

직교이방성체내의 진전 균열에 대한 동적 광탄성 실험 Hybrid 법 개발

신동철* · 황재석* · 성종현**

(2002년 6월 24일 접수, 2003년 6월 21일 심사완료)

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

Dong-Chul Shin, Jai-Sug Hawong and Jong-Hyun Sung

Key Words: Hybrid Method(혼성법), Dynamic Photoelastic Experiment(동적 광탄성 실험), Propagating Crack(진전 균열), Orthotropic Material(등방성체), Isochromatics(등색선), Non-linear Least Squares 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 was 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. When crack is propagated with constant velocity, the contours of stress components in the vicinity of crack tip in orthotropic material are similar to those of isotropic material or orthotropic material with stationary crack under the static load. Dynamic stress intensity factors are decreased as crack growths. It was certified that the dynamic photoelastic experimental hybrid method was very useful for the analysis of the dynamic fracture mechanics.

1. 서론

최근 자동차, 항공기 등에 많은 복합재료가 개발되어 이용되고 있으며, 이에 따라 많은 학자들에 의해 복합재료에 대한 응력 해석 및 파괴 역학적 문제들이 연구되어 지고 있다. 그리고 실질적인 파괴문제는 정적인 하중하에서 보다는 동적인 하중하에서 일어나는 경우가 대부분이다.

동적인 경우에 대해 여러 학자들에 의해서 연구가 되어왔는데 Radok⁽¹⁾은 등방성체내에서 일정 속도로 진전하는 균열의 동적인 문제에 대한 균열 선단 응력장과 변위장을 이론적으로 연구하였

으며, Freund⁽²⁾는 모드-II 하중을 받는 등방성체내 균열의 동적 균열전파에 대해서 연구하였고 이를 Nilsson⁽³⁾이 일반화 시켰다. 또한 이억섭 등^(4,5)은 알루미늄 5803에서의 균열정지현상에 대하여 연구하였으며, 동적 광탄성실험을 통하여 등방성체내의 응력이완 노치부의 접촉특이응력에 관한 연구도 수행되었다.

직교이방성체내의 동적 진전균열에 대해서는 Achenbach⁽⁶⁾ 등이 수치적인 방법으로 균열이 선단에서 x축 방향으로 등속으로 진행되는 균열의 선단 응력장과 변위장을 연구하였다. 이광호, 황재석 등도⁽⁷⁾ 직교이방성체내의 동적 전파균열에 대한 선단 응력장과 변위장 및 동적 응력확대계수를 유도하였다. 그러나 직교이방성체내의 동적 전파균열에 대한 선단 응력장과 변위장 및 동적 응력확대계수에 대한 이러한 연구는 단순한 이론

* 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : dcshin12@yumail.ac.kr

TEL : (053)810-2578 FAX : (053)813-3703

* 회원, 영남대학교 기계공학부

** 영남대학교 대학원 기계공학부

적인 전개에 그친 경우가 대부분이며, 또한 이론식의 표현이 복잡하여 그 적용과 응용이 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 이론의 적용과 응용에 용이한 직교이방성체 내에서 일정한 속도로 진전하는 균열의 맥급수 형태로 표현된 선단 응력장을 유도하고, 이 것과 동적 광탄성 실험을 행하여 얻은 동적 등색선 무늬 및 비선형 최소자승법을 이용하여 선단 응력장과 동적 확대계수를 구할 수 있는 직교이방성체내의 동적 진전균열에 대한 동적 광탄성 실험 하이브리드(Hybrid) 법을 개발하고 이 것의 유효성을 확인하고자 한다.

