

# 직교이방성체내의 진전 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 Hybrid 법 개발

신동철\* · 황재석\*\*

## Development of Dynamic Photoelastic Experimental Hybrid method for Propagating Cracks in Orthotropic Material

Dong-Chul Shin, Jai-Sug Hawong

**Key Words:** Hybrid Method(혼성법), Dynamic Photoelastic Experimental(동적 광탄성 실험), Propagating Crack(진전 균열), Orthotropic Material(등방성체), Isochromatics(등색선), Non-linear Least Square Method(비선형 최소 자승법), Dynamic Stress Intensity Factor(동적 응력확대계수)

### Abstract

In this paper, transparent dynamic photoelastic experimental hybrid method for propagating cracks in orthotropic material is developed. Using transparent dynamic photoelastic experimental hybrid method, we can obtain stress intensity factor and separate the stress components from only isochromatic fringe patterns without using isoclinics.

It is certified that the dynamic photoelastic experimental hybrid method is very useful for the problems of the dynamic fracture mechanics.

### 1. 서론

최근 들어 많은 복합재료가 개발되고 있으며, 또한 이 것은 여러 분야 자동차, 항공기 등에 많이 이용되고 있다. 따라서 많은 학자들에 의해서 복합재료에 대한 응력 해석 및 파괴 역학적 문제들이 연구되어 지고 있다. 그러나 이러한 연구의 대부분은 정적인 하중을 받는 경우가 대부분이며 동적인 경우에 대한 연구는 지금까지는 그리 많지 않은 것이 사실이다. 실질적인 파괴문제는 정적인 하중하에서 보다는 동적인 하중하에서 일어나는 경우가 대부분이므로 동적 하중을 받는 복합재료에 대한 연구가 이루어져야 한다.

동적인 경우의 대해 여러 학자들에 의해서 연구가 되어왔는데 Radok<sup>(1)</sup>은 등방성체내에서 일

정 속도로 진전하는 균열의 동적인 문제에 대한 균열 선단 응력장과 변위장을 이론적으로 연구하였으며, Freund<sup>(2)</sup>는 모드-II 하중하의 동적 균열 전파에 대해서 연구하였고 이를 Nilsson<sup>(3)</sup>이 일반화 시켰다. Achenbach<sup>(4)</sup> 등은 수치적인 방법으로 균열이 x축 방향으로 일정한 속도로 진행되는 경우의 균열선단의 응력장과 변위장을 연구하였다.

본 연구에서는 직교이방성체 내에서 일정한 속도로 진전하는 균열에 대해 동적 광탄성 실험을 행하여 동적 등색선 무늬를 얻고 이를 비선형 최소자승법을 이용하여 선단 응력장 및 변위장과 동적 확대계수를 구할 수 있는 Hybrid법을 개발하고 이 것의 유효성을 확인하고자 한다.

### 2. 동적 하중하의 직교이방성체내의 선단 응력장

선형 탄성적 등방성체의 평면에서 일정한 균열 선단 속도  $c$ 를 가진 균열의 동적 전파에 대하여

\* 영남대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 회원, 영남대학교 기계공학과

생각해보자. X와 Y를 물체내의 균열끝단을 원점으로 하는 고정 직교 좌표라 두면 Y=0는 크랙의 면으로 정의되며 x=X-ct 처럼 움직이는 크랙 끝단에 고정된 이동 좌표계 (x, y)라 하면 질점에 대한 거동 방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_{ij,i} = \rho c^2(t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} = R \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \quad (1)$$

또한 평면 응력 및 평면 변형률에 대한 응력-변형률 관계식은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = a \sigma \quad (2)$$

$$a = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{12} & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 \\ b_{12} & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{66} \end{bmatrix}$$

여기서  $a = a_{ij}$ 은 평면 응력상태에 대한 것이고,  $a = b_{ij}$ 는 평면 변형률에 대해 정의된 것이다. 식 (1)의 오른쪽 항에서 직교이방성체에 대한 미분식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon_{11}) = \frac{\partial}{\partial x}(a_{11}\sigma_{11} + a_{22}\sigma_{22}) \quad (3.a)$$

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}(a_{66}\sigma_{12}) - \frac{\partial}{\partial y}(a_{11}\sigma_{11} + a_{22}\sigma_{22}) \quad (3.b)$$

