

〈論 文〉

고분자재료의 동적 파괴거동에 관한 연구

이역섭* · 한정우** · 황시원*** · 한문식****

(1994년 11월 7일 접수)

Dynamic Fracture Behavior of Some Polymeric Materials

O. S. Lee, J. W. Han, S. W. Hwang and M. S. Han

Key Words : Dynamic Stress Intensity Factor(동적 응력확대계수), PMMA(Polymethy Imethacrylaete), Dynamic Caustics(동적 코스틱스), High Speed Camera(고속카메라 시스템), Initial Curve(초기곡선), Dynamic Crack Propagation Velocity Measuring System(동적 균열전파속도 측정장치)

Abstract

The dynamic stress intensity factors(DSIF ; K_I^{dyn}) were studied in some polymeric materials using caustics method with a high speed camera system. Also crack tip propagation speed was measured by dynamic crack propagation velocity measuring device. To calculate DSIF a finite element analysis program-INha Stress Analysis Moving CRack(INSAMCR) was utilized. Dynamic fracture characteristics were investigated to verify a relationship between DSIF and crack tip propagation speed and acceleration in PMMA, Homalite-100 and Polycarbonate. The relationship between dynamic stress intensity factor and crack tip velocity revealed typical *I'* shapes. Measured crack tip acceleration data envelope converges to the zero level with increasing DSIF. Equivalently crack tip velocities show a wide spread range at low values of DSIF, but become a constant with a higher DSIF. $1.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $1.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ and $1.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ were obtained as K_I^{dyn} values to arrest the dynamic crack for PMMA, Homalite-100 and Polycarbonate, respectively. INSAMCR was run to verify experimental results in PMMA and shows good agreement.

1. 서 론

근래 고분자재료가 신소재로서 널리 쓰이고 복합재료의 기질조직 혹은 첨가재료로서 그 응용분야가 넓어짐에 따라 재료의 기계적 성질들을 정확히 파악할 수 있는 실험적 및 이론적 연구와 안전설계

및 정밀설계를 위한 여러가지 파손 파라미터를 제공하는 파괴역학에 관련된 새로운 연구가 요구되고 있다.

고분자재료의 동적파괴특성을 파악하기 위하여 필연적으로 요구되는 동적 응력확대계수는 시편의 형상이나 하중 및 경계조건에 영향을 받고, 균열선단 부근의 응력장이나 변형강도의 지배를 받으므로 동적 응력확대계수를 결정하는것은 파괴역학의 중요한 연구분야의 하나이며, ^(1,2) 재료 내에서 빠르게 전파하는 균열의 속도와 동적 응력확대계수와의 관계를 비교하는 것은 파괴현상을 이해하는데 도움이

*정회원, 인하대학교 기계공학과

**한국기계연구원

***정회원, 인하대학교 대학원

****정회원, 동양공과대학

된다.^(3,4)

동적 파괴역학 연구는 Yoffe⁽⁵⁾가 1951년에 안정 하중을 받고있는 무한탄성체 안에서 고정된 크기를 갖는 균열이 일정한 속도로 전파될 때 균열선단 응력과 변위를 최초로 해석적으로 유도한 후 균열성장개시, 균열전파경로, 균열전파속도, 균열분지(branching), 균열정지현상 등의 시간에 따라 변화하는 경계치 문제들의 전파거동에 대하여 많은 이론적 연구가 발표되고 있다. 또한 고속촬영기술의 개발에 의하여 정적이나 동적인 하중을 받으면서 빠르게 변화하는 균열선단 주위의 동적 응력장이나 변형장의 분포상태를 직접 촬영할 수 있으며, 이러한 고속촬영에 의하여 동적 균열에 대한 동적 코스틱 사진을 촬영하여 동적 응력확대계수를 추출하는 방법들이 개발 발전되고 있다. 고분자재료는 동적 균열전파현상을 고속카메라 시스템으로 인해 고분자재료의 동적 균열전파속도와 동적 응력확대계수와 의 상호관계에 대하여 많은 연구결과가 발표되고 있다.^(6,7) 또한 국내에서 고분자재료의 내부에 존재하는 균열 Healing현상을 파괴역학의 파라미터를 사용하여 규명하려는 연구가 시도된 바^(8,9) 있고, 초음파를 이용하여 고분자재료의 점특성을 규명할 수 있는 연구결과가 발표된바 있다.⁽¹⁰⁾

그러나 동적 파괴역학문제의 복잡성을 고려하고 기하학적 형상하중조건 등 적절한 시험방법이 여러 방면으로 연구되고 있지만 연구하는 학자들 사이의 이견으로 아직까지 완전히 규격화된 실험법이 정립되지 않고 있으나 근래에는 이 분야의 계속적인 연구발표가 매우 드문 편이다. 국내에서도 고분자재료 및 원자력 압력용기강 등에 대한 동적 응력확대계수와 균열정지 인성치 등을 측정하는 방법론과 응용방법에 대하여 연구하고 있지만 초보단계를 벗어나지 못하는 경향이 있다.

따라서 위에서 간단히 서술한 여러 연구자들의 연구결과에 대한 지속적인 연구의 일환으로 본 논문에서는 고분자재료인 PMMA, Homalite-100, Polycarbonate의 동적 파괴특성을 연구하기 위하여 동적 응력확대계수와 균열전파속도와 가속도의 상호관계를 비교 검토함으로써 균열전파속도와 가속도가 동적인 파괴특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다. 또한 동적 응력확대계수를 측정하거나 결정하는 여러가지 방법중 다음과 같은 동적 코스틱스방법과 동적 유한요소해석방법을 사용하여 동적 응력확대계수를 추출하여 측정방법에 따

라 결과치를 비교하였다. 첫째 광학적인 방법의 하나로써 빠르게 전파하는 동적균열에 대한 동적코스틱스의 사진을 1초에 100만 장을 찍을 수 있는 고속카메라 시스템(high speed camera system)을 이용하여 동적 응력확대계수를 측정하는 방법과⁽¹¹⁾ 둘째 동적 균열전파속도 측정장치로서 균열의 전파속도를 측정하여 동적 2차원 유한요소 프로그램인 INSAMCR 프로그램으로 동적 응력확대계수를 계산하는 두 가지 방법을 사용하였다.

