

등방성체용 동적 광탄성 하이브리드 법 개발에 관한 연구

신 동 철* · 황 재 석**
(1999년 10월 25일 접수)

A Study on the Development of the Dynamic Photoelastic Hybrid Method for Isotropic Material

Dong-Chul Shin and Jai-Sug Hawong

Key Words: Dynamic Photoelastic Hybrid Method(동적 광탄성 하이브리드 법), Dynamic Stress Intensity Factor(동적 응력확대계수), Static Stress Intensity Factor(정적 응력확대계수), Dynamic Mixed Mode Load(동적 혼합모드 하중), Dynamic Load Device(동적 하중장치), Mechanical Resonance(기계적 공진), Dynamic Behavior(동적 거동), Crack Propagating Velocity(균열 전파속도), Rayleigh Wave Velocity(레이leigh 파 속도)

Abstract

In this paper, dynamic photoelastic hybrid method is developed and its validity is certified. The dynamic photoelastic hybrid method can be used on the obtaining of dynamic stress intensity factors and dynamic stress components. The effect of crack length on the dynamic stress intensity factors is less than those on the static stress intensity factors. When structures are under the dynamic mixed mode load, dynamic stress intensity factor of mode I is almost produced. Dynamic loading device manufactured in this research can be used on the research of dynamic behavior when mechanical resonance is produced and when crack is propagated with the constant velocity.

1. 서 론

대부분의 산업현장에 있는 기계 구조물들은 정적인 하중보다는 동적인 하중을 받는 경우가 더 많다. 이런 구조물에 작용하는 정적인 하중의 경우에 대해서는 이론과 실험 등을 통해 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 동적인 하중을 받는 구조물의 균열선단에서의 명확한 응력분포상대나 파괴경로에 대한 연구는 실험적으로나 이론적으로 정적인 경우에 비해 그리 풍부하지 아니하다.

동적 하중을 받는 경우의 등방성체 내의 균열 문제에 대해서 여러 학자들에 의해서 연구가 되어왔다. Radok⁽¹⁾은 등방성체내에서 일정 속도로

진전하는 균열의 동적인 문제에 대한 균열 선단 응력장과 변위장을 이론적으로 연구하였으며, Freund⁽²⁾는 모드-II(mode-II) 하중하의 동적 균열 전파에 대해서 연구하였고 이를 Nilsson⁽³⁾이 일반화 시켰다.

Achenbach⁽⁴⁾ 등은 수치적인 방법으로 균열이 선단에서 초기 균열 진전 방향(x축 방향)으로 일정한 속도로 진행되는 경우의 균열선단 응력장과 변위장을 연구하였다.

본 연구에서는 등방성체 내에서 진전하는 균열에 대해 동적 광탄성 실험을 행하여 동적 등색선 무늬 데이터를 얻고, 이를 이용하여 멱급수 형태로 표현된 응력함수의 계수를 구하기 위해 광응력 법칙에 Newton-Raphson법에 의한 비선형 최소자승법을 적용하여 선단 응력장 및 변위장과 동적 응력확대계수를 구할 수 있는 광탄성 실험 및 수치해석을 혼성한 하이브리드(Hybrid) 법을 개발하고 이 것의 유효성을 확인하고자 한다.

* 영남대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jshawong@ynuucc.yeungnam.ac.kr

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

2. 등방성체내의 진전 균열선단 응력장

Fig. 1과 같은 선형 탄성적 등방성체의 평면에서 균열이 일정한 속도(=C)로 전파되고, X-Y 좌표계는 초기 균열선단을 원점으로 하는 고정 직교 좌표계이고 x=X-Ct로 움직이는 균열선단을 원점으로 하는 이동 좌표계는 x-y 좌표계이다. 이러한 좌표계에 대해 Radok⁽¹⁾이 최초로 유도한 동탄성 문제에 대한 응력장과 변위장을 Nishioka⁽⁵⁾가 다음과 같이 수정하였다.

