

반 무한 복합체의 Rayleigh 표면파에 대한 이방성비의 영향

백운철* · 황재석* · 송용태*

(2000년 8월 29일 접수, 2001년 1월 5일 심사완료)

Effect of Anisotropic Ratio for Rayleigh Wave of a Half-Infinite Composite Material

Un-Cheol Baik, Jai-Sug Hawong and Yong-Tae Song

Key Words: Half-Infinite Composite Material(반 무한 복합체), Anisotropic Ratio(이방성비), Poisson's Ratio(푸아송의 비), Rayleigh Wave Velocity(Rayleigh파 속도), Shear Wave Velocity(전단파 속도), Longitudinal Wave Velocity(종파 속도), Rayleigh Wave Equation(Rayleigh파 방정식)

Abstract

In this paper, when stress waves are propagated along the reinforced direction of the composite, the characteristic equation of Rayleigh wave is derived. The relationships between velocities of stress waves and Rayleigh wave are studied for anisotropic ratios(E_{11}/E_{22} or E_{22}/E_{11}). The increments of anisotropic ratios is made by using known material properties and being constant of basic properties. When the anisotropic ratios are increased, Rayleigh wave velocities to the shear wave velocities are almost equal to 1 with any anisotropic ratios. Rayleigh wave velocities to the longitudinal wave velocities and Shear wave velocities ratio to the longitudinal wave velocities are almost identical each other, they are between 0.12 and 0.21. When the anisotropic ratio is very high, that is, $E_{11}/E_{22} = 46.88$, Rayleigh wave velocities and the shear wave velocities are almost constant with Poisson's ratio, longitudinal wave velocities are very slowly increased with the increments of Poisson's ratios. When E_{11} (elastic modulus of the reinforced direction) and ν_{12} are constant, Rayleigh wave velocities and the shear wave velocities are steeply decreased with the increments of anisotropic ratios and the velocities of longitudinal wave are almost constant with them. When E_{22} (elastic modulus of the normal direction to the fiber) and ν_{12} are constant, Rayleigh wave velocities is slowly increased with the increments of anisotropic ratios, the shear wave velocities are almost constant with them, the longitudinal wave velocities are steeply increased with them.

1. 서론

충격하중을 받는 구조물의 동적 응력에 영향을

미치는 응력파^(1,2)에는 종파, 전단파, 그리고 Rayleigh파 등이 있다. 이러한 응력파들은 각각 전단파가 26%, 종파가 7%, 그리고 Rayleigh파가 67%의 에너지를 이동시킨다.⁽³⁾ 대부분의 에너지를 이동시키는 Rayleigh파는 동적 파괴역학, 지진학, 토목공학, 비파괴시험, 그리고 전기전자공업 분야 등에 사용된다.⁽⁴⁾

재료의 표면에서 전파하는 Rayleigh파는 1885년 경에 Rayleigh 경에 의하여 발견되었고, 균질한

* 영남대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jshawong@yeungnam.ac.kr

TEL : (053)810-2445 FAX : (053)813-3703

탄성체의 자유표면 또는 경계면이 존재하는 경우의 표면을 따라 전파하고 내부를 향해서는 급속하게 소멸하는 표면파(surface wave)이다.⁽⁵⁾ Ang⁽⁶⁾은 반 평면위에 작용하는 선하중(line load)으로부터 발생하는 종파, 전단파, Rayleigh파 등을 Cagniard-De Hoop법을 기초로 하여 연구하였다. Buchwald⁽⁷⁾는 Christoffel 방정식을 사용하여 이방성체에 대한 Rayleigh파를 연구하였다. Lih와 Mal 등^(8,9)은 복합체 적층판의 종파, 전단파, 그리고 Rayleigh파 등에 대하여 수치해석적으로 연구하였다. Ross 등⁽¹⁰⁾은 복합체에서 응력파의 속도를 측정하고, 응력파에 의한 물성치를 측정할 때에 응력파는 비분산적인 파로 가정할 수 있음을 밝혔다. Rose 등⁽¹¹⁾은 적층판에서 표면파의 전파속도는 판의 두께가 1파장 이내이면 표면파의 속도는 조화 표면파로 전파하는 것을 증명하였다. Park와 Calder⁽¹²⁾은 실험적으로 Graphite/Epoxy복합체에서 전파하는 Rayleigh파를 연구하여, 섬유 강화방향이 다른 방향보다 파의 감쇄 정도가 적다는 것을 규명하였다.

