

<논문> SAE NO. 96370028

길이방향의 전단응력을 받는 직교이방성 원판에 내재된 외부균열의 등속전파 응력확대계수 K_{III}

Dynamic Stress Intensity Factor K_{III} of Crack Propagating with Constant Velocity in Orthotropic Disk Plate Subjected to Longitudinal Shear Stress

최 상 인*
S. I. Choi

ABSTRACT

Dynamic stress intensity factors are derived when the crack is propagating with constant velocity under longitudinal shear stress in orthotropic disk plate. General stress fields of crack tip propagating with constant velocity and least square method are used to obtain the dynamic stress intensity factor. The dynamic stress intensity factors of $G_{LV}/G_{TV}=1$ (=isotropic material or transversely isotropic material) which is obtained in our study nearly coincides with Chiang's results when mode III stress is applied to boundary of isotropic disk.

The D.S.I.F. of mode III stress is greater when α (=angle of crack propagation direction with fiber direction) is 90° than that when α is 0° . In case of a/D (a : crack length, D : disk diameter) < 0.58 , the faster crack propagation velocity, the less D.S.I.F. and when crack propagation velocity arrives on shear stress wave velocity, the D.S.I.F. is zero. In case of $a/D > 0.58$, the faster crack propagation velocity, the less D.S.I.F. but when crack propagation velocity arrive on shear stress wave velocity, the D.S.I.F. unexpectedly increases and decreases to zero.

주요기술용어 : Orthotropic Disk Plate(직교이방성 원판), Crack Propagation with constant velocity (등속균열전파속도), Dynamic Stress Intensity Factor K_{III} (동적응력확대계수 K_{III})

1. 서 론

지금까지 일정한 속도로 고속진행하는 균열에 대한 파괴역학에 관한 연구는 대부분 등방성체에

대하여 연구되어져 왔으나^{1)~5)}, 직교이방성체의 고속진행균열에 대한 파괴 역학에 관한 연구는 미미한 상태이다^{6)~12)}. 특히 유한 원판의 직교이방성체에 내재된 균열이 원판의 길이방향의 동적 모드 III 하중을 받아, 균열이 등속으로 진행 할 때 응력확대계수 해석에 관한 연구는 아직 수행

* 정회원, 상주산업대학교 자동차공학과

된 바가 없다. 따라서 길이방향의 동적 모드 III 응력을 받는 직교 이방성 원판에 대한 등속전파 균열의 응력확대계수를 해석고져, 기존 유도된 동적 III 상태 하에서 등속으로 진행할 때 균열 선단 부근의 응력값 및 균열선단에서 멀리 떨어진 부근의 응력값을 알 수 있는 일반적인 응력장¹⁰⁾에 원판의 경계를 따라 선택된 점들과 경계조건을 대입하여 등속으로 진행하는 균열의 동적 응력확대계수를 얻기위한 연립방정식을 구하고 이러한 연립방정식의 해들은 최소자승법에 의하여 구하였다. 본 연구에서 얻은 동적 응력확대계수 값들은 균열의 진행이 정상상태의 조건인 경우이다. 실제의 재료에서 균열이 완전히 정상상태로 진행한다는 것은 불가능하다. 그러나 초기에 균열이 진행하여 시간이 지나면 균열진행은 어느정도 정상상태로된다고 생각되며, 적어도 이러한 경우에는 본 연구가 적용될 수 있으리라 생각된다.

본 연구에서 동적 응력확대계수값들을 얻기위한 조건들은 직교이방성 원판에 내재된 외부균열이 길이방향의 전단응력하에서 즉 원판의 위, 아래 경계에서 원판의 길이 방향으로 동적모드 III 응력이 일정하게 작용하여 원판에 내재된 외부균열이 등속으로 진행할 때, 원판의 크기, 균열의 길이, 균열의 진행속도, 이방성의 비, 파이버 보강방향의 변화등에 따라 변화하는 응력확대계수값의 정량적인 크기를 구하였다.

2. 동적 모드 III 하중의 등속균열의 일반적인 응력장과 변위장

동적 모드 III 하중에 의하여 직교이방성체에 내재된 균열이 등속으로 전파할 때 일반적인 응력장은 방정식 (1)과 같다¹⁰⁾.

$$\tau_{yz} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n (H_{yz})_n, \quad \tau_{xz} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n (H_{xz})_n \quad (1)$$

여기서 $A_n = K_n^+ / (2\pi)^{1/2}$

$$(H_{yz})_n = nr_1^{\frac{n}{2}-1} \begin{cases} \cos\left(\frac{n}{2}-1\right)\theta_1 : n \text{ odd} \\ -\sin\left(\frac{n}{2}-1\right)\theta_1 : n \text{ even} \end{cases}$$

$$(H_{xz})_n = nr_1^{\frac{n}{2}-1}$$

$$\begin{cases} p\cos\left(\frac{n}{2}-1\right)\theta_1 + q\sin\left(\frac{n}{2}-1\right)\theta_1 : n \text{ odd} \\ -p\sin\left(\frac{n}{2}-1\right)\theta_1 + q\cos\left(\frac{n}{2}-1\right)\theta_1 : n \text{ even} \end{cases}$$

$$p = \frac{C_{45}}{C_{44}}, \quad q = \frac{C_{44}C_{55} - C_{45}^2}{C_{44}\sqrt{C_{44}C_{55}(1-M^2)} - C_{45}^2}$$

$$\alpha_1 = -\alpha/\beta, \quad \beta_1 = \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}/\beta$$

$$\alpha = \frac{C_{45}}{C_{55}(1-M^2)}, \quad \beta = \frac{C_{44}}{C_{55}(1-M^2)},$$

$$M = \frac{c}{C_s}, \quad C_s = \left(\frac{C_{55}}{\rho}\right)^{1/2}$$

$$r_1 = \sqrt{(x + \alpha_1 y)^2 + (\beta_1 y)^2},$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\beta_1 \tan\theta}{1 + \alpha_1 \tan\theta}\right)$$

c : 균열진행속도, C_s : 전단응력파의 속도, ρ : 재료의 질량등이다.