$$\sigma_x = -Re[(1+2\beta_1^2 - \beta_2^2)\phi'(z_1) + 2\psi'(z_2)] \quad (1.a)$$

$$\sigma_y = Re[(1+\beta_2^2)\phi'(z_1) + 2\psi'(z_2)] \quad (1.b)$$

$$\tau_{xy} = Im\left[2\beta_1\phi'(z_1) + \frac{(1+\beta_2^2)}{\beta_2}\psi'(z_2)\right] \quad (1.c)$$

$$\mu u = -Re[\phi(z_1) + \psi(z_2)] \quad (2.a)$$

$$\mu v = Im\left[\beta_1\phi(z_1) + \frac{1}{\beta_2}\psi(z_2)\right] \quad (2.b)$$

여기서, $\phi(z_1)$, $\psi(z_2)$ 는 복소 변수 $z_j = x + i\beta_j y = r_j e^{i\theta_j}$ ($j=1,2$)의 함수로 이루어진 복소 함수이며, $i = \sqrt{-1}$, $\beta_1^2 = 1 - C^2/C_l^2$, $\beta_2^2 = 1 - C^2/C_s^2$ 이고 C_l 과 C_s 는 각각 종파(longitudinal wave)와 횡파(shear wave)의 속도이다. 이 것은 전단탄성계수 μ 와 포아송의 비 ν , 그리고 재료의 밀도 ρ 의 항으로 표현된다.

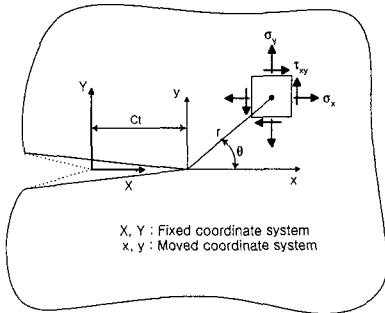


Fig. 1 Coordinate system and stress components

$$C_l^2 = \frac{k+1}{k-1} \frac{\mu}{\rho}, \quad C_s^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.a)$$

$$k = \begin{cases} (3-\nu)/(1+\nu) & : \text{평면응력} \\ (3-4\nu) & : \text{평면변형률} \end{cases} \quad (3.b)$$

복소 함수 ϕ 와 ψ 는 해석적인 함수이므로 멱급수(power series) 형태로 가정할 수 있다.

$$\phi(z_1) = \sum_n A_n z_1^{\lambda_n} = \sum_n (A_n^0 + iA_n^*) r_1^{\lambda_n} e^{i\lambda_n \theta_1} \quad (4)$$

$$\psi(z_2) = \sum_n B_n z_2^{\lambda_n} = \sum_n (B_n^0 + iB_n^*) r_2^{\lambda_n} e^{i\lambda_n \theta_2} \quad (5)$$

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 (6)의 표면력 자유 조건(traction free condition)을 만족하는 일반적인 고유함수 해를 찾아보자.

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = D_1\phi' + D_2\bar{\phi}' + D_3\psi' + D_4\bar{\psi}' = 0 \quad (6)$$

여기서, '·'는 쾨플 복소수(complex conjugate)을 의미하며 D_j ($j=1,2,3,4$)는 다음과 같다.

$$D_1 = 1 + \beta_2^2 + 2\beta_1, \quad D_2 = 1 + \beta_2^2 - 2\beta_1$$

$$D_3 = 2 + \frac{(1+\beta_2^2)}{\beta_2}, \quad D_4 = 2 - \frac{(1+\beta_2^2)}{\beta_2}$$

식 (4), (5)를 식 (6)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 (7)이 얻어진다.

$$\lambda_n = \frac{n}{2} \quad (n=0,1,2,3,\dots) \quad (7)$$

고유치 $\lambda_n = 1/2$ 은 $1/\sqrt{r}$ 계수의 특이 응력장을 뜻하며, 0(zero)의 고유치는 강체 거동을 의미한다. 이들 고유치를 식 (6)에 대입하면 복소 상수에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$B_n^0 = -h(n)A_n^0, \quad B_n^* = -h(\bar{n})A_n^* \quad (8)$$

여기서,

$$h(n) = \begin{cases} \frac{2\beta_1\beta_2}{(1+\beta_2^2)} & (n: \text{홀수}) \\ \frac{1}{2}(1+\beta_2^2) & (n: \text{짝수}) \end{cases} \quad (9)$$