2. 직교이방성체내 등속 진전균열의 선단 응력장

본 연구에서는 선형 탄성적 직교이방성체의 평면에서 X와 Y는 물체내의 초기균열끝단을 원점으로 하는 고정 직교좌표계라면 Y=0는 크랙의 면으로 정의되며, 균열이 일정한 속도 c로 x축을 따라 전파될 때, 즉 x=X-ct로 움직이는 균열 끝단을 원점으로 하는 이동 좌표계를 x와 y라 하자. 이 때, 질점에 대한 거동 방정식은 다음과 같다.⁽¹⁾

$$\rho \ddot{u}_{i,j} = \rho c^2(t) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} = R \frac{\partial^2 u_i}{\partial x^2} \quad (1)$$

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

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{a} \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{a} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_2 & a_4 & a_5 \\ a_3 & a_5 & a_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} \end{bmatrix}$$

여기서 $\boldsymbol{a} = a_{ij}$ 은 평면응력상태, $\boldsymbol{a} = b_{ij}$ 는 평면 변형률에 대해 정의된 것으로, 직교이방성체인 경우는 $a_3 = a_5 = 0$ 이다.

식 (1)의 오른쪽 항에서 직교이방성체에 대한 미분식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_{11}) = \frac{\partial}{\partial x} (a_1 \sigma_{11} + a_2 \sigma_{22}) \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_{12} - \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) = \frac{\partial \gamma_{12}}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} (a_6 \sigma_{12}) - \frac{\partial}{\partial y} (a_1 \sigma_{11} + a_2 \sigma_{22}) \end{aligned} \quad (3b)$$

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

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

그러므로, Airy 응력 함수(Φ)를 사용하여 (4) 식을 만족하는 응력 성분들을 가정하면,

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \{ a_2 A R + (1 + a_2 R) \mu^2 \} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \\ \sigma_{22} &= \{ A(1 - a_1 R) - a_1 R \mu \} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \\ \sigma_{12} &= \{ -[1 + (a_2 - a_1) R] \mu \} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $A = (1 - a_6) R$ 이다.

일반적인 2차원 적합 방정식은 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$2\varepsilon_{12,12} = \gamma_{12,12} = \varepsilon_{11,22} + \varepsilon_{22,11} \quad (6)$$

직교이방성체의 응력-변형률 관계식 (2)를 식 (6)에 대입하면

$$p_3 \Phi_{,2222} + p_2 \Phi_{,1122} + p_1 \Phi_{,1111} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} p_3 &= a_1 \\ p_2 &= 2a_2 + a_6 - R[a_1 a_6 + a_1 a_4 - a_2^2] \\ p_1 &= a_4 - R[a_4 a_6 + a_1 a_4 - a_2^2] + R^2 a_6 [a_1 a_4 - a_2^2] \end{aligned}$$

크랙선단 속도 $c(t)$ 가 0일 때, 방정식 (7)은 정적인 문제에 대한 Lekhnitskii⁽⁸⁾의 식과 같다.

위의 식이 실근을 가지게 되는 경우는 균열진전 속도가 직교이방성 재료에서 가능한 다양한 파의 속도에 상응하는 값에 관계되는 것⁽⁶⁾이며 일반적인 경우의 균열 진전 속도는 이러한 값에

미치지 못한다. 본 연구에서 연구하는 경우의 크랙의 진전 속도는 실근을 가지지 않을 정도의 속도이다($\alpha(t) < C_R$, C_R : 레이레이파의 속도). 그러므로 방정식 (7)은 별개인 두 개의 복소수 근을 가진다고 가정하였고 만일 식 (7)이 별개의 두 쌍의 복소수 근 $\mu_1, \bar{\mu}_1$ 과 $\mu_2, \bar{\mu}_2$ 를 가진다면, 에어리 응력함수식은 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \text{Real} \left(\int \Omega_1 dz_1 + \int \Omega_2 dz_2 \right) \quad (8)$$

여기서 $\Omega_1 = \phi(z_1)$, $\Omega_2 = \psi(z_2)$, $z_i = x + \mu_i y$ ($i=1,2$)이며, 식 (8)에서 편의를 위하여 응력장이 Ω_i' 와 Ω_i'' 을 각각 Ω_i 와 Ω_i' 의 항으로 표현하였다.⁽⁵⁾ 식 (8)은 정적인 문제의 이방성 재료에 대한 Lekhnitskii의 복소 변수식⁽⁶⁾과 동일한 형태이다.