방정식 (1)에서 $n=1$ 인 경우에는 직교이방성체의 등속 균열선단부근의 응력장이며, K_n^+ 는 K_1^+ 가 되며 응력확대계수 K_n 에 해당된다. 그리고 탄성계수 C_{44} , C_{45} , C_{55} 와 물성치와의 관계는 방정식 (2)와 같다¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} C_{44} &= G_{TV} \cos^2 \alpha + G_{LV} \sin^2 \alpha \\ C_{45} &= (G_{TV} - G_{LV}) \sin \alpha \cos \alpha \\ C_{55} &= G_{TV} \sin^2 \alpha + G_{LV} \cos^2 \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

방정식 (2)은 탄성 주축 방향의 물성치 G_{LV} , G_{TV} 을 알면 파이버 방향(L)에서 임의 각도 α 로 경사진 방향의 탄성계수 C_{44} , C_{45} , C_{55} 을 얻을수 있다.

3. 최소자승법에 의한 응력확대계수 결정법

본 연구에서 사용된 직교이방성 원판의 모델은 Fig.1과 같다. Fig.1에서 보는 바와 같이 직교이방성 원판의 길이방향의 동적모드 III 응력을 받아 균열이 등속으로 속도 c 로 진행하고 있으며 모델의 형상이 균열을 중심으로 상하대칭이므로 균열을 중심으로 원판의 윗부분만 고려하였다. 모델의 경계조건은 $\tau_{Rz} = \tau$ on $r=R$ 이다.

여기서 τ_{Rz} 는 원판외부 경계의 길이방향의 전단응력이므로 방정식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_{Rz} &= \tau_{yz} \sin \xi + \tau_{zx} \cos \xi \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n [(H_{yz})_n \sin \xi + (H_{zx})_n \cos \xi] \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n [(H_{Rz})_n \end{aligned} \tag{3}$$

위의 모델의 경계조건에서 균열선단에서 부터 임의의 거리 r , θ 만큼 떨어진 부분의 응력은 방

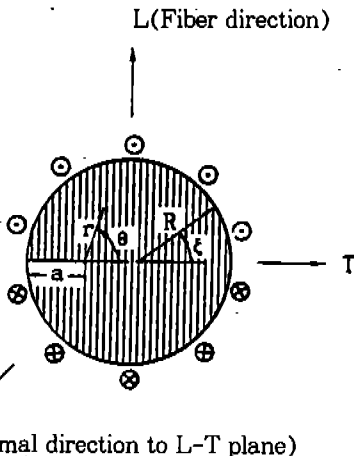


Fig.1 Model of orthotropic disk plate

정식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[R_{Rz}]_{k \times n} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_k \end{pmatrix} \tag{4}$$

여기서 k 와 τ_k 는 직교이방성 원판에서 외부경계에서 선택된 임의의 점들과 응력들이다. 따라서 방정식 (4)에 임의의 점을 k 개 선택하고 선택된 점의 응력들을 각각 대입하면 A_1, A_2, \dots, A_n 등을 구할수 있고 따라서 응력확대계수값을 구해낼 수 있다.

방정식 (4)는 다시 방정식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_k = \sum_{n=1}^{\infty} A_n [H_{Rz}]_{k \times n} - \tau_k = 0 \tag{5}$$

방정식 (5)는 테일러 급수를 사용하고 고차항을 무시하면 방정식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (F_k)_{i+1} &= (F_k)_i + \left(\frac{\partial F_k}{\partial A_1}\right)_i \Delta A_1 + \left(\frac{\partial F_k}{\partial A_2}\right)_i \Delta A_2 \\ &+ \dots + \left(\frac{\partial F_k}{\partial A_n}\right)_i \Delta A_n = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 i 는 i 번째 반복계산단계를 의미한다. 방정식 (5)의 A_n 는 한번의 계산과정에서 얻을 수 있으나, 한번의 계산과정에서는 모든 F_k 가 0로 되기 어렵다. 따라서 반복법을 사용하여 모든 F_k 를 0에 근접시켜 A_n 값을 구한다. 그리고 방정식 (6)은 방정식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} -(F_k)_i &= \left(\frac{\partial F_k}{\partial A_1}\right)_i \Delta A_1 + \left(\frac{\partial F_k}{\partial A_2}\right)_i \Delta A_2 \\ &+ \dots + \left(\frac{\partial F_k}{\partial A_n}\right)_i \Delta A_n \end{aligned} \tag{7}$$

방정식 (7)을 간단히 매트릭스 형태로 나타내면

$$[F] = [f][\Delta A] \tag{8}$$

과 같다. 따라서 방정식 (8)은 방정식 (9), (10), (11)의 과정에 의해 계산된다.

$$[f]^T[F] = [f]^T[f][\Delta A] \tag{9}$$

$$[d] = [c][\Delta A] \tag{10}$$

$$[\Delta A] = [c]^{-1}[d] \tag{11}$$

방정식 (8), (9), (10) 그리고 (11)의 과정을 통하여 방정식 (6)을 만족하는 $\Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_n$ 등을 최종적으로 구해낼 수 있다. 그리하여 다시 방정식 (12)에 대입하므로 A_1, A_2, \dots, A_n 등을 최종적으로 구해낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (A_1)_{i+1} &= (A_1)_i + \Delta A_1 \\ (A_2)_{i+1} &= (A_2)_i + \Delta A_2 \\ &\vdots \\ (A_n)_{i+1} &= (A_n)_i + \Delta A_n \end{aligned} \tag{12}$$

방정식 (12)로 부터 A_1 값을 얻을 수 있으므로 등속으로 진행하는 균열선단의 응력확대 계수 $K_{I1}^+ = K_{II} = A_1(2\pi)^{1/2}$ 을 구해 낼수 있을 뿐만 아니라 균열선단에서 부터 멀리 떨어진 임의의 위치의 응력 및 변위값도 구해낼 수 있다.

