

단일방향 탄소섬유복합재료 적층 판에서 전파 방향에 따른 램파 S_0 모드의 군속도의 변화

이정기^{*,+}, 김영환^{**}, 이승석^{*}, 김호철^{***}

Variation of the Group Velocity of Lamb Wave S_0 Mode with the Propagating Direction in the Laminated Unidirectional CFRP Plates

Jeong Ki Lee^{*,+}, Young H. Kim^{**}, Seung Seok Lee^{*} and Ho Chul Kim^{***}

ABSTRACT

In this paper, the group velocity dispersion curves of the S_0 symmetric mode in unidirectional CFRP plate was calculated as varying the propagating direction. The group velocity curve was obtained with the group velocities of the S_0 symmetric mode corresponding to 0.2 MHz·mm under the first cut-off frequency in the dispersion curves, and corrected by introducing the slowness curve. The velocities of the S_0 symmetric mode in the unidirectional CFRP plate were measured as varying the propagating direction and compared with the corrected group velocity curve. The measured velocities were good agreement with the corrected group velocity curve except near the fiber direction which was called the cusp region. It implies that the direction of the group velocities incline toward the fiber direction of the unidirectional CFRP plates when the propagation direction is not accorded with the principal axis. It is supposed that this phenomenon results from the preferential propagating the energy toward the direction with the faster propagation velocity.

초 록

본 연구에서는 단일방향 탄소섬유강화복합재료 판에서 S_0 대칭모드의 군속도 분산곡선을 전파 방향을 변화시키면서 계산하였다. 그리고 속도 분산 곡선에서 첫 번째 단절주파수 이하인 0.2 MHz·mm에 해당하는 S_0 대칭모드 군속도를 가지고서 위상속도 곡선을 얻고 slowness 곡선을 도입하여 군속도 곡선으로 교정하였다. 단일방향 섬유강화복합재료 판에서 S_0 대칭모드의 속도를 전파 방향을 변화시키면서 측정하였고 교정된 군속도 곡선과 비교하였다. 측정된 속도는 섬유 방향 근처의 cusp 영역을 제외하고는 교정된 군속도 곡선과 잘 일치하였다. 이것은 단일방향 탄소섬유강화복합재료 판에서 속도가 빠른 방향으로 에너지를 더 잘 전파하기 때문에 전파 방향이 주축방향과 일치하지 않을 때 군속도 방향은 섬유 방향 쪽으로 기울어지는 결과로 나타난 것이다.

Key Words: 램파(lamb waves), 군속도(group velocity), 이방성(anisotropy), 복합재(composites), 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)

1. 서 론

섬유강화 복합재료(FRP)는 밀도에 비하여 강도가 높기 때문에 항공기, 선박, 압력용기 등 여러분야에 사용이 확대

*+ 한국표준과학연구원 환경안전계측센터 스마트계측그룹, 교신저자(E-mail:leejki59@empal.com)

* 한국표준과학연구원 환경안전계측센터 스마트계측그룹

** 성균관대학교 기계공학부

*** 한국과학기술원 물리학과

되어 왔다. 특히 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)는 강화 섬유의 기계적 강도가 우수하여 높은 압력이나 충격에 견디는 압력용기 소재로 각광받고 있다. 그러나 FRP는 이질재료의 보강으로 비균질하고 생산공정도 복잡하여 결함 발생 확률이 높으며, 사용 중에 예기치 못한 손상에 의한 기계적 성질의 저하가 일반 재료에 비하여 매우 크게 나타난다. 그리고 FRP는 섬유의 부피 분율에 의하여 탄성계수가 변화하고, 섬유 배열 방식에 따른 이방성을 지닌다. 이러한 기계적 성질의 변화를 비파괴적으로 평가하기 위하여 초음파를 이용하는 방법을 개발하고자 많은 노력을 기울여왔다.

