

단일방향 섬유 복합재료 내의 초음파 전파 및 산란 현상의 해석과 시뮬레이션

Analysis and Simulation of Ultrasonic Wave Propagation and Scattering in Unidirectional Fiber Composites

이춘재*, 임현준**

Choon-Jae Lee* and Hyunjune Yim**

초 록 복합재료의 초음파검사는 매질의 탄성이방성으로 인해 빔스큐(beam skew)현상 등이 발생하기 때문에 등방성 재료의 검사에 비해 훨씬 어렵다. 그 동안의 많은 연구의 결과로서 이방성 재료 내 탄성파의 전파 현상에 대한 해석해법이 정립되어 있으나, 그 해석해가 매우 복잡하여 실제 문제의 해를 구하기 위해서는 수치적인 방법에 의존하여야 하는 경우가 많다. 본 연구에서는 횡등방 이방성(transversely isotropic)으로 가정할 수 있는 단일방향 섬유 복합재료 내 점원에 의한 초음파 전파의 해석해를 먼저 구하고, 이러한 복합재료를 질량-스프링 모델로 모델링하여 해석해에 상응하는 수치해를 구하였다. 그 결과, 초음파의 전파에 대한 수치해와 해석해가 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. 동일한 수치해법을 사용하여 초음파가 복합재료의 자유표면에서 반사되는 현상과 균열에 의해 산란되는 현상에 대한 수치해도 구하였으며 그 결과를 파동역학의 관점에서 고찰하였다. 본 연구에서 그 유효성이 확인된 수치 모델은 복합재료의 초음파검사를 시뮬레이션 함에 있어 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

주요어: 복합재료, 이방성매질, 초음파검사, 수치 시뮬레이션, 질량-스프링 모델

Abstract Ultrasonic testing of composite materials is much more difficult than that of isotropic materials, because of the beam skew phenomenon caused by their elastic anisotropy. An established analytical method exists for elastic wave propagation in anisotropic media as a result of previous research efforts. Yet, due to the complexity of the analytical method, solution of real problems must resort to the numerical method. In this work, analytical solutions have first been obtained for the wavefield due to a point source in a unidirectional fiber-reinforced composite, which may be modeled as transversely isotropic. Then, the corresponding numerical solutions have been obtained using the mass-spring lattice model(MSLM). The two solutions have agreed well with each other. Other problems such as reflection from free boundaries and scattering from cracks have also been solved numerically, and the results have been investigated from the viewpoint of wave mechanics. The numerical model whose validity has been confirmed by this work will be of great use in simulating ultrasonic testing of composite materials.

Keywords: composite materials, anisotropic media, ultrasonic testing, numerical simulation, mass-spring lattice model(MSLM)

1. 서 론

섬유강화 복합재료(fiber-reinforced composites)는 많은 경우 탄성이방성(elastic anisotropy)을 갖는다. 이방성 매질에서 초음파가 전파하는 양상은 등방성 매질의 경우에 비해 크게 다르고 매우 복잡하다. 대표적인 현상으로서, 균질 등방성 재료에서는 위상속도와 군속도가 모든 방향에 있어 일정한 하나의 값을 갖지만, 균질 이방성 재료에서는 위상속도와 군속도의 크기가 방향에 따라 다를 뿐 아니라 한 방향에 있어서도 위상속도벡터와 군속도벡터의 방향과 크기가 서로 다르다. 후자의 현상을 흔히 빔스큐(beam skew)라고 부르는데, 이는 초음파 탐촉자로부터 방사되는 파동에너지가 전혀 예상치 못한 방향으로 전파되는 결과를 초래하기 때문에 초음파검사의 결과를 분석함에 있어 큰 장애가 된다.

이러한 문제를 최소화하기 위해서는 이방성 매질에서 탄성파가 전파되는 현상에 대해 깊이 이해할 필요가 있으며, 이를 위하여 많은 이론적, 실험적 연구가 수행되었다 [1-3]. 특히, 해석적인 해법은 Musgrave[1]와 Fedorov[2]에 의해 잘 정립되어 유용하게 쓰이고 있다. 그러나, 이 해석 해법은 매우 간단한 탄성파의 전파, 반사, 굴절 등의 문제에 대해서만 해를 제공할 뿐, 기하학적 형상이 복잡한 실제 문제의 해를 주지는 못한다. 따라서, 일반적인 실제 문제의 해를 구하기 위해서는 수치해법에 의존하여야 한다.