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

응력 성분들을 구하기 위해 식 (8)을 식 (4), (5)에 대입하고 1차 미분을 하면,

$$\phi'(z_1) = \sum_{n=1}^N \frac{n}{2} \{A_n^0 + iA_n^*\} z_1^{\frac{n}{2}-1} \quad (10)$$

$$\phi'(z_2) = - \sum_{n=1}^N \frac{n}{2} \{h(n)A_n^0 + ih(\bar{n})A_n^*\} z_2^{\frac{n}{2}-1} \quad (11)$$

식 (10), (11)를 식 (1)에 대입하면 균열 선단 근방의 응력장은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ -(1+2\beta_1^2 - \beta_2^2) z_1^{\frac{n}{2}-1} + 2h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ &\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ -(1+2\beta_1^2 - \beta_2^2) z_1^{\frac{n}{2}-1} + 2h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ \sigma_y &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ (1+\beta_2^2) z_1^{\frac{n}{2}-1} - 2h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ &\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ (1+\beta_2^2) z_1^{\frac{n}{2}-1} - 2h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ \tau_{xy} &= \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left\{ 2\beta_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - \frac{(1+\beta_2^2)}{\beta_2} h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \\ &\quad - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left\{ 2\beta_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - \frac{(1+\beta_2^2)}{\beta_2} h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)를 동적 광응력 법칙인 식 (13)에 적용하면 식 (14)가 얻어진다.

$$D = \left(\frac{f \omega^2 N_f}{t} \right)^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} D &= \left\{ \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left[-2(1+\beta_1^2) z_1^{\frac{n}{2}-1} + 4h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right. \\ &\quad \left. - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left[-2(1+\beta_1^2) z_1^{\frac{n}{2}-1} + 4h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right\}^2 \\ &\quad + 4 \left\{ \sum_{n=1}^N A_n^0 \frac{n}{2} \operatorname{Im} \left[2\beta_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - \frac{(1+\beta_2^2)}{\beta_2} h(n) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right. \\ &\quad \left. - \sum_{n=1}^N A_n^* \frac{n}{2} \operatorname{Re} \left[2\beta_1 z_1^{\frac{n}{2}-1} - \frac{(1+\beta_2^2)}{\beta_2} h(\bar{n}) z_2^{\frac{n}{2}-1} \right] \right\}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)는 재료와 균열 성장 속도 및 위치가 결정되면 $A_n (= A_n^0 + iA_n^*)$ 만의 함수이다. 그러므로 식 (14)에 광탄성 실험의 비선형 최소자승법^(6,7)을 적용하면 복소 계수 A_n 을 구할 수 있다. 이렇게 구한 A_n 을 식(12)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. 그래서 본 논문에서는 이와 같은 방법을 등방성 체내의 진전 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리드 법이라 하며, 동적 응력 확대 계수는 식 (15)와 (16)으로 정의할 수 있다.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y |_{\theta=0} \quad (15)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy} |_{\theta=0} \quad (16)$$

그러므로 식 (12)를 식 (15), (16)에 대입하면 식 (17)과 (18)과 같은 동적 응력확대계수와 상수들 간의 관계식을 얻을 수 있다.

$$K_I = -\sqrt{2\pi} \frac{D(C)}{2(1+\beta_2^2)} A_1^0 \quad (17)$$

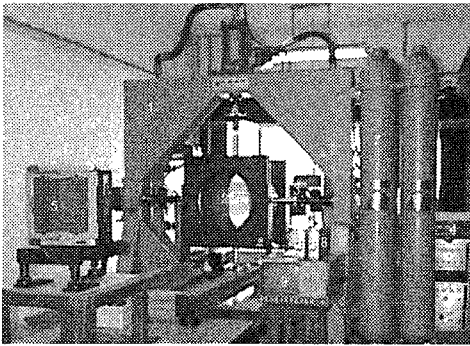
$$K_{II} = -\sqrt{2\pi} \frac{D(C)}{4\beta_2} A_1^* \quad (18)$$

여기서, $D(C) = 4\beta_1\beta_2 - (1+\beta_2^2)^2$ 이고, $D(C) = 0$ 는 레이레이(Rayleigh) 방정식⁽²⁾으로 잘 알려져 있으며 근으로는 $C=0$, C_R (레이레이파 속도)이다.