복소 변수  $z = x + \mu y$ 라 두고 식 (3)을 (1) 식에 대입하면

$$(1 - a_1 R) \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial z} - a_2 R \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial z} + \mu \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial z} = 0$$

$$a_1 R \mu \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial z} + (1 + a_2 R) \mu \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial z} + (1 - a_6 R) \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

그러므로, Airy 응력 함수( $\Phi$ )를 사용하여 (4) 식을 만족하는 응력 성분들을 가정하면,

$$\sigma_{11} = \{a_2 AR + (1 + a_2 R)\mu^2\} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}$$

$$\sigma_{22} = \{A(1 - a_1 R) - a_1 R \mu\} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{12} = \{-[1 + (a_2 - a_1)R]\mu\} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}$$

여기서  $A = (1 - a_6)R$ 이다.

직교이방성체의 응력-변형률 관계식 (2)를 2차원 적합 방정식에 대입하면

$$p_3 \Phi,_{2222} + p_2 \Phi,_{1122} + p_1 \Phi,_{1111} = 0 \quad (6)$$

$$p_3 = a_1$$

$$p_2 = 2a_2 + a_6 - R[a_1 a_6 + a_1 a_4 - a_2^2]$$

$$p_1 = a_4 - R[a_4 a_6 + a_1 a_4 - a_2^2] + R^2 a_6 [a_1 a_4 - a_2^2]$$

크랙선단 속도  $\alpha(t)$ 가 0일 때, 방정식 (6)은 정적인 문제에 대한 Lekhnitskii<sup>(5)</sup>의 식과 같다.

위의 식이 실근을 가지게 되는 경우는 균열진전 속도가 직교이방성 재료에서 가능한 다양한 파의 속도에 상응하는 값에 관계되는 것<sup>(4)</sup>이며 일반적인 경우의 균열 진전 속도는 이러한 값에 미치지 못한다. 본 연구에서 연구하는 경우의 크랙의 진전 속도는 실근을 가지지 않을 정도의 속도이다( $\alpha(t) < C_R$ ). 그러므로 방정식 (6)은 별개의 두 개의 복소수 근을 가진다고 가정하였고 만일 식 (6)이 별개의 두 쌍의 복소수 근  $\mu_1, \bar{\mu}_1$ 과  $\mu_2, \bar{\mu}_2$ 를 가진다면, 에어리 응력함수식은 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi = \text{Real} \left( \int \Omega_1 dz_1 + \int \Omega_2 dz_2 \right) \quad (7)$$

여기서  $\Omega_1 = \phi(z_1)$ ,  $\Omega_2 = \psi(z_2)$ ,  $z_i = x + \mu_i y$  ( $i = 1, 2$ )이며, 식 (7)에서 편의를 위하여 응력장이  $\Omega_i'$ 와  $\Omega_i''$ 을 각각  $\Omega_i$ 와  $\Omega_i'$ 의 향으로 표현하였다<sup>(5)</sup>. 식 (7)은 정적인 문제의 이방성 재료에 대한 Lekhnitskii의 복소 변수식<sup>(5)</sup>과 동일한 형태이다. 식 (7)을 식 (5)에 대입하면 각 응력성분은 식 (8)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \text{Real} (S \underline{\Omega}) \quad (8)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} E_1 & E_2 \\ F_1 & F_2 \\ G_1 & G_2 \end{bmatrix}, \underline{\Omega} = \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \end{bmatrix}$$

$$E_1 = (1 + a_2 R)\mu_1^2 + a_2 AR$$

$$E_2 = (1 + a_2 R)\mu_2^2 + a_2 AR$$

$$F_1 = -[a_1 R \mu_1^2 - (1 - a_1 R)A]$$

$$F_2 = -[a_1 R \mu_2^2 - (1 - a_1 R)A]$$

$$G_1 = -(1 - (a_1 - a_2)R)\mu_1$$

$$G_2 = -(1 - (a_1 - a_2)R)\mu_2$$

$\Omega_i$ 를 식 (9)와 같은 복소 멱급수로 나타낼 수

있다<sup>(1,3,4)</sup>.

$$\phi(z_1) = \sum_n A_n z_1^{\lambda_n} = \sum_n (A_n^0 + iA_n^*) r_1^{\lambda_n} e^{i\lambda_n \theta_1} \quad (9.a)$$

$$\psi(z_2) = \sum_n B_n z_2^{\lambda_n} = \sum_n (B_n^0 + iB_n^*) r_2^{\lambda_n} e^{i\lambda_n \theta_2} \quad (9.b)$$

여기서,  $\lambda_n$ 은 실수 고유치(real eigen value)이며,  $A_n^0$ 와  $A_n^*$ 등은 각각 복소 상수  $A_n$ 의 실수부와 허수부를 나타내는 것이다.