모든 재료의 탄성계수가 초음파 속도와 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 탄성계수를 알아내기 위하여 초음파 속도를 측정하는 방법에 관한 연구가 많이 수행되어 왔으며, 이들 중에서 초음파 속도 측정의 가장 일반적인 방법인 pulse-echo 방법과 투과법을 이용하여 탄성계수를 평가하기 위한 방법이 시도되었다[1,2]. 그러나 이 방법은 재료의 두께 방향으로만 초음파 속도를 측정하기 때문에, 이방성 때문에 모든 방향의 초음파 속도를 측정하기 위해서는 측정 방향에 맞도록 시편을 절단해야 하는 제한이 따른다. 또 다른 방법으로 물 속에서 Snell의 법칙을 이용하여 방향에 따른 종파와 횡파의 위상속도를 측정하는 방법이 시도되었다[3-5]. 그러나 속도가 빠른 섬유 방향에 대해서는 매우 작은 입사각에서 임계각에 도달되기 때문에 측정 오차가 매우 크며, 물속에서 측정을 수행해야하므로 산업 현장에서 적용하기가 쉽지 않다. 그리고, unidirectional Graphite/Epoxy 복합재료 판에서 point source/point receiver 방법을 이용하여 초기 펄스의 도달 시간으로부터 종파와 횡파의 속도를 측정하여 탄성계수를 결정하는 방법이 시도되었으나, 섬유 방향에 대한 속도는 측정이 불가능하여 외삽하여 결정하였다[6].

FRP는 일반적으로 판 구조로 제작되기 때문에 판에서의 유도파에 대한 연구도 많이 수행되었다. 판에서 전파하는 탄성파로서 대표적인 램파(Lamb wave)는 주파수에 따라 속도의 변화가 심한 분산 특성을 지닌다[7-10]. 그리고 FRP 판과 같이 이방성을 지닌 판에서도 램파 분산특성을 갖지만[11-15], 첫 번째 단절주파수(cut-off frequency) 이하의 S₀ 대칭모드는 분산이 거의 없는 모드로 알려져 있다[8,11,16]. 그럼에도 불구하고 이방성 재료에서는 파수 벡터(wave vector) 방향인 위상속도 방향과 에너지 흐름 방향인 군속도 방향이 일치하지 않는다. 일반적으로 실험에서 군속도와 위상 속도를 동시에 측정하기가 어려우며, Snell의 법칙을 이용한 방법은 위상속도를 측정하게 되며, 그 외의 방법은 군속도를 측정하게 된다. 그러나 재료의 탄성계수는 위상속도와 관계되며 램파의 분산 방정식 또한 평면파의 전파를 가정하고 있기 때문에 측정한 군속도 방향으로 부터 위상속도 방향과 크기를 결정하는 것이 필요하다.

Rose 등[17]은 단일방향 CFRP판에서 분산이 없는 S₀ 대칭 모드의 군속도와 위상속도의 방향이 일치하지 않음을 실험적으로 밝히기는 하였으나, 단일방향 CFRP판에서 섬유 배열 방향과 수직한 방향을 제외하고는 모든 방향에서의 에너지 흐름 방향을 섬유 배열 방향으로 결정한 것은 에너지가 모든 방향으로 전파하는 현상과 배치되는 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 단일방향 CFRP 판에서 파수 벡터 방향에 따른 램파의 군속도 분산곡선을 구하고, 각 전파 방향에 대한 S₀ 대칭 모드의 군속도 분산 곡선에서 첫 번째 단절주파수 이하의 영역인 낮은 0.2 MHz·mm에 해당하는 군속도 값을 선택하여 얻은 군속도 곡선과 slowness 곡선을 이용하여 교정된 군속도 곡선을 얻었다. 전파 방향 변화에 따른 측정된 속도들을 군속도 곡선들과 비교하여 이방성 판에서 램파의 전파 특성을 규명하고자 하였다.

2. 이방성 판에서 램파의 분산

2.1 이방성 판에서 램파의 분산 방정식

적층 FRP는 본질적으로 비균질한 재료이나 섬유의 직경이나 각 적층의 두께가 사용하는 탄성파의 파장에 비하여 매우 작은 경우 균질한 재료로 간주할 수 있다. 이러한 균질한 이방성 재료에서 선형 탄성 영역에서의 응력 σ_{ij} 와 변형률 ϵ_{lm} 과의 관계인 Hooke의 법칙은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij} = C_{ij}^{lm} \epsilon_{lm} = C_{ij}^{lm} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_m} \quad (1)$$

이러한 탄성 영역에서의 매질 입자의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{ij}^{lm} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_m} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (2)$$

여기서 u_i 는 매질 입자의 변위이고, ρ 는 매질의 밀도이며, C_{ij}^{lm} 는 매질의 탄성계수 텐서이다. 자유 표면 상태의 판에서 임의의 방향으로 평면파가 전파할 때, 평면파에 의한 입자의 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$u_i = u_0 \exp[i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})] \quad (3)$$

여기서 u_0 는 매질 입자의 변위에 대한 진폭이고, \vec{k} 는 파수 벡터이며, ω 는 각진동수이다.