식 (8)을 식 (5)에 대입하면 각 응력성분은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\sigma = \text{Real} (S \Omega) \quad (9)$$

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

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

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

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

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

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

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

$\Omega_i(\phi(z_1), \psi(z_2))$ 를 식 (10)과 같은 복소 멱급수로 나타낼 수 있다.^(1,3,6)

$$\phi(z_1) = \sum_{n=0}^N A_n z_1^{\lambda_n} = \sum_n (A_n^0 + iA_n^*) r_1^{\lambda_n} e^{i\lambda_n \theta_1} \quad (10a)$$

$$\psi(z_2) = \sum_{n=0}^N B_n z_2^{\lambda_n} = \sum_n (B_n^0 + iB_n^*) r_2^{\lambda_n} e^{i\lambda_n \theta_2} \quad (10b)$$

여기서 λ_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 (10)의 표면력

자유 조건(traction free condition)을 만족하는 일반적인 고유함수의 조건은 식 (11)과 같다.

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} = D_1 \phi' + D_2 \bar{\phi}' + D_3 \psi' + D_4 \bar{\psi}' = 0 \quad (11)$$

여기서 $-$ 는 복소수 공액(complex conjugate)을 의미하며, 식 (11)을 만족하는 D_j ($j=1,2,3,4$)는 다음과 같다.

$$D_1 = F_1 + iG_1, \quad D_2 = F_1 - iG_1$$

$$D_3 = F_2 + iG_2, \quad D_4 = F_2 - iG_2$$

식 (10)을 식 (11)에 대입하여 $e^{\pm i\lambda_n \pi}$ 에 대해서 정리한 후, 이러한 방정식이 유효해(non-trivial solution)을 가지기 위한 조건으로부터 고유치를 계산하면 식 (12)와 같다.

$$\lambda_n = \frac{n}{2} \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (12)$$

고유치 $\lambda_n = 1/2$ 가 $1/\sqrt{r}$ 계수의 특이 응력장을 뜻하며, 0(zero)의 고유치는 강체 거동을 의미한다. 이들 고유치를 식 (11)에 대입하면 복소 상수에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$B_n^0 = -h(n) A_n^0, \quad B_n^* = -h(\bar{n}) A_n^* \quad (13)$$

여기서, $\bar{n} = n+1$

$$h(n) = \begin{cases} \frac{G_1}{G_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} & : n \text{ odd} \\ \frac{F_1}{F_2} & : n \text{ even} \end{cases} \quad (14)$$

응력 성분들을 구하기 위해 식 (13)을 식 (10)에 대입하고 1차 미분을 하면,

$$\phi'(z_1) = \sum_{n=1}^N \frac{n}{2} \{A_n^0 + iA_n^*\} z_1^{\frac{n}{2}-1} \quad (15)$$

$$\psi'(z_2) = - \sum_{n=1}^N \frac{n}{2} \{h(n)A_n^0 + ih(\bar{n})A_n^*\} z_2^{\frac{n}{2}-1} \quad (16)$$

식 (15), (16)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 멱급수 형태로 표현된 균열 선단 근방의 응력장을 식 (17)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
\sigma_{11} &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ E_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - E_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\
&\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ E_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - E_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\
\sigma_{22} &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ F_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - F_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\
&\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ F_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - F_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\
\sigma_{12} &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ G_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - G_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\
&\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ G_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - G_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\}
\end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)의 선단 응력장은 멱급수 형태로 유도된 선 연구자들^(6,7)의 이론식에 비해 가장 단순한 형태이고 $A_n (= A_n^0 + iA_n^*)$ 만이 미지수이므로, 본 연구에서 유도된 식 (17)의 응력장은 실험과 수치 해석 등의 적용 및 응용에 가장 쉽게 이용될 수 있다.

