

〈論 文〉

# 동적모드 I 상태에서 직교 이방성체의 이방성비가 등속전파 균열선단의 응력성분과 변위성분에 미치는 영향

이광호\* · 황재석\*\* · 최선호\*\*

(1994년 3월 4일 접수)

## Influence of Anisotropic Property Ratio of Orthotropic Material on Stress Components and Displacement Components at Crack Tip Propagating with Constant Velocity Under Dynamic Mode I

Kwang-Ho Lee, Jai-Sug Hawong and Sun-Ho Choi

**Key Words :** Dynamic Mode I Load(동적모드 I 하중), Anisotropic Property Ratio(이방성비), Orthotropic Materials(직교 이방성체), Dynamic Stress Field(동적 응력장), Dynamic Displacement Field(동적 변위장)

### Abstract

When the crack in orthotropic material is propagating under dynamic mode I load, influences of anisotropic property ratio  $E_L/E_T$  on stress and displacement component around propagating crack tip are studied in this paper. When  $M < 0.55$  and  $\alpha = 90^\circ$  ( $\alpha$ ; the angle of fiber direction with crack propagating direction,  $M$ ; crack propagation velocity/shear stress wave velocity), the influence of  $E_L/E_T$  on stress  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  and  $\sigma_\theta$  is the greatest on  $\sigma_y$ . Except  $M < 0.55$  and  $\alpha = 90^\circ$ , it is the greatest on  $\sigma_x$  in any situation. Increasing  $E_L/E_T$ , stress components are increased or decreased. When maximum stress is based, the stress  $\sigma_x(\alpha = 90^\circ)$ ,  $\sigma_y(\alpha = 0^\circ)$  and  $\tau_{xy}(\alpha = 90^\circ)$  are decreased with increment of  $E_L/E_T$  in  $M = 0$ . Any stresses except  $\sigma_x(\alpha = 0^\circ)$  are decreased with increment of  $E_L/E_T$  in  $M = 0.9$ . When  $\alpha = 90^\circ$ , the influence of  $E_L/E_T$  on displacement  $U$  and  $V$  is  $V > U$  in any velocities of crack propagation, when  $\alpha = 0^\circ$ , it is  $V < U$  in  $M < 0.75$  and  $V > U$  in  $M > 0.75$  and when  $E_L/E_T$  is increased,  $U$  and  $V$  are decreased in any conditions.

### 1. 서 론

최근 구조물의 설계에 대한 사용조건이 엄격하고 도 복잡화함에 따라 종래의 재료에서 얻을수 없는 역학적 특성의 한계를 극복하고 보다 새롭고 훌륭한 특성을 지닌 재료의 사용이 요구되고 있다. 그리하여 이러한 엄격하고도 까다로운 사용조건에 맞는

여러 다종다양한 복합재료가 개발되고 있으며 상당한 발전을 하고 있다. 지금까지 개발된 복합재료의 형태는 주로 섬유강화 복합재료와 입자강화 복합재료 등이 있으나 섬유강화 복합재료가 일반적으로 역학적인 성질이 우수하여 중점적으로 개발되고 있으며 여러 방면에 널리 사용되고 있다. 섬유강화 복합재료는 비강도 비강성 등이 우수하고 이방성 성질과 탄성주축의 성질을 지니고 있으며 이러한 성질을 이용하여 이방성의 탄성비율을 임의로 변화시키고 탄성주축의 방향을 구조물의 사용조건에 맞

\*정회원, 한국조폐공사  
\*\*정회원, 영남대학교 기계공학과

계 임의로 설정할 수 있어 구조물 설계에 매우 유익한 장점들을 가지고 있다. 그러나 섬유강화 복합재료가 구조물의 설계상 이러한 우수한 장점을 가지고 있으면서도 사용 조건이 아주 극한 상황의 구조물 재료의 설계에 있어서 어려운 것은 복합재료의 역학적인 특성에 대한 자료가 충분하지 못하다는 것이다. 일반적으로 재료의 파괴는 정적인 하중상태와 동적인 상태하에서 발생하고 있으며, 움직이고 있는 구조물에 있어서는 주로 동적인 상태하에서 파괴가 발생하기가 쉬우며 동적인 파괴는 정적인 파괴보다 훨씬 더 순간적이고 위험하다. 그러나 지금까지 복합재료의 응력해석 및 파괴역학의 연구는 거의 정적인 상태하에서 연구되어 왔으며, 이러한 연구로는 동적하중을 받는 구조물을 설계할 때 재료의 역학적인 자료의 부재로 인하여 설계상 상당한 어려움이 있다. 따라서 구조물의 설계에 많은 장점을 지닌 직교 이방성 복합재료가 충격하중을 받는 구조물에 유용하게 사용되기 위하여서는 직교 이방성 복합재료의 동적상태의 응력해석과 동적상태의 파괴역학 해석이 절실히 요구되고 있다.

지금까지 직교 이방성체의 균열문제에 대한 연구에서 균열정지 상태에 대한 연구로는 Itou<sup>(1)</sup>가 두개의 등방성체 사이에 있는 직교 이방성체의 균열에 대하여 연구하였으며, 비슷한 연구로 Ang<sup>(2)</sup>은 두개의 복합체 사이에 있는 복합체에 존재하는 균열선단에서 일시적인 동적 응력확대계수에 대하여 연구하였다. 그들의 연구에서 일시적인 최대 동적 응력확대 계수값은 동일한 조건하에서 정적인 응력확대계수값보다 20~40% 정도 더 크며 이러한 현상은 등방성체에서도 비슷한 결과값을 가진다. 그리고 Shindo 등<sup>(3)</sup>은 직교 이방성체의 테두리 균열에 대한 응력 확대 계수에 대하여 연구하였는데 균열의 길이  $a$ 와 시편의 폭  $h$ 의 비가  $a/h > 0.7$ 인 경우에는 일시적인 최대 응력확대계수 값은 정적인 응력 확대 계수값과 비슷한 값을 가진다.

직교 이방성체의 진행균열에 대한 연구로는 Kassir과 Tse 등<sup>(4)</sup>은 정상상태하에서 Griffith 균열 진행문제를 적분 변형 기법을 이용하여 해석하였고 이와 비슷한 연구가 Arcize와 Sih 등<sup>(5)</sup>에 의해 연구되었다. 그리고 Achenbach 등<sup>(6)</sup>은 수치해석적인 방법으로, Piva<sup>(7,8)</sup> 등은 복소고유치 함수를 이용하여 균열이 선단에서  $x$ 축방향으로 일정한 속도로 진행되는 경우 다시 말해 균열의 진행상태가 정상상태인 경우에 대하여 균열선단의 응력장과 변

위장에 대하여 연구하였으나 그들의 응력장과 변위장에서는 응력 확대계수가 분명히 제시되지 않았고, 또한 아직까지 복합체의 동적 파괴문제는 이론적으로나 실험적으로 아주 미약한 상태이다.