본 논문에서는 단일방향의 섬유로 강화된 복합재료를 횡등방 이방성(transversely isotropic)으로 가정하고, 먼저 이러한 매질 내에서의 위상속도, 군속도 등에 대한 해석해를 보인다. 또한, 횡등방 이방성의 모델링에 적합한 직사각형 질량-스프링 모델(rectangular mass-spring lattice model, RMSLM)을 소개하고, 이 수치모델을 사용하여 단일방향 섬유 복합재료에서 발생하는 탄성파의 전파, 반사, 산란 등의 문제에 대한 수치해를 구하고, 이를 해석해 및 파동역학의 결과와 비교하여 수치모델의 정확성을 검토한다.

2. 해석해법

2.1. 운동방정식

균질 이방성 매질에서의 탄성 변위에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

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

식 (1)에서 ρ 는 매질의 밀도, u_i 는 변위벡터의 i 번째 성분, C_{ijkl} 은 강성행렬(stiffness matrix)의 요소를 나타내며, 식 (1)에서는 반복되는 첨자에 대한 합규약(summation convention)이 적용된다.

본 연구의 대상인 단일방향 섬유 복합재료의 성질은 횡등방 이방성(transversely isotropic)으로 모델링할 수 있으며[4], Fig. 1과 같이 섬유의 방향을 x_3 축으로 하여 $x_1x_2x_3$ 직교좌표계를 설정하면 식 (1)에 쓰인 강성행렬 C_{ijkl} 은 식 (2)와 같은 구성방정식을 만족하며, 그 요소들 사이에 식 (3)과 같은 관계가 성립된다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1122} & C_{2222} & C_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1133} & C_{2233} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{2323} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{3131} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2C_{1212} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \dots\dots\dots \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} C_{1111} &= C_{2222} \quad (\text{또는 } C_{11} = C_{22}) \\ C_{1133} &= C_{2233} \quad (\text{또는 } C_{13} = C_{23}) \dots\dots\dots (3) \\ C_{2323} &= C_{3131} \quad (\text{또는 } C_{44} = C_{55}) \\ C_{1212} &= \frac{1}{2} (C_{1111} - C_{1122}) \quad (\text{또는 } C_{66} = \frac{1}{2} (C_{11} - C_{12})) \end{aligned}$$

식 (3)에서 괄호 안의 식은 C_{ijkl} 의 축약형 표기법을 쓸 때의 식이며, 본 논문에서도 이 축약형 표기법을 쓰기로 한다. 식 (2), (3)과 같은 성질을 갖는 매질에서 x_3 축

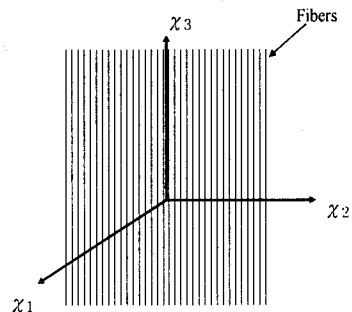


Fig. 1 Cartesian coordinates for unidirectional fiber composites

을 포함하는 모든 평면은 동일한 성질의 횡등방 이방성을 갖는다. 본 연구에서는 횡등방 이방성 평면 중 하나인 x_2-x_3 평면 내에 변위가 놓이는 2차원 면내 변위의 문제를 대상으로 할 것이다.

2.2. 위상속도

서론에서 언급한 바와 같이 이방성 매질에서의 위상속도벡터와 군속도벡터는 그 크기와 방향이 서로 다르고, 각자의 크기도 방향에 따라 변화한다. 이러한 성질을 도식화하여 나타내면 Fig. 2와 같다[5]. Fig. 2에는 미소한 평면파요소(plane wave segment)가 굵고 짧은 실선으로 표시되어 있는데, 파동벡터(wave vector) \mathbf{k} 는 이 평면파요소와 수직이다. 이 때, 위상속도벡터 \mathbf{v} 는 파동의 시작점인 O 점으로부터 평면파요소에 수직인 방향으로 측정되며, 에너지속도인 군속도벡터 \mathbf{v}_g 는 O 점으로부터 평면파요소를 잇는 직선을 따라 측정된다. 즉, Fig. 2의 평면파요소는 O 점에서 시작되어 군속도벡터 \mathbf{v}_g 의 방향으로 전파된다. 위상속도벡터와 군속도벡터 사이의 각 Δ 를 빔스큐각(beam skew angle)이라 한다.

일반적으로, 이방성 매질에 대한 분산관계식(dispersion relation)을 구하기 위해 식 (4)와 같이 평면 조화파를 가정한다.