크랙 표면( $\theta = \pm\pi$ )에 대해 식 (9)의 표면력 자유 조건(traction free condition)을 만족하는 일반적인 고유함수 해를 찾아보자.

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} = D_1\phi' + D_2\bar{\phi}' + D_3\psi' + D_4\bar{\psi}' = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} D_1 &= F_1 + iG_1, & D_2 &= F_1 - iG_1 \\ D_3 &= F_2 + iG_2, & D_4 &= F_2 - iG_2 \end{aligned}$$

여기서,  $\bar{\phantom{x}}$ 는 복소수 공액(complex conjugate)을 의미하며,  $D_j$  ( $j=1,2,3,4$ )는 다음과 같다.

식 (9)를 식 (10)에 대입하여  $e^{\pm i\lambda_n \theta}$ 에 대해서 정리한 후, 이러한 방정식이 유효해(non-trivial solution)을 가지기 위한 조건으로부터 고유치를 계산하면 식 (11)와 같다.

$$\lambda_n = \frac{n}{2} \quad (n=0,1,2,3,\dots) \quad (11)$$

고유치  $\lambda_n = 1/2$ 가  $1/\sqrt{r}$  계수의 특이 응력장을 뜻하며, 0(zero)의 고유치는 강체 거동을 의미한다. 이들 고유치를 식 (10)에 대입하면 복소 상수에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$B_n^0 = -h(n)A_n^0, \quad B_n^* = -h(\bar{n})A_n^* \quad (12)$$

$$h(n) = \begin{cases} G_1/G_2 = \mu_1/\mu_2 & : n \text{ odd} \\ F_1/F_2 & : n \text{ even} \end{cases} \quad (13)$$

$$\bar{n} = n+1$$

응력 성분들을 구하기 위해 식 (12)를 식 (9)에 대입하고 1차 미분을 하면,

$$\phi'(z_1) = \sum_{n=1}^N \frac{n}{2} \{A_n^0 + iA_n^*\} z_1^{\frac{n}{2}-1} \quad (14)$$

$$\psi'(z_2) = - \sum_{n=1}^N \frac{n}{2} \{h(n)A_n^0 + ih(\bar{n})A_n^*\} z_2^{\frac{n}{2}-1} \quad (15)$$

식 (14), (15)를 식 (8)에 대입하면 균열 선단 근방의 응력장은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ E_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - E_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ &\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ E_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - E_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ \sigma_{22} &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ F_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - F_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ &\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ F_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - F_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ \sigma_{12} &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ G_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - G_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ &\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ G_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - G_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

이를 광탄성 실험에 적용하기 위해 식 (17)의 광응력 법칙에 대입하면

$$D = \left( \frac{N_f}{t} \right)^2 = \left( \frac{\sigma_{11}}{f_{11}} - \frac{\sigma_{22}}{f_{22}} \right)^2 + \left( 2 \frac{\sigma_{12}}{f_{12}} \right)^2 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} D &= \left\{ \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left[ l_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - l_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right. \\ &\quad \left. - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left[ l_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - l_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right\}^2 \\ &\quad + 4 \left\{ \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left[ m_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - m_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right. \\ &\quad \left. - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left[ m_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - m_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right\}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서

$$\begin{aligned} l_1 &= \left( \frac{E_1}{f_{11}} - \frac{F_1}{f_{22}} \right), \quad l_2 = \left( \frac{E_2}{f_{11}} - \frac{F_2}{f_{22}} \right), \\ m_1 &= \frac{G_1}{f_{12}}, \quad m_2 = \frac{G_2}{f_{12}} \end{aligned}$$

식 (18)는 재료와 균열 성장 속도 및 위치가 결정되면  $A_n (= A_n^0 + iA_n^*)$ 만의 함수이다. 그러므로 식 (18)에 광탄성 실험의 비선형 최소자승법<sup>(6)</sup>을 적용하면 복소 계수  $A_n$ 을 구할 수 있다. 이렇게 구한  $A_n$ 을 식 (16)에 대입하면 응력 성분을 구할 수 있다. 이와 같이 광탄성 실험의 데이터를 이용하여 응력 함수를 구하고 응력 성분도 분리