2. 코스틱스

2.1 코스틱스형성의 기본이론

코스틱스의 기본원리는 응력을 받는 시편을 통과한 빛이 시편의 두께에 변화가 생기면 광학적 효과에 의하여 발생하는 굴절률이 부분적으로 변하면서 직진하던 경로를 벗어나게 된다. 만일 시편에 균열이 있으면 빛은 균열선단 주위의 경계로부터 분산되고 균열선단의 변형으로 인한 굴절된 빛의 집중에 의하여 시편으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 스크린에 어두운 부분과 밝은 부분의 선명한 경계선의 단일 원형을 형성하는데, 이를 코스틱스(caustics)라고 한다.

코스틱스의 크기는 응력확대계수에 관계가 있고 코스틱스곡선을 형성하는데 있어서 시편상의 곡선을 초기곡선(initial curve)이라 하며 응력확대계수에 의한 균열선단에서의 응력장의 해석은 균열선단 부근의 아주 작은 영역에서만 적용되며 코스틱스의 크기 및 형상의 초기곡선 크기에 관련이 있다.

Fig. 1은 하중이 작용되고 있는 균열선단 부근에서 레이저광속이 굴절되어 코스틱스가 형성되는 모양을 나타낸 것으로, 레이저광속이 시편(평면 E)상의 점 $P(r, \theta)$ 를 통과하여 W 만큼 확산되어 스크린(평면 E')상의 r' 위치인 점 $P'(x', y')$ 에 코스틱스곡선을 형성한다. 만일 빛이 평면두께의 변화에 의해 광학경로 ΔS 를 벗어나면 $z=z_0$ 에서 W 는 다음과 같다.

$$W(r, \theta) = z_0 \text{grad} \Delta S(r, \theta) \quad (1)$$

$$r' = r + W(r, \theta) \quad (2)$$

여기서, 평면두께와 굴절률에 의해 변하는 광학경로의 길이 ΔS 는

$$\Delta S = ct[(\sigma_1 + \sigma_2) \pm \lambda(\sigma_1 - \sigma_2)] \quad (3)$$

이고 기호는 다음과 같다.

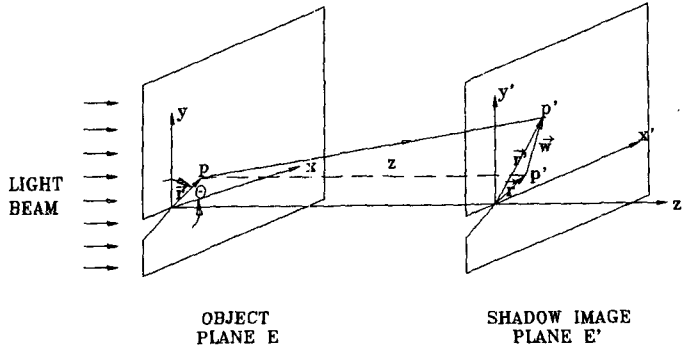


Fig. 1 Geometrical condition of the method of caustics

- z_0 : 시편과 스크린 사이의 거리
- c : 탄성광학상수
- t : 시편두께
- σ_1, σ_2 : 주응력
- λ : 광학적 이방성상수

식(1), (3)에서

$$r' = r + z_0 c t \text{grad}[(\sigma_1 + \sigma_2) \pm \lambda(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (4)$$

등방성재료에서 λ 는 0이고, 식(4)와 균열선단에서의 응력분포식에 대입하여 정리하면 사상방정식(mapping equation)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} x' &= r \cos \theta + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} z_0 c t r^{-3/2} \cos \frac{3}{2} \theta \\ y' &= r \sin \theta + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} z_0 c t r^{-3/2} \sin \frac{3}{2} \theta \end{aligned} \quad (5)$$

코스틱스곡선이 형성되기 위한 필요충분 조건식은 다음과 같다.

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x'}{\partial r} & \frac{\partial x'}{\partial \theta} \\ \frac{\partial y'}{\partial r} & \frac{\partial y'}{\partial \theta} \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

Jacobian 판별식 J 가 "0"이 되는 시편상의 점들의 궤적을 초기곡선이라 하며, 이것이 스크린에 사상되어 코스틱스곡선이 형성된다.

2.2 동적 균열선단에서의 코스틱스의 형상

모드 I의 하중을 받으며 순간 균열전파속도 $v = da/dt$ 로 전파하는 균열선단 부근의 동적 응력분포는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1 + \alpha_2^2}{4\alpha_1\alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2}$$

$$\begin{aligned} & \left[(1 + 2\alpha_1^2 - \alpha_2^2) p(\bar{\theta}, \alpha_1) - \frac{4\alpha_1\alpha_2}{1 + \alpha_2^2} p(\bar{\theta}, \alpha_2) \right] \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1 + \alpha_2^2}{4\alpha_1\alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2} \\ & \left[-(1 + \alpha_2^2) p(\bar{\theta}, \alpha_1) - \frac{4\alpha_1\alpha_2}{1 + \alpha_2^2} p(\bar{\theta}, \alpha_2) \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{1 + \alpha_2^2}{4\alpha_1\alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)^2} \alpha_1 [q(\bar{\theta}, \alpha_1) - q(\bar{\theta}, \alpha_2)] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} p(\bar{\theta}, \alpha_j) &= \frac{[\cos \bar{\theta} + (\cos^2 \bar{\theta} + \alpha_j^2 \sin^2 \bar{\theta})^{1/2}]^{1-\alpha_j^2}}{(\cos^2 \bar{\theta} + \alpha_j^2 \sin^2 \bar{\theta})^{1-\alpha_j^2}} \\ q(\bar{\theta}, \alpha_j) &= \frac{[-\cos \bar{\theta} + (\cos^2 \bar{\theta} + \alpha_j^2 \sin^2 \bar{\theta})^{1/2}]^{1-\alpha_j^2}}{(\cos^2 \bar{\theta} + \alpha_j^2 \sin^2 \bar{\theta})^{1-\alpha_j^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\alpha_j = \left(1 - \frac{v^2}{c_j^2}\right)^{1/2} \quad j=1, 2 \quad (9)$$

증파속도 :

$$c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (10)$$

횡파속도는 아래와 같다.