4. 직교 이방체에 내재된 등속 균열선단의 응력확대계수

직교이방성체의 응력확대계수값을 구하고자

Table 1 The comparison of our results with Chiang's results for the normalized dynamic stress intensity factor $K_{II} / \tau(\pi a)^{1/2}$ in isotropic material

a : D/M	0	0.2	0.4	0.6	0.8
1 : 2	1.7995 (1.80)	1.7724 (1.77)	1.6884 (1.69)	1.5371 (1.54)	1.2842 (1.28)

K_{II} : dynamic stress intensity factor, a:crack length, ():Chiang's results, $M=c/C_s$, c:crack propagation velocity, C_s :shear stress wave velocity

균열을 중심으로 원판의 윗부분의 경계를 따라 선정된 점의 수는 110개이다. 그러나 실제로는 80개의 점을 선택하여도 충분히 정확한 값을 얻을 수가 있으나 본 연구에서는 좀더 정확성을 기하고자 110개의 점을 선택하였다. 또한 방정식 (1)에서 동적 응력확대계수값을 얻기 위하여 사용되는 n는 홀수만을 사용하였고 n=79까지는 되어야 정확한 계산값을 얻을 수 있다. n값은 정수 또는 홀수의 정수를 사용하여야 하며 본 연구에서는 n의 값을 높이기 위하여 홀수만을 사용하였다.

Table 1은 Chiang이 얻는 등방성체에 대한 응력확대계수값¹¹⁾과 본 연구에서 얻어진 등방성체의 응력확대계수값을 비교하고 있다. Table 1에서 알 수 있듯이 본 연구에서 얻어진 결과들은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 방정식 (1)은 직교이방성체의 응력장이나 $G_{LV}/G_{TV}=1$ 인 경우는 등방성체의 응력장과 일치한다는 사실은 이미 밝혀진 바가 있다¹⁰⁾. 따라서 Table 1의 결과들은 이방성의 비 $G_{LV}/G_{TV}=1$ 을 사용하여 얻은 결과들이며, 이때 얻어진 응력확대계수값들은 등방성체의 응력확대계수값과 일치한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 사용된 최소자승법

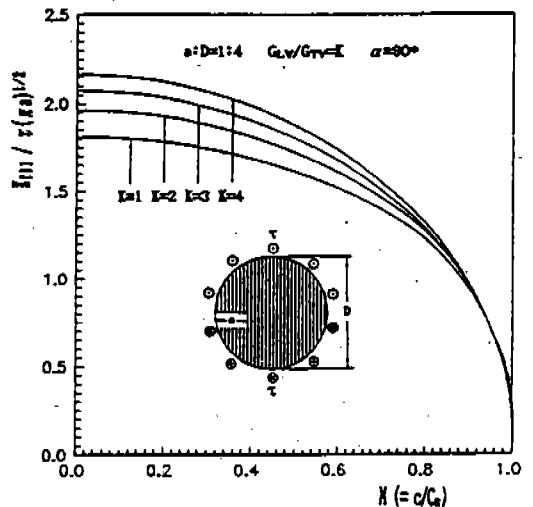


Fig.2 Normalized stress intensity factor with M (crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

에 의한 응력확대계수의 결정법의 개념은 응력확대계수를 정량적으로 결정하는데 유용하게 사용할 수 있다.

Fig.2는 시편의 균열과 원판직경의 비인 a :

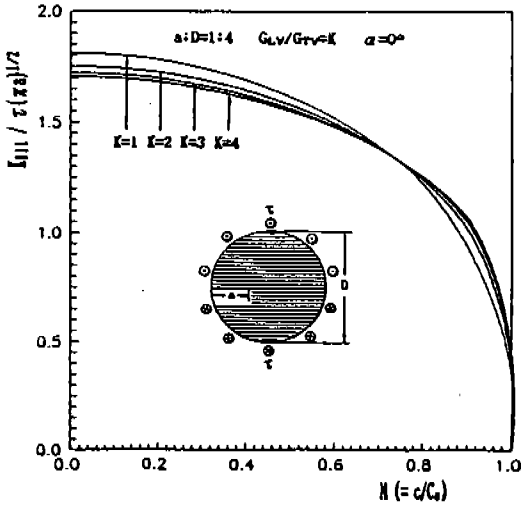


Fig.3 Normalized stress intensity factor with M (crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

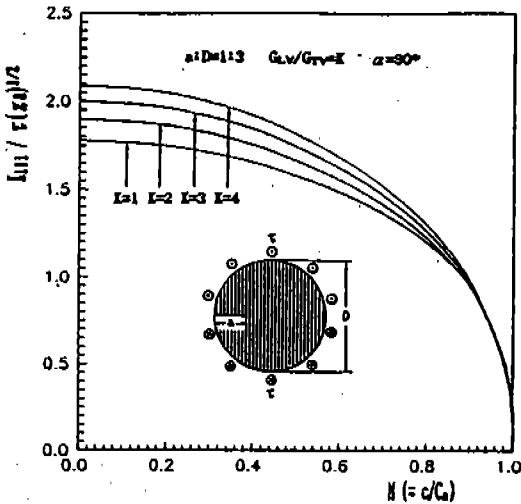


Fig.4 Normalized stress intensity factor with M (crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