복합체의 응력파 전파속도는 복합체의 이방성 때문에 전파 방향에 따라 다르게 나타난다. Slaughter 등⁽¹³⁾은 섬유강화 복합체의 동적 압축파에 관한 연구에서 강화된 섬유가 늘어나지 않는다면(inextensible) 섬유 방향의 변위는 0으로 가정할 수 있음을 제시하였다. Murakami⁽¹⁴⁾도 적층판에서 파의 전파에 관한 이론 연구에서 변형률 $\epsilon \ll 1$ 이면 관계된 방향의 변위는 소거될 수 있음을 제시하였다.

지금까지 연구된 것에 의하면 복합체 내부에 전파하는 응력파는 비분산적인 파로 가정할 수 있고, 복합재료의 탄성 반평면의 응력파에 대한 연구는 최근 수십년 동안 중요시되어왔지만 복합체에서 전파하는 Rayleigh파에 대한 연구는 아직 극히 적다. 그러므로 본 연구는 복합체 탄성 반평면에서 Rayleigh파의 특성방정식을 구하고, 복합체의 이방성비에 의한 응력파의 영향을 평가하고자 한다.

2. 기본이론

Fig. 1과 같은 반공간에서 Rayleigh파에 대한 좌표계는 파이버의 방향을 x 축, 물체의 자유표면에 대하여 수직인 방향은 y 축으로 잡고, z 축은

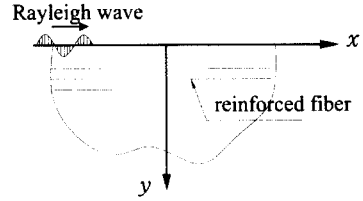


Fig. 1 Incidence of Rayleigh wave in a half-space of the orthotropic material

x 축과 y 축에 의하여 이루어지는 평면에 수직하고 지면에서 들어가는 방향으로 한다. Rayleigh파는 $y=0$ 인 면을 따라 x 축 방향으로 위상속도 $\xi = \omega/k$ 를 가지고 전파한다고 가정한다. 즉 $x-z$ 평면에서 평면파의 전파 운동은 z 방향에 독립이고, $x-y$ 평면에만 영향을 준다. 따라서 x, y 방향의 변위 u, v 를 복소평면파 형식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$u = \beta_1 e^{ik(\xi t - x - qy)}, \quad v = \beta_2 e^{ik(\xi t - x - qy)} \quad (1)$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$, k 는 파수로서 위상속도 $\xi (= \omega/k)$ 에 의하여 주파수 ω 에 관계된다. q 는 x 방향에 대한 y 방향의 파수(wave number) 성분의 비이고, $Im[q] < 0$ 이다. 이 때, 파장을 $\lambda = 2\pi/k$, 주기 $T = 2\pi/\omega$ 가 된다. 재료가 선형의 연속이라면, $\omega = \omega(k)$ 로 주어지고, 식 (1)에서 함수가 선형적이라면 물체는 비분산적이라고 가정할 수 있다. 그러한 경우에 위상속도 ξ 는 파수에 의존하지 않게 된다. 즉, 식 (1)과 같이 물체에 전파되는 파가 정상상태의 조화파라면, 주파수 영역이 아닌 단순한 파수성분의 비로서 변위를 정의할 수 있다.