고속으로 진행되는 균열에 대한 파괴역학적인 문제를 이론적으로나 실험적으로 해석함에 있어서 고속 균열선단에서 응력장 및 변위장과 응력확대 계수와의 관계를 아는것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구의 저자들은 이미 직교 이방성체에 대한 동적 모드 I과 모드 II 상태하에서 일정한 속도로 진행되는 동적 균열문제에 대한 동적 응력성분과 동적 변위성분 등과 동적 응력확대계수와의 관계식들을 유도하였다.<sup>(9)</sup> 그러나 동적모드 I 상태에서 직교 이방성체의 물성치 변화와 등속으로 확장하는 균열선단의 응력성분과 변위성분 변화의 관계에 대하여는 아직 연구된 바가 없으므로 이러한 관계와 상태를 연구하는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 동적모드 I 상태하에서 등속 균열선단의 응력장과 변위장<sup>(9)</sup>

동적모드 I 상태하에서 균열이 등속으로 진행할 때 균열선단의 응력장은 방정식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} Re \left\{ \frac{1}{(1+M_1)(\mu_1-\mu_2)} \right. \\ &\quad \left. \left[ \frac{(m_1^2+M_2)\mu_1}{\sqrt{\cos\theta+m_2\sin\theta}} - \frac{(m_1^2+M_2)\mu_2}{\sqrt{\cos\theta+m_1\sin\theta}} \right] \right\} \\ \sigma_y &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} Re \left\{ \frac{1}{(\mu_1-\mu_2)} \right. \\ &\quad \left. \left[ \frac{\mu_1}{\sqrt{\cos\theta+m_2\sin\theta}} - \frac{\mu_2}{\sqrt{\cos\theta+m_1\sin\theta}} \right] \right\} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} Re \left\{ \frac{\mu_1\mu_2}{(1+M_1)(\mu_1-\mu_2)} \right. \\ &\quad \left. \left[ \frac{1}{\sqrt{\cos\theta+m_1\sin\theta}} - \frac{1}{\sqrt{\cos\theta+m_2\sin\theta}} \right] \right\} \quad (1) \end{aligned}$$

여기서,  $M_1 = \rho c^2(a_{12} - a_{11})$

$$M_2 = \rho c^2(a_{12} - a_{22})$$

$$\mu_1 = [m_1 - \rho c^2 a_{22} / m_1 - m_1 \rho c^2 a_{11} + (\rho c^2)^2 (a_{11} a_{22} - a_{12}^2) / m_1]$$

$$\mu_2 = [m_2 - \rho c^2 a_{22} / m_2 - m_2 \rho c^2 a_{11} + (\rho c^2)^2 (a_{11} a_{22} - a_{12}^2) / m_2]$$

이며  $m_1$ 과  $m_2$ 는 재료의 물성치와 균열의 진행속도에 영향을 받는 방정식(2)의 특성근 중에서 대응되는 두개의 근이다.

$$(m^4 + 2B_{12}m^2 + K_{66}) = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$2B_{12} = [2a_{12} + a_{66} + \rho c^2(a_{12}^2 - a_{11}a_{66} - a_{11}a_{22})]/a_{11}$$

$$K_{66} = \{a_{22} + \rho c^2[a_{12}^2 - a_{11}a_{66} - a_{11}a_{22} + \rho c^2 a_{66} (a_{11}a_{22} - a_{12}^2)]\}/a_{11}$$

$\rho$ 는 물체의 밀도,  $c$ 는 균열의 진행속도이며  $x, y$ 는 균열이 진행할 때 균열선단을 원점으로 하는 이동좌표이며 변위계수와 물성치와의 관계는 Fig. 1에서  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에는  $a_{11}=1/E_L, a_{22}=1/E_T, a_{12}=-\nu_{LT}/E_L=-\nu_{TL}/E_T, a_{66}=1/G_{LT}$ 이며  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에는 첨자  $T$ 는  $L$ 로 변환된다. 방정식 (1)에서  $\mu_1, \mu_2, m_1, m_2$ 는 재료의 변위계수 ( $a_{11}, a_{12}, a_{22}, a_{66}$ ), 즉 물성치 그리고 균열의 진행속도 ( $c$ ) 등에 영향을 받으며 균열의 진행속도가 없다면  $\mu_1, \mu_2, m_1, m_2$ 는 재료의 물성치만의 영향을 받고  $\mu_1=m_1, \mu_2=m_2$ 가 된다. 따라서 방정식 (1)에서 균열의 진행속도  $c$ 를 0으로 하면 Sih 등이 유도한 직교 이방성체의 정적인 상태 응력장<sup>(10)</sup>과 일치하고 있음을 알 수 있다.

다음에 동적모드 I 상태하에서 직교 이방성체의 등속 균열상태의 변위장은 방정식 (3)같이 얻을 수 있다.

$$U = K_1 \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{(1+M_1)(\mu_1 - \mu_2)} \left[ p_2 \mu_1 \sqrt{\cos \theta + m_2 \sin \theta} - p_1 \mu_2 \sqrt{\cos \theta + m_1 \sin \theta} \right] \right\}$$

$$V = K_1 \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{(1+M_1)(\mu_1 - \mu_2)} \left[ q_2 \mu_1 \sqrt{\cos \theta + m_2 \sin \theta} \right] \right\}$$

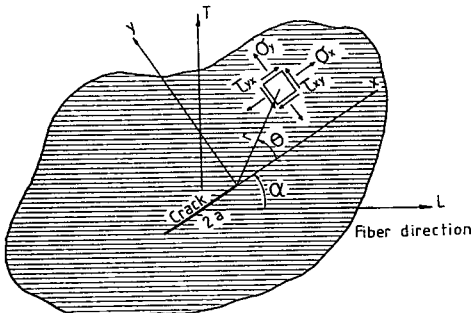


Fig. 1 The stress component in the vicinity of crack tip

$$\left. \begin{aligned} & -q_1 \mu_2 \sqrt{\cos \theta + m_1 \sin \theta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서,

$$p_1 = a_{11}(m_1^2 + M_2) + a_{12}(1 + M_1)$$

$$p_2 = a_{11}(m_2^2 + M_2) + a_{12}(1 + M_1)$$

$$q_1 = \frac{a_{12}(m_1^2 + M_2) + a_{22}(1 + M_1)}{m_1}$$

$$q_2 = \frac{a_{12}(m_2^2 + M_2) + a_{22}(1 + M_1)}{m_2}$$

방정식 (3)에서도 고속균열의 진행속도가 없다면 ( $c=0$ ) 방정식 (1)의 경우와 같이 Sih 등이 유도한 정적인 상태의 변위장<sup>(10)</sup>과 일치함을 알 수 있다.

그리고 진행균열의 특성을 얻기 위하여 먼저 방정식 (1), (3)을 실수 함수식으로 나타내어야 하므로 방정식 (2)에서 특성근의 형태에 따라 재료의 성질을 두가지 경우로 나누어 고려해야 한다.

### 2.1 제1종의 경우에 대한 응력장과 변위장

제1종의 경우 ( $\sqrt{K_{66}} < B_{12}; K_{66} > 0$ )에는 방정식 (2)는 순수허근을 가지며 그 중에 대응되는 2개의 근을  $m_1, m_2$ 라 하면

$$m_1 = ip, \quad m_2 = iq \quad (4)$$

여기서,

$$p = \sqrt{B_{12} - \sqrt{B_{12}^2 - K_{66}}}$$

$$q = \sqrt{B_{12} + \sqrt{B_{12}^2 - K_{66}}}, \quad K_{66} > 0$$

이며 따라서 동적모드 I 상태하에서 제1종 직교 이방성체의 등속 균열선단에서 응력성분은 방정식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r} (1+M_1) C} \left[ (M_2 - q^2) \beta_1 f_2(\theta) \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) - (M_2 - p^2) \beta_2 f_2(\theta) \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r} C} \left[ \beta_1 f_2(\theta) \cos\left(\frac{\theta_2}{2}\right) - \beta_2 f_1(\theta) \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) \right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r} (1+M_1) C} \left[ \beta_1 \beta_2 \left[ f_1(\theta) \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) - f_2(\theta) \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \right] \right] \quad (5)$$

여기서,

$$H_1 = 1 - \rho c^2 a_{11}$$

$$C = H_1(p - q) + \rho c^2(q - p)(H_1 a_{22} + \rho c^2 a_{12}^2) / pq$$

$$\begin{aligned}\beta_1 &= p + a_{22} \frac{\rho c^2}{p} - p \rho c^2 a_{11} - \frac{(\rho c^2)^2}{p} (a_{11} a_{22} - a_{12}^2) \\ \beta_2 &= q + a_{22} \frac{\rho c^2}{q} - q \rho c^2 a_{11} - \frac{(\rho c^2)^2}{q} (a_{11} a_{22} - a_{12}^2) \\ f_1(\theta) &= (\cos^2 \theta + p^2 \sin^2 \theta)^{-1/4} \\ f_2(\theta) &= (\cos^2 \theta + q^2 \sin^2 \theta)^{-1/4} \\ \theta_j &= \tan^{-1}(z_j \tan \theta) \quad (j=1, 2, \quad z_1=p, \quad z_2=q)\end{aligned}$$

이다.