할 수 있으며 동적 응력 확대 계수도 구할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이와 같은 방법을 직교이방성체내의 진진 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리드 법이라 하며, 동적 응력 확대 계수는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y |_{\theta=0} \quad (19)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{xy} |_{\theta=0} \quad (20)$$

그러므로 동적 응력 확대 계수와 상수들 간의 관계식을 얻을 수 있다.

$$K_I = \sqrt{2\pi Re} \left[ \frac{\mu_2 F_1 - \mu_1 F_2}{2\mu_2} \right] A_1^0 \quad (21)$$

$$K_{II} = -\sqrt{2\pi Im} \left[ \frac{G_1 F_2 - G_2 F_1}{2F_2} \right] A_1^* \quad (22)$$

### 3. 실험 및 실험방법

#### 3.1 시편 및 실험장치

시편의 제작 과정은 주형상자에 에나멜이 코팅된 구리 파이버를 직물 리드(reed)를 사용하여 일정한 간격으로 원하는 두께의 중앙에 위치하도록 장착하고, 시바-가이거(Ciba-Geigy)사의 아랄다이트(Araldite-B41)을 주재료 하고 경화제 HT903을 중량비 10:3의 비율로 배합한 에폭시 수지를 부어 성형한 구리강하 에폭시 복합체(copper fiber epoxy composite: C. F. E. C.)이다. 이러한 시편에 동적 하중을 가하기 위한 하중장치는 Fig. 1과 같으며, 본 장치로 가할 수 있는 변형율 속도(strain rate)는  $31.637 \text{ s}^{-1}$ 이다. 이 장치에 적당한 용량의 로드셀(Load-cell)을 장착하였으며, 시편에 발생하는 동적 응력상태를 등색선 무늬 형태로 볼 수 있도록 크랭크-살딘형식 카메라 시스템(Cranz-Schardin pattern camera system)인 동적 광탄성 실험장치를 사용하였다. 이 카메라 장치는 프레임율이 106 frame/sec로써 총 16개의 상(image)을 얻을 수 있으며 광원의 스파킹(sparking) 시간을  $1 \mu \text{ sec}$ 단위까지 조정할 수 있다.

#### 3.2 실험 방법

본 연구에서 행한 실험 과정은 다음과 같다.

(1) 시편을 제작하고 균열 주위에 은분 페인트(silver paint)를 칠하여 은분 페인트 양쪽에 전선



1. Dynamic biaxial loading frame 3. Multi-spark light source  
2. Field lens & Polarizer & Quarter wave plate  
4. Multi-spark control box 5. Multi-camera 6. Load-cell  
7. Accumulator 8. Dynamic amplifier 9. Oscilloscope

Fig. 1 Dynamic loading device

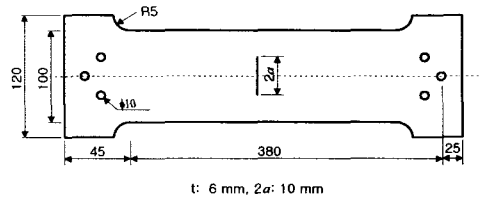


Fig. 2 Schematic of the specimen

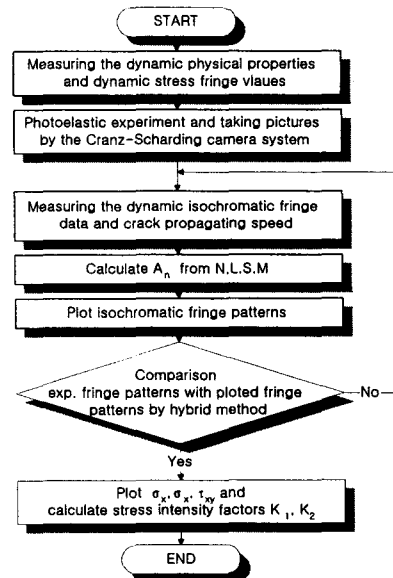


Fig. 3 Flow-chart of dynamic photoelastic hybrid method

을 연결하고 이 전선을 트리거(trigger) 장치가 장착된 제어박스로 연결한다.

(2) 시편을 하중장치에 장착하고 기계적 동조장치를 사용하여 균일한 접촉이 되도록 한다.

(3) 하중장치에 장착된 로드셀을 오실로스코프에 연결하고 멀티 스파크 광원(multi-spark light source)의 전압을 조정한다.

(4) 충격 하중장치에 적당한 유압을 조절하고 멀티 카메라에 X-선 필름을 장착한다.