$D=1:4$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 균열이 x 방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 균열 진행속도가 빠를수록 무차원 응력확대계수값은 감소하며 균열의 속도가 전단응력파의 속도($M=1$)에 접근하면 응력확대계수는 0으로 근접함을 알 수 있다. 그리고 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 응력확대계수값도 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.3은 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 $a : D=1 : 4$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha=0^\circ$ 인 경우와 균열이 x 방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 균열진행속도가 약 $M < 0.72$ 에서는 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 $\alpha=90^\circ$ 인 경우와는 반대로 응력확대계수값은 감소하며 또한 G_{LV}/G_{TV} 가 증가할수록 그 감소하는 폭은 적다는 것을 알 수 있다. 균열진행속도 약 $M=0.72$ 근방에서는 이방성의 비인 G_{LV}/G_{TV} 의 크기에 관계없이 일정한 응력확대계수값을 가진다는 것을 알 수 있다. 그리고 균열 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하며 균열의 속도가 전단응력파의 속도($M=$

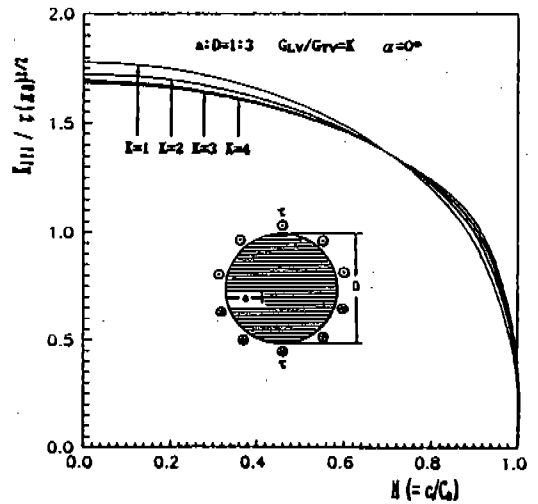


Fig.5 Normalized stress intensity factor with M (crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

1)에 가까우면 응력확대계수는 0으로 근접함을 알 수 있다. $\alpha=90^\circ$ 와 $\alpha=0^\circ$ 인 경우, 균열이 동일한 M으로 진행되는 경우에는 균열진행속도는 $\alpha=0^\circ$ 인 경우가 $\alpha=90^\circ$ 인 경우보다 $(G_{LV}/G_{TV})^{1/2}$ 배 빠르다. 따라서 균열이 $\alpha=0^\circ$ 인 경우와 $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 동일한 속도 c로 진행되는 경우에는 $\alpha=0^\circ$ 인 경우의 균열속도 M이 $\alpha=90^\circ$ 인 경우의 M보다 작아야 한다. 그러므로 길이 방향의 모드 III 응력을 받는 직교이방성 원판에서는 균열의 진행속도가 일정할때 $\alpha=90^\circ$ 인 경우가 $\alpha=0^\circ$ 인 경우보다 응력확대계수는 크다는 것을 알 수 있다.

Fig.4는 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 $a : D=1 : 3$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 균열이 x방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 균열 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하며 균열의 속도가 전단응력파의 속도(M=1)에 가까우면 응력확대계수는 0으로 감소함을 알 수 있다. 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 응력확대계수값도 증가하고 있음을 알 수 있다. Fig.2와 Fig.4를 비교하여 볼 때 Fig.2의 무차원 응력확대계

수값이 Fig.4의 무차원 응력확대계수보다 크다. 따라서 $a/D=0.25$ 인 경우의 무차원 응력확대계수 $[K_{II} / \tau(\pi a)^{1/2}]$ 가 $a/D=0.33$ 의 무차원 응력확대계수보다 크다. 그러나 실제의 응력확대계수 K_{II} 는 균열의 길이가 증가할수록 증가한다.

Fig.5는 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 $a : D=1 : 3$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha=0^\circ$ 인 경우에 균열이 x방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 균열의 진행속도가 약 $M < 0.70$ 에서는, 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 $\alpha=90^\circ$ 인 경우와는 반대로 응력확대계수값은 감소하며 또한 G_{LV}/G_{TV} 가 증가할수록 그 감소하는 폭은 적다는 것을 알 수 있다. 그리고 균열 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하며 균열의 속도가 전단응력파의 속도(M=1)에 가까우면 응력확대계수는 0으로 감소함을 알 수 있다. Fig.3과 Fig.5를 비교하면 균열의 속도가 약 $M < 0.4$ 에서는 Fig.3의 무차원 응력확대계수값이 Fig.5의 무차원 응력확대계수보다 크며 $M > 0.4$ 에서는 거의 비슷한 값을 가진다. 따라서 $\alpha=0^\circ$ 인 경우에도 $a/D=0.25$ 인 경우의 무차원 응력확대계수 $[K_{II} / \tau(\pi a)^{1/2}]$ 가 a/

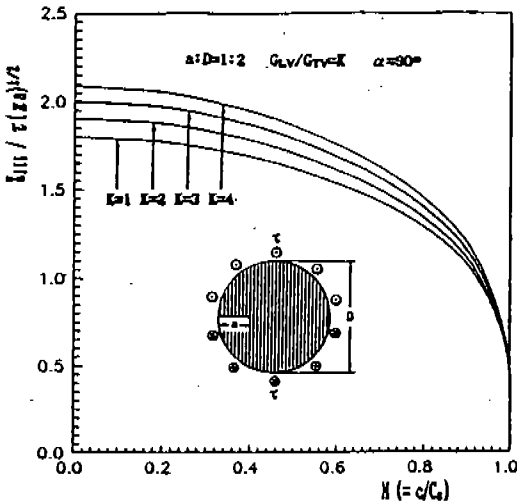


Fig.6 Normalized stress intensity factor with M(crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

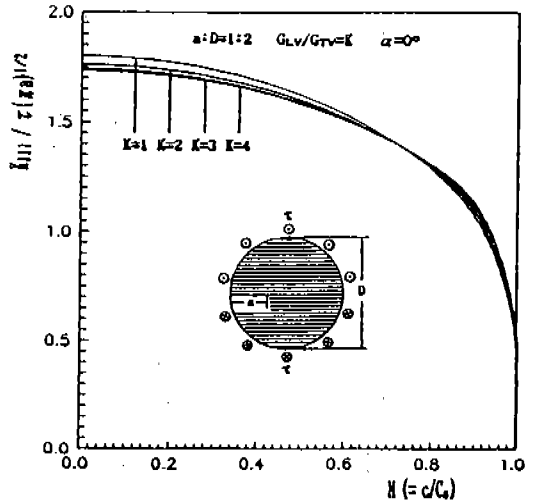


Fig.7 Normalized stress intensity factor with M(crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

$D=0.33$ 의 무차원 응력확대계수보다 크다. 그러나 실제의 응력확대계수 K_{II} 는 균열의 길이가 증가할수록 증가한다.