다음에 동적모드 I 하중상태에서 제1종 직교 이방성의 등속 균열선단에서 변위성분  $U, V$ 는 방정식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}U &= \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \frac{K_1}{(1+M_1)C} [p'_2 \beta_1 \cos(\frac{\theta_2}{2}) / f_2(\theta) \\ &\quad - p'_1 \beta_2 \cos(\frac{\theta_1}{2}) / f_1(\theta)] \\ V &= \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \frac{K_1}{(1+M_1)C} [q'_2 \beta_1 \sin(\frac{\theta_2}{2}) / f_2(\theta) \\ &\quad - q'_1 \beta_2 \sin(\frac{\theta_1}{2}) / f_1(\theta)]\end{aligned}\quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned}p'_1 &= a_{11}(M_2 - p^2) + a_{12}(M_1 + 1) \\ q'_1 &= a_{11}(M_2 - q^2) + a_{12}(M_1 + 1) \\ p'_2 &= [a_{12}(M_2 - p^2) + a_{22}(M_1 + 1)] / p \\ q'_2 &= [a_{12}(M_2 - p^2) + a_{22}(M_1 + 1)] / q\end{aligned}$$

이다.

## 2.2 제2종의 경우에 대한 응력장과 변위장

다음에 제2종의 경우 ( $K_{66} > |B_{12}|$ ;  $K_{66} > 0$ )에는 4개의 복소수근을 가지는데 그 중에 대응대는 두개의 근을  $m_1, m_2$ 라면

$$m_1 = \gamma_1 + i\gamma_2, \quad m_2 = -\gamma_1 + i\gamma_2 \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned}\gamma_1 &= \sqrt{\frac{\sqrt{K_{66} - B_{12}}}{2}} \\ \gamma_2 &= \sqrt{\frac{\sqrt{K_{66} - B_{12}}}{2}}, \quad K_{66} > 0\end{aligned}$$

이다.

제2종의 경우 균열선단에서 응력성분은 방정식 (8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1}{2J(1+M_1)} \\ &\quad \{[S_1 \cos(\frac{\theta_2}{2}) + S_2 \sin(\frac{\theta_2}{2})] f'_2(\theta)\end{aligned}$$

$$+ [S_1 \cos(\frac{\theta_1}{2}) - S_2 \sin(\frac{\theta_1}{2})] f'_1(\theta)\}$$

$$\sigma_y = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1}{2J} \{[J \cos(\frac{\theta_2}{2}) + L \sin(\frac{\theta_2}{2})] f'_2(\theta)$$

$$+ [J \cos(\frac{\theta_1}{2}) - L \sin(\frac{\theta_1}{2})] f'_1(\theta)\}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1}{2J(1+M_1)} (J^2 + L^2)$$

$$\begin{aligned}&\{[\cos(\frac{\theta_2}{2}) f'_2(\theta) - \cos(\frac{\theta_1}{2}) f'_1(\theta) + J \cos(\frac{\theta_1}{2})] \\ &\quad + L \sin(\frac{\theta_1}{2})\} f'_1(\theta)\}\end{aligned}\quad (8)$$

여기서,

$$S_1 = S_3 J + S_4 L$$

$$S_2 = S_3 L - S_4 J$$

$$S_3 = \gamma_1^2 - \gamma_2^2 + M_2$$

$$S_4 = 2\gamma_1 \gamma_2$$

$$J = \gamma_1 [H_1 - \frac{1}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \rho c^2 (H_1 a_{22} + \rho c^2 a_{12}^2)]$$

$$L = \gamma_2 [H_1 - \frac{1}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \rho c^2 (H_1 a_{22} + \rho c^2 a_{12}^2)]$$

$$f'_1(\theta) = [\cos^2 \theta + (\gamma_1^2 + \gamma_2^2) \sin^2 \theta + \gamma_1 \sin(2\theta)]^{-1/4}$$

$$f'_2(\theta) = [\cos^2 \theta + (\gamma_1^2 + \gamma_2^2) \sin^2 \theta - \gamma_1 \sin(2\theta)]^{-1/4}$$

$$\theta_j = \tan^{-1}(\frac{\gamma_2 \sin \theta}{\cos \theta + \lambda_j \sin \theta}) \quad (j=1, 2, \quad \lambda_1 = \gamma_1, \quad \lambda_2 = -\gamma_1)$$

이며, 제2종의 직교 이방성체의 등속 균열선단에서 변위성분은 방정식 (9)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}U &= \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \frac{K_1}{(1+M_1)2J} \\ &\quad \{[S_5 \cos(\frac{\theta_1}{2}) + S_6 \sin(\frac{\theta_1}{2})] / f'_1(\theta) \\ &\quad + [S_5 \cos(\frac{\theta_2}{2}) - S_6 \sin(\frac{\theta_2}{2})] / f'_2(\theta)\} \\ V &= \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \frac{K_1}{(1+M_1)2J} \\ &\quad \{[S_7 \cos(\frac{\theta_1}{2}) + S_8 \sin(\frac{\theta_1}{2})] / f'_1(\theta) \\ &\quad + [S_7 \cos(\frac{\theta_2}{2}) - S_8 \sin(\frac{\theta_2}{2})] / f'_2(\theta)\}\end{aligned}\quad (9)$$

여기서,

$$S_5 = S'_5 J + S'_6 L$$

$$S_6 = S'_5 L - S'_6 J$$

$$S_7 = S'_7 J + S'_8 L$$

$$S_8 = S'_7 L - S'_8 J$$

$$S'_5 = a_{11}(\gamma_1^2 - \gamma_2^2 + M_2) + a_{12}(1 + M_1)$$

$$S'_6 = 2a_{11} \gamma_1 \gamma_2$$

$$S_7 = \frac{1}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \{ \gamma_1 [a_{12}(\gamma_1^2 - \gamma_2^2 + M_2) + a_{22}(1 + M_1) + 2a_{12}\gamma_2^2] \}$$

$$S_8 = \frac{1}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2} \{ \gamma_2 [a_{12}(\gamma_1^2 - \gamma_2^2 + M_2) + a_{22}(1 + M_1) + 2a_{12}\gamma_1^2] \}$$

이다.

본 연구에서 유도된 응력성분 및 변위성분의 방정식들은 균열이 일정한 속도로 파이버 방향 또는 파이버 방향에 수직인 방향으로 진행되는 경우 직교 이방성체의 균열선단부근에서 응력성분 변위성분 그리고 균열진행 특성을 연구하는 데 유용하게 사용될 수 있다.

### 3. 직교이방성체의 이방성비가 등속 균열 선단의 응력성분과 변위성분에 미치는 영향

본 연구에서 유도한 등속 진행하는 균열선단 부근의 응력 및 변위분포 특징을 알기 위하여 사용된 직교 이방성체의 재료는 구리 파이버/에폭시,<sup>(11)</sup> 유리 파이버/에폭시 그리고 아라미드 파이버/에폭시<sup>(12)</sup> 복합재료이며 기계적 물성치는 Table 1과 같다. Table 1의 기계적 물성치는 정적인 상태에서 물성치를 나타내고 있으며 실제로 동적인 상태의 물성치와는 다르다. 그러나 Ross 등<sup>(13)</sup>에 의하면 파이버 각도 변화에 의존되는 물성치변화는 정적인 상태나 동적인 상태가 서로 비슷한 관계를 가지고 있음을 제시하고 있다. 따라서 정적인 상태의 물성치는 동적인 상태와 차이가 있지만  $E_L/E_T$ ,  $G_{LT}/E_T$  등의 물성치의 비에는 정적인 상태나 동적인 상태가 거의 같다고 할 수 있으며 이러한 이방성의 비가 같고 동일한 균열진행 상태  $M(c/C_s)$  하에서는 균열선단에서 작용되는 응력이나 변위는 같다. 따라서 본 연구에서는 정적인 물성치를 그대로 동적인 상태의 응력성분과 변위성분에 적용하였다.