3. 실험 및 실험방법

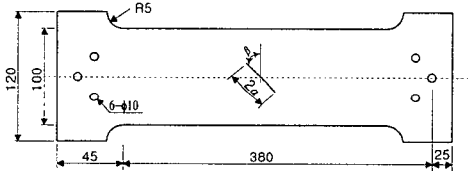
3.1 실험장치

본 연구에서 사용된 시편의 재료는 시바-가이 기(CIBA-GEIGY)사의 아랄다이트(Araldite) B41을 주재료하고 경화제 HT903을 중량비 10:3의 비율로 성형한 에폭시판이다. 이러한 시편에 동적하중을 가하기 위한 하중장치는 Fig. 2와 같으며 이 장치는 정적 및 동적 1축, 2축 시험을 할 수 있는 기능을 갖고 있다. 본 장치로 가할 수 있는 변형률 속도(strain rate)는 31.637 s^{-1} 이다. 이 속도는 기계나 구조물의 기계적 공진 현상이 발생되는 변형률의 속도에 해당되므로 구조물이나 기계



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



t: 6.2 mm, 2a: 10 mm

Fig. 3 Schematic of the specimen

의 부품들의 동적 거동을 연구하는데 이 장치가 유효하게 사용될 수 있다.

이 장치에 적당한 용량의 로드셀(load-cell)을 장착하고 이 장치의 유압을 조절하면 우리가 원하는 1축 혹은 2축 충격하중을 가할 수 있다. 충격하중을 가하기 전에 모든 하중의 연결부분이 Fig. 3과 같은 시편에 동일한 조건으로 접촉할 수 있도록 조이거나 풀 수 있는 기계적 동조장치를 제작하여 장치에 부착하였다.

이러한 시편에 발생하는 동적 응력상태를 등색선 무늬 형태로 볼 수 있도록 Fig. 4와 같은 크랭스-샬던형식 카메라 시스템(Cranz-Schardin pattern camera system)인 동적광탄성 실험 장치를 사용하였다. 이 카메라 장치는 프레임율이 10^6 frame/sec 로써 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 방법의 과정은 다음과

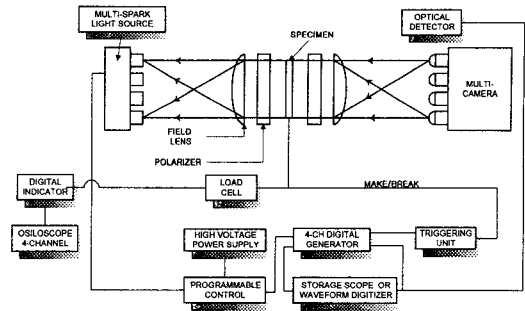


Fig. 4 Dynamic photoelastic experimental device of Cranz-Schardin pattern camera system

같다.

(1) 시편을 제작하고 균열 주위에 은분 페인트(silver paint)를 칠하여 은분 페인트 양쪽에 전선을 연결하고 이 전선을 트리거(trigger) 장치가 장착된 제어박스(제어박스)로 연결한다.

(2) 시편을 하중장치에 장착하고, 기계적 동조장치를 사용하여 시편에 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. 5와 같다. 즉 광탄성 실험의 하이브리드 법 적용과정은 다음과 같다.

(1) 필름 현상을 통해 얻은 균열 주위의 등색선 무늬 데이터 측정(이때 경계부근의 부정확한 데이터를 피하여 정수배 혹은 0.5배 차수의 등색선 무늬 데이터를 취함) 및 균열 속도를 측정한다.

(2) 최소 자승법 프로그램에 의해 복소계수 A_n 을 구하고 실제 등색선 무늬와 비교하여 유효성 확인한다.

(3) (2)의 과정에서 구한 복소계수 A_n 로부터 균열 주위의 응력성분을 도출하고 동적 응력확대 계수를 구한다.