직교이방성체의 응력파 변형률관계는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= c_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial v}{\partial y} \\ \sigma_y &= c_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{xy} &= c_{66} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 σ_x 와 σ_y 는 직교이방성체의 탄성주축 x 와 y 방향의 수직응력, τ_{xy} 는 전단응력이다. c_{ij} ($i, j=1, 2, 6$)는 탄성 주축 방향에 대한 강성(stiffness)이다. 평면응력 조건에서 c_{ij} 는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, & c_{22} &= \frac{E_{22}}{E_{11}} c_{11} \\ c_{12} &= \nu_{12} c_{22} = \nu_{21} c_{11}, & c_{66} &= \mu_{12} \end{aligned} \quad (3)$$

μ_{12} 는 전단탄성계수, E_{11} , E_{22} 는 각각 x , y 방향 탄성계수, ν_{ij} 는 푸아송의 비($i, j=1, 2$), 탄성계수들은 Maxwell의 법칙인 $\nu_{ij}/E_{ii} = \nu_{ji}/E_{jj}$ 가 성립한다.

일반적으로 균질의 선형복합체에서 물체력이 없다면, $x-y$ 평면에서 전파하는 평면파에 대한 변위운동은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} c_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_{66} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (c_{12} + c_{66}) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (c_{12} + c_{66}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + c_{66} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + c_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 ρ 는 밀도, t 는 시간을 나타낸다. 식 (4)의 해는 식 (1)을 적용하여 구할 수 있다. Rayleigh파의 역학적인 경계조건은 자유표면($y=0$)에서 수직 응력성분은 0이므로 식 (5)와 같다.

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0 \quad (5)$$

해를 얻기 위하여 식 (1)을 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 같은 Christoffel의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} c_{11} + c_{66}q^2 - \rho\xi^2 & (c_{12} + c_{66})q \\ (c_{12} + c_{66})q & c_{22}q^2 + c_{66} - \rho\xi^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

식 (6)이 만족하기 위하여 좌변의 계수 행렬식을 0으로 두고 정리하면, q^2 에 대한 2차방정식을 얻게된다. q^2 에 대한 2차방정식의 근들이 실수이라면, 얻어지는 두 개의 근 q_r ($r=1, 2$)의 허수

부가 음의 값이 되도록 하는 음수임에 틀림이 없다. 즉 $q_r = -ix_r$ 이 되고, 이때 $x_r > 0$ 이다. 그리고 만약에 근이 복소수라면 공액근이 되고 그 값들은 $q_2 = -q_1^*$ 와 같이 된다. 각각의 경우에 있어서 $q_1 q_2$ 는 음수이고 실수가 된다.

식 (6)에서 각각의 q_r ($r=1, 2$)과 변위 진폭비 $p_r = \beta_r/\beta_1$ 을 사용하면, $p_1 = 1$, $p_2 = \beta_2/\beta_1$ 가 되므로, 식 (6)으로 부터 식 (7)를 얻는다.

$$\begin{pmatrix} c_{11} + c_{66}q^2 - R & (c_{12} + c_{66})q \\ (c_{12} + c_{66})q & c_{22}q^2 + c_{66} - R \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ p_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $R = \rho\xi^2$ 이다. 식 (7)로 부터 변위 진폭비는 식 (8)과 같다.

$$p_r = -\frac{c_{11} - R + c_{66}q_r^2}{(c_{12} + c_{66})q_r}, \quad r=1, 2 \quad (8)$$

일반적인 해는 같은 위상속도 $\xi = \omega/k$ 로 전파하는 이들 두 변위는 선형결합을 사용함으로써 구하여진다. 따라서 변위 진폭의 선형결합에 의하여 식 (9)과 같은 x 방향과 y 방향의 변위 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= A_1 e^{i k(\xi t - x - q_1 y)} + A_2 e^{i k(\xi t - x - q_2 y)} \\ v &= A_1 p_1 e^{i k(\xi t - x - q_1 y)} + A_2 p_2 e^{i k(\xi t - x - q_2 y)} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, A_1 과 A_2 는 선형결합에 의하여 더해진 변위 진폭이다. 그리고 위상속도 ξ 는 경계 조건 식 (5)에 의하여 결정된다. $y=0$ 일 때, 식 (9)을 식 (5)에 대입하여 정리하여 행렬식으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$\begin{pmatrix} c_{12} + c_{22}p_1 q_1 & c_{12} + c_{22}p_2 q_2 \\ p_1 + q_1 & p_2 + q_2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (10)의 계수행렬식을 0으로 두고 식 (6)으로 부터 구한 두근 q_1, q_2 와 식 (8)을 사용하면 식 (11)이 얻어진다.