직교 좌표계에서 위와 같은 파동의 진행방향을 x 축으로 하고, 두께 방향을 z 축으로 설정하면 평면파의 경우 y 축 방향으로의 입자의 운동에 대한 변화가 없으므로 미분량이 0이 되어 식 (1)의 운동방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned}\rho\omega^2 u_{10} &= C_{11}^{11}k_x^2 u_{10} \\ &+ (C_{33}^{11} + C_{31}^{31})k_x k_z u_{30} + C_{31}^{31}k_z^2 u_{10} \\ \rho\omega^2 u_{30} &= C_{33}^{33}k_z^2 u_{30} \\ &+ (C_{33}^{11} + C_{31}^{31})k_x k_z u_{10} + C_{31}^{31}k_x^2 u_{30}\end{aligned}\quad (4)$$

식 (3)에서 입자의 변위에 대한 직폭의 각 방향 성분의 비를 $R = u_{30}/u_{10}$ 로 정하고, 판의 양 표면의 좌표를 $z = \pm h$ 로 정하여 자유 표면 상태의 경계조건인 $\sigma_{33}|_{z=\pm h} = 0$ 과 $\sigma_{31}|_{z=\pm h} = 0$ 을 적용하여 정리하면 다음과 같은 분산 방정식이 얻어진다.

(1) 대칭모드 분산 방정식

$$AB(\sin k_z h \cos k_z h) - CD(\sin k_z h \cos k_z h) = 0. \quad (5)$$

(2) 비대칭모드 분산 방정식

$$CD(\sin k_z h \cos k_z h) - AB(\sin k_z h \cos k_z h) = 0. \quad (6)$$

여기서 A, B, C, D 는 다음의 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned}A &= (C_{33}^{33}R - k_z - C_{33}^{11}k_x), \quad B = (R + k_x + k_z) \\ C &= (C_{33}^{33}R + k_z + C_{33}^{11}k_x), \quad D = (R - k_x + k_z).\end{aligned}$$

그리고 R_{\pm} 와 $k_{z\pm}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}R_{\pm} &= \frac{u_{30}}{u_{10}} = \frac{\rho\omega^2 - C_{11}^{11}k_x^2 - C_{31}^{31}k_z^2}{(C_{31}^{31} + C_{33}^{11})k_x k_z} \\ k_{z\pm}^2 &= \left[\frac{-M \pm \sqrt{M^2 - 4N}}{2} \right] \\ M &= \frac{1}{C_{33}^{33}C_{31}^{31}} \{ C_{11}^{11}C_{33}^{33} - [2C_{31}^{31}C_{33}^{11} + (C_{31}^{31})^2] \\ &\quad - \frac{\rho\omega^2}{k_x^2} (C_{33}^{33} + C_{31}^{31}) \} \\ N &= \frac{1}{C_{33}^{33}C_{31}^{31}} \left\{ \left(\frac{\rho\omega^2}{k_x^2} - C_{11}^{11} \right) \left(\frac{\rho\omega^2}{k_x^2} - C_{31}^{31} \right) \right\}\end{aligned}$$

2.2 단일방향 CFRP 판의 램파 분산곡선

Fig. 1은 단일방향 CFRP 판을 orthotropic 구조로 가정하여 섬유방향으로 전파하는 램파의 군속도 분산곡선이다. 이 곡선은 탄성계수 C_{11}^{11} , C_{33}^{33} , C_{33}^{11} , C_{31}^{31} 를 각각 137.12 GPa, 5.73 GPa, 13.40 GPa, 4.80 GPa의 값을 대입하여 계산하였다.