(5) 실험실의 전등을 끄고 충격하중을 가한다.

(6) X-선 필름을 현상하여 동적 파괴현상을 나타내는 등색선 무늬를 얻는다.

그리고 본 연구에서 사용된 동적 광탄성 실험의 하이브리드 법의 플로차트는 Fig. 3과 같다.

#### 4. 실험결과 및 검토

본 연구에서 개발된 직교이방성체 진전균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리드 법의 유효성을 확인하기 위해 Fig. 1의 장치를 사용하여 1축(uniaxial)의 동적 인장하중을 가하여 이 때 얻어지는 등색선 무늬를 사용하여 하이브리드 법의 유효성을 확인하였다.

Fig. 4는 시간에 대한 균열전단 속도를  $C_R$ (레이프 속도)로 무차원화 하여 나타낸 것이다. 균열길이는 사진현상을 통하여 측정하였으며 균열전파시간은 광원의 스파킹 시간간격으로써 측정하였다. Fig. 4에서 보듯이 두 경우 모두 균열이 진전함에 따라 균열전단의 속도가 아주 조금씩 증가하고 있음을 볼 수 있으나 최대치와 최소치의 차이가 크지 않았다. Fig. 4에서 본 연구에서의 균열전파속도가 일정하다고 가정할 수 있으며 균열 전파속도는 402.6 m/s 로 하였으며, 초기 충격하중은 9515.7 N이다.

Fig. 5는 균열진전에 따른 실제 동적 광탄성 무늬와 하이브리드 법에 의해 구하여진 응력함수를 사용하여 구한 등색선 무늬이며, 여기서 보듯이 균열이 진전하더라도 등색선 무늬 형태가 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 이러한 점은 정적인 하중하에서 균열 길이가 커짐에 따라 무늬차수가 더 많이 발생하는 것과는 다른 현상이다. Fig. 5에서 보듯이 실제 동적 광탄성 무늬와 하이브리드 법에 의해 구하여진 등색선 무늬가 균열선단에서 멀리 떨어질수록 잘 일치하지 않으나, 균열선단 부근에서는 비교적 잘 일치하고 있다. 이것은 실

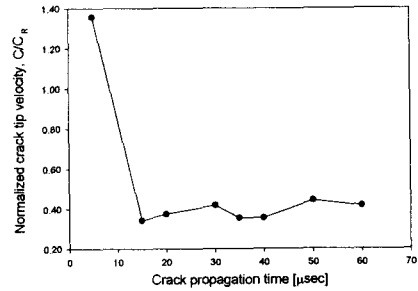
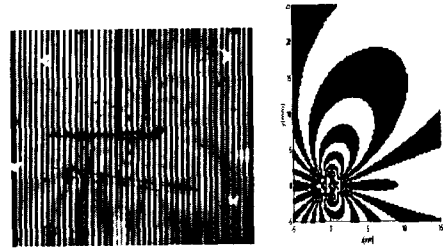
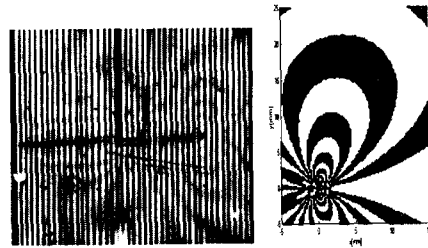


Fig. 4 Variations of crack tip velocity



(a) 10 μ sec



(b) 60 μ sec

Fig. 5 Actually dynamic isochromatic photograph and graphic isochromatics

제 등색선 무늬가 희미하여 정확한 크랙선단을 찾을 수 없기 때문에 발생한 것이라고 생각된다. 그러므로 이러한 점을 감안하면 두 무늬형태가 균열선단 부근에 잘 일치하고 있으므로, 본 연구에서 유도한 직교이방성체내의 진전균열에 대한 선단 응력장이 유효하며, 또한 본 연구에서 개발된 직교이방성체 동적 광탄성 실험의 하이브리드 법이 유효하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 균열전파시간에 대해 초기 충격하중과 초기 균열길이( $2a=10$  mm)의 응력확대계수  $K_0(=\sigma_0\sqrt{\pi a})$ 로 무차원화한 응력확대계수를 나타낸 것이다.  $K_1/K_0$  값은 균열길이가 증가함에 따라 차츰 증가하다가 감소함을 볼 수 있다. 그러나 이러한 현상은 정적인 균열인 경우가 균열길이에 대