Fig.6은 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 $a : D=1 : 2$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 균열이 x방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 균열 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하며 균열의 속도가 전단응력파의 속도($M=1$)에 가까우면 응력확대계수는 0으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 응력확대계수 값은 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.7은 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 $a : D=1 : 2$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha=0^\circ$ 인 경우에 균열이 x방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 균열의 속도가 약 $M < 0.72$ 에서는 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 $\alpha=90^\circ$ 인 경우와는 반대로 응력확대계수값은 감소하며 또한 G_{LV}/G_{TV} 가 증가할수록 그 감소하는 폭은 적다는 것을 알 수 있다. 그리고 균열진행속도가 빠를수록 응력확대계수

값은 감소하며 균열의 속도가 전단응력파의 속도 ($M=1$)에 가까우면 응력확대계수는 0으로 감소함을 알 수 있다.

Fig.2에서 Fig.7의 결과에서 알 수 있듯이, $\alpha=90^\circ$ 인 경우나 $\alpha=0^\circ$ 인 경우에 관계없이, $a/D=0.25$ 에서 0.33으로 증가하면 무차원 응력확대계수값은 이방성의 비 K 에 관계없이 감소하며, $a/D=0.33$ 에서 0.50으로 증가하면 무차원 응력확대계수값은 증가한다. 따라서 무차원 응력확대계수값은 $a/D=0.25, 0.33$ 그리고 0.50중에서, $a/D=0.33$ 일때 최소값을 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 실제의 응력확대계수 K_{II} 값은 균열의 길이가 증가하면 증가한다.

Fig.8은 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 $a : D=1 : 1.5$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha=90^\circ$ 인 경우에 균열이 x방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 균열 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하나 균열의 속도가 전단응력파의 속도($M=1$)에 가까우면 응력확대계수값은 갑자기 증가하다가 0으로 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 균열의 길이가 증가하면 응력확대계수값의 감소하는 폭이 적어

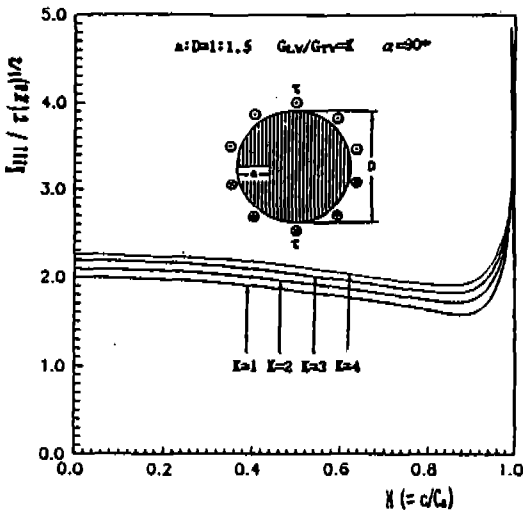


Fig.8 Normalized stress intensity factor with M (crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

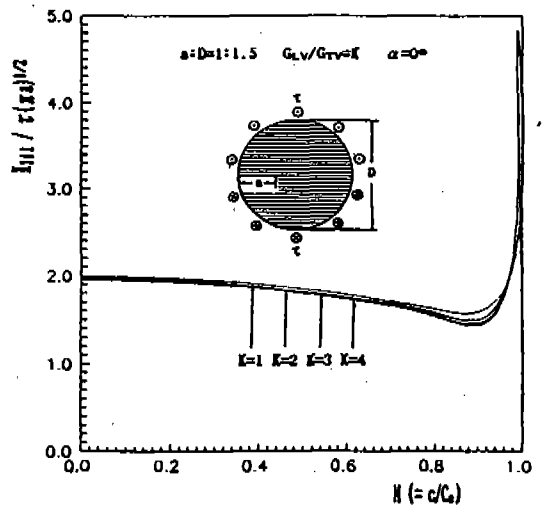


Fig.9 Normalized stress intensity factor with M (crack propagation velocity/shear stress wave velocity)

지고 균열의 길이와 직경의 비(a/D)가 약 0.58 이상인 경우에 균열의 속도가 전단응력파의 속도에 가까워지면 응력확대계수값은 갑자기 증가하다가 감소하는 현상이 나타난다. 그리고 균열의 길이가 직경의 길이에 근접하면($a/D > 0.9$) 응력확대계수값은 균열의 속도가 약 $M < 0.2$ 에서는 응력확대계수값이 감소하나 균열의 속도가 약 $M > 0.2$ 이상에서는 응력확대계수값이 증가하다가 균열의 속도가 전단응력파의 속도에 가까워지면 응력확대계수는 갑자기 증가하는 현상을 알 수 있다. 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 응력확대계수값은 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig.9는 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 $a : D = 1 : 1.5$ 이고 파이버와 균열이 이루는 각도 $\alpha = 0^\circ$ 인 경우에 균열이 x방향으로 등속으로 진행할 때 균열진행속도에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 1, 2, 3, 4로 증가하면 $\alpha = 90^\circ$ 인 경우와는 반대로 응력확대계수값은 감소하며 또한 G_{LV}/G_{TV} 가 증가할수록 그 감소하는 폭은 적다는 것을 알 수 있다. $\alpha = 0^\circ$ 의 경우와 마찬가지로 균열 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하나 균

열의 속도가 전단응력파의 속도($M=1$)에 가까우면 응력확대계수는 갑자기 증가하다가 0으로 감소함을 알 수 있다.