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \exp\left\{i\frac{2\pi}{\lambda}(lx_1 + mx_2 + nx_3 - vt)\right\} \dots\dots (4)$$

식 (4)에서 \mathbf{A} 는 변위의 진폭벡터이고, λ 는 파장이며, (l, m, n) 은 Fig. 2의 파동벡터 \mathbf{k} 와 같은 방향의 단위 벡터이고, v 는 위상속도를 나타낸다. 식 (4)를 운동방정

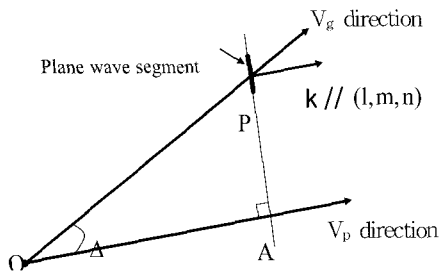


Fig. 2 Phase and group velocities of plane wave segment in anisotropic media

식 (1)에 대입하고, 식 (2), (3)을 이용하여 정리한 후 \mathbf{A} 의 성분들에 대한 방정식을 구하면 식 (5)와 같이 된다[5].

$$\begin{pmatrix} l^2 a + m^2 \frac{c}{2} - H & lm(a - \frac{c}{2}) & nld \\ lm(a - \frac{c}{2}) & l^2 \frac{c}{2} + a \frac{m}{2} - H & mnd \\ nld & mnd & (\frac{n}{2} h - H) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} = 0 \dots\dots (5)$$

식 (5)에서 새로 사용된 문자들은 표현을 간단히 하기 위한 것이며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} a &\equiv C_{11} - C_{44}, \quad c \equiv C_{11} - C_{12} - 2C_{44}, \\ d &\equiv C_{13} + C_{44}, \quad \dots\dots\dots (6) \\ h &\equiv C_{33} - C_{44}, \quad H \equiv \rho v^2 - C_{44} \end{aligned}$$

식 (5)에서 0이 아닌 A_1, A_2, A_3 가 존재하기 위해서는 고유치문제인 식 (5)의 해를 구해야 한다. 즉, 식 (5)의 3×3 행렬의 행렬식(determinant)이 영(zero)이 되어야 한다는 특성방정식을 풀어야 하는데, 이 방정식은 미지의 위상속도 v 를 포함하는 문자 H 에 관한 방정식이 된다. 물론, H 의 해를 구하면 위상속도 v 는 아래 식으로부터 구할 수 있다.

$$v = \sqrt{\frac{H + C_{44}}{\rho}} \dots\dots\dots (7)$$

또, 각 H 값에 대하여 식 (5)의 고유치벡터 \mathbf{A} 를 구하면 그 방향이 변위의 방향이 된다.

이미 언급한 바와 같이 본 연구에서는 횡등방 이방성 평면인 x_2-x_3 평면 내에서 파동이 전파되는 2차원 문제를 고려하며, 이 경우 (l, m, n) 벡터에서 x_1 방향으로의 성분 l 은 0(zero)이 된다. 이 2차원문제는 면내 변위만 존재하는 경우와 면외 변위만 존재하는 경우로 나누어 풀 수 있으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다[5].

- (1) x_2-x_3 평면 내의 면내 변위:

$A_1 = 0, A_2, A_3 \neq 0$ 인 경우에 해당하며, 식 (5)의 고유치문제에서 H 의 해를 구하면 두 개의 해가 얻어지며 다음과 같다.

$$H_{QP, QSV} = \frac{1}{2} \{ m^2 a + n^2 h \pm \sqrt{(m^2 a + n^2 h)^2 - 4m^2 n^2 (ah - d^2)} \} \dots \dots \dots (8)$$

식 (8)에서 H 의 첨자, QP 및 QSV는 이 두 해가 등방성 매질에서의 P파(종파) 및 SV파(수직편광횡파)와 유사(Quasi)하기 때문에 붙여진 것인데, 이는 QP 및 QSV 모드에 해당하는 변위가 파동벡터 방향과 정확하게 평행이거나 수직이 아니기 때문이다[5].

(2) $x_2 - x_3$ 평면 밖으로의 면의 변위:

$A_1 \neq 0, A_2, A_3 = 0$ 인 경우에 해당하여, H 의 해는 다음과 같다.

$$H_{QSH} = m^2 \frac{c}{2} \dots \dots \dots (9)$$

식 (9)의 해 역시 등방성 매질에서의 SH파와 유사하다.