Fig. 1는 무한판의 균열선단에서 응력성분을 나타내고 있으며 본 연구에 적용된 하중은 순수 모드

I 상태이고 평면 응력상태에 있어서 균열 진행속도  $c$ 가 균열선단의 응력성분과 변위성분 영향을 균열과 파이버의 방향이 이루는 각도  $\alpha=0^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7$  그리고  $13.8$ 로 증가하는 경우에 연구하였다. 그리고 황, 이<sup>(11)</sup> 등의 연구에서 동일한 재료에서 파이버의 체적비가 증가하면 이방성의 비  $E_L/E_T$ 는 증가하나 파이버 방향의 직각 방향의 물성치와 전단물성치의 비  $G_{LT}/E_T$ 는 거의 일정함을 실험적으로나 이론적으로 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 사용된 재료는  $G_{LT}/E_T=0.42-0.45$ 이며 모두가 제1종 재료에 해당된다. 그리고 균열의 진행속도는  $M=c(\rho a_{66})^{1/2}$ 라 두고 비교하였는데 전단응력과의 속도를  $C_s=(G_{LT}/\rho)^{1/2}$ 라 두면  $M$ 은 전단 응력과의 속도에 대한 균열의 진행속도의 비 즉  $M=C/C_s$ 을 나타낸다. 균열의 진행속도는 전단응력과의 속도  $C_s=(G_{LT}/\rho)^{1/2}$ 보다 더 빨리 진행할 수 없으므로 본 연구에서는  $M=0$ 에서  $M=0.9$ 까지 균열 진행속도를 변화시키면서 균열선단의 응력 및 변위의 상태를 비교하였다.

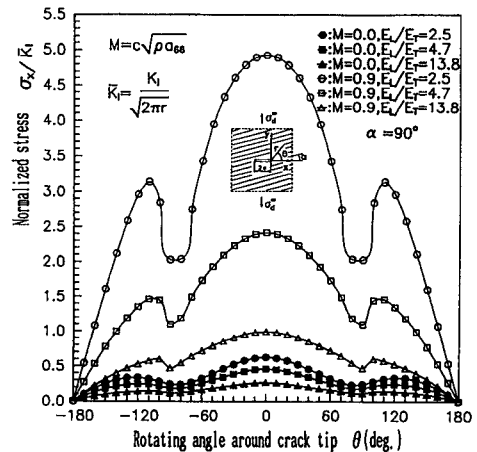


Fig. 2 Variations of  $\sigma_x/K_1$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=90^\circ$  in the vicinity of crack tip

Table 1 The mechanical properties of composite material

Spc.	$E_L$ (Mpa)	$E_T$ (Mpa)	$G_{LT}$ (Mpa)	$\nu_{LT}$	Density (kg/m <sup>3</sup> )	$V_f/V_m$
Copper/Epoxy	9800	3920	1744	0.43	1200	0.1
Glass/Epoxy	38600	8270	3646	0.26	1800	0.45
Aramid/Epoxy	76000	5500	2300	0.34	1460	0.6

Fig. 2는 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=90^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열 선단부근에서 무차원 응력  $\sigma_x/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다. 균열정지 경우에서나 균열이  $M=0.7, 0.9$ 의 고속으로 진행하는 경우에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록 무차원 응력  $\sigma_x/\bar{K}_I$ 은 감소하며 이러한 현상은 균열이 정지하는 경우에서 보다는 균열이 고속으로 진행하는 경우에 더욱더 심하다. 그리고 응력의 분포형태는 이방성의 비에 관계없이 서로 비슷하며 최대 무차원 응력  $\sigma_x/\bar{K}_I$ 은  $\theta=0^\circ$ 에서 발생한다.

Fig. 3은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 응력  $\sigma_x/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다. 균열정지 경우에서나 균열이  $M=0.9$ 의 고속으로 진행하는 경우에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록 최대무차원 응력은 증가한다. Fig. 2와 Fig. 3을 비교하면 전체적으로 무차원 응력  $\sigma_x$ 은  $\alpha=0^\circ$ 인 경우가  $\alpha=90^\circ$ 인 경우보다 더 크며, 최대 무차원 응력은 균열 진행 상태에 관계없이  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록  $\sigma_x$ 는 더욱 더 감소하며  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록  $\sigma_x$ 는 더욱더 증가한다. 이것은 다시말해 응력  $\sigma_x$ 는 응력의 방향이 파이버의 방향과 일치하는 경우가 수직하는 경우의 응력보다 더 크며 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 커질수록 파이버 방향과 일치하는 경우

의 응력이 수직하는 경우의 응력보다 더욱더 커진다.

Fig. 4는 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=90^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 응력  $\sigma_y/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다.  $M < 0.81$ 인 경우는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 큰 경우가 작은 경우보다 응력  $\sigma_y$ 가 크나  $M=0.81$ 인 경우에는 이방성의 비에 관계없이 서로 비슷하며  $M > 0.81$ 인 경우에는 반대로 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 작은 경우의 응력이 큰 경우보다 크다. 그리고 최대 무차원 응력  $\sigma_y/\bar{K}_I$ 이 발생하는 지점은 균열 정지 상태에서는 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5$ 인 경우에는  $\theta=\pm 70^\circ$ 에서  $E_L/E_T=4.6, 13.8$ 에서는  $\theta=\pm 80^\circ$ 에서 발생하며 균열이  $M=0.9$ 의 고속인 경우에는  $E_L/E_T=2.5, 4.6$ 에서는  $\theta=\pm 80^\circ$ 에서  $E_L/E_T=13.8$ 에서는  $\theta=\pm 90^\circ$ 에서 발생함을 알 수 있다. 이처럼 균열의 속도에 관계없이 이방성의 비가 커질수록 최대 무차원 응력이 발생하는 지점의 각도  $\theta$ 는 점점 증가하며 정지 균열상태보다 고속 균열상태에서 최대 무차원 응력  $\sigma_y/\bar{K}_I$ 이 발생하는 각도 는은 조금 더 크다.

Fig. 5는 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 응력  $\sigma_y/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다. 균열 진행 상태에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록 다시말해  $x$ 방향으로 물성치가  $y$ 방향의 물성치보다 더욱더 증가할

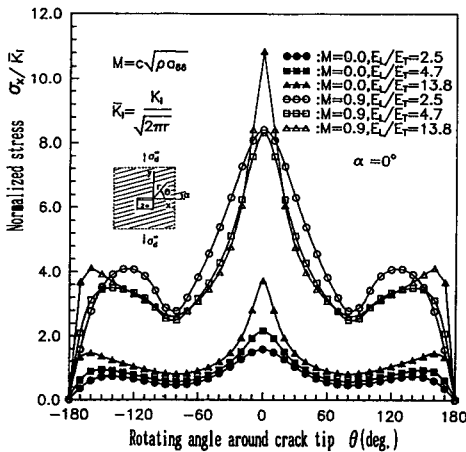


Fig. 3 Variations of  $\sigma_x/\bar{K}_I$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=0^\circ$  in the vicinity of crack tip

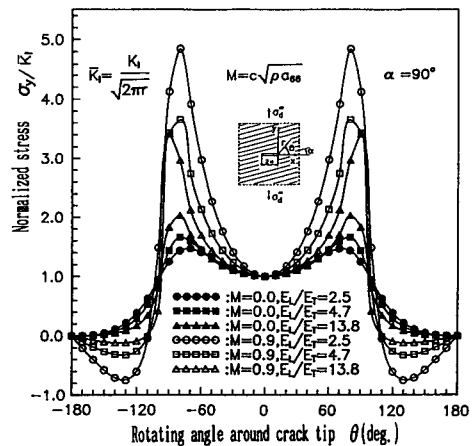


Fig. 4 Variations of  $\sigma_y/\bar{K}_I$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=90^\circ$  in the vicinity of crack tip