식 (17)의 선단 응력장을 광탄성 실험에 적용하기 위해 식 (18)의 동적 광응력 법칙에 대입하면

$$\begin{aligned}
D &= \left(\frac{N_f}{t} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{f_{11}} - \frac{\sigma_{22}}{f_{22}} \right)^2 + \left(2 \frac{\sigma_{12}}{f_{12}} \right)^2 \\
D &= \left\{ \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left[l_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - l_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right. \\
&\quad \left. - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left[l_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - l_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right\}^2 \\
&\quad + 4 \left\{ \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left[m_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - m_2 h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right. \\
&\quad \left. - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left[m_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - m_2 h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right\}^2
\end{aligned} \quad (18)$$

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 (19)는 재료와 균열 성장 속도 및 위치가 결정되면 $A_n (= A_n^0 + iA_n^*)$ 만의 함수이다. 그러므로 식 (19)에 광탄성 실험의 비선형 최소자승법⁽⁹⁾을 적용하면 복소 계수 A_n 을 구할 수 있다. 이렇게 구한 A_n 을 식 (17)에 대입하면 응력 성분을 구할 수 있다. 이와 같이 광탄성 실험의 데이터를

이용하여 응력 함수를 구하고 응력 성분도 분리할 수 있으며 동적 응력 확대 계수도 구할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 이와 같은 방법을 직교이방성체내의 진전 균열에 대한 동적 광탄성 실험 하이브리드 법이라 하며, 동적 응력 확대 계수는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y |_{\theta=0} \quad (20)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_{xy} |_{\theta=0} \quad (21)$$

그러므로 동적 응력 확대 계수와 상수들 간의 관계식은 아래와 같다.

$$K_I = \sqrt{2\pi} \operatorname{Re} \left[\frac{\mu_2 F_1 - \mu_1 F_2}{2\mu_2} \right] A_1^0 \quad (22)$$

$$K_{II} = -\sqrt{2\pi} \operatorname{Im} \left[\frac{G_1 F_2 - G_2 F_1}{2F_2} \right] A_1^* \quad (23)$$

식 (22), (23)을 식 (17)에 대입하고 $C(t)$ 가 0일 때 ($R=0$), 식 (17)은 정적인 문제의 직교이방성체에 대한 Sih 등⁽¹⁰⁾의 선단 응력장과 동일한 표현식이 됨을 확인할 수 있다.

3. 실험 및 실험방법

3.1 시편 및 실험장치

직교 이방성체용 광탄성 실험 시편의 형상은 Fig. 1과 같으며, 광탄성 실험 재료의 모재(matrix)는 에폭시 수지이며, 파이버(fiber)는 에나멜이 코팅된 구리선(copper fiber)이다. 주형상자에 구리 파이버를 직물리드(reed)를 사용하여 일정한 간격으로 원하는 두께의 중앙에 위치하도록 장착하고, 시바-가이기사(Ciba-Geigy Co.)의 아랄다이트(Araldite-B41)와 경화제 HT903을 중량비 10:3의 비율로 배합한 에폭시 수지를 부어 성형한 구리강하 에폭시 복합체(copper fiber epoxy composite: C. F. E. C.)⁽¹¹⁾이다. 이러한 시편에 동적 하중을 가할 수 있는 하중장치는 Fig. 2와 같으며, 본 장치로 가할 수 있는 변형을 속도(strain rate)는 31.64 s⁻¹이다.