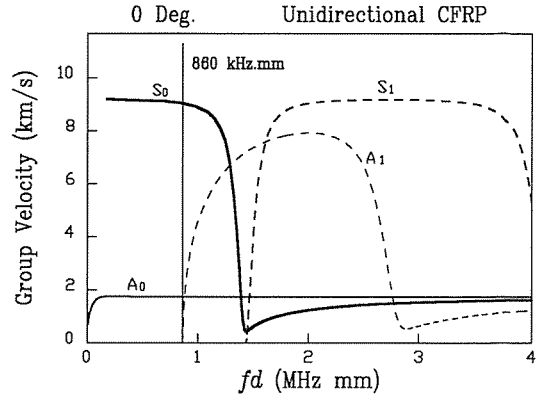


Fig. 1 Group velocity dispersion curves of Lamb wave propagating along the fiber direction in unidirectional CFRP plate.

섬유방향으로 전파하는 램파의 첫 번째와 두 번째 단절 주파수에 대응되는 fd (주파수 \times 두께) 값은 각각 0.86 MHz \cdot mm와 1.51 MHz \cdot mm이다. 첫 번째 단절주파수 이하의 범위에서는 오직 S_0 대칭모드와 A_0 비대칭모드만이 존재한다. 그리고 이러한 주파수범위에서의 S_0 대칭모드의 군속도는 A_0 비대칭모드의 군속도보다 크고 크기의 변화가 거의 없다. 이것은 이 범위에서 분산이 거의 없음을 의미한다. 따라서 이 주파수 영역에서는 S_0 대칭모드는 A_0 비대칭모드보다 앞서 진행하며, 파형의 모양도 크게 변화하지 않을 것이다.

Fig. 2는 섬유방향을 기준으로 파수 벡터 방향을 변화시켰을 때 S_0 대칭모드의 군속도 분산곡선을 나타낸 것이다. 여기서 첫 번째 단절주파수 이하의 군속도의 크기는 파수 벡터 방향이 섬유 방향에서 벗어날수록 작아진다. 이러한 현상은 매질의 이방성에 의한 것이다.

3. 실험 장치 및 속도 측정

3.1 실험 장치

Fig. 3은 이방성을 지닌 판에서 램파의 전파 특성을 파악하기 위한 실험 장치의 구성도이다. 단일방향 CFRP 판은 섬유 부피분율을 67%가 되도록하여 8 plies, 16 plies, 24 plies를 적층하여 크기는 600 mm \times 600 mm로 하였으며, 두께는 각각 0.96 mm, 1.81 mm, 2.56 mm가 되도록 만들었다. 탄성파인 램파를 발생시키기 위하여 중심주파수가 500 kHz이고 주파수 대역폭이 98%이며, 직경이 25 mm인 압전형 초음파 탐촉자를 사용하였으며, 판의 표면에 수직으로 접촉시켜 펄스 발생기(Ultrason BP-9400A)의 전기적인 펄스에 의하여 초음파 탐촉자

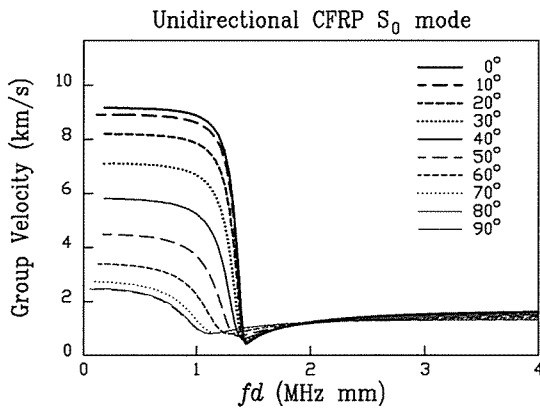


Fig. 2 Variation of the group velocity dispersion curves of S_0 symmetric mode with the wave vector direction in unidirectional CFRP plate.

(transducer)를 구동하였다. 음원인 초음파 탐촉자에서 발생된 펄스 진동은 램파를 형성하여 판의 모든 방향으로 전파되도록 하였다.