Fig.2~Fig.9까지에서 알 수 있듯이 균열의 속도가 응력확대계수에 미치는 영향은 $\alpha = 90^\circ$ 인 경우나 $\alpha = 0^\circ$ 인 경우에 관계없이 $a/D < 0.58$ 에서는 균열의 진행속도가 증가할수록 응력확대계수값은 감소하며 균열의 속도가 전단응력파의 속도에 도달하면 응력확대계수값은 0이 된다. 그러나 $a/D > 0.58$ 이상인 경우에는 균열의 속도가 전단응력파의 속도에 가까워지면 응력확대계수값은 갑자기 증가하다가 0으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 응력확대계수에 미치는 영향은 $\alpha = 90^\circ$ 인 경우에는 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 증가할수록 응력확대계수는 증가하고, $\alpha = 0^\circ$ 이고 $a/D < 0.58$ 인 경우에는 균열의 속도가 약 $M = 0.70 \sim 0.72$ 이하에서는 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 증가할수록 응력확대계수는 감소하고 균열의 속도가 약 $M = 0.70 \sim 0.72$ 근방에서는 이방성의 비에 관계없이 일정한 응력확대계수값을 가지며 약 $M = 0.70 \sim 0.72$ 이상에서는 반대로 G_{LV}/G_{TV} 가 증가할수록 응력확대계수값은 약간 증가한다. 그리고 $\alpha = 0^\circ$ 이고 a/D

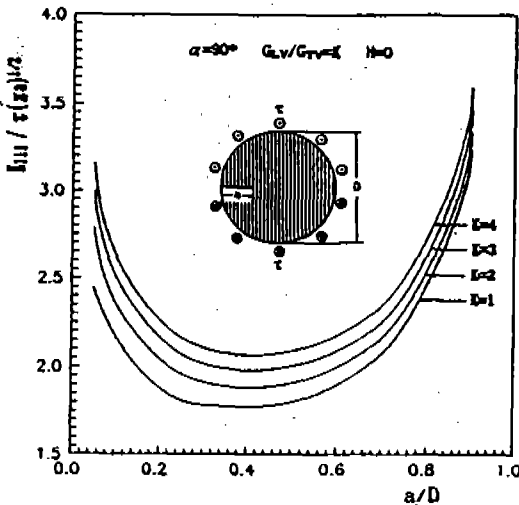


Fig.10 Normalized stress intensity factor with normalized crack length

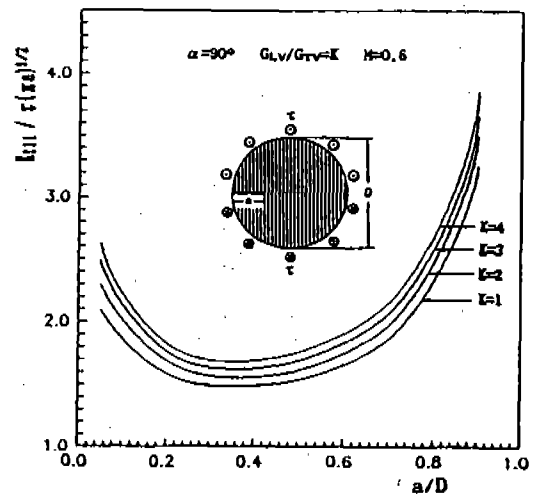


Fig.11 Normalized stress intensity factor with normalized crack length

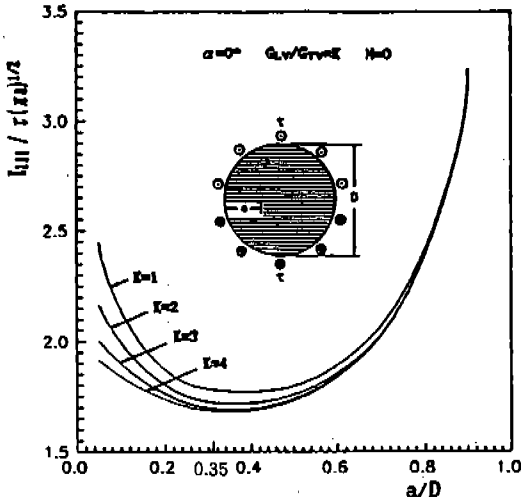


Fig.12 Normalized stress intensity factor with normalized crack length

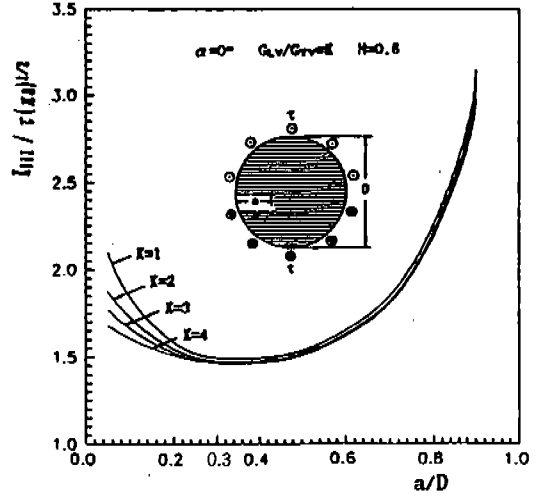


Fig.13 Normalized stress intensity factor with normalized crack length

>0.58인 경우는 이방성의 비가 증가할수록 응력확대계수값은 감소한다. 직교이방성 원판의 외부에 길이방향의 전단응력을 받아 판의 내부에 내재된 균열이 일정한 속도로 진행할 때 $\alpha=90^\circ$ 인 경우가 $\alpha=0^\circ$ 인 경우보다 응력확대계수값이 크다. 이것은 다시말해 동적모드 III 응력상태에서는 균열진행방향이 파이버와 수직인 경우가 수평인 경우보다 응력확대계수가 크다는 것을 알 수 있다.