그리고 시편에 발생하는 동적 응력 상태를 등색선 무늬 형태로 볼 수 있도록 크랭크-살던형식 카메라 시스템(Cranz-Schardin pattern camera

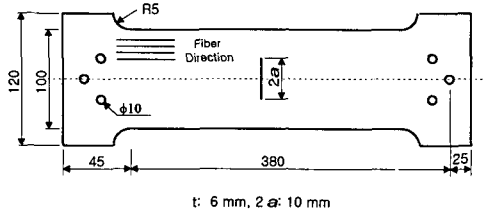
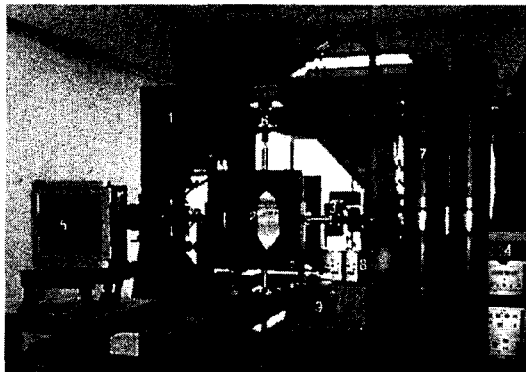


Fig. 1 Schematic of the specimen



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

Fig. 2 Dynamic loading device

system)인 동적 광탄성 실험 장치를 사용하였다. 이 카메라 장치는 프레임율이 10^6 frame/sec로써 전체 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 전선을 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.

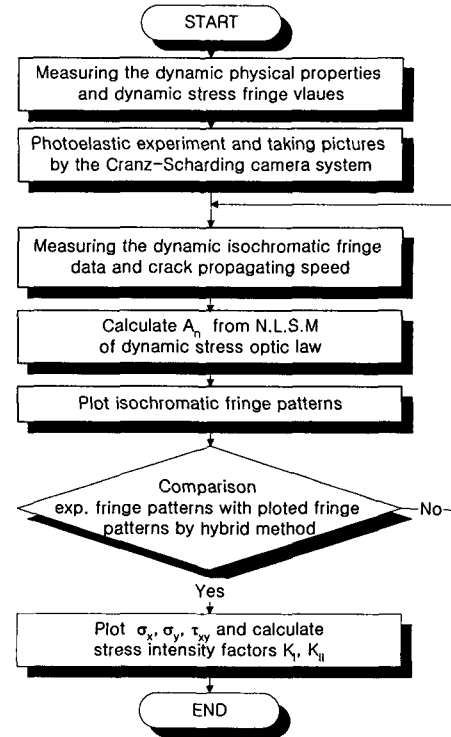


Fig. 3 Flow-chart of dynamic photoelastic hybrid method

(5) 실험실의 진동을 끄고 충격하중을 가한다.

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

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

(1) 필름 현상을 통해 얻은 균열 주위의 등색선 무늬 데이터 측정(이때 경계부근의 부정확한 데이터를 피하여 정수배 혹은 0.5배 차수로 시편폭 대 거리비 $0.04 < r/w < 0.30$ 인 범위내의 100~140여 개의 등색선 무늬 데이터를 취함) 및 균열 속도를 측정한다.

(2) 최소 자승법 프로그램에 의해 복소계수 A_n ($n=7\sim 9$)을 구하고, 이것을 광응력 법칙에 대입하여 구한 그래픽 등색선 무늬와 실제 등색선 무늬를 비교하여 유효성을 확인한다.

(3) (2)의 과정에서 구한 복소계수 A_n 을 이용하여 균열 주위의 응력성분을 도출하고 동적 응력확대계수를 구한다.

4. 실험결과 및 검토

본 연구에서 개발된 직교이방성체 진전균열에 대한 동적 광탄성실험 하이브리드 법의 유효성을 확인하기 위하여 Fig. 2의 장치를 사용하여 1축(uniaxial)의 동적 인장하중을 가하여 이 때 얻어지는 등색선 무늬를 사용하여 하이브리드 법의 유효성을 확인하였다.