$$c_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (11)$$

위의 동적 응력분포의 이동좌표계에 대한 사상방정식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \bar{x}' &= \bar{r} \cos \bar{\theta} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} z_0 c t \bar{r}^{-3/2} F^{-1} G_1(\alpha_1, \bar{\theta}) \\ \bar{y}' &= \bar{r} \sin \bar{\theta} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} z_0 c t \bar{r}^{-3/2} F^{-1} G_2(\alpha_1, \bar{\theta}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$F = \frac{4\alpha_1\alpha_2 - (1 + \alpha_2^2)}{(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)(1 + \alpha_2^2)} \quad (12)$$

$$G_1(\alpha_1, \bar{\theta}) = \frac{-1}{\sqrt{2}}(g^{1/2} + \cos \bar{\theta})^{-1/2} \\ (g^{-1/2} - g^{-1}\cos \bar{\theta} - 2g^{-3/2}\cos^2 \bar{\theta})$$

$$G_2(\alpha_1, \bar{\theta}) = \frac{-1}{\sqrt{2}}(g^{1/2} + \cos \bar{\theta})^{-1/2} \\ (\alpha_1^2 g^{-1}\sin \bar{\theta} - \alpha_1^2 g^{-3/2}\sin 2\bar{\theta})$$

$$g = 1 + (\alpha_1^2 - 1)\sin^2 \bar{\theta} \quad (13)$$

함수 $G_1(\alpha_1, \bar{\theta})$ 와 $G_2(\alpha_1, \bar{\theta})$ 에서 α_1 의 영향은 실제의 균열속도(즉, $v < 0.3c_1$)에 비해 무시할 정도로 작기 때문에 공학적인 정확도를 고려하면 $G_1(\alpha_1, \bar{\theta})$ 와 $G_2(\alpha_1, \bar{\theta})$ 는 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$G_1(\alpha_1, \bar{\theta}) \approx \cos \frac{3}{2}\bar{\theta}$$

$$G_2(\alpha_1, \bar{\theta}) \approx \sin \frac{3}{2}\bar{\theta} \quad (14)$$

식(14)의 간략화한 식을 이용하여 초기곡선 \bar{r} 를 구하면 다음과 같다.

$$\bar{r} = \left[\frac{3}{2} \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} z_0 c t F^{-1} \right]^{2/5} \equiv r_0 \quad (15)$$

결과적으로 동적 응력확대계수를 결정하는 식은 다음과 같이 된다.

$$K_I^{dyn} = 0.0934 F \frac{D^{5/2}}{z_0 c t} \quad (16)$$

위의 식(16)을 이용하여 코스틱스지름을 측정함으로써 시간에 대응되는 동적 응력확대계수를 결정할 수 있다.

3. 실험방법

본 연구를 수행하기 위하여 동적 응력확대계수를 측정하거나 결정하는 여러가지 방법 중 동적 코스틱스방법과 동적 유한요소해석에 의한 방법을 사용하였다.

3.1 동적 코스틱스방법

Fig. 2는 고속카메라 시스템의 개략도이다. 이 시스템은 크게 두 부분으로 구성되어 있는데, 하나는 광학축과 45° 각도로 기울어져 있고 고속터빈 회전축에 부착된 거울을 이용한 고속카메라와 들쭉는 광원인 5 Watt 알곤펄스레이저(argon pulse

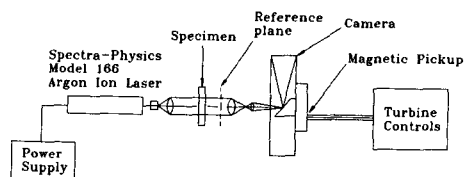


Fig. 2 Schematic of high speed camera system

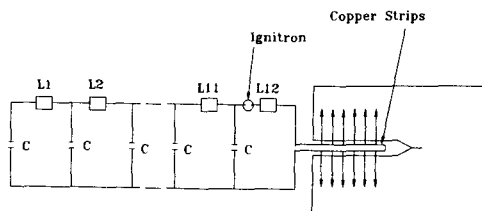


Fig. 3 Electromagnetic loading scheme

laser)로 구성되어 있다. 터빈이 고속회전을 함에 따라 광원으로부터 나온 빛은 시편과 렌즈를 통과하여 경사진 거울에 의해 반사되어 35 mm 원통 필름트랙 위에 동적 코스틱스형상이 순차적으로 투사하게 된다. 터빈과 같이 회전하는 128개의 이를 가진 휠은 각각의 이가 자장을 지날때 터빈의 회전과 레이저펄스를 일치시켜주는 타이밍펄스(timing pulse)를 발생시키고, 각 레이저펄스는 20 nsec를 유지하며 필름면에 별도의 상을 형성한다. 또 터빈 1회전에 128번

레이저펄스만을 발생시키게 하는 binary counter에 의해 필름상에 겹치는 것을 방지한다. 이 시스템은 1초에 100만 장을 찍을 수 있고 터빈의 회전속도에 의하여 조정된다. 본 논문의 경우 1초에 12.5~10만 장을 찍을 수 있도록 세팅하여 실험하였다.

Fig. 3은 전자기 하중장치(electro-magnetic loading device)를 나타낸 것으로서 접은 구리판을 크랙사이 틈새에 삽입시키고 비전도체인 mylar판으로 절연시켰다. 전류가 루프를 통해 흐를때 균열선단에 삽입된 구리판 주위에 자장이 발생된다. 자장벡터는 전류벡터에 법선방향으로 존재하므로 각 균열선단 구리판에서 전자기압력(electro-magnetic pressure)을 발생시킨다. 고속카메라는 균열에 하중이 작용하기 전에 30 μsec에서 트리거되므로 균열선단은 이미 초기 균열이 성장되기 전부터 기록되게 하였다.

3.2 동적 유한요소해석방법

동적 유한요소해석 프로그램에 사용되는 균열전파 시간에 대한 균열전파 거리의 입력데이터는 측정회로 장치가 간단하고 가격이 저렴하며, 비교적 신뢰성이 있다. 이런 균열전파속도 측정장치는 균열이 전파되어 나가는 부위에 일정한 간격으로 몇 개의 전도선인 은선을 그어서 은선이 파단될때 발생하는 신호에 의하여 균열의 전파시간을 측정하는 방법이다. 이 장치는 16개의 전도선을 사용할 수 있는 균열측정장치이며 예상되는 균열전파 경로에 +5V의 일정전압을 입력한 전도선인 은선들은 균열선단의 진전에 의해 끊어져면서 스위치 역할을 하며 동시에 입력신호를 발생 시킨다. 첫번째 전도선이 끊어졌을때 +5V가 출력되며 두번째 전도선이 끊어졌을때 0V가 출력된다. 본 연구에서는 이런 과정을 반복하여 최대 8개의 사각파를 발생시키게 하였다. 입력전원은 전도선이 끊어졌을때 순간적으로 접지되어야 하므로 트리거선과 리셋스위치의 전원용으로 각각 5V씩 사용하였다. 데이터를