$$f(R) = c_{22}(\Gamma - R)^2(c_{66} - R) - c_{66}(c_{11} - R)R^2 = 0 \quad (11)$$

여기서 $R = \rho\xi^2$, $\Gamma = c_{11}(1 - \nu_{12}\nu_{21})$ 이다. 식 (11)은 R 에 대한 3차 방정식이고, Rayleigh파의 경계조건을 만족시켜서 구한 식이므로, 식 (11)을 사용하여 구한 위상속도는 Rayleigh파의 위상속도 ($\xi = C_R$)가 된다.

만약, 복합체의 물성치비인 이방성비(E_{11}/E_{22})가 굉장히 크다면, 상대적으로 탄성계수가 큰 방향의 변형은 무시할 수 있을 정도로^(14,15) 굉장히 작을 것으로 가정할 수 있다. 따라서 복합체의 섬유 길이 방향의 물성치(E_{11})가 섬유방향의 수직방향 물성치(E_{22})보다 상대적으로 굉장히 크다면, 변형률은 $e_x \ll e_y$ 로 가정하는 것은 가능하다. 따라서 이방성비가 큰 복합체의 경우는 식 (12)을 가정할 수가 있다.

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (12)$$

따라서 큰 이방성비를 갖는 복합체는 식 (12)으로부터 x 방향의 변위 u 에 의한 변위 운동방정식은 무시할 수 있고, y 방향의 변위 v 에 의한 운동방정식만을 고려해도 된다. 그러므로 이방성비가 큰 복합체의 응력과 변형률 관계는 식 (13)과 같고,

$$\sigma_x = c_{12} \frac{\partial v}{\partial y}, \sigma_y = c_{22} \frac{\partial v}{\partial y}, \tau_{xy} = c_{66} \frac{\partial v}{\partial x} \quad (13)$$

변위 운동방정식은 식 (14)와 같다.

$$c_{66} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + c_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (14)$$

식 (14)에 변위관계 식 (1)과 Rayleigh파의 경계조건 식 (5)을 적용하면 식 (15)을 얻을 수 있다.

$$f(R^*) = 2\sqrt{\rho\xi^2 - c_{66}} = 0 \quad (15)$$

식 (15)를 만족하는 근은 $\xi^2 = c_{66}/\rho = C_T^2$ 이 되고, 이것은 이방성비가 크게되면 복합체의 탄성주축방향으로 전파하는 Rayleigh파의 속도는 전단파의 속도와 같아지고 푸아송 비의 영향은 받지 않는 것을 의미한다.

3. 고찰

등방성체에서 평면파는 단지 두 개의 파만 존재하는 것에 비하여, 복합체의 위상속도는 파의 전파방향에 따라서 변한다. 그러나 본 연구는 응력파가 탄성 주축방향으로 전파하는 것으로 가정하여 검토하였다. 그리고 본 연구는 이방성비와 응력파의 속도관계를 평가하는 것이 목적이므로,

Table 1 Properties and stress wave velocity of orthotropic materials

Material	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	μ_{12} (GPa)	ρ (g/cm ³)	ν_{12}	$\frac{E_{11}}{E_{22}}$	C_T (m/s)	C_R (m/s)	C_L (m/s)
Boron/Epoxy[15]	204	18.5	5.59	2.0	0.23	11.02	1449.66	1443.80	8778.46
Graphite/Epoxy[11]	138.5	11.0	6.3	1.52	0.31	12.59	2035.86	2009.35	9582.24
Carbon/Epoxy[16]	142.17	9.255	4.795	1.9	0.334	15.36	1588.61	1574.69	8681.8
Graphite/Epoxy[17]	181.0	10.3	7.2	1.58	0.28	17.57	2134.70	2105.29	10727.1
Graphite/Epoxy[18]	220	6.9	4.8	1.64	0.25	31.88	1710.79	1697.87	11593.52
Graphite/Epoxy[18]	290	6.2	4.8	1.70	0.25	46.88	1680.33	1669.63	13069.67