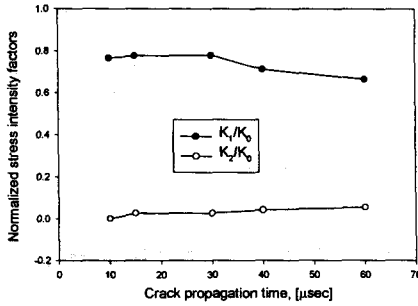


Fig. 6 Variations of dynamic stress intensity factors

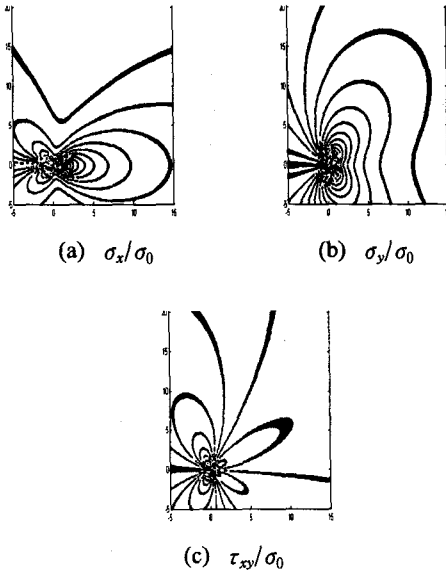


Fig. 7 Contours of normalized stress components

해  $K_{II}/K_0$  값이 민감하게 증가하는 것과는 차이를 나타낸다. 이 것으로 보아 동적인 경우의 응력확대계수는 정적인 경우의 응력확대계수보다도 균열길이의 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 트리거 된 후  $10 \mu \text{ sec}$  일 때 하이브리트 법으로 구한 복소계수를 사용하여 각 응력성분들을 가하여진 초기 응력으로 무차원화하여 0.1단위로 나타낸 것이다. Fig. 7에서 응력성분들은 균열표면에서의 표면력 자유 조건(traction-free condition)을 만족하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 직교이방성체내의 진전균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리트 법이 유효하다는 것을 알 수 있다. 또한 나타난 응력성분들은 정적인 경우의 응력성분<sup>(7)</sup>과 유사함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.  
(1) 직교이방성체내의 진전 균열에 대한 선단 응력장을 유도하였으며 그 유효성을 확인하였다.

(2) 직교이방성체내의 진전하는 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리트법이 개발되었으며, 그 유효성이 확인되었다. 그리고 동적 광탄성 실험의 하이브리트법을 이용하면 동적 응력확대계수와 동적응력성분도 구할 수 있다.

(3) 본 논문에서 연구된 직교이방성체의 진전 균열의 응력확대계수  $K_I/K_0$  값은 균열길이가 증가함에 따라 증가하다 감소하며, 직교이방성체의 동적 응력확대계수에 대한 균열길이의 영향은 정적인 경우보다 적다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제(과제번호: 97-0200-04-01-3)의 일부로써 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Radok, J. R. M., 1956, "On the Solution of Problems of Dynamic Plane Elasticity", Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 14, pp. 289-298.
- (2) Freund, L. B., 1976, "Dynamic Crack Propagation", Mech. Fract. Vol. 19, edited by F. Erdogan, ASME, pp. 105-134.
- (3) Nillion, F., 1977, "The Infinite Strip with a Semi-infinite Crack Static and Dynamic Considerations", SM Archives, Vol. 2, No. 2, pp. 205-261.
- (4) Achenbach, J. D. and Bazant, Z. P., 1972, "Elastodynamic Near-Tip Stress and Displacement Fields for Rapidly Propagation Crack in Orthotropic Materials", J. of Appl. Mech. Vol. 42, pp. 183-191.
- (5) Nisioka, T. and Atluri, S.N., 1983, "Path-Independent Intergrals, Energy Release Rate, and General Solutions of Near-tip Field in Mixed-Mode Dynamic Fracture Mechanics", Engng. Frac. Mech., Vol. 18, pp.1-22.
- (6) 신동철, 황재석, 2000, "등방성체용 동적 광탄성 실험의 Hybrid 법 개발에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 A권(투고중).
- (7) 신동철, 황재석, 남정환, 이효재, 권오성, 1998, "직교이방성체 파괴역학에 투과형 광탄성 실험의 하이브리트 법 적용, 대한기계학회논문집 A권 제22권 제6호, pp. 1036-1044.