판을 전파하는 램파의 신호는 직경이 1.53 mm이며, 10 Hz에서 1.2 MHz까지 거의 일정한 수신감도를 지니는 pinducer를 디지털 오실로스코프(Lecroy 9410)에 연결하여 수신하여 GPIB를 통하여 PC에 저장하였다. 특정 방향으로 전파하는 램파의 신호를 수신하기 위하여 음원인 초음파 탐촉자를 중심으로 하여 두 개의 pinducer를 일직선상으로 서로 다른 거리에 배치하였다. 그리고 음원인 초음파 탐촉자 중심에 다른 pinducer를 두어 초음파 발생 순간을 trigger 신호로 하여 수신 pinducer에 도달하는 램파의 도달 시간을 정하였다.

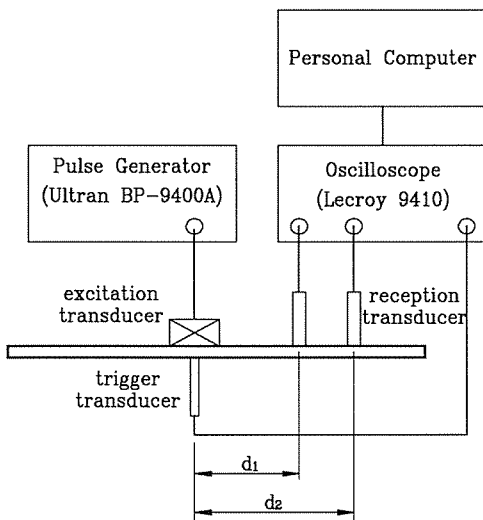


Fig. 3 Schematic diagram of experimental set-up.

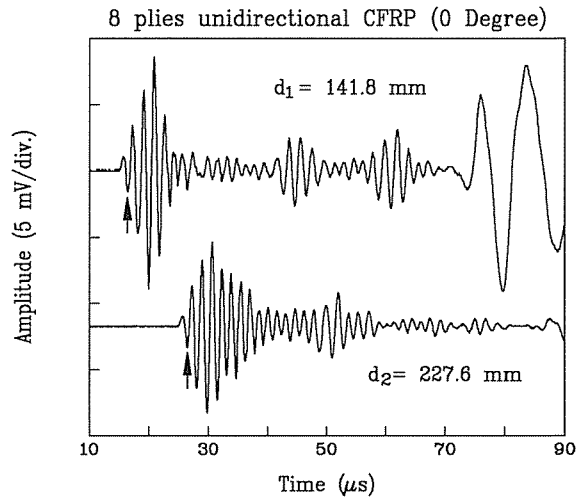


Fig. 4 Received signals with the pinducer at two different position in the 8 plies laminated unidirectional CFRP plate.

3.2 속도 측정

Fig. 4는 8 plies 단일방향 CFRP 판에서 섬유방향으로 전파한 탄성파의 신호를 두 다른 거리에서 수신한 신호들이다. 음원에서 발생한 초기의 진동은 2회 정도의 진동을 주었음에도 불구하고 거리가 떨어진 위치에서 수신된 신호는 램파로 전환되어 파군을 형성하고 있다. 이것은 램파로 전환되어 전파하기 때문에 나타나는 현상이다[8,9]. 앞에서 언급한 바와 같이 램파는 첫 번째 단절주파수 이하의 영역에서 S_0 대칭모드가 앞서 진행하므로 수신된 신호의 초기 파군은 S_0 대칭모드가 도달한 것이며, 뒷부분의 저주파이면서 큰 진폭의 신호는 A_0 비대칭모드가 도달한 것이다. 초기에 도달한 S_0 대칭모드의 속도를 결정하기 위하여 Fig. 4의 화살표로 표시한 위치인 아래쪽의 첫 번째 봉우리(peak)가 도달되는 시간을 측정하였다.

4. 이방성과 군속도의 방향의 관계

이방성 재료에서 점원에 의하여 발생되는 탄성파는 구면파를 형성하지 않는다. 마찬가지로 이방성 판에서 점원에 의하여 발생되는 램파도 판의 이방성에 의존하여 원형이 아닌 다른 모양을 갖게 된다. 이렇게 파면이 원형이 아닌 경우에는 파수 벡터 방향인 위상속도 방향과 에너지 흐름의 방향인 군속도 방향이 일치하지 않는다. 이와 같이 파면이 원형이 아닌 경우에는 위상속도 방향은 파면에 법선 방향이며, 군속도의 방향은 음원에서 일직선 방향이 된다. 이와 같이 위상속도와 군속도의 방향이 일치하지 않는 경우에 특정

