도달 시간을 측정하고 파의 에너지를 다음과 같이 계산하였다.

$$P = \int |s(t)| dt \quad (10)$$

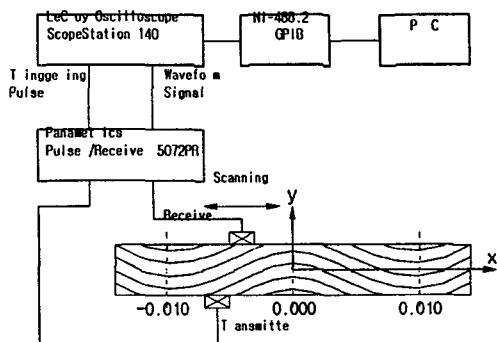


Fig. 3 Schematic drawing of experimental set-up and locations of transmitter and receiver (m)

4. 결과 및 고찰

수치 해석 결과 Fig. 4에 보여지는 것과 같이 $x-y$ 평면 내에서 진동하는 준횡파와 준종파의 경로는 보강섬유의 굴곡에 많은 영향을 받아, 시편의 반대쪽 산 영역(convex region)으로 수렴하는 현상을 공통적으로 나타내며, 보강섬유의 굴곡비가 증가할수록 이러한 현상은 심화되는 것으로

나타났다. 그러나, 순종파는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

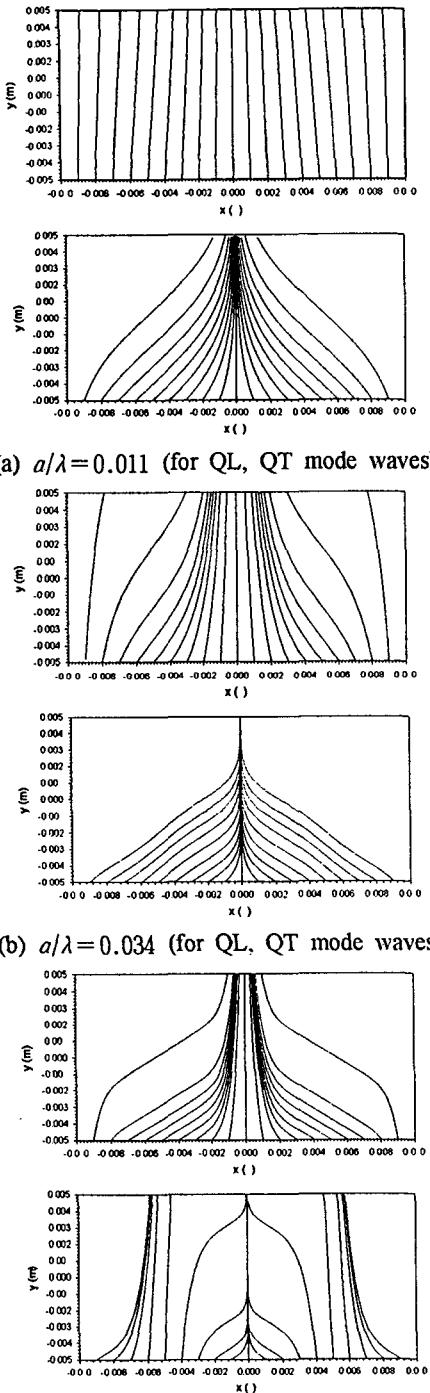


Fig. 4 Ray paths of quasi-longitudinal and quasi-transverse wave for various fiber waviness

Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 보강섬유의 방향 변화에 따라, 섬유방향에 수직한 방향으로의 위상 파속의 변화가 심기 때문에 Fig. 4와 같이 파의 경로가 큰 영향을 받게됨을 알 수 있다. 특히 준횡파의 위상 파속 변화가 크므로, 보강섬유의 적은 변화에도 준횡파의 경로 변화가 심하게 나타났다. 골 영역(concave region, $x=0.000$)에서 입사된 파는 곧바로 맞은편 산 영역(convex region)으로 전파되고, 산 영역($x=\pm 0.010$) 부근에서 입사된 파도 시편 반대면의 이웃한 산 영역($x=0.000$)으로 전파되는 특성을 나타내었다. 즉, 입사된 파는 보강섬유의 1/2 주기 내에서만 전파되어, 보강섬유의 굴곡비가 클수록 트랜스미터의 반대쪽 산 영역으로 수렴하는 현상을 나타내었다.

한편, 재료 내에서의 굴절 및 반사로 인해 발생하는 재분배된 파의 에너지 변화는 Fig. 5와 같다. 파의 경로는 Fig. 4(c)와 같이 보강섬유의 방향의 변화가 심한 산, 골 영역에서 곡선 형태를 보였으며, 이 부분에서 에너지가 감소되는 경향을 보였다. 따라서, 파의 에너지는 경로에 영향을 받게되나, 보강섬유가 연속적으로 변화하므로 큰 영향을 미치지는 못하는 것으로 나타났다.