본 연구에서 사용한 직교이방성체 시편의 기본 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 4는 시편에 충격하중을 가하였을 때의 하중변화를 로드셀과 오실로스코프를 통하여 얻은 전기적 신호를 나타낸 것으로 이 때의 초기 충격하중은 9515.7 N(피크점의 58.2 mV에 해당)이다.

Fig. 5는 시간에 대한 균열선단 속도를 C_R (레이레이파 속도)로 무차원화 하여 나타낸 것이다. 균열길이는 사진현상을 통하여 측정하였으며 균

열전파시간은 광원의 스파킹 시간간격으로써 측정하였다. Fig. 5에서 보듯이 두 경우 모두 균열이 진전함에 따라 균열선단의 속도가 조금씩 감소하고 있음을 볼 수 있으나 최대치와 최소치의 차이가 크지 않았다. 따라서 본 연구의 균열전파속도가 일정하다 볼 수 있으며, 이 때 균열 전파속도는 402.6 m/s 이다.

Table 1 Material properties of C.F.E.C.

Volume ratio of fiber, V_f (%)	1.32
Young's modulus, E_{LL} (GPa)	4.513
Young's modulus, E_{TT} (GPa)	3.442
Shear modulus, G_{LT} (GPa)	1.416
Possion's ratio, ν_{LT}	0.38
Density, ρ (kg/m^3)	1428
Stress fringe value, f_{LL} (kN/m)	16.446
Stress fringe value, f_{TT} (kN/m)	13.867
Stress fringe value, f_{LT} (kN/m)	13.746