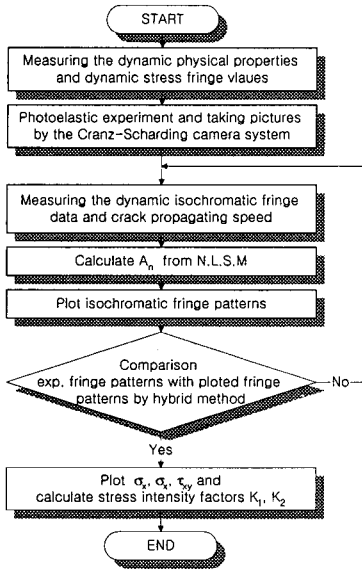


Fig. 5 Flow-chart of dynamic photoelastic hybrid method

Table 1 Material properties of epoxy resin

Young's modulus, E (GPa)	3.20
Possion's ratio, ν	0.38
Density, ρ (kg/m^3)	1316
L-wave velocity, C_l (m/s)	1688
S-wave velocity, C_s (m/s)	937
R-wave velocity, C_R (m/s)	880
Stress fringe value, f_σ (kN/m)	10.61

4. 실험결과 및 검토

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

본 연구에서 사용한 등방성체 시편의 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 6은 초기 균열각도가 0° 인 시편에 충격하중을 가하였을 때의 하중변화를 로드셀과 오실로스코프를 통하여 얻은 전기적 신호를 나타낸 것으로 이 때의 초기 충격하중은 5967.4 N(피크점의 36.5 mV에 해당)이다.

Fig. 7은 균열 초기각도가 0° 인 경우와 30° 인 경우, 트리거(trigger)된 후의 시간에 대한 균열길

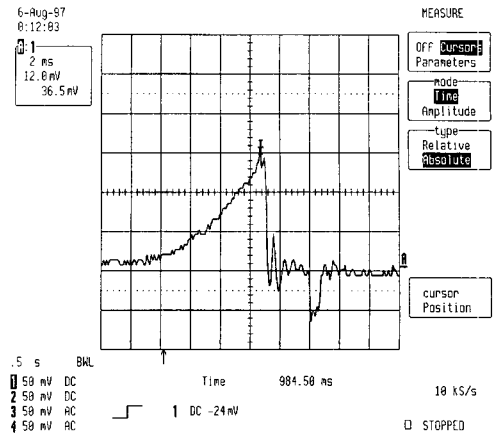


Fig. 6 Signal of impact loading

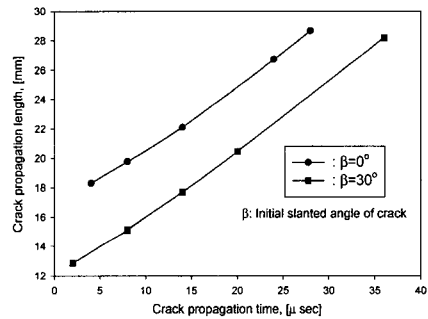


Fig. 7 Dynamic crack propagation length

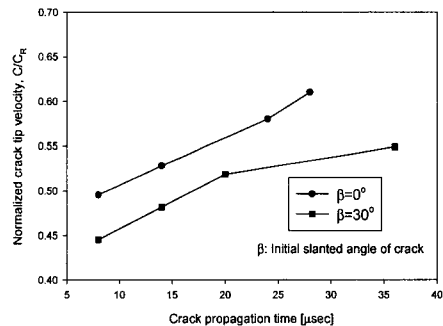


Fig. 8 Variations of crack tip velocity

이를 나타낸 것으로 균열길이는 사진현상을 통하여 측정하였으며 균열전파시간은 광원의 스파킹 시간간격으로써 측정하였다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 균열 경사각에 관계없이 시간에 대한 균열전파길이의 변화가 거의 일정하므로 균열전파속도가 일정하다고 가정할 수 있다.

Fig. 8은 시간에 대한 균열전단 속도를 C_R (레

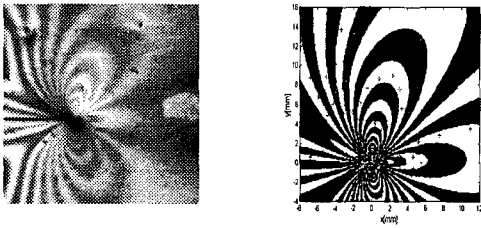
이레이파 속도)로 무차원화 하여 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보듯이 두 경우 모두 균열이 진전함에 따라 균열선단의 속도가 조금씩 증가하고 있음을 볼 수 있으나 최대치와 최소치의 차이가 크지 않았다. 따라서 본 연구의 균열전파속도가 일정하다고 가정할 수 있다. 즉 초기각도가 0°인 경우 균열전파속도는 513.57 m/s, 30°인 경우 균열전파속도는 446.18 m/s 로 하였다.