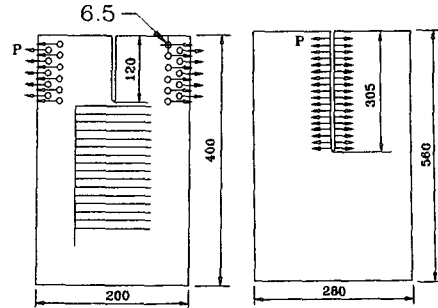


Fig. 4 Specimen configuration

기록하기 위하여 시편에 그은 은선중 첫번째선을 트리거 선으로 이용하였으며 상온에서 만능 재료시험기(toyo baldwin 10 ton)를 이용하여 인장속도 200 mm/min로 실험하였다. 균열선단으로부터 각각 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, 15 mm 간격으로 일정하게 8~16개의 은선을 그어서 균열이 전파되면서 파단된 신호를 데이터 기록장치를 사용하여 저장하였다. 균열 측정장치에서 출력된 신호는 nicolet

Table 1 Material properties and summary of experimental data

Material property

Materials	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio	Yield stress (MPa)	Ultimate stress (MPa)	Density (Kg/m ³)
PMMA	3240	0.35	32.37	44.93	1180
Homalite-100	3900	0.31	-	48.93	1230
Polycarbonate	2724	0.38	64.19	65.56	1120

Summary of experimental data

Homalite-100#1	10	4	-9.06×10^{-10}	4.7625	1.6764
Homalite-100#2	10	4	-9.06×10^{-10}	4.7625	0.8382
PMMA #1	8	8	-1.08×10^{-10}	4.7625	1.6764
PMMA #2	8	6	-1.08×10^{-10}	4.7625	1.6764

Specimen	Initial crack length(mm)	Grid gap(mm)	Thickness(mm)
PMMA #3	120	10	3.0
PMMA #4	120	15	5.0
Polycarbonate	120	5	4.5

digital storage oscilloscope를 이용하여 데이터를 기록, 저장하였다. 본 실험에 사용된 Homalite-100, PMMA, polycarbonate 재료의 물성치와 실험조건은 Table 1과 같다.

본 연구에 사용된 시편은 Fig. 4와 같이 균열이 진전하면서 균열선단에서 발생하는 탄성파가 시편의 경계에서 반사되고 이 탄성파가 진전하는 균열에 인장 또는 압축영향을 주기 때문에 크랙이 진전되는 동안 반사되는 탄성파의 영향을 받지 않도록 시편의 크기를 정하였으며 두께 3 mm, 4.5 mm, 4.76 mm, 5 mm 등의 시편을 가공하여 사용하였다. 실험에 사용한 고분자재료는 단순한 탄성재료로 가정하였다.

3.3 INSAMCR 코드

동적 균열의 전파 및 정지현상을 해석하기 위하여 미국 Maryland 대학에서 응용모드(application mode)용으로 개발한 동적 2차원 유한요소해석 프로그램을 generation모드의 해석이 가능하도록 연구목적에 적합하게 수정 보완하여 사용한 코드는 4 절점 Isoparametric 요소들로 이루어져 있고 가상일의 원리를 이용한 것이다.⁽¹³⁾ 응용모드는 균열전파속도와 동적 파괴인성치를 재료의 특성으로 간주하여 균열전파시간과 균열길이의 관계를 규명할 수 있도록 작성한 것이고, generation모드는 균열전파속도와 시간의 관계를 이용하여 동적 파괴인성치와 동적 균열진전속도를 추출해 낼수 있는 방법을 말한다. 이 프로그램은 동적 응력확대계수의 결정을 위하여 순간적인 탄성응력장을 이용하여 선적분으로 계산되는 J -적분을 사용하였고 스트레인, 파괴 및 운동에너지, viscous, 총 에너지를 계산함으로써 크랙이 전파하는 전 구간에 걸쳐 에너지의 증감을 보여준다. 동적균열의 전파모델은 각각의 균열진전 증분치에 대한 균열선단의 구속력이 선형적으로 감소한다는 절점력 이완거동을 이용하였다.

INSAMCR 프로그램을 사용하여 동적 균열전파 해석을 검증하기 위해 미국 Maryland 대학에서 실행하였던 Homalite-100 MCT(modified compact tension) 시편을 사용하여 비교하였다. 사용된 MCT시편을 본 프로그램에서 해석할 수 있도록 요소분할하였으며, 요소수는 598개이고 절점수는 658개이다. 이때 입력값으로 들어가는 상기 대학의 실험에 의한 Homalite-100 재료의 균열전파속도와 응력확대계수와의 관계는 상기 대학에서 실험으로

구한 선도로부터 8점을 임의로 입력하였다.

검증결과는 동일 조건하에서의 Homalite-100 재료로 만든 MCT시편의 동적 균열전파해석을 본 연구의 INSAMCR 프로그램으로 해석한 내용과 미국 Maryland 대학에서 해석한 내용을 비교하여 균열전파시간에 따른 균열전파거리를 나타낸 것으로서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

INSAMCR은 동적 해석모드이며 프로그램을 실행시키기 위해서는 균열이 개시되는 하중에서의 정적변위가 입력데이터로 요구되기 때문에 NISA를 이용하여 정적으로 해석한 정적변위와 하중을 입력 데이터로 이용하였다.

4. 실험결과 및 해석

Fig. 5는 두께 4.76 mm인 PMMA시편의 균열전파에 따른 동적 코스트릭형상을 고속카메라 시스템으로 촬영한 대표적인 사진이다. 사진에서 볼 수 있듯이 시간이 경과함에 따라서 균열선단의 위치가 점점 증가하는 것을 보여주며 동적 코스트릭의 크기는 새롭게 생성되는 동적 응력장의 변화에 따라 그 크기가 변하는 것을 알 수 있다. 동적 코스트릭 주변에 생기는 물결모양의 파형은 미소한 균열의 생성, 파단에 의해 발생하는 응력파들이 전파하는 양상을 보여 주고 있다.