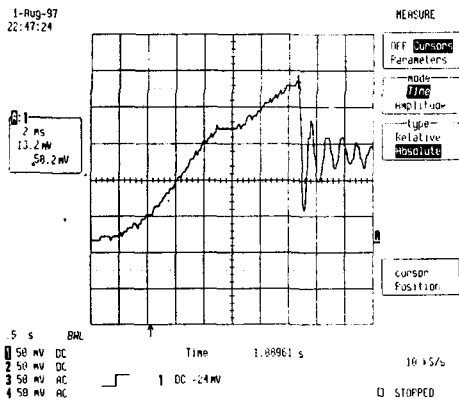


Fig. 4 Signal of impact loading

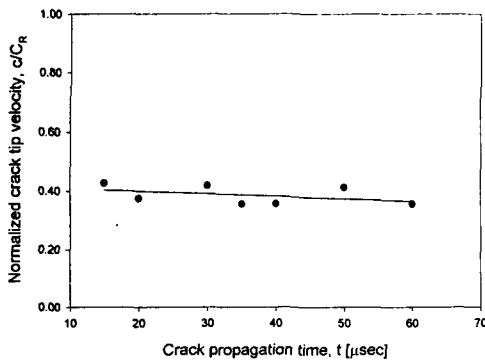


Fig. 5 Variations of crack tip velocity

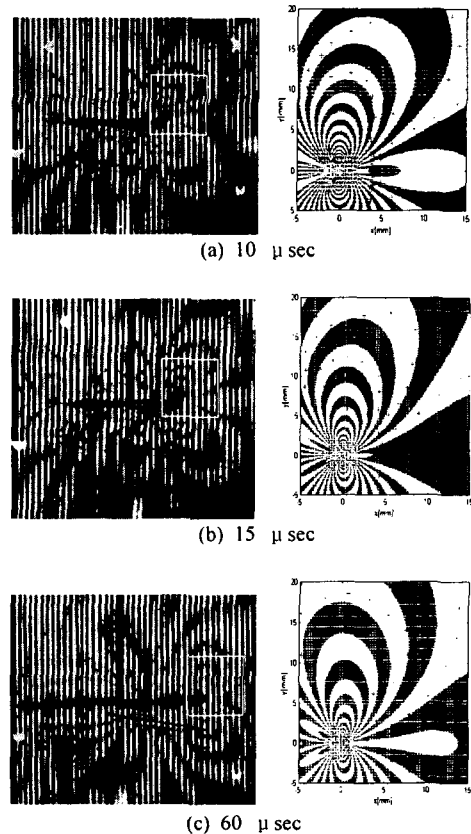


Fig. 6 Actually dynamic isochromatic photograph and graphic isochromatics

Fig. 6은 균열진전에 따른 실제 동적 광탄성 무늬와 하이브리드 법에 의해 구하여진 응력함수를 사용하여 구한 등색선 무늬를 나타낸다. 여기서 "+"표시는 데이터를 취한 지점, "□"표시는 그래픽된 영역을 나타내며 그래픽된 등색선 무늬의 왼쪽과 아래쪽의 숫자는 균열선단에서의 거리 (mm)를 의미한다. Fig. 6에서 보듯이 균열이 진전 하더라도 등색선 무늬차수 및 형태의 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 이러한 점은 정적인 하중

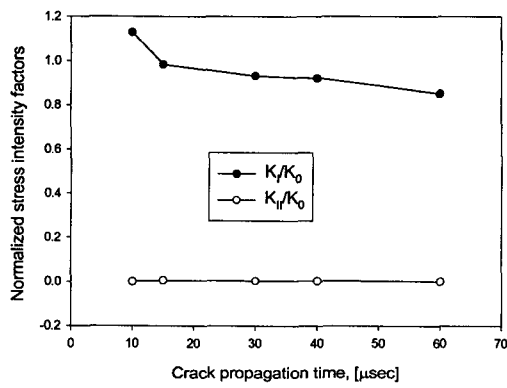


Fig. 7 Variations of dynamic stress intensity factors

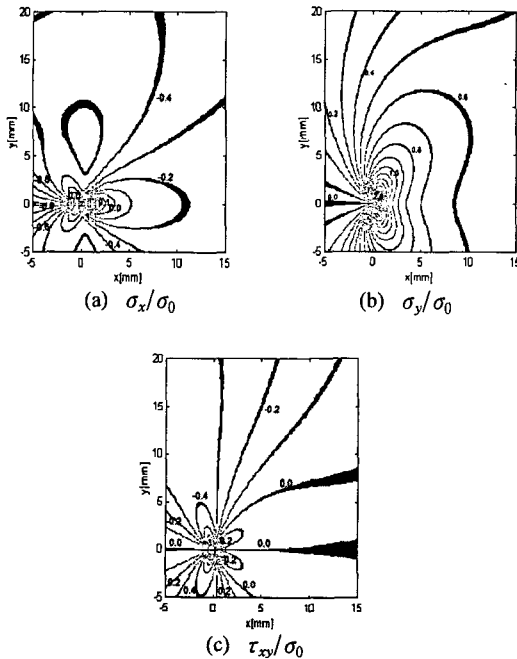


Fig. 8 Contours of normalized stress components

하에서 균열 길이가 커짐에 따라 무늬차수가 더 많이 발생되는 것과는 다른 현상이다. Fig. 6에서 보듯이 실제 동적 광탄성 무늬와 하이브리드 법에 의해 구하여진 등색선 무늬가 비교적 잘 일치하고 있다. 이것은 실제 등색선 무늬가 희미하여 정확한 균열선단을 찾기 어렵다는 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 실험 하이브리드 법이 유효하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 균열진전파시간에 대해 초기 충격하중과 초기 균열길이 ($2a=10\text{mm}$)에 대한 응력확대계수 $K_0(=\sigma_0\sqrt{\pi a})$ 로 무차원화한 응력확대계수를 나타낸 것이다. K_I/K_0 값은 균열길이가 증가함에 따라 점차 감소함을 볼 수 있는데 이는 균열의 진전이 파이버에 의해 방해받기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 현상은 정적인 균열인 경우가 균열길이에 대해 K_I/K_0 값이 민감하게 증가하는 것과는 상이한 것이다. 이것으로 보아 응력확대계수에 미치는 균열길이의 영향은 동적인 경우가 정적인 경우보다도 매우 적게 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 트리거 된 후 $60\ \mu\text{sec}$ 일 때의 등색선 무늬 데이터로부터 하이브리드 법으로 구한 복소계수를 사용하여 각 응력성분들을 가하여진 초기 응력으로 무차원화하여 0.1단위로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 나타난 응력성분들은 균열면에서의 표면력 자유 조건 (traction-free condition)을 만족하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 직교이방성체내의 진전균열에 대한 동적 광탄성 실험 하이브리드 법이 유효하다는 것을 알 수 있다. 또한 나타난 응력성분들은 정적인 경우의 응력성분⁽¹¹⁾과 유사함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직교이방성체내의 진전 균열에 대해 멱급수 형태로 표현된 선단 응력장을 유도하였으며 그 유효성을 확인하였다.