수록 무차원 응력은 감소한다. 그리고 최대 무차원 응력의 발생지점은 이방성의 비에 관계없이 균열 정지상태에서는  $\theta=60^\circ$ 에서 발생하고 균열이  $M=0.9$ 인 고속인 경우에는  $\theta=80^\circ$ 에 발생하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4의  $\alpha=0^\circ$ 인 경우와 Fig. 5의  $\alpha=90^\circ$ 인 경우를 비교하면 무차원 응력  $\sigma_y$ 은 균열 상태에 관계없이 또한 이방성의비에 관계없이  $\alpha=90^\circ$ 인 경우가  $\alpha=0^\circ$ 인 경우보다 더 크다. 그리고 정지 균열의 경우  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록 무차원  $\sigma_y$ 는 더욱더 증가하며  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에는 이방성의비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록 무차원  $\sigma_y$ 는 더욱더 감소한다. 그리고 균열의 속도가  $M=0.9$ 인 경우에는  $\alpha=0^\circ$ 인 경우나  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 관계없이 이방성의 비가 커질수록 무차원 응력은 감소하나, 동일한 이방성의 비에서는  $\alpha=90^\circ$ 의 경우의 무차원 응력이  $\alpha=0^\circ$ 인 경우의 무차원 응력보다 훨씬 크며 이러한 현상은 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 커질수록 더욱더 심하다. 이것은 다시말해 응력  $\sigma_y$ 는 응력의 방향이 파이버 방향과 일치하는 경우의 응력은 수직하는 경우의 응력보다 더 크며 이방성의 비가 커질수록 파이버 방향과 응력의 방향이 일치하는 경우의 응력은 수직하는 경우의 응력보다 더욱더 커진다. 그리고 등방성체의 경우 응력  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 의 최대치는 균열 정지상태에서는  $\sigma_y$ 가  $\sigma_x$ 보다 조금 크나 균열이 고속으로 진행하면  $\sigma_x$ 의 증가가  $\sigma_y$ 의 증가보다 더 커져 균열의 진행속도가 상당히 고속이되면 반대로  $\sigma_x$ 가  $\sigma_y$ 보다

더 커진다. 이러한 현상은 직교 이방성체에서도 이방성의 비가 적은 경우에는 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉 파이버 방향과 균열의 진행방향과 이루는 각도  $\alpha=90^\circ$ 에서 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5$  경우는 균열정지 상태에서는  $\sigma_y$ 가  $\sigma_x$ 보다 크나 균열이  $M=0.9$ 의 고속으로 진행하면  $\sigma_x$ 가  $\sigma_y$ 보다 현저하게 증가하여 서로 비슷한 값을 가지며 균열의 속도가  $M=0.92$  이상이 되면  $\sigma_x$ 가  $\sigma_y$ 보다 더 크게 된다. 그러나 이 경우에서 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 상당히 증가하면 아무리 균열의 진행속도가 고속이 되어도  $\sigma_y$ 가  $\sigma_x$ 보다 더 크다.

Fig. 2에서 Fig. 5의 응력  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 의 크기를 비교하여 보면 균열의 진행상태가  $M<0.9$ 이고,  $E_L/E_T>2.5$ 인 재료에서  $\alpha=90^\circ$ 에서는  $\sigma_y$ 가  $\sigma_x$ 보다 크며 이방성의 비가 증가할수록 이러한 현상은 더욱더 심하며  $\alpha=0^\circ$ 에서는  $\sigma_x$ 가  $\sigma_y$ 보다 크며 이러한 현상은 이방성의 비가 증가할수록 더욱더 심하다.

Fig. 6은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=90^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 응력  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다. 균열 정지상태의 경우나 균열 진행상태에 관계없이 이방성의비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록 무차원 응력은 감소한다. 그리고 최대 무차원이 발생하는 지점은 균열의 진행속도에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7$ 에서는  $\theta=\pm 100^\circ$ 에서,  $E_L/E_T=13.8$ 에서는  $\theta=\pm 90^\circ$ 에서 발생함을 알 수 있다. 이와같이  $E_L/E_T$ 가 증가할수

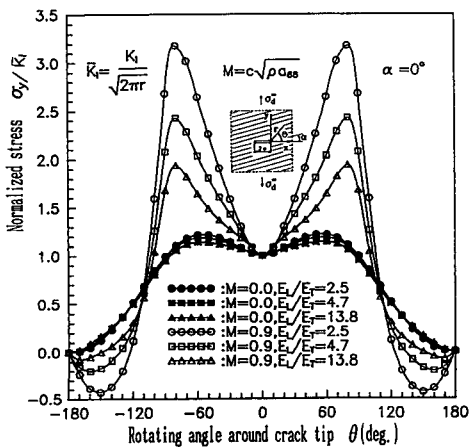


Fig. 5 Variations of  $\sigma_y/\bar{K}_I$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=0^\circ$  in the vicinity of crack tip

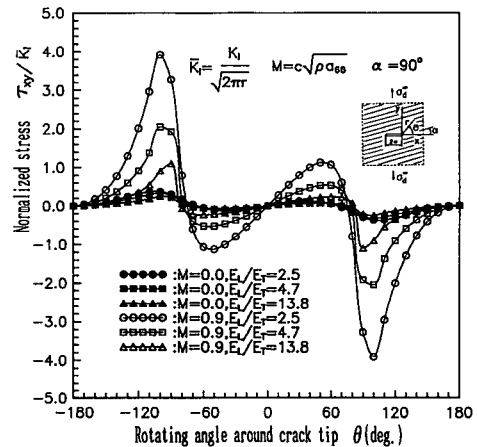


Fig. 6 Variations of  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=90^\circ$  in the vicinity of crack tip

록 최대 무차원  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$ 이 발생하는 위치  $\theta$ 의 각도는 점점 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 응력  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다. 균열 정지상태에서  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$ 은 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가하더라도 비슷한 값을 가지고 있으나 균열의 진행속도가  $M=0.9$ 인 경우에는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 증가할수록  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$ 은 작아진다. 최대치  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$ 이 발생하는 위치는 균열 정지 경우에는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 에 관계없이  $\theta = \pm 110^\circ$ 에서 발생하고 균열이  $M=0.9$ 인 경우에는  $\theta = \pm 100^\circ$ 에서 발생한다. 그리고 Fig. 6과 7에서 보듯이 응력  $\tau_{xy}$ 는 이방성의 비가 작은 경우( $E_L/E_T = 2.5$ )에서는 균열 진행상태에 관계없이  $\alpha=0^\circ$ 와  $\alpha=90^\circ$ 의 응력이 서로 비슷하게 작용하나 이방성의 비가 큰 경우( $E_L/E_T = 4.6, 13.8$ )에는 균열이 고속이 되면  $\alpha=0^\circ$ 가  $\alpha=90^\circ$ 보다 무차원 응력  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$ 는 크게 작용한다.