Fig. 6은 동적 균열해석 유한요소 프로그램을 사용하여 계산한 두께 3 mm와 5 mm인 PMMA 시편과 두께 4.5 mm인 Polycarbonate 시편들에 대한 시편 균열길이에 대응하는 각종 에너지의 변화를 나타내었다. 여기서, 파괴에너지(fracture energy)는 선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 각 시편들에 대한 에너지의 절대크기는 차이가 있지만 전파거리에 따른 에너지의 변화경향은 동일하며 균열전파 초기에는 변형에너지의 영향이 크며 중·후반에는 파괴에너지와 운동에너지의 영향이 커짐을 알 수 있다. 전체에너지 값은 균열이 전파하는 시간동안 일정한 값이 유지되므로 동적 균열전파 실험데이터를 이용한 동적 유한요소해석방법 및 과정의 신뢰성을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 균열전파시간에 따른 동적 균열전파거리와 동적 응력확대계수와의 관계를 각 시편에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에는 균열전파길이에 대응하는 균열전파속도도 표시하였다. (a), (b)는 두께 4.67 mm의 Homalite-100과 (c), (d)는 두께

4.67 mm의 PMMA 재료에 대한 동적 코스틱스 실험에 의한 결과를 나타낸 것이며 (e), (f), (g)는 각각 두께 3mm와 5mm의 PMMA와 두께 4.5mm

의 Polycarbonate 시편에 대한 결과이다. 균열전파 시간의 증가에 따른 동적 균열전파거리는 가속-감속의 연속적인 반복과 더불어 선형적으로 증가하며

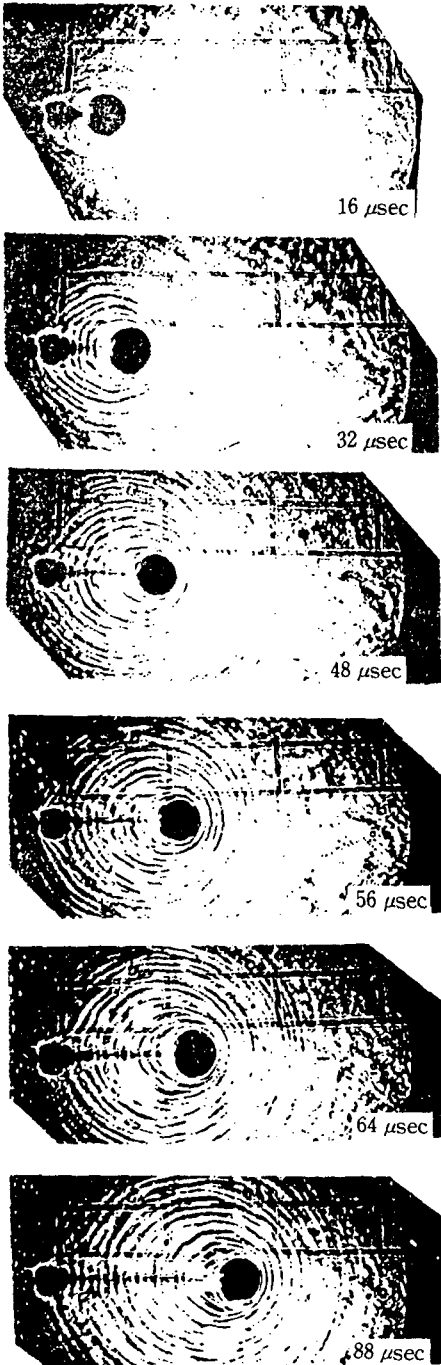
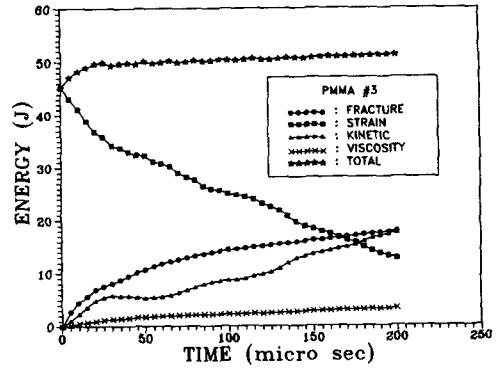
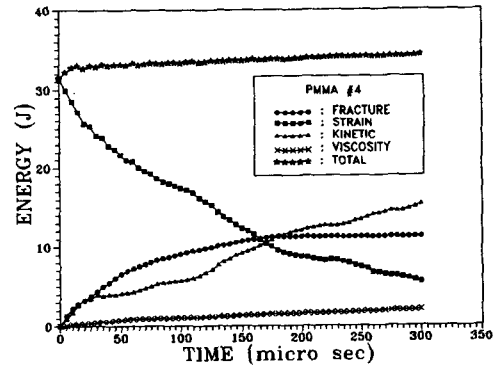


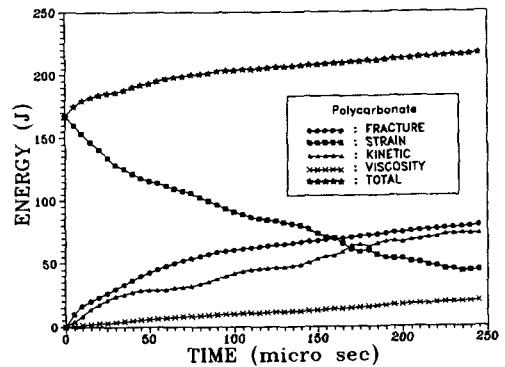
Fig. 5 High speed cinematographs of a running crack



(a) PMMA, thickness 3 mm, INSAMCR code method

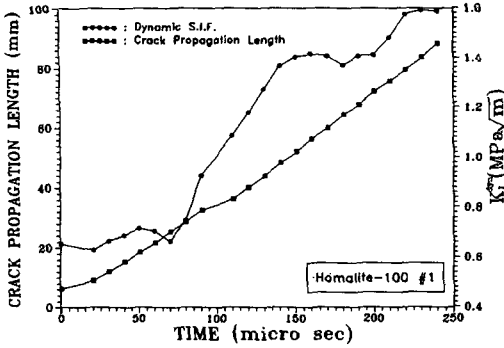


(b) PMMA, thickness 5 mm, INSAMCR code method

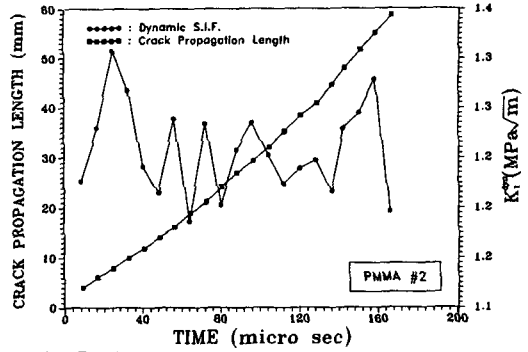


(c) Polycarbonate, thickness 4.5 mm, INSAMCR code method

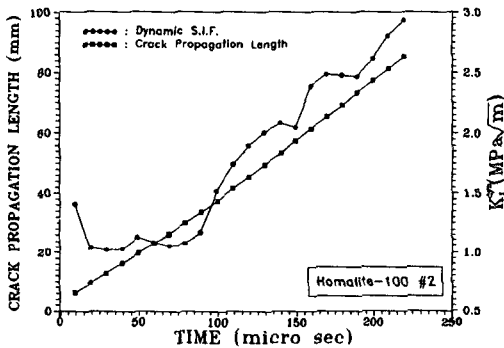
Fig. 6 Predicted energy as a function of crack propagation time