2.3. 빔스큐각 및 군속도

Fig. 2에서 살펴보았듯이 이방성 매질에서는 에너지의 전파방향이 파면에 수직하지 않게 되는 빔스큐 현상으로 인해 초음파검사 결과를 해석함에 있어 어려움이 많다. Fig. 2에 보인 빔스큐각 Δ 는 $x_2 - x_3$ 평면 내 변위의 경우 식 (10)으로 계산된다[6].

$$\tan \Delta = \sin(2\theta) [H(a-h) - (ah - d^2) \cos(2\theta)] / [2(H + c_{44})D] \dots \dots \dots (10)$$

식 (10)에서 $D = \pm [(m^2 a - n^2 h)^2 + 4m^2 n^2 d^2]^{\frac{1}{2}}$ 이고, θ 는 x_3 축과 (l, m, n) 방향이 이루는 각이다. 면의 변위의 경우에는 Δ 가 아래 식 (11)로 주어진다[6].

$$\tan \Delta = (c_{66} - c_{44})mn / (c_{66}m^2 + c_{44}n^2) \dots \dots \dots (11)$$

탄성파의 전파는 파동을 통해 에너지가 전파하는 현상이므로, Fig. 2의 원점에서 시작된 파동은 단위시간 후 군속도벡터 \mathbf{v}_g 의 끝점에 위치하게 된다. 따라서, 2.2절의 방법으로 모든 (l, m, n) 방향으로의 위상속도를 구하고, 식 (10), (11)로부터 빔스큐각 Δ 를 구하면 Fig. 2에 보인 기하학적 관계로부터 (즉, 위상속도벡터의 끝점에서 그린 수직선 AP와 빔스큐각 Δ 만큼 회전된 직선 OP와의 교점 P를 구함) 군속도벡터의 끝점 P, 즉 단위시간 경과

후 파동의 위치를 구할 수 있다[6].

2.4. 해석해

본 연구에서는 계산을 위하여 단일방향 유리섬유로 강화된 유리섬유-에폭시 복합재료를 선택하였으며, 이 복합재료의 밀도 및 강성행렬 요소의 값은 Table 1과 같다[7]. 2.2절과 2.3절에서 설명한 방법을 적용하면, Table 1과 같은 성질을 갖는 유리섬유-에폭시 복합재료의 위상속도 및 파면의 위치를 임의의 방향 (l, m, n) 에 대해 구할 수 있다. 각 방향에 대한 위상속도벡터의 끝점을 이으면 위상속도면(velocity surface)이라는 폐곡면이 되는데, 본 연구에서는 $x_2 - x_3$ 평면 (즉, 횡등방 이방성 평면) 내에서 전파하는 파동만을 대상으로 하므로, 위상속도면이

Table 1 Density and elastic constants for unidirectional fiberglass epoxy composites

Elastic constants and density	Value
C_{11}, C_{22}	1.0581×10^{10} N/m ²
C_{12}	4.095×10^9 N/m ²
C_{13}, C_{23}	4.679×10^9 N/m ²
C_{33}	4.0741×10^{10} N/m ²
C_{44}, C_{55}	4.422×10^9 N/m ²
C_{66}	3.243×10^9 N/m ²
ρ	1850 kg/m ³

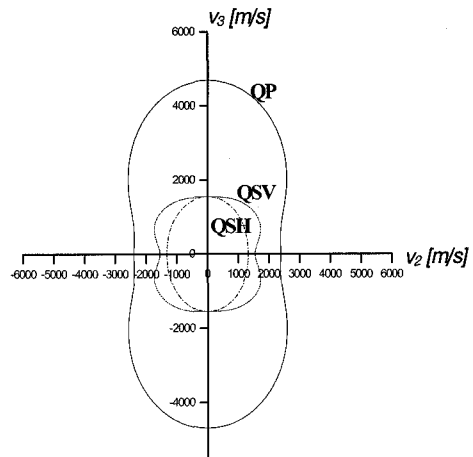


Fig. 3 Velocity surfaces in transversely isotropic plane of unidirectional glass fiber-epoxy composite

$x_2 - x_3$ 평면과 만나 형성되는 곡선이 관심의 대상이며 이를 구한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3에는 이렇게 구해진 세 개의 폐곡선(QP, QSV, QSH)이 있는데, 원점으로부터 폐곡선 상의 점까지의 거리가 해당 모드와 그 방향으로의 위상속도를 나타낸다. Fig. 3로부터 세 모드 모두에 있어서 방향에 따라 위상속도가 달라짐을 알 수 있고, 모든 방향에 있어서 위상속도의 크기는 QP, QSV, QSH 순임을 알 수 있다.