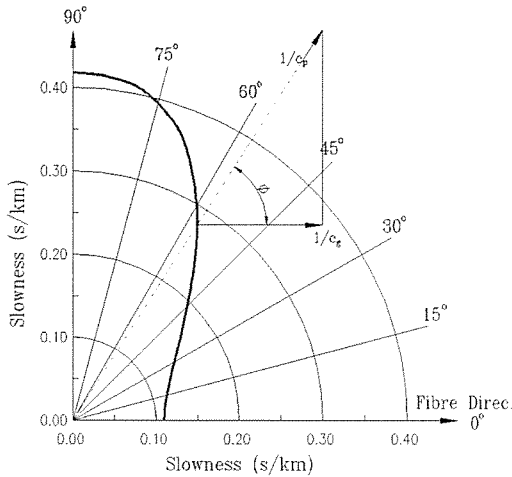


Fig. 5 Slowness curve of the S_0 mode corresponding to $0.2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$

방향의 위상속도에 대응하는 군속도의 방향과 크기의 결정은 위상속도의 역수인 slowness 곡선을 이용한다. 군속도의 방향은 slowness 곡선의 법선 방향이며, 이를 이용하면 군속도는 위상속도와 다음의 관계를 갖는다[18].

$$c_g \cos \phi = c_p \quad (6)$$

여기서 ϕ 는 군속도와 위상속도 방향의 사이각이다. 이와 같이 두 속도의 방향이 차이가 있으므로, 앞의 분산방정식으로부터 구한 램파의 군속도 분산곡선인 Fig. 1과 2는 엄밀한 의미로 이방성 판의 군속도가 아니다. 군속도 분산곡선은 파수 벡터 방향에 대하여 나타낸 것이기 때문에 에너지 흐름의 방향으로 교정을 해야 한다. 이를 위해서는 실제로 위상속도로 slowness 곡선을 구하여야 한다. 일반적으로 램파의 S_0 대칭모드의 군속도는 저주파 영역에서 위상속도와 크기가 거의 같다[10,19]. 그러므로 첫 번째 단절주파수 이하의 분산이 적은 영역의 군속도는 위상속도로 근사할 수 있다. 이러한 관계를 이용하여 slowness 곡선을 구하고 이로부터 군속도의 방향과 크기를 교정하였다.

Fig. 5는 방향 교정을 위하여 구한 $0.2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 에 해당하는 S_0 대칭모드 slowness 곡선이다. 음원이 위치한 원점에서 모든 방향은 파수 벡터의 방향이고, slowness 곡선의 법선 방향이 군속도의 방향이 된다. Fig. 5에 표시된 파수 벡터 방향이 56° 에 해당하는 군속도의 방향은 섬유 배열 방향과 같은 방향을 가진다.

Fig. 6은 단일 방향 CFRP 적층 판에서 각 전파 방향에 대한 S_0 대칭모드에 대한 속도 변화를 나타낸 그림이다. 실선은 Fig. 2의 각 방향에 따른 군속도 분산곡선에서 fd

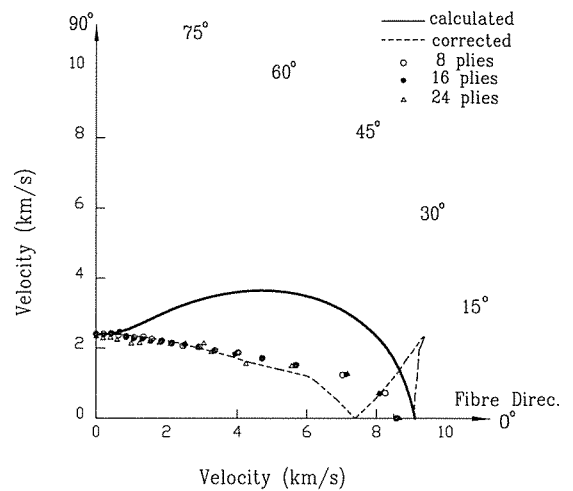


Fig. 6 Phase velocity curve (solid line) obtained with the group velocities calculated by dispersion relation, group velocity curve (dashed line) corrected with the slowness surface, and the measured velocities in 8 plies(○), 16 plies(●), 24 plies(△) laminated unidirectional CFRP plate.