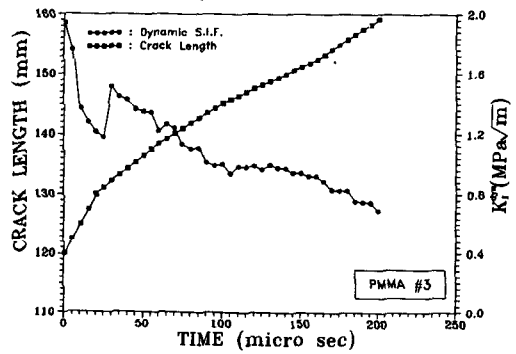
(a) Homalite-100, thickness 4.76 mm, $z_0=1$. 6764 m, dynamic caustics method



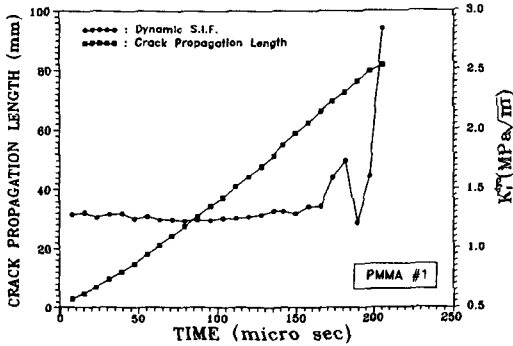
(d) PMMA, thickness 4.76 mm, loading voltage=4 KV, dynamic caustics method



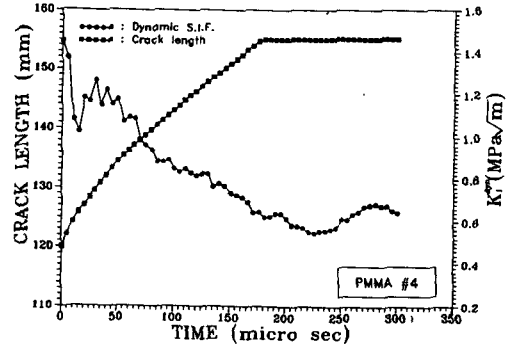
(b) Homalite-100, thickness 4.76 mm, $z_0=0$. 8382 m, dynamic caustics method



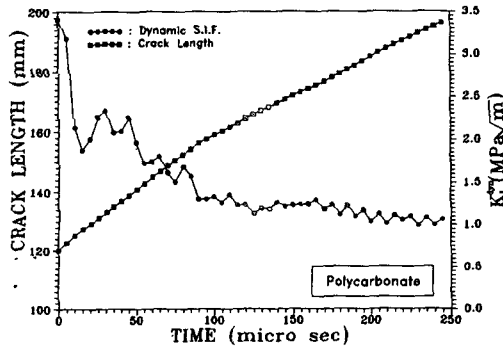
(e) PMMA, thickness 3 mm, INSAMCR code method



(c) PMMA, thickness 4.76 mm, loading voltage=8 KV, dynamic caustics method



(f) PMMA, thickness 5 mm, INSAMCR code method



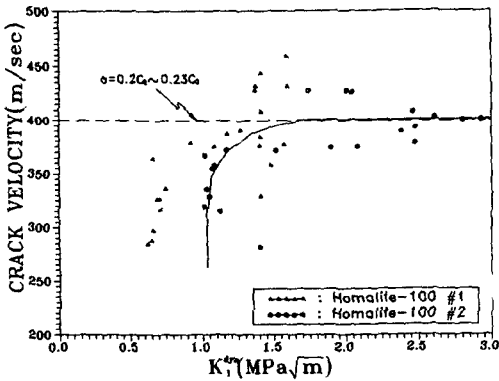
(g) Polycarbonate, thickness 4.5 mm, INSAMCR code method

Fig. 7 Dynamic stress intensity factor and crack propagation length as a function of time

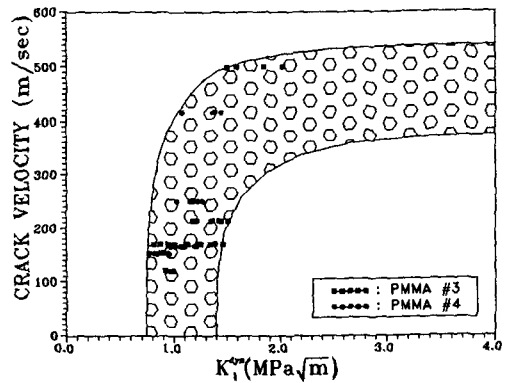
(a)의 경우 동적균열이 전파개시한 후 약 90 μ s에서 (f)의 경우 70 μ s에서 (g)의 경우 90 μ s에서 동적 균열이 정지하는 현상(1차 균열정지)을 볼 수 있다. 정적하중하에서 실험이 행해진 (e), (f), (g)의 경우 동적 균열전파 개시후 동적 응력확대계수는 균열전파시간에 따라 감소하면서 1차 균열정지를 일으킨 후에는 균열 정지인성치인 일정한 값에 감소진동하면서 수렴하는 것을 볼 수 있다. (a), (b), (c), (d)와 같이 동적 코스틱스방법에 의한 결과에서는 전파초기의 동적 응력확대계수값이 균열이 전파하는 동안 커짐을 볼 수 있는데 이것은 본 연구에 사용한 전자기 하중장치에 의한 하중이 고전압(4 KV~8 KV)에서 사이라트론 점화장치(thyratron-ignitron firing system)에 의해 방전되기 때문에 실제로 균열선단에서 받는 하중은 충격하중과 비슷한

효과를 가지며 동적 하중을 받는 고정균열(dynamically loaded stationary cracked) 조건의 실험결과와 같은 결과를 나타낸다. 이 결과는 Krishnaswamy, 등⁽¹²⁾이 연구한 동하중하의 균열의 해석결과와 일치함을 보여준다.