방향은 위상속도벡터와 같고 크기는 위상속도의 역수인 벡터를 완도벡터(slowness vector)라고 하는데, 모든 방향으로의 완도벡터를 이으면 완도면(slowness surface)이라는 폐곡면이 형성된다. 유리섬유-에폭시 복합재료에 대해 완도면의 $x_2 - x_3$ 평면에서의 단면을 구한 것이 Fig. 4에 나타나 있다. 즉, Fig. 3에서 각 방향으로 원점으로부터의 거리의 역수를 구하여 이를 그래프로 그린 것이 Fig. 4이다. 본 논문에서는 구체적으로 고찰하지 않지만, 완도면을 사용하면 파동의 반사, 굴절 등에 관한 해석해를 구할 수 있다.

마지막으로, 2.3절의 방법으로 QP, QSV, QSH 모드의 파면(wave surface)을 구한 결과가 Fig. 5에 나타나 있다. Fig. 5에 보인 파면들은 군속도벡터의 끝점에 해당되므로 원점에서 시작된 파동이 단위시간 (1 sec) 동안 퍼져나간 파동선단(wavefront)이라고 생각할 수 있다. 여기서, QSV 모드의 경우 커쭈(cusp)이 생기는 것을 알 수 있는

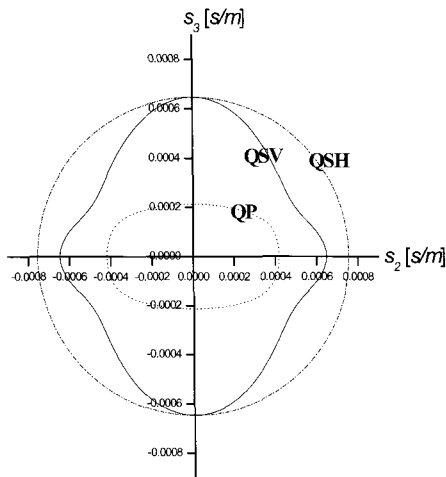


Fig. 4 Slowness surfaces in transversely isotropic plane of unidirectional glass fiber-epoxy composite

데 이는 이 모드에서 빔스쿠각이 매우 크기 때문이며, 커쭈가 존재하는 방향에서 최대 세 개의 QSV 파면을 관찰할 수 있음을 의미한다.

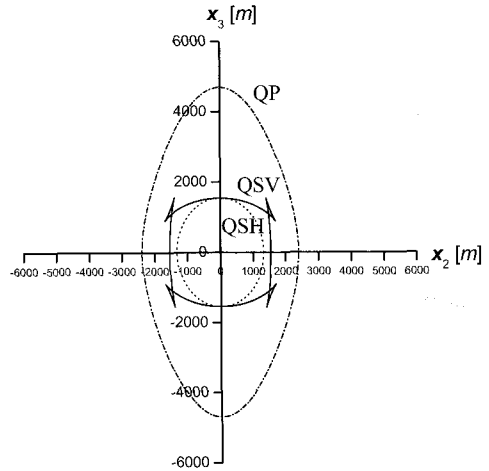


Fig. 5 Wave surfaces in transversely isotropic plane of unidirectional glass fiber-epoxy composite

3. 수치해

3.1. 수치모델 및 문제 정의

횡등방 이방성 매질에 적합한 2차원 (평면변형률) 질량-스프링 모델로서 가로, 세로의 격자 간격과 스프링상수가 다른 직사각형 격자의 모델이 개발된 바 있다[8]. 본 연구에서는 이 직사각형 질량-스프링 모델을 적용하여 단일방향 유리섬유-에폭시 복합재료에서의 파동에 관한 수치해를 구한다.

본 논문에서는 Fig. 6에 보인 여섯 문제의 수치해를 구하고 그 결과를 고찰한다. Fig. 6의 모든 경우는 Fig. 6(a)에 보인 x_2, x_3 축의 방향으로 그린 것이다. Fig. 6(a)의 문제는 가장 기본적인 문제로서 1 사이클의 사인(sine)파 형태를 갖는 x_3 축 방향 힘이 작용하는 점원(pointsource)에 의해 발생하는 파동을 구하는 문제로서, 그 결과를 Fig. 5의 해석해와 직접 비교할 수 있는 문제이다. Fig. 6(b)의 문제는 경사진 선원(line source)에 의해 발생된 평면파가 자유표면에서 반사되는 현상을 고찰하기 위한 문제로서 가진력의 방향은 선원과 수직(normal)이다.