(2) 본 연구에서 유도된 선단 응력장의 표현식은 선 연구자들의 이론식에 비하여 매우 간결하며, 본 논문에서의 동적 광탄성실험 하이브리드

법의 적용에 매우 유용함을 확인하였다.

(3) 본 논문에서 연구된 직교이방성체의 진전 균열의 응력확대계수 K_I/K_0 값은 균열길이가 증가함에 따라 점차 감소하며, 직교이방성체의 동적 응력확대계수에 대한 균열길이의 영향은 정적 응력확대계수에 대한 균열길이의 영향보다 매우 적다.

(4) 본 논문에서 연구된 직교이방성체내의 진전 균열 주위의 응력성분들은 정적인 하중을 받는 직교이방성체 및 등방성체내의 정지균열 주위의 응력성분과 유사하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구사업 (과제번호: R05-2001-000-01135-0)의 일부로써 수행된 것이며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

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) Nillson, F., 1977, "The Infinite Strip with a Semi-infinite Crack Static and Dynamic Considerations," *SM Archives*, Vol. 2, No. 2, pp. 205~261.
- (4) Lee, O. S. and Kim, D. Y., 1999, "Crack-Arrest Phenomenon of A15803," *Transactions of KSME A*, Vol. 23, No. 12, pp. 2160~2166.
- (5) Nah, K. C., Hwang, S. W. and Lee, O. S., 1996, "Analysis of Contact Singular Stresses with Relief Notch by Using Dynamic Photoelasticity (II)," *Transactions of KSME A*, Vol. 20, No. 7, pp. 2097~2107.
- (6) 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.
- (7) Lee, K. H., Hawong, J. S. and Choi, S. H., 1996, "Dynamic Stress Intensity Factors K_I , K_{II} and Dynamic Crack Propagation Characteristics of Orthotropic Material," *Engr. Frac. Mech.*, Vol. 53, No.1, pp. 119~140.
- (8) Lekhnitskii, S. G., 1963, "Theory of Elasticity of an Anisotropic Body," Translated by P. Fren, edited by J. J. Brandstatter, Holden-Day Series in Mathematical Physics, Holden-Day Inc., San Francisco.
- (9) Shin, D. C. and Hawong, J. S., 2000, "A Study on the Development of the Dynamic Photoelastic Hybrid Method for Isotropic Material," *Transactions of KSME A*, Vol. 24, No. 9, pp. 2220~2227.
- (10) Sih, G. C., Paris, P. C. and Irwin, G. R., 1965, "On Cracks in Rectilinearly Anisotropic Bodies," *Int. J. of Fracture Mech.*, Vol. 1, No. 3, pp. 189~203.
- (11) Shin, D. C., Hawong, J. S., Nam, J. H. Lee, H. J. and Kwon, O. S., 1998, "Application of Transparent Photoelastic Experimental Hybrid Method for the Fracture Mechanics of Orthotropic Material." *Transactions of KSME A*, Vol. 22, No. 2, pp. 1036~1044.