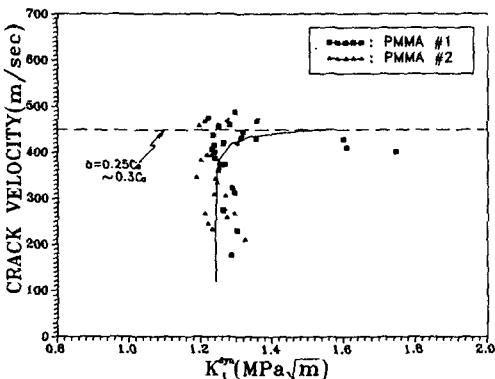
Fig. 8은 동적 응력확대계수(K_I^{dyn})에 대한 균열전파속도의 전반적인 관계를 거시적 관점에서 시편의 종류와 측정방법에 따라서 나타낸 것이다. (a)는 두께 4.67 mm의 Homalite-100재료, (b)는 PMMA 재료의 동적 코스틱스방법으로 측정된 결과이고, (c)는 두께 3 mm와 5 mm의 PMMA 재료, (d)는 두께 4.5 mm의 Polycarbonate재료에 대하여 해석한 결과를 나타낸 그림이다. 동적 균열전파속도에 대한 동적 응력확대계수는 (a)의 경우 약 $0.8 < K_I^{dyn} < 1.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서 (b)의 경우 약 $1.2 < K_I^{dyn} < 1.4$



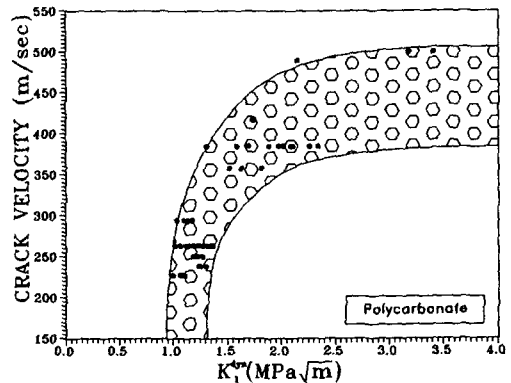
(a) Homalite-100, thickness 4.76 mm, dynamic caustics method



(c) PMMA, INSAMCR code method



(b) PMMA, thickness 4.76 mm, dynamic caustics method



(d) Polycarbonate, INSAMCR code method

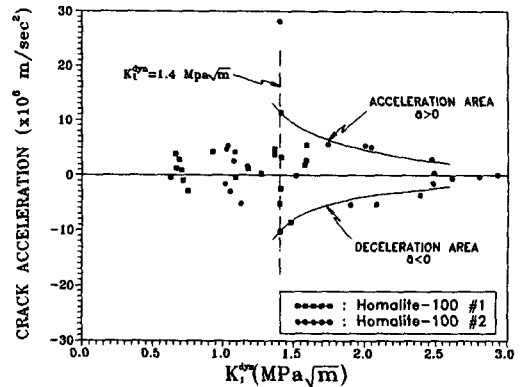
Fig. 8 Relationship between dynamic stress intensity factor and dynamic crack tip velocity

MPa√m 사이에서 (c)의 경우 약 $0.8 < K_I^{dyn} < 1.4$ MPa√m에서 (d)의 경우 약 $1 < K_I^{dyn} < 1.3$ MPa√m 사이에서 수렴을 하며 모두 전형적인 Γ 형의 곡선을 나타낸다.

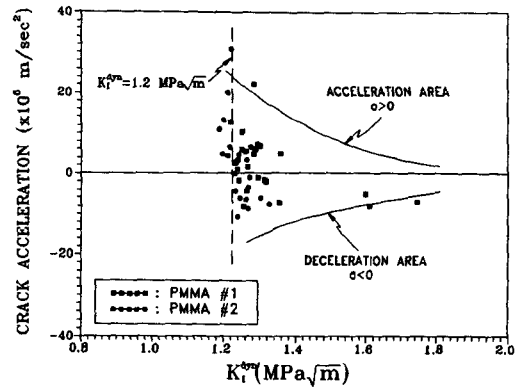
이 때 수렴하는 동적 응력확대계수의 값인 동적 정지인성치(K_{Ia})의 값을 비교해 보면 동적 코스틱스방법으로 측정된 PMMA재료의 동적 정지인성치 (b)와 동적 유한요소법으로 해석한 동적 정지인성치의 값이 실험방법의 특성상 그 데이터 산포도의 차이는 있지만 가속도가 영인 점을 연결하여 수렴하는 값에 대해서는 두 방법이 거의 일치하는 경향을 보여주고 있다. 더구나 고속카메라의 frame rate를 빠르게 하고 전도선 그리드의 간격을 짧게 한다면 두 방법의 측정값이 잘 일치하리라 생각된다.

동적 균열전파속도와 가속도가 동적 응력확대계수와의 관계를 규명하기 위하여 두께 4.76 mm, 하중전압 4 KV, 서터속도 8 μs의 시험조건으로서 동적 코스틱스방법으로 측정된 Homalite-100재료에서의 동적균열이 전파하는 순서를 Fig. 9에 도시하였다. 동적 균열의 속도가 가속 혹은 감속되는 현상과는 관계없이 동적 응력확대계수는 연속적으로 증가하는 양상을 나타내고 있으며, 부분적으로는 감속될 경우의 동적 응력확대계수값이 가속되는 동적 응력확대계수값보다 크다는 사실을 알 수 있다. 또한 가속도가 영인 부분을 기준으로 가속도영역과 감속도영역을 가지며 부분적으로 동적 응력확대계수에 대해 반시계방향으로 회전을 하면서 전체적으

로 증가하며 같은 속도에서 가속도의 값은 감속도의 값에 비해 작게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 균열전파속도는 약 450 mm/sec에서 최대값을 가지



(a) Homalite-100, thickness 4.76 mm, dynamic caustics method



(b) PMMA, thickness 4.76 mm, dynamic caustics method

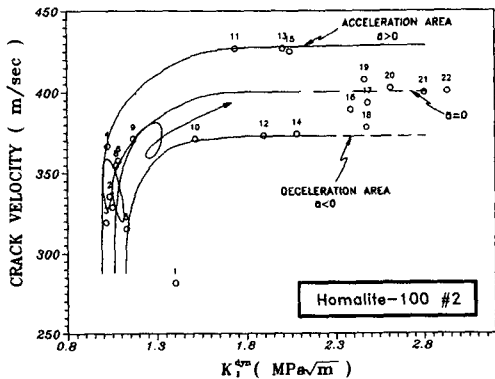
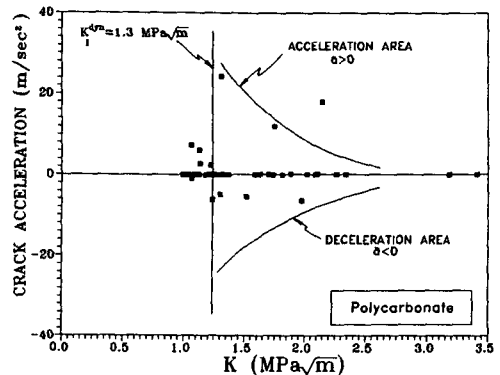