Fig. 9는 초기 균열각도가 0° 이고 초기 충격하중이 5967.4 N일 때의 균열진전에 따른 실제 동적 광탄성 무늬와 하이브리드 법에 의해 구하여진 응력함수를 사용하여 구한 등색선 무늬이며 'u' 표시는 데이터를 취한 점을 의미한다. 이 때, 균열선단에서의 등색선 무늬차수의 식별이 불가능하므로 식별이 가능한 균열선단에서 조금 떨어진 지점(선단에서 2mm이상의 지점)의 데이터를

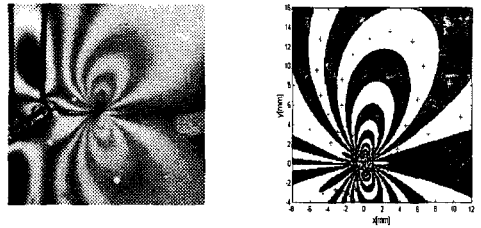
취하였다. Fig. 9에서 보듯이 균열이 어느 정도 진행되고 난 후에는 등색선 무늬 형태가 거의 변화가 없다. 이러한 점은 정적인 하중을 받는 경우 균열 길이가 커짐에 따라 무늬차수가 더 많이 발생되는 것과는 다른 현상이다.

Fig. 10은 초기 균열각도가 30° 이고 초기 충격하중이 4905.0 N인 경우의 실제 동적 광탄성 무늬와 하이브리드 법에 의해 구하여진 응력함수를 사용하여 구한 응력성분을 이용하여 얻은 등색선 무늬로 나타낸 것으로 균열선단에서의 무늬차수는 Fig. 9의 무늬차수보다 약 3차정도 적게 나타나고 있다. Fig. 10에서도 균열이 어느 정도 성장한 후에는 등색선 무늬가 거의 변화하지 않는다는 것을 볼 수 있으며, 파괴경로는 가하여진 하중에 대해 수직 방향이라는 것도 볼 수 있다.

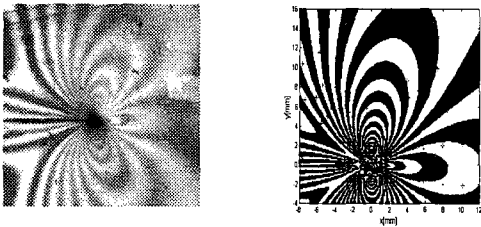
Fig. 9와 10에서 보듯이 실제 동적 광탄성 무늬



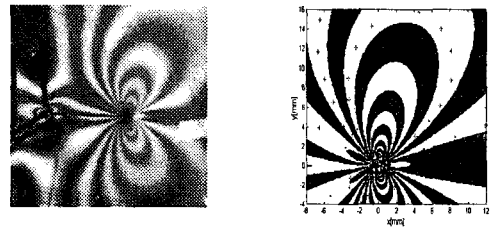
(a) 4 μ sec (crack length: 18.30 mm)



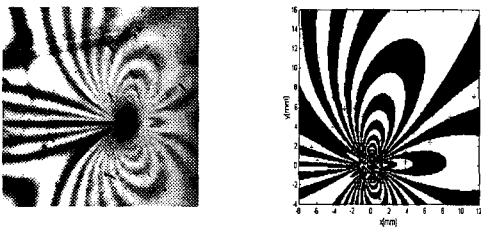
(a) 2 μ sec (crack length: 12.82 mm)



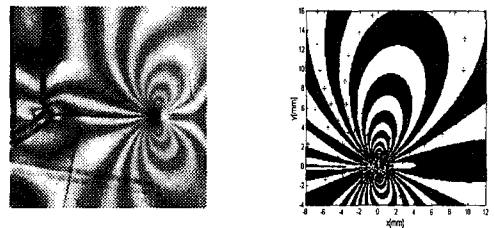
(b) 14 μ sec (crack length: 22.11 mm)



(b) 20 μ sec (crack length: 20.45 mm)



(c) 28 μ sec (crack length: 28.67 mm)



(c) 36 μ sec (crack length: 28.18 mm)

Fig. 9 Actually dynamic isochromatic photograph and graphic isochromatics($\beta = 0^\circ$)

Fig. 10 Actually dynamic isochromatic photograph and graphic isochromatics($\beta = 30^\circ$)