Fig. 8은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=90^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 응력  $\sigma_\theta/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다. 균열 정지상태에서는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 에 관계없이  $\theta=0^\circ$ 에서 무차원 응력  $\sigma_\theta/\bar{K}_I$ 은 최대값을 가지나 균열이  $M=0.9$ 의 고속인 경우에는  $E_L/E_T=2.5, 4.6$ 은  $\theta = \pm 70^\circ$ 에서  $E_L/E_T=13.8$ 에서는  $\theta=0$ 에서 최대  $\sigma_\theta/\bar{K}_I$ 을 가진

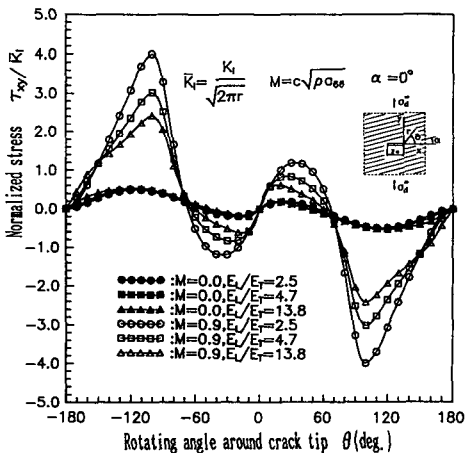


Fig. 7 Variations of  $\tau_{xy}/\bar{K}_I$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=0^\circ$  in the vicinity of crack tip

다. 이것은 다시말해  $\alpha=90^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 현저하게 증가하면 균열의 속도가 고속인 경우에서도 거의 분파균열이 발생하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 응력  $\sigma_\theta/\bar{K}_I$ 을 나타내고 있다. 균열상태  $M < 0.8$ 인 경우에는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 커질수록 무차원 응력이 증가하나  $M > 0.8$ 의 고속인 경우에는  $E_L/E_T$ 가 증가할수록 감소하고  $M > 0.9$  이고  $E_L/E_T > 4.5$ 이상인

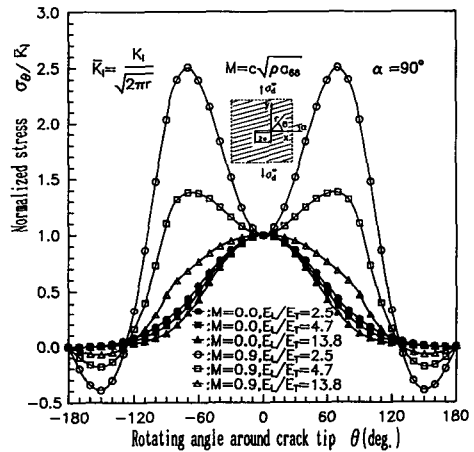


Fig. 8 Variations of  $\sigma_\theta/\bar{K}_I$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=90^\circ$  in the vicinity of crack tip

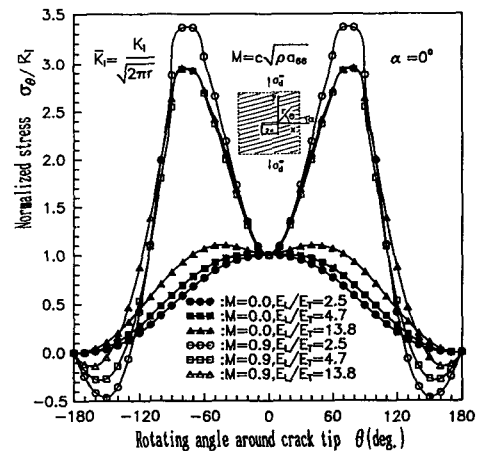


Fig. 9 Variations of  $\sigma_\theta/\bar{K}_I$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=0^\circ$  in the vicinity of crack tip



경우에서는 이방성의 비가 아무리 증가해도 응력  $\sigma_\theta$ 은 서로 비슷한 값을 가지고 있다. 일반적으로 등방성체의 경우 균열 정지상태에서는 원주방향 응력은 균열의 방향  $\theta=0^\circ$ 에서 최대값을 가지나 직교 이방성체에서 파이버 방향과 균열의 진행방향  $\alpha=0^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 상당히 높으면 (본 재료에서는  $E_L/E_T=4.5$ 이상)  $\theta=0^\circ$ 의 다른 방향으로 최대원주응력이 발생하므로 모드 I 하중이 작용하는 경우 균열 정지상태의 하중에서도 분파균열이 발생 하기가 매우 쉽다. 그리고 Figs. 8, 9에서 보듯이  $\alpha=90^\circ$ 인 경우보다  $\alpha=0^\circ$ 인 경우가 원주응력이 더 크게 작용하며 이러한 현상은 균열이 고속일수록 더욱더 원주응력  $\sigma_\theta/K_I$ 는 크게 작용하므로 분파균열이 더욱 더 발생하기 쉽다.

이와 같이 Fig. 2에서 Fig. 9까지 보듯이 순수 모드 I 상태에서 탄성주축  $\alpha$ 의 변화와 이방성의 비  $E_L/E_T$ 의 변화에 따른 균열선단부근에서 응력  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 는 응력성분의 방향이 파이버 방향과 일치하는 경우가 수직하는 경우보다 응력이 크게 작용하며 이러한 현상은 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 커질수록 파이버 방향과 일치하는 경우의 응력이 수직하는 경우의 응력보다 더욱더 크다. 그리고 응력  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 의 크기는 균열의 진행상태가  $M < 0.9$ 이고,  $E_L/E_T > 2.5$ 인 재료에서  $\alpha=90^\circ$ 에서는  $\sigma_y$ 가  $\sigma_x$ 보다 크며 이방성의 비가 증가할수록 이러한 현상은 더욱더 심하며  $\alpha=0^\circ$ 에서는  $\sigma_x$ 가  $\sigma_y$ 보다 크며 이러한 현상은 이방성의 비가 증가할수록 더욱더 심하다. 응력  $\tau_{xy}$ 는 이방성의 비가 적은 경우( $E_L/E_T=2.5$ )에서는 균열 진행상태에 관계없이  $\alpha=0^\circ$ 와  $\alpha=90^\circ$ 의 응력이 서로 비슷하게 작용하나 이방성의 비가 큰 경우( $E_L/E_T=4.6, 13.8$ )에는 균열이 고속이 되면  $\alpha=0^\circ$ 가  $\alpha=90^\circ$ 보다 응력이 크게 작용한다. 그리고  $\sigma_\theta$ 는  $\alpha=90^\circ$ 인 경우보다  $\alpha=0^\circ$ 인 경우가 원주응력  $\sigma_\theta$ 가 더 크게 작용하며 이러한 현상은 균열이 고속일수록 더욱더 원주응력  $\sigma_\theta$ 가 크게 작용하므로 분파 균열이 더욱 더 발생하기 쉽다. 그리고  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  그리고  $\sigma_\theta$ 의 최대치의 순서는 균열 정지 상태에서는  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에는 이방성의 비에 관계없이  $\sigma_x > \sigma_y \approx \sigma_\theta > \tau_{xy}$ 의 순이고  $\alpha=90^\circ$ 인 경우는  $\sigma_y > \sigma_\theta > \sigma_x \approx \tau_{xy}$ 이다. 균열의 상태가  $M=0.9$ 의 고속 균열에서는  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에는 이방성의 비에 관계없이  $\sigma_x > \sigma_\theta > \tau_{xy} > \sigma_y$ 의 순이고  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에는 이방성의 비가 작은 경우( $E_L/E_T=2.5$  이하)에는  $\sigma_x > \sigma_y > \tau_{xy} > \sigma_\theta$ 이나 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가