Fig. 6(c) 및 6(d)의 문제는 모두 x_3 축 방향으로 분포된 선원에 의해 발생된 평면파가 균열에 의해 산란되는 문제이며, 각각 균열이 x_3 축 방향 및 x_2 축 방향으로 놓여 있는 경우이다. 특히, Fig. 6(c)와 같은 x_3 축 방향의 균열은 강화섬유가 기지와 분리되는 디본드(debond) 현상에 의해 쉽게 발생될 수 있는 결합 형태이다. Fig. 6(e)는 Fig. 6(c)와 같으나 선원이 x_2 축 방향이라는 차이가 있다. 마지막으로 Fig. 6(f)는 경사진 선원에 의해 발생된 평면파가 균열에 의해 산란되는 문제이다.

3.2. 수치해 및 고찰

질량-스프링 모델을 사용하여 Fig. 6의 각 문제에 대

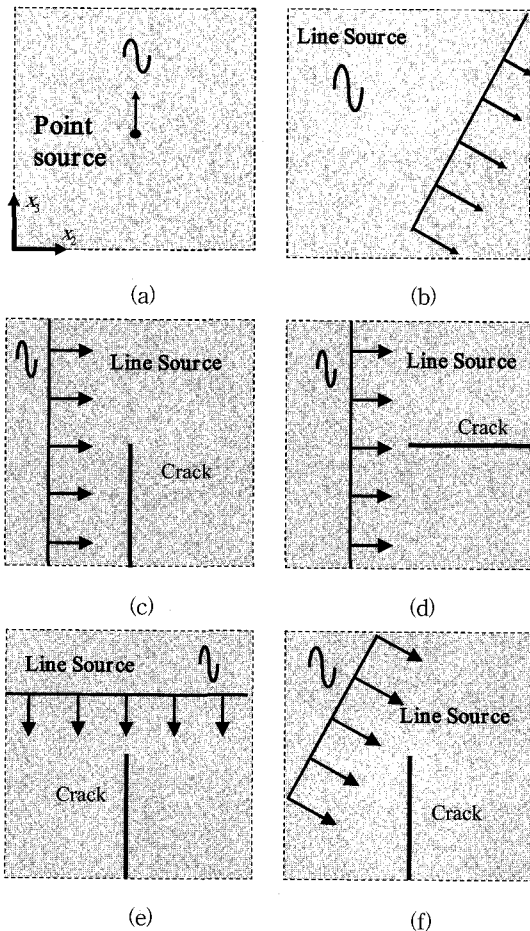


Fig. 6 Problems solved numerically

해 구한 수치해를 Fig. 7에 같은 순서로 나타내었다. Fig. 7의 각 그림에서 검은 부분은 변위가 없는 부분이고 밝을수록 변위의 절대값이 큰 부분이다.

앞서 언급하였듯이, Fig. 7(a)의 결과는 해석해 중 Fig. 5의 파면과 직접 비교할 수 있는 결과이다. Fig. 5와 Fig. 7(a)를 비교해보면 두 그림의 변위장이 매우 유사함을 알 수 있고, QP 및 QSV 모드의 파면을 Fig. 7(a)에 레이블(label)로 표시하였다. (수치해에서는 평면변형률을 가정하므로 QSH 모드는 발생하지 않는다.) 비교를 위하여, 서로 다른 네 개의 에너지 전파방향에 대하여 군속도의 크기를 해석해(Fig. 5)와 수치해(Fig. 7(a))에서 구하여 Table 2에 보였다. Table 2에서 각도 θ 는 x_3 축으로부터 시계 방향(또는 반시계 방향, 대칭이므로)으로 측정된