와 하이브리드 법에 의해 구하여진 등색선 무늬가 조금은 불일치하는 경우도 있다. 이것은 균열 전파속도가 균일하지 않고 다소 차이가 있었다는 점과 실제 등색선 무늬가 희미하여 정확한 크랙 선단을 찾을 수 없기 때문에 발생한 것이라고 유추할 수 있다. 그러나 두 무늬형태가 잘 일치하고 있으므로, 본 연구에서 개발된 등방성체 동적 광탄성 실험의 하이브리드 법이 유효하다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 개발된 하이브리드 법을 사용하면 불확실한 균열선단의 등색선 무늬차수를 취하지 않고 조금 떨어진 지점의 데이터를 취하여 균열선단의 무늬차수를 역으로 계

산할 수 있는 장점이 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 균열전파시간에 대해 초기 충격하중과 초기 균열길이($2a=10$ mm)에 대한 응력확대계수 $K_0(= \sigma_0 \sqrt{\pi a})$ 로 무차원화한 응력확대계수를 나타낸 것이다. 여기서 초기 균열각도가 0° 인 경우(\circ, \circ)나 30° 인 경우(\bullet, \bullet), K_2/K_0 값은 거의 0에 가까운 값이며 K_1/K_0 값은 균열길이가 증가함에 따라 차츰 증가함을 볼 수 있다. 즉 동적 혼합모드에서도 거의 모드 I (Mode I)의 동적 응력확대계수만 발생한다. 그러나 이러한 현상은 정적인 균열인 경우가 균열길이에 대해 K_1/K_0 값이 민감하게 증가하는 것과는 차이를 나타낸다. 이것으로 보아 동적인 경우의 응력확대계수는 정적인 경우의 응력확대계수보다도 균열길이의 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 초기하중이 크게 작용한 0° 인 경우가 균열전파속도도 크게 나타나며 동적 응력확대계수 K_1/K_0 값 또한 크게 발생하였다.

Fig. 12는 균열 초기각도가 0° 인 경우 트리거된 후 $28 \mu\text{sec}$ 일 때 하이브리드 법으로 구한 복소계수를 사용하여 각 응력성분들을 가하여진 초기응력으로 무차원화하여 0.1단위로 나타낸 것이다.

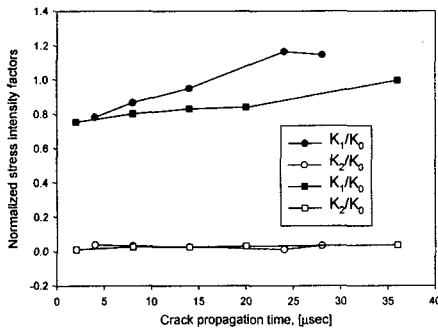


Fig. 11 Variations of dynamic stress intensity factors

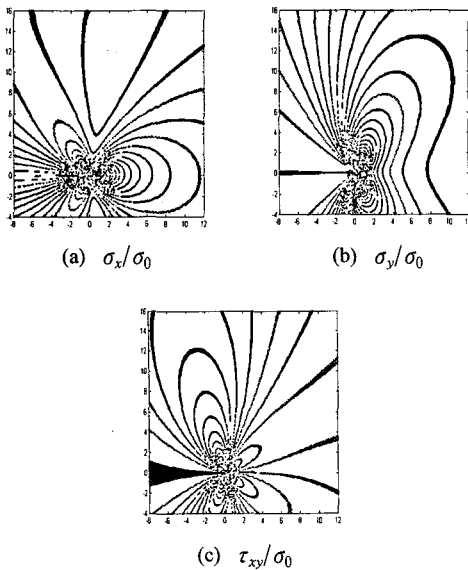


Fig. 12 Contours of normalized stress components (initial crack angle: 0° , $28 \mu\text{ sec}$)