커지면 ( $E_L/E_T=2.5$  이상), 응력  $\sigma_x$ 가 작아져 응력의 크기순서는  $\sigma_y > \sigma_x > \tau_{xy} \approx \sigma_\theta$ 로 되며  $E_L/E_T=13.8$ 에서는  $\sigma_y > \sigma_x \approx \tau_{xy} \approx \sigma_\theta$ 이 된다. 그리고 보강 방향의 변화가 균열선단의 응력  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  그리고  $\sigma_\theta$ 에 미치는 영향은 이방성의 비가 작은 경우( $E_L/E_T=2.5$ )에는 균열의 속도에 관계없이  $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_\theta \approx \tau_{xy}$ 이나 이방성의 비가 큰 경우 ( $E_L/E_T=4.7, 13.8$ )에는 균열속도가  $M < 0.7$ 에서는  $\sigma_x > \sigma_y > \tau_{xy} > \sigma_\theta$ 이며 균열이  $M=0.9$ 인 경우에는  $\sigma_x > \sigma_\theta > \sigma_y \approx \tau_{xy}$ 이다. 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 응력  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  그리고  $\sigma_\theta$  등에 미치는 영향은  $\alpha=90^\circ$ 인 경우에  $M=0$ 인 경우는  $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_\theta \approx \tau_{xy}$ 이나 균열의 속도가 점점 증가하면  $\sigma_x$ 에 미치는 영향이  $\sigma_y$ 에 미치는 영향보다 더 크게 되고 ( $M=0.55$ 이상 부터),  $M > 0.8$ 인 경우는  $\sigma_x > \tau_{xy} > \sigma_\theta \approx \sigma_y$  순이 된다.  $\alpha=0^\circ$ 인 경우에는  $M=0$ 인 경우는  $\sigma_x > \sigma_\theta \approx \sigma_y \approx \tau_{xy}$ 이나 균열의 속도가 증가하면 응력  $\tau_{xy}$ 가 증가하며  $M > 0.8$ 인 경우에는  $\sigma_x > \tau_{xy} > \sigma_\theta$ ,  $\sigma_y$ 이다. 따라서 균열이  $M > 0.8$ 이면  $\alpha$ 에 관계없이  $\sigma_x > \tau_{xy} > \sigma_\theta \approx \sigma_y$ 이다. 이방성의 비가 증가하면 응력  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\sigma_\theta$  등의 최대치는 균열 정지상태에서는  $\sigma_x(\alpha=90^\circ)$ ,  $\tau_{xy}(\alpha=90^\circ)$ ,  $\sigma_y(\alpha=0^\circ)$ 가 감소하고 균열이  $M=0.9$ 의 고속 상태하에서는 응력  $\sigma_x(\alpha=0^\circ)$ 를 제외하고 응력  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\sigma_\theta$  등의 최대치는 어떠한 경우에서도 감소한다.

Fig. 10은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=90^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 변위  $U/K_I$

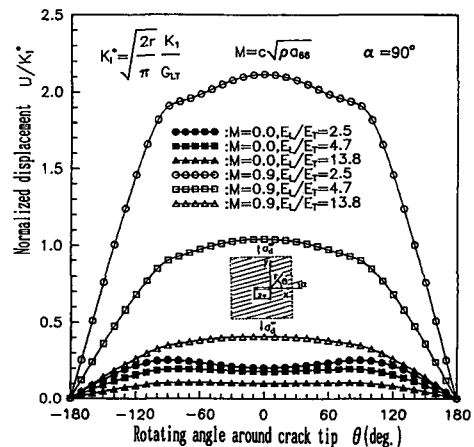


Fig. 10 Variations of  $\sigma_\theta/K_I^*$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=90^\circ$  in the vicinity of crack tip

$\bar{K}_I^*$ 을 나타내고 있다. 균열 진행속도에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 커질수록 무차원 변위  $U/K_I^*$ 는 작아지며 이러한 변화폭은 균열이 고속일수록 더욱더 작아지며 이방성의 비에 관계없이 최대 변위  $U/K_I^*$ 는 정지 균열상태에서  $\theta=90^\circ$  근방에서  $M=0.9$ 인 고속균열에서는  $\theta=0^\circ$ 에서 최대 변위가 발생한다.

Fig. 11은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 변위  $U/\bar{K}_I^*$ 을 나타내고 있다. 균열 진행속도에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 커질수록 변위는 작아지며 이러한 변화폭은 균열이 고속인 경우가 더욱더 작아지며 균열 정지상태에서는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 에 관계없이 최대변위는  $\theta=\pm 90^\circ$  근방에서 발생하며 균열이  $M=0.9$ 의 고속균열에서는 이방성의 비에 관계없이  $\theta=\pm 80^\circ$ 에서 발생한다. Fig. 10과 11을 비교하면 균열 정지상태에서는 이방성의 비에 관계없이  $\alpha=0^\circ$ 가  $\alpha=90^\circ$ 보다 변위가 크게 발생하며 균열이  $M=0.9$ 인 고속 균열에서는 이방성의비  $E_L/E_T=2.5$ 인 경우에는  $\alpha=90^\circ$ 가  $\alpha=0^\circ$ 보다 크나  $E_L/E_T=4.7, 13.8$ 에서는  $\alpha=0^\circ$ 가  $\alpha=90^\circ$ 보다 변위  $U$ 가 크게 발생한다. 따라서 무차원 변위  $U/K_I^*$ 는 이방성의 비가 상당히 높으면(본 연구에서는  $E_L/E_T=4.5$  이상) 균열 진행속도에 관계없이  $\alpha=0^\circ$ 가  $\alpha=90^\circ$ 보다 변위  $U$ 가 크게 발생한다.

Fig. 12는 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=90^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7,$

13.8에 대하여 균열선단부근에서 무차원 변위  $V/K_I^*$ 을 나타내고 있다. 균열 진행속도에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 클수록 무차원 변위는 작아지며 이러한 변화폭은 균열이 고속일수록 더욱더 작아지며 이방성의 비  $E_L/E_T$ 에 관계없이 최대 변위는  $\theta=\pm 180^\circ$ 에서 발생한다.

Fig. 13은 파이버 방향과 균열 진행방향과의 각도  $\alpha=0^\circ$ 인 경우 이방성의 비  $E_L/E_T=2.5, 4.7, 13.8$ 에 대하여 균열선단부근에서 무차원 변위  $V/K_I^*$ 을 나타내고 있다. 균열 진행속도에 관계없이 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 커질수록 무차원 변위  $V/K_I^*$

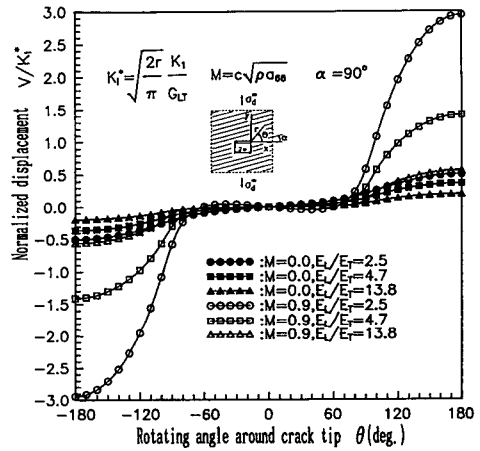


Fig. 12 Variations of  $V/\bar{K}_I^*$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=90^\circ$  in the vicinity of crack tip

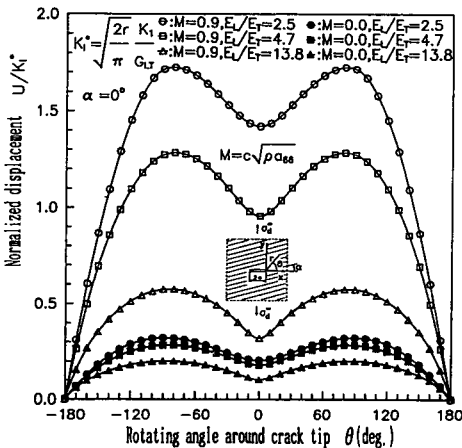


Fig. 11 Variations of  $U/\bar{K}_I^*$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=0^\circ$  in the vicinity of crack tip

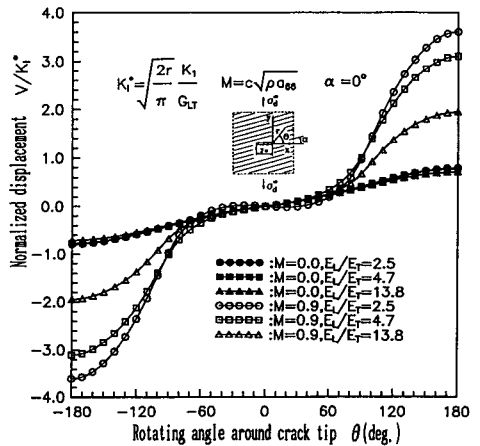


Fig. 13 Variations of  $V/\bar{K}_I^*$  with anisotropic property ratio ( $E_L/E_T$ ) of  $\alpha=0^\circ$  in the vicinity of crack tip

$K_I^*$ 는 작아지며 이러한 변화폭은 균열이 고속일수록 더욱더 작아지며 이방성의 비  $E_L/E_T$ 에 관계없이 최대 변위는  $\theta = \pm 180^\circ$ 에서 발생한다. Fig. 12과 Fig. 13을 비교할 때  $\alpha = 0^\circ$ 가  $\alpha = 90^\circ$ 보다 변위 폭이 크다.