값이 $0.2 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$ 인 군속도 값을 선택하여 나타낸 것으로 앞에서 언급한 바와 같이 이것은 위상속도에 근사되므로 위상속도 곡선에 대응된다. 이를 이용하여 방향과 크기를 교정한 군속도 곡선은 점선으로 표시하였다. 교정된 군속도 곡선은 섬유방향 근처에서는 하나의 값을 갖지 않고 두 개 이상의 속도 값을 가지는 부분이 존재한다. 이러한 영역을 cusp 영역이라고 한다[6]. Fig. 5에서 파수 벡터 방향이 56° 이하일 때에는 군속도의 방향이 음의 방향을 갖는다. 그러나 단일 방향 CFRP 적층 판은 섬유 배열 방향을 기준으로 대칭이 되므로 군속도 곡선을 Fig. 6과 같이 나타내었다. 이것은 파수 벡터가 0° 부터 56° 사이에 있을 때 파면은 파수 벡터와 수직하게 형성될지라도 에너지는 섬유 방향 쪽으로 흘러감을 의미한다. 이러한 현상은 속도가 빠른 방향으로 에너지가 더 잘 흐를 수 있기 때문에 나타나는 것이다. 또한 파수 벡터가 56° 이상에서도 교정된 군속도의 방향은 파수 벡터 방향에 비하여 섬유방향 쪽으로 기울어져 있다. 이와 같은 현상도 에너지가 속도가 빠른 쪽으로 흐르기 때문에 나타나는 현상이다.

Fig. 6에서 흰원, 검은원, 삼각형으로 표시한 것은 각각 8 plies, 16 plies, 24 plies로 적층한 단일방향 CFRP 판에서 측정된 각 방향의 속도를 나타낸 것이다. 각 판에서 측정된 속도 값들은 판의 두께에 관계없이 잘 일치한다. 램파의 속도는 판의 두께보다는 전파하는 모드에 관계된다. 그리고 수신된 신호의 도달 시간은 신호의 초기 부분을 선택하였으므로 두께와 관계없이 가장 빨리 도달하는 모드의 속도를 측정된 것이다. 그러므로 측정된 속도는 두께와 무관한 거의 같은 값을 갖게 된 것이다.

그러나 측정된 속도는 방향과 크기를 교정하지 않은 위상속도 곡선과는 많은 차이가 있으며, 방향과 크기를 교정한 군속도 곡선과는 섬유 방향 근처에 존재하는 cusp 영역을 제외하고는 잘 일치하였다. 이러한 결과는 측정된 속도가 에너지 전파와 관련된 군속도이며, 이방성 판에서 전파하는 램파의 군속도는 분산 곡선만으로 결정할 수 없고 방향 교정이 함께 되어야만 함을 입증하는 것이다. 그리고 이방성 판에서 군속도의 방향은 위상속도의 방향보다 섬유 방향 쪽으로 기울어져 있다. 이것은 에너지의 흐름이 속도가 빠른 쪽으로 더 많이 전파되기 때문에 나타나는 현상이다.

5. 결 론

적층 단일방향 CFRP판을 orthotropic 구조로 가정하여 각 방향으로 전파하는 분산곡선을 구하였다. 첫 번째 단절주파수보다 작은 주파수영역인 0.2 MHzmm의 fd 값에 해당하는 S_0 대칭모드에 대한 군속도는 위상속도에 근사되므로 이로부터 위상 속도 곡선을 구하고, slowness 곡선을 구성한 뒤에 방향과 크기를 교정한 군속도 곡선을 재구성하였다. 그리고 8, 16, 24 plies로 적층한 단일방향 CFRP 판에서 각 방향에 대한 램파의 S_0 대칭모드의 속도를 측정하여 두 개의 속도곡선과 비교하였다.