Fig. 9 Relationship between dynamic stress intensity factor and dynamic crack tip velocity (Homalite-100, thickness 4.76 mm, $z_0=0.8282$ m, dynamic caustic method)



(c) Polycarbonate, INSAMCR code method

Fig. 10 Relationship between dynamic stress intensity factor and dynamic crack tip acceleration

며 이 속도는 Homalite-100 재료의 elastic wave velocity C_1 (1780 m/s)의 약 25%값에 해당한다.

Fig. 10은 동적 응력확대계수값(K_{dyn}^n)의 크기에 대해서 균열전파 가속도 값들의 분포양상을 각 시편에 따라 나타낸 것으로서 동적 응력확대계수가 낮은 값에 대해 거의 산포해 있으며 그 산포는 동적 응력확대계수의 값이 증가함에 따라 가속도가 영인 값에 수렴하는 경향을 보이고 있다. (a)는 두께 4.67 mm의 Homalite-100재료, (b)는 PMMA 재료의 동적 코스틱스방법으로 측정된 결과이고, (c)는 두께 4.5 mm의 Polycarbonate재료에 대하여 해석한 결과를 나타낸 그림이다. 동균열가속도의 산포도가 크게 나타나는 부분은 (a)의 경우가 $1.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, (b)의 경우 K_{dyn}^n 가 $1.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, (c)의 경우 $1.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서 가속도의 산포가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 동적 응력확대계수에 대해 가속도 크기가 변화함을 보여주며, K_{dyn}^n 의 낮은 값에서는 균열의 전파가 가속과 감속의 변화가 심하게 반복되면서 전파가 일어나고, 전반적으로 K_{dyn}^n 값이 증가함에 따라 가속도의 변화가 적고 안정된 균열전파를 한다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 PMMA, Homalite-100, Polycarbonate의 동적 균열전파속도와 가속도가 동적 응력확대계수(K_{dyn}^n)에 미치는 영향에 대하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 고분자재료에서 균열전파속도와 동적 응력확대 계수의 관계는 순간적인 가속감속과 더불어 연속적으로 증가하는 Γ 형을 나타낸다.

(2) 동적 응력확대계수가 낮은 값에서 가속도변화의 분포가 크게 나타나고 계수의 값이 증가할수록 0으로 수렴하는 경향을 보인다. 즉 K_{dyn}^n 값이 증가함에 따라 가속도의 변화가 작아지므로 일정한 속도로 균열이 전파된다.

(3) Homalite-100의 경우 K_{dyn}^n 가 $1.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, PMMA의 경우 K_{dyn}^n 가 $1.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, Polycarbonate의 경우 K_{dyn}^n 가 $1.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서 가속도의 변화분포가 넓게 나타난다.

(4) PMMA의 경우 균열전파속도 측정장치에 의해 측정된 속도를 이용하여 동적 유한요소법으로 해석한 결과와 동적 코스틱사진을 촬영하여 얻어진 결과와 일치한다.

후 기

본 연구는 92년도 한국과학재단 특정기초 연구과제(과제번호: 92-23-00-13) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Andrew, E. H., 1968, *Fracture in Polymer*, America Elsevier.
- (2) Williams, J. G., 1980, *Stress Analysis of Polymer*, Ellis Horwood Limited.
- (3) Kalthoff, J. F., Beinert, J. and Winkler, S., 1979, "Measurement of Dynamic Stress Intensity Factors for Fast Running and Arresting Cracks in Double Cantilever Beam Specimen," *Fast Fracture and Crack Arrest, ASTM STP 627*, pp. 161~176.
- (4) Kobayashi, A. S. and Yang, K. H., 1989, "Dynamic Crack Arrest in Ceramic and Ceramic Composites," *Dynamic Fracture Mechanics for the 1990's, ASME*, Vol. 160, pp. 93~98.
- (5) Yoffe, E. H., 1960, "The Moving Griffith Crack," *Phil. Magazine*, Vol. 18, pp. 739.
- (6) Irwin, G. R., 1978, "Photoelastic Studies for Crack Propagation and Arrest in Polymers and 4340 Steel," *U. S. NRC Report NUREG-75-107*, Univ. of Maryland.
- (7) Lee, O. S. and Knauss, W. G., 1989, "Dynamic Crack Propagation along a Weakly Bonded Plane in a Polymer," *Experimental Fracture Mechanics*, Vol. 39, No. 3, pp. 342~345.
- (8) 이억섭, 1986, "A Study on Crack Healing of Various Glassy Polymers Theoretical Modeling," 한국정밀공학회지, 제3권, 제1호, pp. 40~49.
- (9) Lee, O. S., et. al, 1978, "An Experimental Study on Crack Healing of Various Glassy Polymer," *J. of KSME*, Vol. 1, No. 1, pp. 65~69.
- (10) Lee, O. S. and Williams, J. H., 1991, "Ultrasonic Wave Characterization of Polymer," *Material Evaluation*, Vol. 49, No. 3, pp. 351~355.
- (11) Kobayashi, A. S. and Wade, B. G., 1973,

- "Crack Propagation and Arrest in Impact Plates," *Dynamic Crack Propagation*, ed. G. C. Shi, Noordhoff International, pp. 663.
- (12) Krishnaswamy, S., Rosakis, A. J. and Ravichandran, G., 1989, "A Bifocal Arrangement for Reflected Caustics for the Investigation of the Domain of Dominance of Asymptotic Elastic Fields in Dynamic Fracture," *Dynamic Fracture Mechanics for the 1990's*, ASME, Vol. 160, pp. 71 ~77.
- (13) Schwartz, C. W., Chona, R., Fournery, W. L. and Irwin, G. R., 1984, "A Two Dimensional Dynamic Finite Element Code for the Stress Analysis of Moving Cracks," *ORNL/Sub/79-7778/3*.