Fig. 10에서 13까지 보듯이 모드 I 상태에서 변위  $U$ 와  $V$ 는 이방성의 비( $E_L/E_T = 4.5$  이상)가 클수록  $\alpha = 0^\circ$ 의 경우가  $\alpha = 90^\circ$ 의 경우보다 더 크게 변위  $V$ 가 변위  $U$ 보다 크게 발생한다. 그리고 최대 변위가 발생하는 위치는 변위  $V$ 는 균열 진행상태와 이방성의 비  $E_L/E_T$ 에 관계없이  $\theta = 0^\circ$ 에서 발생하며, 변위  $U$ 는 균열 정지상태에서는 이방성의 비  $E_L/E_T$  변화에 관계없이  $\theta = \pm 90^\circ$ 에서, 균열의 속도가  $M = 0.9$  경우에는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 에 관계없이  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우는  $\theta = 0^\circ$ 에서,  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우는  $\theta = \pm 80^\circ$ 에서 발생한다. 그리고 보강방향의 변화 즉  $\alpha$ 의 방향 변화가 균열선단의 변위  $U, V$ 에 미치는 영향은 최대로 영향을 미치는  $\theta$ 을 기준으로 할 때, 균열 진행상태와 이방성의 비에 관계없이 모드 I 상태의 경우는 변위  $V$ 가 변위  $U$ 보다 그 영향이 더 크다. 그리고 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 변위  $U, V$ 에 미치는 영향은  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우에는 균열 진행상태에 관계없이  $V > U$ 이며,  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우는  $M < 0.75$ 인 경우에는  $U > V$ 이나 균열 진행속도가  $M = 0.9$  ( $M > 0.75$ )인 경우는  $V > U$ 이다.

지금까지는 직교이방성 무한판의 등속 균열선단부근의 응력장과 변위장에 대하여 연구되었으나, 향후에는 유한판의 동적 응력확대계수 값을 구하여 유한판내에서 전파하는 균열선단부근의 응력장과 변위장에 대하여 연구하는 것이 과제이다.

#### 4. 결 론

지금까지 동적모드 I 상태에서 직교 이방성비가 등속 전파 균열 선단부근의 응력장 및 변위장에 미치는 영향의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열선단의 응력성분  $\sigma_x, \sigma_y$ 의 최대값은 응력성분 방향이 파이버 보강방향과 일치하는 경우의 응력성분이 수직하는 경우의 응력성분보다 항상 더 크며 이방성의 비가 커질수록 더욱 더 그러하다.

(2) 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 응력  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  그리고  $\sigma_\theta$  등에 미치는 영향은  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우에 균열의 속도가  $M < 0.55$ 인 경우에는  $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_\theta \approx \tau_{xy}$ 이고 이러한 속도 이상이 되면  $\sigma_x$ 가 가장 많이 영향을

받는다.  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우에는  $M = 0$ 인 경우에는  $\sigma_x > \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_\theta$ 이나, 균열의 속도가 증가하면  $\tau_{xy}$ 가 증가하며  $M > 0.8$ 인 경우에는  $\sigma_x > \tau_{xy} > \sigma_y, \sigma_\theta$ 이다.

(3) 이방성의 비  $E_L/E_T$ 가 변위  $U, V$ 에 미치는 영향은  $\alpha = 90^\circ$ 인 경우에는 균열 진행상태에 관계없이  $V > U$ 이며  $\alpha = 0^\circ$ 인 경우는  $M < 0.75$ 인 경우에는  $U > V$ 이나  $M = 0.9$ 인 ( $M > 0.75$ )인 경우는  $V > U$ 이다.

(4) 이방성의 비가 증가하면 응력  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_\theta$  등의 최대치는 균열 정지상태에서는  $\sigma_x$  ( $\alpha = 90^\circ$ ),  $\tau_{xy}$  ( $\alpha = 90^\circ$ ),  $\sigma_y$  ( $\alpha = 0^\circ$ )가 감소하고 균열이  $M = 0.9$ 의 고속상태하에서는 응력  $\sigma_x$  ( $\alpha = 0^\circ$ )를 제외하고 응력  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_\theta$  등의 최대치는 어떠한 경우에서도 감소한다.

(5) 변위  $U, V$ 의 크기는 이방성의 비  $E_L/E_T$ 와  $\alpha$ 에 관계없이  $V > U$ 이다.

#### 참고문헌

- (1) Itou, S., 1989, "Dynamic Stress Intensity Factors around Two Coplaner Griffith Cracks in an Orthotropic Layer Sandwiched between Two Elastic Half-Planes," *Engng. Fract. Mech.* Vol. 34, 5/6, pp. 1085~1095.
- (2) Ang, W. T., 1988, "A Crack in an Anisotropic Layered Material Under the Action of Impact Loading," *J. Appl. Mech.* 55, 120~125.
- (3) Shindo, Y. and Higaki, H., 1990, "Impact Response of Symmetric Edge Cracks in an Orthotropic Strip," *Frac. and Strength* 90, pp. 436~441.
- (4) Kassir, M. K. and Tse, S., 1983, "Moving Griffith Crack in an Orthotropic Material," *Int. J. Engng. Sci.* 21, pp. 315~325.
- (5) Areisz, M. and Sih, G. C., 1984, "Effect of Orthotropy on Crack Propagation," *Theor. Appl. Frac. Mech.* 1, pp. 225~238.
- (6) Achenbach, J. D. and Bazant Z. P., 1975, "Elastodynamic Near-Tip Stress and Displacement Fields for Rapidly Propagating Crack in Orthotropic Materials," *J. of Appl. Mech.*, Vol. 42, pp. 183~189.
- (7) Piva, A. and Viola, E., 1988, "Crack Propagation in an Orthotropic Medium," *Engng. Fract.*

- Mech.*, Vol. 29, No. 5, pp. 535~548.
- (8) Viola, E, Piva. A and Radi. E., 1990, "Crack Propagation in An Orthotropic Medium Under General Loading," *Engng. Fract. Mech.*, Vol. 34, No. 5/6, pp. 1155~1174.
- (9) 이광호, 황재석, 최선호, 1993, "직교 이방성체의 동적 응력확대계수에 관한연구(I) (등속 균열전파 속도하에서 동적 모드 I과 II 상태의 응력장, 변위장, 에너지해방률에 관한 연구)," 대한기계학회논문집, 제17권 2호, pp. 313~330.
- (10) Sih. G. C., Paris. P. C., Irwin. G. R., 1965, "On Crack in Rectilinearly Anisotropic Bodys," *Int. J. of Frac. Mech.* pp. 189~203.
- (11) 黃在錫, 李廣浩, 1990, "光彈性 直交異方性體의 物性値와 應力 프린지치 簡易 測定法," 大韓機械學會 論文集 第14卷 1號, pp. 23~36.
- (12) Tsai, S. T. and Hahn, H. T., 1980, *Introcuction to Composite Materials*, Technomic Publishing Co. pp. 19.
- (13) Ross, C. A., Sierakowski, R. L and Sun, C. T. 1985, "Dynamic Response of Composite Materials," *S. E. M.*, pp. 30~65.