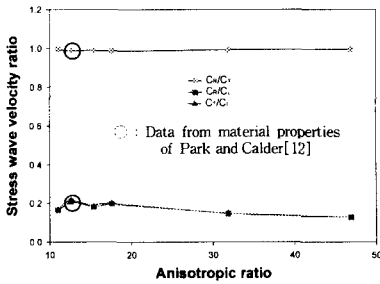
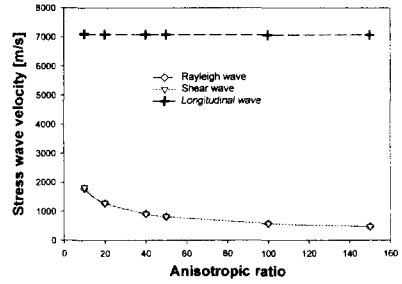


Fig. 2 Stress wave velocity ratio with anisotropic ratio (E_{11}/E_{22}) of Table 1

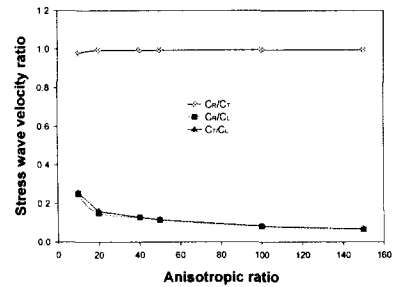
Table 1과 같은 기존의 사용된 복합재료로부터 각각의 이방성비(E_{11}/E_{22})가 11.02, 12.59, 15.36, 17.57, 31.88, 46.88일 때, 전단파($C_T = \sqrt{c_{66}/\rho}$) 및 종파($C_L = \sqrt{c_{11}/\rho}$), Rayleigh파의 속도관계를 평가하였다.

Fig. 2는 Table 1에서 제시된 물성치를 사용하여 구한 각 응력파의 속도비를 나타낸다. Table 1과 Fig. 2에서 보듯이 복합체에서 탄성 주축방향인 섬유 방향으로 전파하는 전단파에 대한 Rayleigh파의 속도 비는 약 0.98~0.99이고, 종파에 대한 Rayleigh파의 비는 약 0.12~0.21, 그리고 종파에 대한 전단파의 비는 약 0.12~0.21이다. 그러므로 종파에 대한 Rayleigh파와 전단파의 속도비는 거의 같다. Fig. 2의 이방성비가 12.59에 해당하는 기호 ○의 값은 식 (11)를 사용하여 구한 값으로서 Park와 Calder⁽¹²⁾가 제시한 값과 일치한다. 이것은 식 (11)이 유효하다는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 보듯이 복합체에서 탄성 주축방향인 섬유 방향으로 전파하는 종파에 대한 전단파의 비와 종파에 대한 Rayleigh파의 비에 대한 그래프는 서로 겹쳐서 구분이 잘 안된다. 그것은 탄성 주축 방향인 섬유 보강방향으로 전파하는 전단파에 대한 Rayleigh파의 속도의 차이가 0.01~0.4%이기 때문이다. Fig. 2에서 종파에 대한 전단파의 속도비와 종파에 대한 Rayleigh파의 속도비의 값은 거의 같고, 그 값은 적다. 즉, 이방성비가 증가하면 전단파의 속도와 Rayleigh파의 속도는 거의 같다.