적층 수가 다른 세 가지의 적층 단일방향 CFRP 판에서 측정된 S_0 대칭모드의 속도는 적층 두께와는 무관한 같은 크기의 값들을 얻었으며, 위상속도 곡선과는 거의 일치하지 않았으며, slowness를 이용하여 방향을 교정한 군속도 곡선과 cusp 영역을 제외하고는 잘 일치하였다. 이러한 결과는 이방성 재료에서 램파의 에너지 전파속도인 군속도는 분산곡선 뿐만이 아니라 방향 교정을 해야만 함을 입증하는 것이다. 그리고, 이방성 판에서는 속도가 빠른 쪽으로 에너지를 더 많이 보내게 되므로 주축을 제외한 전파방향에 대한 군속도의 방향은 파수 벡터의 방향에 비하여 속도가 빠른 쪽으로 기울어지게 된다.

참고문헌

- 1) Zimmer J. E. and Cost J. R., "Determination of the Elastic Constants of a Unidirectional Fiber Composite Using Ultrasonic Velocity Measurements," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 47, No. 3, 1970, pp. 795-803.
- 2) Kim H. C. and Park J. M., "Ultrasonic wave propagation in Carbon fibre reinforced plastics," *J. Material Science*, Vol. 22, 1988, pp. 4536-4540.
- 3) Kline R. A., "Wave Propagation in Fibre Reinforced

- Composites for Oblique Incidence," *J. Composite Materials*, Vol. 22, 1988, pp. 287-303.
- 4) Wu T.-T. and Ho Z.-H., "Anisotropic Wave Propagation and its Application to NDE of Composite Materials," *Experimental Mechanics*, Dec. 1990, pp. 313-318.
- 5) Rokhlin S. I. and Wang W., "Double through transmission bulk wave method for ultrasonic phase velocity measurement and determination of elastic constants of composite materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 6, 1992, pp. 3303-3312.
- 6) Sachse W., Veidt M. and Niu L., "Determination of the elastic properties of composite materials using simulated AE signals," *Acoustic Emission in Composite Materials*, Vol. 4, 1992, pp. 401-410.
- 7) Lamb H., "On waves in an elastic plate," *Proc. of the Royal Soc. London, Series A*, Vol. 93, No. 648, 1917, pp. 114-128.
- 8) Weaver R. L. and Pao Y. H., "Axisymmetric Elastic Waves Excited by Point Source in a Plate," *J. Applied Mechanics*, Vol. 49, 1982, pp. 821-836.
- 9) Weaver R. L. and Pao Y. H., "Spectra of transient waves in elastic plates," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 6, 1982, pp. 1933-1941.
- 10) 이정기, 김호철, 최명선, 김영환, "유리판과 단일방향 탄소섬유강화 플라스틱판에서 점원에 의해 발생된 과도적 탄성파의 주파수 해석," 한국음향학회, 13권, 제6호, pp. 50-59, 1994.
- 11) Solie L. P. and Auld B. A., "Elastic waves in free anisotropic plate," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 54, 1973, pp. 50-65.
- 12) Chimenti D. E. and Nayfeh A. H., "Leaky Lamb waves in fibrous composite laminates," *J. Applied Physics*, Vol. 58, No. 12, 1985, pp. 4531-4538.
- 13) Kline R. A., "Doroudian M. M. and Hsiao C.P., Plate wave propagation in transversely isotropic materials," *J. Composite Materials*, Vol. 23, 1989, pp. 505-533.
- 14) Noiret D. and Rojet J., "Calculation of wave propagation in composite materials using the Lamb wave concept," *J. Composite Materials*, Vol. 23, 1989 pp. 195-206.
- 15) Gorman M. R., "Plate wave acoustic emission; Composite Materials, Acoustic Emission in Composite Materials," Vol. 4, 1992, pp. 395-400.
- 16) Dayal V. and Kinra V. K., "Leaky Lamb waves in an anisotropic plate. I: An exact solution and experiments," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 85, No. 6, 1989, pp. 2268-2276.
- 17) Rose W. R., Rokhlin S. I. and Adler L., "Evaluation of anisotropic properties of Graphite-Epoxy composites using

- Lamb waves," *Rev. Prog. QNDE*, Vol. 6B, 1987, pp. 1111-1118.
- 18) A. G. Every and W. Sachse, "Determination of the elastic constants of anisotropic solids from acoustic wave group velocity measurements," *Physics Review B*, Vol. 42, No. 13, 1990, pp. 8196-8205.
- 19) Pollard H. F., "*Sound waves in Solids*," Chap. 4, 1977.