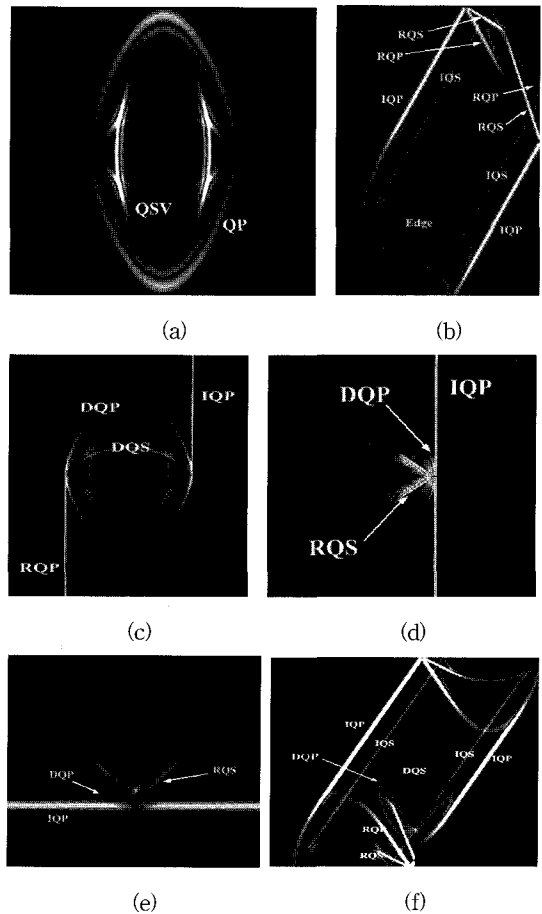


Fig. 7 Wavefields obtained numerically using Mass-Spring Lattice Model (MSLM)

각도이다. Table 2의 결과에서 네 방향 모두에서 QP파 및 QSV파의 군속도에 대한 수치해와 해석해가 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 적어도 파동의 발생 및 전파속도에 관한 한 질량-스프링 모델이 정확하다는 것을 입증하는 결과이다.

Table 2 Comparison of analytical and numerical results for group velocities of QP and QSV waves in various directions

Direction	Group velocity of QP wave [m/s]		Group velocity of QSV wave [m/s]	
	Analytical solution	Numerical solution (Error %)	Analytical solution	Numerical solution (Error %)
$\theta = 0^\circ$	4692.8	4692.8 (0 %)	1546.1	1546.1 (0 %)
$\theta = 45^\circ$	2777.8	2828.4 (1.8 %)	2027.8	2020.3 (0.371 %)
$\theta = 66.3^\circ$	2500	2606.1 (4.24 %)	1875.0	1849.6 (0 %)
$\theta = 90^\circ$	2391.5	2391.5 (1.35 %)	1546.1	1546.1 (0 %)

Fig. 7(b)의 결과에서는 두 가지 현상을 관찰할 수 있다. 먼저, Fig. 6(b)에 보인 선원(line source)으로부터 양쪽으로 두 모드의 입사파(IQP, IQS, 여기서 I는 incident를 의미)가 함께 발생한다는 사실이다. 등방성 매질에서는 동일한 선원에 의해 P파만 발생하는 것과 비교하면 [8], 두 가지 모드가 함께 발생하는 것은 이방성 때문임을 알 수 있다. Fig. 7(b)에서 두 번째로 관찰할 수 있는 현상은 자유표면에서의 반사현상에 관한 것이다. 우선, 매질의 위쪽 경계면에서 IQP파의 입사로 인해 두 모드의 반사파(RQP, RQS, 여기서 R은 reflected를 의미)가 발생하는 것을 알 수 있으며, 등방성 매질에서와 마찬가지로 모드변환이 일어남을 알 수 있다. 한편, 우측의 경계면에서는 IQP파의 입사로 인해 RQS파만 발생되고, IQS파의 입사로 인해 RQP파만 발생하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 우측 경계면에서와 같은 입사각을 갖는 경우 모드 변환되지 않은 반사파가 매우 미약하기 때문으로 생각된다. 또한, 선원의 아래쪽 끝에서 edge파가 발생되고 이것이 아래쪽 경계면에서 반사되는 것도 관찰할 수 있다.

Fig. 7(c)에서는 수직방향으로 놓인 균열의 선단(tip)에서 마치 그 점에 점원이 있는 것처럼 두 모드의 회절파(DQP, DQS, 여기서 D는 diffracted를 의미)가 발생함을

확인할 수 있고, IQP 입사파가 균열의 좌측면(crack face)에서 반사되는 RQP파도 관찰된다. 그러나, 균열이 입사파의 진행방향과 평행하게 놓인 Fig. 7(d) 및 7(e)에서는 균열선단에서의 회절파가 매우 미약하여 DQP파의 극히 일부만을 어렵게 관찰할 수 있다. 또한, Fig. 7(d) 및 7(e)에서 공통적으로 관찰되는 V자 모양의 밝은 부분은 IQP파가 균열면에 90° 의 입사각으로 입사할 때(grazing incidence) 발생하는 반사회파(RQS)로 생각된다. 이러한 현상은 등방성 매질에서도 관찰된 바 있다[9].