Fig. 3(a)는 E_{11} 과 다른 물성치는 일정하다는



(a) Stress wave velocity



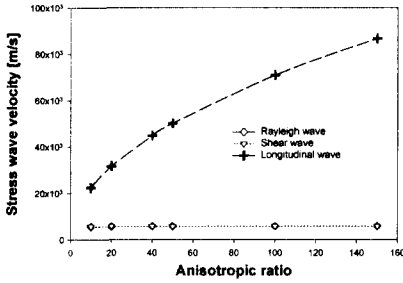
(b) Stress wave velocity ratio

Fig. 3 Stress wave velocity with anisotropic ratio (E_{11}/E_{22}) when E_{11} is constant

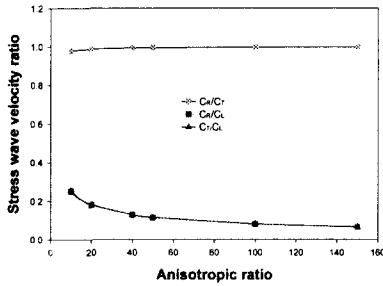
가정 하에서 E_{22} 의 변화에 의한 이방성비를 변화시켜서 구한 응력파의 속도를 사용하여 얻은 그래프로서, 평면응력 조건에서 복합재료의 이방성비에 대한 Rayleigh파, 전단파, 그리고 종파의 속도를 나타낸 그래프이다. Fig. 3(a)에서 보듯이, 이방성 비가 증가하면 Rayleigh파와 전단파의 속도가 서서히 감소하는 경향을 나타내고, 종파는 아주 서서히 감소하는 것을 보이고 있다.

Fig. 3(b)는 E_{11} 이 일정하고 E_{22} 를 변화시켜서 구한 응력파 속도의 비를 나타낸 그래프이다. Fig. 3(b)에서 보듯이 종파에 대한 Rayleigh파 및 전단파의 속도 비는 이방성비가 증가하면 서서히 감소하는 것을 보여 주고 있는 반면에 전단파에 대한 Rayleigh파의 속도비는 0.98~0.99로서 거의 1에 가까운 값을 갖는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 4(a)는 복합체의 물성치 E_{22} 와 다른 물성치가 일정하다는 가정하에서 E_{11} 의 변화에 의한



(a) Stress wave velocity



(b) Stress wave velocity ratio

Fig. 4 Stress wave velocity with anisotropic ratio(E_{11}/E_{22}) when E_{22} is constant

이방성비를 변화시켜 구한 응력파의 속도를 사용하여 이방성비(E_{11}/E_{22})에 대한 Rayleigh파와 전단파 및 종파의 속도를 나타낸 그래프이다.

Fig. 4(a)에 나타난 결과는 Fig. 3(a)의 결과와 많이 다르다. Fig. 4(a)에서는, 이방성비가 증가하면, Rayleigh파의 속도는 아주 서서히 증가하고, 전단파의 속도는 거의 일정하고, 그리고 종파의 속도는 빠르게 증가한다.

Fig. 4(a)에서 Rayleigh파와 전단파의 속도 표시가 구분되지 않는다. 그것은 두파의 속도비에 의한 차이가 1~2%이기 때문이다. Fig. 4(b)는 E_{22} 와 다른 물성치가 일정하다는 가정하에서 E_{11} 의 변화에 의하여 이방성비를 변화시켜서 구한 응력파의 속도비를 나타낸 것이다. Fig. 4(b)에서 알 수 있듯이, 복합재료의 이방성비가 증가할 때, 전단파 속도에 대한 Rayleigh파의 속도비(약 0.97~0.99)는 거의 1에 가까운 값을 갖는 것을 보여 주

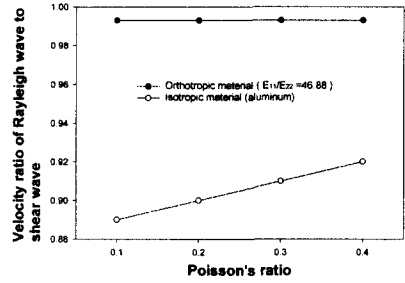


Fig. 5 Velocity ratio of Rayleigh wave to shear wave with Poisson's ratio(ν_{12})