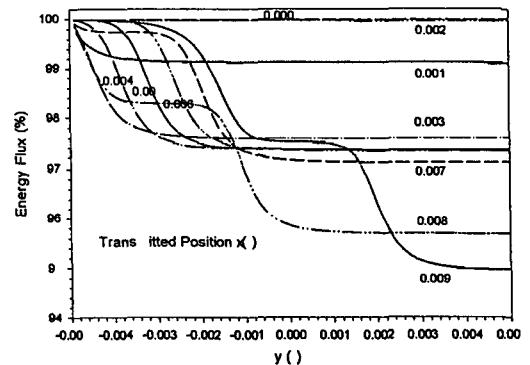
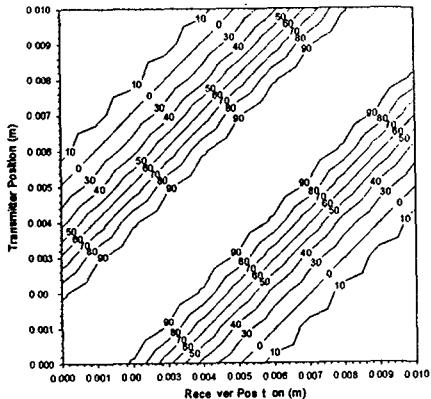


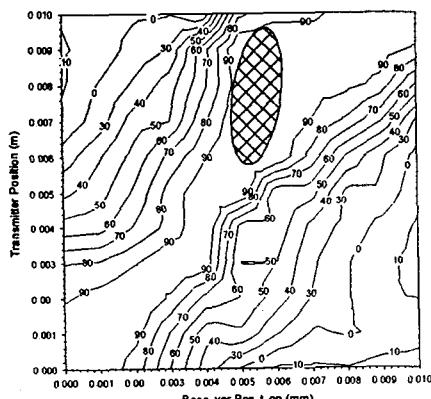
Fig. 5 Plot of energy flux of quasi-longitudinal wave for various transmitter positions ($a/\lambda = 0.059$)

세 가지 시편에 대한 실험에서도 입사된 종파는 공통적으로 시편의 반대 면에서만 검출되었다. 여러 위치에 고정된 트랜스미터에 대해 리시버를 1mm 간격으로 이동하며 검출된 파의 에너지를 가장 큰 것을 기준으로 하여 Fig. 6과 같이 상대적으로 표현하였다. 수치해석 결과, 트랜스미

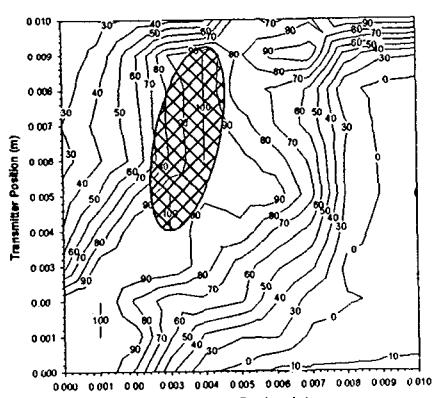
터의 위치에 따른 경로 의존적인 에너지의 감쇠 정도가 큰 영향을 미치지 못하므로, 실험에서 얻은 파의 에너지 분포를 트랜스미터와 리시버의 위치의 관계로 해석하였다.



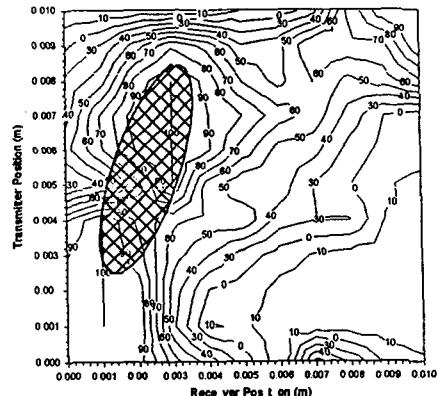
(a) Unidirectional composites



(b) $a/\lambda = 0.011$



(c) $a/\lambda = 0.034$

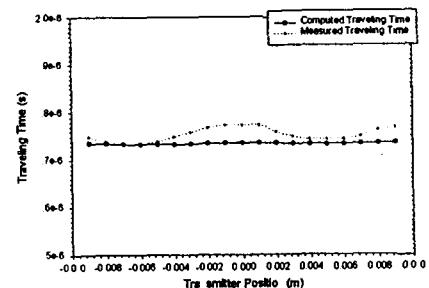


(d) $a/\lambda = 0.059$

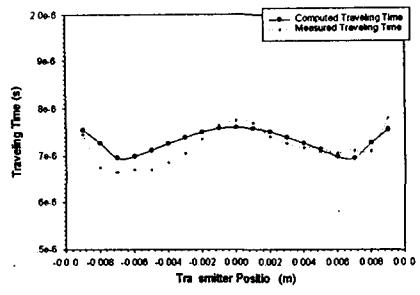
Fig. 6 Contour plots of energy distribution of received wave for various fiber waviness