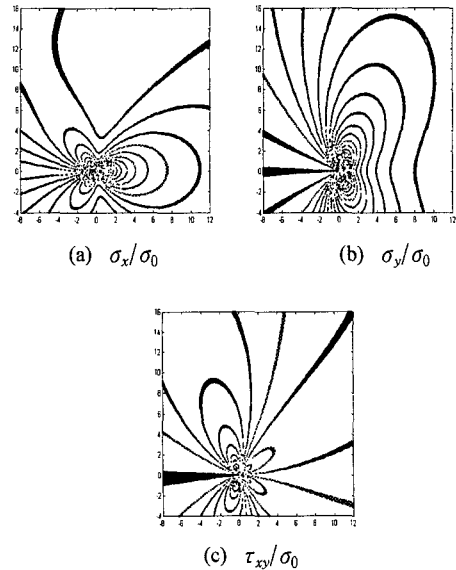


Fig. 13 Contours of normalized stress components (initial crack angle: 30° , $20 \mu\text{ sec}$)

Fig. 13은 균열 초기각도가 30° 인 경우의 트리거 된 후 20 μ sec일 때 각 응력성분들을 가하여진 초기응력으로 무차원화하여 나타낸 것으로 이 또한 초기각도가 0° 인 경우와 유사한 형태로 나타나고 있다.

Fig. 12, 13에서 알 수 있듯이 나타난 응력성분들은 균열표면에서의 표면력 자유조건(traction-free condition)을 만족하고 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 등방성체내의 진전 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리드 법이 유효하다는 것을 알 수 있다. 또한 나타난 응력성분들은 정적인 경우의 응력성분과 유사함을 알 수 있다.

본 연구에서 개발된 등방성체용 동적 광탄성 하이브리드 법의 유효성을 확인하기 위하여 실제 등색선 무늬와 하이브리드 법으로 구한 응력성분들을 이용하여 다시 그래픽한 등색선 무늬와의 일치정도와 각 응력성분을 분리했을 때의 경계조건 즉, 균열 표면에서의 표면력 자유조건(traction-free condition)을 만족하는가로 판단하였으며, 그 결과 두 조건을 전부 잘 만족하고 있음을 확인하였다. 그러나 동적 응력확대계수의 정량적 비교검토는 선 연구자들에 의해 제시된 경우가 없고 또한, 동적인 경우는 그 실험 조건과 재료의 물성치에 따라 다양한 값을 가지기 때문에 동적 응력확대계수에 대한 정량적 비교검토는 불가능하였음을 밝혀둔다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 등방성체내의 진전하는 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 하이브리드법이 개발되었으며, 그 유효성이 확인되었다. 그리고 동적 광탄성실험의 하이브리드법을 이용하면 동적 응력확대계수와 동적 응력성분도 구할 수 있다.

(2) 본 논문에서 연구된 등방성체의 진전 균열의 응력확대계수 K_I/K_0 값은 균열길이가 증가함에 따라 차츰 증가하며, 등방성체의 동적 응력확대계수에 대한 균열길이의 영향은 정적 응력확대계수에 대한 균열길이의 영향보다 적다

(3) 본 연구에서 사용된 동적 하중장치는 구조물의 기계적 공진현상을 일으키는 동적 하중을 받는 경우의 동적 거동을 연구하는데 이용될 수 있고, 식 (1)로서 구조물의 동적 거동을 평가하는

데도 유효하게 이용될 수 있다.

(4) 에폭시판의 균열전파속도가 레이레이파 속도(Rayleigh-wave velocity)의 약 45~62 %정도이다.

(5) 등방성체내의 진전 균열선단의 응력성분들의 분포는 정적인 경우와 유사하며 혼합 모드에서도 균열이 진전한 후에는 거의 모드-I (Mode-I)의 동적 응력확대계수만 발생한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구과제(과제번호: 97-0200-04-01-3)의 일부로서 수행된 것임

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) Achenbach, J. D. and Bazant, Z. P., 1972, "Elastodynamic Near-Tip Stress and Displacement Fields for Rapidly Propagation Crack in Orthotropic Materials," *J. of Applied Mechanics*, 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, 황계석, 오영식, 1998, "등방성체내의 진전 균열에 대한 동적 광탄성 실험의 Hybrid 법 개발," 추계학술대회논문집(A), 대한기계학회, pp. 547~552.
- (7) Hawong, J. S., Lin, C. H., Lin, S. T., Rhee, J. and Rowlands, R. E., 1995, "A Hybrid Method to Determine Individual Stresses in Orthotropic Composites Using Only Measured Isochromatic Data," *J. of Composite Materials*, Vol. 29, No. 18, pp. 2366~2387