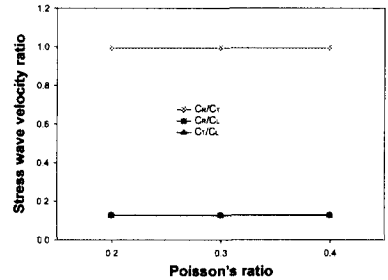


Fig. 6 Stress wave velocity ratio with Poisson's ratio(ν_{12}) when $E_{11}/E_{22}=46.88$

고 있다. 이 결과는 Fig. 3(b)와 같은 값을 나타내고 있고, 식 (15)와 같은 결과이다. 이러한 현상은 Table 1의 실제의 물성치를 사용하여 구한 전단파에 대한 Rayleigh파의 속도비(0.98~0.99)와 거의 같다. E_{11} 을 고정하여 얻은 Fig. 3(b)과 E_{22} 을 고정하여 구한 Fig. 4(b)에서, 응력파의 속도비는 각각의 이방성비에 대하여 거의 같은 값을 갖는다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 Rayleigh파의 속도는 식 (11)을 사용하여 구하였다. Fig. 5는 이방성비가 큰 복합체의 응력파에 대한 푸아송의 비의 영향을 평가하기 위하여 이방성비가 46.88인 복합체와 등방성체인 알루미늄의 푸아송의 비 ν_{12} 를 증가시켰을 때 전단파 속도에 대한 Rayleigh파의 속도비를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보듯이 등방성체는 Sih⁽¹⁹⁾의 결과와 같이 푸아송의 비가 증가하면 전단파 속도에 대한 Rayleigh파의 속도비는 증가하지만 이방성비가 큰 재료에서는 푸아송

의 비가 전단파 속도에 대한 Rayleigh파의 속도비에 영향을 주지 않는다는 것을 보여 주고 있다.

Fig. 6은 이방성비(E_{11}/E_{22})가 46.88인 재료에서 푸아송의 비 ν_{12} 가 증가할 때, 종파에 대한 전단파 속도와 Rayleigh파의 속도비, 그리고 전단파 속도에 대한 Rayleigh파의 속도비를 나타낸 것이다. Fig. 5와 마찬가지로 Fig. 6에서도 이방성비가 큰 재료에서는 푸아송의 비의 변화는 응력파의 속도비에 거의 영향을 주지 않는다.

4. 결론

평면응력 조건하에서, 복합체의 섬유강화 방향으로 전파하는 응력파와 복합체의 표면($y=0$)을 따라 전파하는 Rayleigh파를 연구하였고, 직교 이방성체의 이방성비(E_{11}/E_{22})가 응력파의 속도에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 식 (11)은 위와 같은 조건에서 발생하는 Rayleigh파의 특성 방정식이다. 그리고 그 식의 유효성이 증명되었다.

(2) E_{11} (섬유 보강 방향의 탄성계수), ν_{12} 등이 일정하고, E_{22} 의 변화에 의하여 이방성 비가 증가하면, Rayleigh파와 전단파의 전파속도는 급격하게 감소하고, 종파의 속도는 거의 일정하다.

(3) E_{22} (섬유 보강 방향에 수직 방향의 탄성계수), ν_{12} 등이 일정하고, E_{11} 의 변화하여 이방성 비가 증가하면, Rayleigh파의 속도는 매우 서서히 증가하고, 전단파의 속도는 거의 일정하고, 그리고 종파의 속도는 매우 급격하게 증가한다.

(4) 이방성비가 증가하면, 파이버 방향으로 전파하는 전단파 속도에 대한 Rayleigh파의 속도비(약 0.98~99)는 거의 1에 가깝고, 즉 서로 같다. 종파의 속도에 대한 Rayleigh파의 속도비(약 0.12~0.21)와 종파에 대한 전단파의 속도비(약 0.12~0.21)는 거의 같다.

(5) 이방성비가 큰($E_{11}/E_{22}=46.88$)재료에서, 푸아송의 비가 증가하면 전단파와 Rayleigh파의 속도는 변화없고, 종파의 속도는 아주 서서히 증가한다. 즉, 푸아송 비의 변화는 응력파의 속도에 거의 영향을 주지 않는다.