보강섬유 방향이 일방향 기준시편과 같은 보강섬유 굴곡의 골과 산에 트랜스미터가 위치한 경우, 리시버가 동일한 위치에 있을 때 가장 큰 에너지를 가진 파가 검출되었으나, 보강섬유가 좌표축에 대해 기울어진 곳에 트랜스미터가 위치한 경우, 최대 에너지를 가진 파가 검출되는 위치가 일방향 기준시편과 달리 보강섬유 굴곡비에 따라 변화되는 현상을 볼 수 있다. 수치 해석에서와 같이 여러 위치의 트랜스미터에서 입사된 파는 한 곳에 집중되며, 트랜스미터와 리시버가 멀리 떨어진 곳에서도 이러한 현상을 볼 수 있다. 네 가지의 시편에서 보강섬유의 굴곡비가 클수록 에너지가 집중되는 위치가 반대편 산 쪽으로 집중되는 특징을 볼 수 있다.

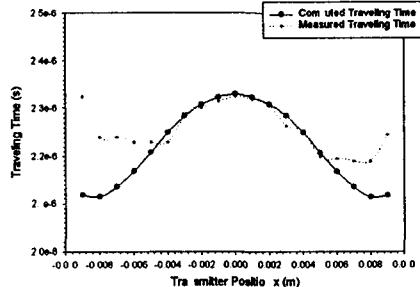
Fig. 7은 여러 위치의 트랜스미터에 대하여 최대 에너지가 검출되는 위치에서의 측정된 파의 도달 시간 및 수치 해석 결과를 세 가지 시편에 대하여 보여준다.



(a) $a/\lambda = 0.011$



(b) $a/\lambda = 0.034$



(c) $a/\lambda = 0.059$

Fig. 7 Plots of computed and measured traveling time versus transmitter position for various fiber waviness (thickness : (a-b) 5.3mm (c) 7mm)

Fig. 7에서 보강섬유의 굴곡비가 클수록 도달 시간의 변화폭이 커짐을 확인할 수 있다. 해석적으로 얻은 값이 실험에서 얻은 값과 약간의 오차를 보였다. 그러나, 트랜스미터와 리시버의 위치가 동일한 산 영역에서 가장 큰 값을 가지며, 두 탐촉자 사이의 거리가 커지는 부분에서 파의 도달 시간이 오히려 짧아지는 경향은 유사하다고 할 수 있다. 이러한 오차는 일방향 기준시편에서 얻은 재료의 주방향에 대한 강성계수가 실제 굴곡진 보강섬유를 가진 시편과 일치하지 않으며, 시편의 주방향 강성계수가 국부적으로 다르기 때문에 발생된 것으로 추정된다.

5. 결 론

본 연구에서는 보강섬유의 굴곡이 일정한 두꺼운 복합재료에서의 초음파의 전파 특성을 파의 에너지, 도달 시간 그리고 경로 등을 고려하여 수치적 해석을 수행하고, 세 가지의 보강섬유 굴곡비를 갖는 시편에 대한 실험을 수행하여 일방향 기준시편과 비교함으로써 굴곡진 보강섬유를

가진 복합재료에서의 초음파의 전파특성을 밝혔다. 그리고, 보강섬유의 굴곡비가 커짐에 따라 입사된 반대편의 보강섬유 굴곡의 산 쪽 영역으로 에너지가 집중되는 영역이 이동함을 확인하였다.

일정한 보강섬유의 굴곡을 가진 복합재료에 대한 초음파를 이용한 비파괴 평가 특성은 다음과 같다.

1. 트랜스미터와 리시버가 동일한 위치에 있을 경우, 최대 에너지가 검출되는 위치가 보강섬유 굴곡의 산이나 굴곡이므로, 보강섬유의 굴곡 주기를 결정할 수 있다.
2. 검출된 파의 에너지가 집중되는 위치를 기준시편과 비교함으로써, 보강섬유의 상대적인 굴곡 정도를 판단할 수 있다.
3. 검출되는 파의 에너지 분포를 통하여 보강섬유 굴곡의 방향을 판단할 수 있다.

참고문헌

- (1) H.-J. Chun, I. M. Daniel, J.-Y. Shin, "Nonlinear behavior of thick composite materials with fiber waviness", AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit. ST. LOUIS, MO, 12-15 APRIL, Vol. 1, 1999, pp. 467-474
- (2) Shi-Chang Wooh, Isaac M. Daniel, "Wave propagation in composite materials with fibre waviness", Ultrasonics, Vol. 33(1), 1995, pp. 3-10
- (3) Kwang Yul Kim, Wei Zou, Wolfgang Sachse, "Wave propagation in a wavy fiber-epoxy composite material: Theory and experiment", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 103(5), 1998, pp. 2296-2301
- (4) Isaac M. Daniel, Ori Ishai, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, 1994
- (5) Fedor I. Fedorov, "Theory of elastic waves in crystals", Plenum Press. New York, 1968
- (6) S. I. Rokhlin, T. K. Bolland, Laszlo Adler, "Reflection and refraction of elastic waves on a plane interface between two generally anisotropic media", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 79(4), 1986, pp. 906-918