마지막으로, Fig. 7(f)는 경사진 방향의 입사파가 수직 균열에 의해 산란되는 문제(Fig. 6(f))의 수치해를 보이고 있는데, 여기서 일부는 미약하지만 균열선단을 중심으로 두 모드의 회절파(DQP, DQS)가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 또, 균열의 좌측 아래를 보면, 입사 IQP파가 균열의 좌측면에서 반사하여 두 모드의 반사파(RQP, RQS)를 형성하는 것을 알 수 있다. 선원의 양끝에서는 물론 edge파가 발생되고 이들 또한 매질의 위, 아래 경계면에서 반사되어 복잡한 파동장을 형성하고 있다.

본 절에서 Fig. 7에 보인 여섯 가지 수치해에 대해 고찰한 결과, 관찰된 모든 파동 현상이 2절에서 구한 해석해 및 등방성 매질에서의 파동 해석 경험에 비추어 볼 때 물리적으로 타당함을 알 수 있고, 이는 본 연구에서 사용한 수치해법이 파동현상의 정성적 분석에 있어 정확함을 입증하는 것이라고 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 단일방향의 섬유로 강화된 복합재료에서 초음파가 전파되는 현상을 이해하기 위해 횡등방 이방성 매질에서의 탄성과 전파 현상에 대한 해석해와 수치해를 구하고 그 결과를 비교, 고찰하였다. 모든 계산은 유리섬유-에폭시 복합재료를 대상으로 수행하였다. 먼저, 해석해에서는 횡등방 이방성 평면에서 발생하는 유사종파, 유사횡파에 대하여 위상속도면, 완도면, 파면을 구하였다. 그 결과, 위상속도가 파동벡터의 방향에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있었고, 특히 유사횡파의 파면에서는 심한 뾰족현상으로 인해 커슌(cusp)이 발생하는 것을 알 수 있었다.

수치해를 위해서는 가로, 세로의 격자 간격이 상이한 직사각형 질량-스프링 모델을 사용하였으며, 점원으로 인해 발생하는 파면의 수치해가 해석해와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 이 외에도 자유표면에서의 반사, 균열에

서의 산란 등 초음파검사에서 발생할 수 있는 대표적인 몇 가지 경우에 대해 수치해를 구하였으며 그 결과를 파동역학의 관점에서 고찰하여 발생하는 파의 발생 원인을 규명할 수 있었다.

본 연구의 결과로서, 직사각형 질량-스프링 모델을 적용하여 횡등방 이방성 매질에서의 초음파 전파 현상을 모델링하는 것이 타당함을 확인하였으므로, 향후 이 모델을 이용하여 초음파검사의 시뮬레이션이 가능할 것으로 생각된다. 또한, 본 연구를 통하여 이방성 매질에서의 탄성과 전파에 관한 일반적인 이해도 크게 증진되었다. 그러나, 본 연구에서는 다양한 문제에 있어서 발생하는 파면의 종류와 그 원인에 대한 정성적인 고찰만 수행되었으므로, 향후 연구를 통하여 본 모델의 정량적 정확성도 검토되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업설비 안전성평가 연구센터(SAFE)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. J. P. Musgrave, *Crystal Acoustics*, Holden-Day, San Francisco, (1970)
- [2] F. I. Fedorov, *Theory of Elastic Waves in Crystals*, Plenum Press, New York, (1968)
- [3] T. R. Tauchert and A. N. Guzelsu, "An Experimental Study of Dispersion of Stress Waves in a Fiber-Reinforced Composite," *Journal of Applied Mechanics*, ASME Trans., Vol. 39, pp. 98-102, (1972)
- [4] J. E. Zimmer and J. R. Cost, "Determination of Elastic Constants of a Uni-directional Fiber Composite Using Ultrasonic Velocity Measurements", *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 47, pp. 795-803, (1970)
- [5] M. J. P. Musgrave, "On the Propagation of Elastic Waves in aeolotropic media," *Proceedings of Royal Society of London*, Vol. 226, pp. 339-355, (1954)
- [6] M. J. P. Musgrave, "Deviation of ray from wave normal for elastic waves in principal planes of crystal symmetry," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 18, pp. 207-211, (1970)
- [7] E. R. C. Marques and J. H. Williams, Jr., *Stress Waves in Transversely Isotropic Media*, NASA Contract Report 3977, May, (1986)
- [8] H. Yim and Y. Choi, "Simulation of ultrasonic waves in various types of elastic media using the mass spring lattice model", *Materials Evaluation*, Vol. 58, pp. 889-896, (2000)
- [9] H. Yim and Y. Sohn, "Numerical simulation and visualization of elastic waves using mass-spring lattice model," *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 47, No. 3, pp. 549-558, (2000)