참고문헌

- (1) 황갑운, 조규중, 1994, "유한요소법에 의한 2차원 응력파 전파 해석에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 18, No. 12(통권 111호), pp. 3369~3376.
- (2) 김재승, 강현주, 김상렬, 1997, "램프형 포인트 하중에 의한 반무한 탄성체의 응력파 해석," 대한기계학회논문집 A, Vol. 21, No. 4, pp. 673~678.
- (3) Woods, R. D., 1968, *Journal of Solids Mechanics*, Founds, Am. Soc., Civil Eng., Vol. 94, p. 115.
- (4) Budaev, B. V. and Bogy, D. B., 1995, "Rayleigh Wave Scattering by a Wedge," *Wave Motion*, Vol. 22, pp. 239~257.
- (5) Lord Rayleigh, 1885, "On Waves Propagated Along the Plane Surfaces of an Elastic Solid," *Proceedings Mathematical Society London*, Vol. 17, pp. 4~11.
- (6) Ang, D. D., 1960, "Transient Motion of Line Load on the Surface of an Elastic Half-Space," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 18, pp. 251~256.
- (7) Buchwald, V. T., 1961, "Rayleigh Waves in Anisotropic Media," *Quart. Journ. Mech. and Applied Math.*, Vol. XIV, Pt. 4, pp. 461~469.
- (8) Mal, Ajit K. and Lih, Shyh-shiuh, 1992, "Elastodynamic Reponse of a Unidirection Composite Laminate to Concentrated Surface Loads: Part I," *J. Appl. Mechs.*, Vol. 59, No. 4, pp. 878~886.
- (9) Mal, Ajit K. and Lih, Shyh-shiuh, 1992, "Elastodynamic Reponse of a Unidirection Composite Laminate to Concentrated Surface Loads: Part II," *J. Appl. Mechs.*, Vol. 59, No. 4, pp. 887~892.
- (10) Ross, C. A., 1980, "Stress Wave Propagation in Composite Materials, in Dynamic Response of Composite Materials," Ed. by C. A. Ross, R. L. Sierakowski, and C. T. Sun, *Society for Experimental Mechanics(SEM)*, pp. 1~66.
- (11) Rose, J. I., Nayfeh, A., and Pilarski, A., 1990, "Surface Wavws for Material Characterization,"

- Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 7~11.
- (12) Park, H. and Calder, C., 1994, "Laser-Generated Rayleigh Waves in Graphite / Epoxy Composites," *Exp. Mech.*, Vol. 34, No. 2, pp. 148~154.
- (13) Slaughter, W. S., Fan, J., and Eleck, N. A., 1996, "Dynamic Compressive Failure of Fiber Composites," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 44, No. 11, pp. 1867~1890.
- (14) Murakami, H., 1985, "A Mixture Theory for Wave Propagation in Angle-Ply Laminates, Part 1 : Theory," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp. 331~337.
- (15) Agarwal, B. D. and Broutman, L. J., 1990, *Analysis and Performance of Fiber Composite*, John Wiley & Sons, Inc., p. 437.
- (16) Liu, G. R., Tani J., Ohyoshi, T., and Watanabe, K., 1991, "Characteristic Wave Surface in Anisotropic Laminated Plates," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 113, No. 3, pp. 279~285.
- (17) Jaleel, K. M. A., Kishore, N. N., and Sundararajan, 1993, "Finite-Element Simulation of Elastic Wave Propagation in Orthotropic Composite Materials," *Materials Evaluation*, pp. 830~838.
- (18) Zweben, C., Hahan, H. T., and Chou, T. W., 1989, "Section 1.3 Static Strength and Elastic Properties," in *Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials*, pp. 68~69.
- (19) Sih, G. C., 1969, "Dynamic Aspects of Crack Propagation," *Proceedings of the Battelle Colloquium on Inelastic Behavior of Solids*, pp. 607~639.