Fig.10은 $\alpha=90^\circ$ 이고 균열 정지상태에서 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 a/D 의 변화에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 무차원 응력확대계수 $[K_{III} / \tau(\pi a)^{1/2}]$ 값은 이방성의 비에 관계없이 $a/D < 0.35$ 에서는 균열의 길이가 증가하면 감소하며, $a/D > 0.35$ 에서는 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제의 응력확대계수 K_{III} 는 균열의 길이가 증가할수록 증가한다.

Fig.11은 $\alpha=90^\circ$ 이고 균열의 속도 $M=0.6$ 에서 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 a/D 의 변화에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 무차원 응력확대계수 $[K_{III} / \tau(\pi a)^{1/2}]$ 값은 이방성의 비에 관계없이 $a/D < 0.3$ 에서는 균열의 길이가 증가할수록 감소하며, $a/D > 0.3$ 에서

는 균열의 길이가 증가하면 무차원 응력확대계수값은 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제의 응력확대계수 K_{III} 는 균열의 길이가 증가할수록 증가한다.

Fig.10과 Fig.11을 비교하면 $\alpha=90^\circ$ 이고, $K=1$ 에서 4로 증가할 때, $M < 0.6$ 인 경우이고 $a/D < 0.8$ 인 상태의 범위에서는 균열속도가 빠를수록 무차원 응력확대계수값은 감소한다. 균열정지 상태에서는 $a/D=0.35$ 에서 최소 무차원 응력값을 가지며, 균열진행상태에서는 $a/D=0.3$ 에서 최소 무차원 응력값을 가진다는 것을 알 수 있다.

Fig.12는 $\alpha=0^\circ$ 이고 균열 정지상태에서 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 a/D 의 변화에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 무차원 응력확대계수 $[K_{III} / \tau(\pi a)^{1/2}]$ 값은 이방성의 비에 관계없이 $a/D < 0.35$ 에서는 균열의 길이가 증가하면 무차원 응력확대계수는 감소하며, $a/D > 0.35$ 에서는 균열의 길이가 증가하면 무차원 응력확대계수값은 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제의 응력확대계수 K_{III} 는 균열의 길이가 증가할수록 증가한다.

Fig.13은 $\alpha=0^\circ$ 이고 균열의 속도 $M=0.6$ 에서 시편의 균열과 원판직경의 길이 비인 a/D 의 변

화에 대한 무차원 응력확대계수값을 나타내고 있다. 무차원 응력확대계수값 $[K_{\alpha} / \tau(\pi a)^{1/2}]$ 값은 이방성의 비에 관계없이 균열의 길이, 즉 $a/D < 0.3$ 에서는 균열의 길이가 증가하면 감소하며, $a/D > 0.3$ 에서는 균열의 길이가 증가하면 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제의 응력확대계수 K_{α} 는 균열의 길이가 증가할수록 증가한다.

Fig.12와 Fig.13을 비교하면 $\alpha=90^{\circ}$ 이고, $K=1$ 에서 4로 증가할 때, $M < 0.6$ 인 경우이고 $a/D < 0.9$ 상태의 범위는 균열속도가 빠를수록 무차원 응력확대계수값은 감소한다. 균열정지 상태에서는 $a/D=0.35$ 에서 최소 무차원 응력값을 가지며, 균열진행상태에서는 $a/D=0.3$ 에서 최소 무차원 응력값을 가진다. 그리고 균열의 속도가 빠를수록 응력확대계수값이 작다는 것을 알 수 있다.

Fig.10~Fig.11까지에서 알 수 있듯이 응력확대계수값은 $\alpha=90^{\circ}$ 인 경우가 $\alpha=0^{\circ}$ 인 경우보다 크며, 무차원 응력확대계수는 균열정지상태에는 $a/D < 0.35$ 의 범위에서, 균열이 $M=0.6$ 의 속도로 진행되는 경우에는 $a/D < 0.30$ 의 범위에서, 균열의 길이가 증가하면 무차원 응력확대계수는 감소하며 균열의 길이가 이들의 범위를 지나면 균열의 길이가 증가함에 따라 무차원 응력확대계수는 증가한다. 그러나 실제의 동적응력확대계수 K_{α} 는 균열의 길이가 증가하면 증가한다. 그리고 균열의 속도가 빠를수록 응력확대계수 K_{α} 는 균열의 길이가 증가하면 증가한다. 그리고 균열의 속도가 빠를수록 응력확대계수값이 감소하나, 균열의 길이가 상당히 증가한 경우, 즉 $a/D > 0.8$ ($\alpha=90^{\circ}$) 또는 $a/D > 0.9$ ($\alpha=0^{\circ}$)인 경우에는 균열의 속도가 빠를수록 응력확대계수값은 증가하다가 균열의 진행속도가 전단응력파의 속도 ($M=1$)가 되면 동적 응력확대계수값은 0가 된다. 그리고 a/D 의 값이 0.8 ($\alpha=90^{\circ}$) 또는 0.9 ($\alpha=0^{\circ}$)인 경우에는 균열의 진행속도 $M < 0.6$ 이면, 균열의 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하나, $M > 0.6$ 이면, 균열의 진행속도가 빠를수록 응력확대계수값은 증가한다. 그리고 앞에서 언급되었듯이, $a/D < 0.58$ 인 경우는 어떠한 균열전파속도 하에서도, 균열의 속도가 빠를

수록 응력확대계수값은 감소하며, $a/D > 0.58$ 인 경우는 균열전파속도가 어느 속도범위까지는 균열전파속도가 빠를수록 응력확대계수값은 감소하나, 어느 속도범위를 벗어나면 균열의 전파속도가 빠를수록 응력확대계수값은 증가한다. 그리고 이러한 균열전파속도의 범위는 a/D 가 증가할수록 낮아진다. 즉, 균열의 길이가 a/D 가 매우 증가한 경우에는 아주 느린 균열전파속도에서도 응력확대계수값은 증가한다고 하겠다. Fig.10~Fig.13까지에서 $M=0$ 와 $M=0.6$ 의 응력확대계수값의 차이, 즉 $a/D < 0.8$ ($\alpha=0^{\circ}$)에서는 $M=0$ 인 경우가 $M=0.6$ 인 경우보다 응력확대계수값이 더 크며, $a/D > 0.8$ ($\alpha=90^{\circ}$) 또는 $a/D > 0.9$ ($\alpha=0^{\circ}$)에서는 $M=0.6$ 인 경우가 $M=0$ 인 경우보다 응력확대계수값이 더 크다. 그리고 이러한 차이는 주로 균열전파속도 M 과 균열의 길이 a/D 에 기인한다고 하겠다.

5. 결 론

지금까지 직교이방성 원판의 상하경계에서 길이방향의 전단응력이 작용하여 원판에 내재된 외부균열이 등속으로 전파할 때 균열선단부근의 응력확대계수 K_{α} 연구의 결과에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구의 최소자승법 개념에 의한 응력확대계수 결정법은 응력확대계수를 구하는데 유용하게 사용할 수 있다.
- 2) $\alpha=90^{\circ}$ 인 경우의 응력확대계수값은 $\alpha=0^{\circ}$ 인 경우의 응력확대계수값보다 크다.
- 3) 균열의 길이와 원판직경의 길이 비인 a/D 가 약 0.58이하인 경우
 - 가) 균열의 속도가 빠를수록 응력확대계수 K_{α} 는 감소하며 균열전파속도가 전단응력파의 속도가 되면 응력확대계수값은 0이다.
 - 나) 이방성의 비 G_{Lv}/G_{Tv} 가 증가하면 $\alpha=90^{\circ}$ 인 경우에는 응력확대계수값이 증가하나 $\alpha=0^{\circ}$ 인 경우에는 일정속도 ($M=0.7\sim 0.72$) 이하에서는 감소하고 일정속도이상에서는 증가하는 경향을 나

타내고 있다.

- 4) 균열의 길이와 원판직경의 길이 비인 a/D 가 약 0.58이상인 경우
 - 가) 균열의 속도가 빠를수록 응력확대계수 K_{II} 는 감소한후 증가하며 균열전파속도가 전단응력파의 속도에 가까우면 응력확대계수값은 갑자기 증가한후 0이 된다.
 - 나) 이방성의 비 G_{LV}/G_{TV} 가 증가하면 $\alpha=90^\circ$ 인 경우에는 응력확대계수값이 증가하나 $\alpha=0^\circ$ 인 경우에는 감소한다.
- 5) 균열의 길이가 증가하면 균열정지상태에서는 $a/D < 0.35$ 의 범위에서, 균열이 $M=0.6$ 의 속도로 진행되는 경우에는 $a/D < 0.30$ 의 범위에서, 무차원 응력확대계수계수는 감소하며 균열의 길이가 이들의 범위를 지나면 균열의 길이가 증가함에 따라 무차원 응력확대계수는 증가한다. 그러나 실제의 동적응력확대계수 K_{II} 는 균열의 길이가 증가하면 증가한다.

참 고 문 헌

1. Achenbach, J. D. and Nishimura, N., 1985, "Effect of Inertia on Finite Near-Tip Deformation for Fast Mode III Crack Growth", J. Appl. Mech., Vol. 52, No. 3, pp. 281~286.
2. Zhang, X. S., 1985, "Solution of Rectangular Sheet Containing a Central Crack Propagation at Constant Velocity Under Antiplane Shear", Engng. Fract. Mech, Vol. 22, No. 2, pp. 181~188.
3. Zhang, X. S., 1987, "Solution of Rectangular Sheet with An Edge Crack Moving at Constant Velocity under Anti-Plane Shear", Engng. Fract. Mech. Vol. 27, No. 1, pp. 103~110.
4. Broberg, K. B., 1960, "The Propagation of Brittle Crack", Arkiv. Fysik, 18. No. 10, pp. 159~192.
5. Baker. B. R., 1962, "Dynamic Stress Created by a Moving Crack", ASME J. of Appl. Mech. Vol. 29, pp. 449~545.
6. Khanna, S. K. and Shulkla, A., 1994, "Development of Stress Field Equations and Determination of Stress Intensity Factor During Dynamic Fracture of Orthotropic Composite Materials", Engng. Fract. Mech. Vol. 47, No. 3, pp. 345~359.
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, 최선희, 1993, "직교이방성체의 동적응력확대계수에 관한연구(I) 동속균열 전파속도하에서 동적모드 I 과 모드 II 상태의 응력장, 변위장, 에너지해방률에 관한 연구" 대한기계학회 논문집 제17권 제 2호, pp. 313~330.
10. 이광호, 황재석, 최선희, 1993, "직교이방성체의 동적응력확대계수에 관한연구(II)" "동속균열 전파속도하에서 동적모드 III 상태의 응력장, 변위장, 에너지해방률에 관한 연구" 대한기계학회 논문집 제17권 제 2호, pp. 331~341.
11. Chiang, C. R., 1990, "Determination of the Dynamic Stress Intensity Factor of a Moving Crack by Numerical Method", Inter. J. of Fract. 45, pp. 123~130.
12. Sih, G. C., 1977, "Mechanics of Fracture 4(Elastodynamic Crack Problems)", Noordhoff International Pub., pp. 71~93.