

동적 균열의 간섭

Interference between two dynamic cracks

이 익섭 (인하대학교 기계공학과), 최 인성* (인하대학교 대학원)

O. S. Lee and I. S. Choi

ABSTRACT : The interference phenomenon of a dynamic crack propagation in a inclined DEN(double edge notched) specimen has been investigated by using the dynamic photoelasticity. One crack initiated by static loading is propagated dynamically and experiences a mixed mode condition(interference) as the crack approaches to the inclined edge notch. We use the overdeterministic least-square method to extract dynamic K_{Ia} , K_{IIa} and σ_{ox} from the recorded dynamic photoelastic pattern surrounding a running crack. The evaluated K_{Ia} , K_{IIa} and σ_{ox} together with the crack propagation velocity estimate the dynamic crack interference phenomenon

Key words : Crack acceleration effect(균열가속효과), Crack curving(균열 휨), Crack propagation velocity(균열전파속도), Dilatational wave velocity(종파속도), Distortional wave velocity(횡파속도), Dynamic stress intensity factor(동적 응력확대계수), Overdeterministic least-square method(과도결정-최소자승법)

1. 서론

파괴역학은 하중조건이나 균열선단의 전파거동에 따라 크게 정적 파괴역학과 동적 파괴역학으로 나눌수 있는데, 동적 파괴역학은 복잡한 실험장비가 필요하고 이론이 복잡하기 때문에 정적 파괴역학에 비해 상대적으로 활발하지 못하다. 일반적으로 파괴개시인성치는 같은 재료라 할지라도 하중률에 따라서 현저한 차이를 보이고 있다. 또 균열이 불안정하게 전파되고 있을 경우에는 소위 동적 파괴인성값(K_{Ia})은 균열의 전파속도에 따라서 변화할 것이다. 따라서 정적인 하중조건으로 구한 재료의 특성값 즉 정적 파괴인성치, K_{Ic} 는 어느 특정한 경우의 하중률의 경우에 대한 적절한 설계값으로 이용될 때가 많으며, 급격한 하중변화가 있는 경우에는 이 조건에 맞는 파괴 인성치를 구하여 설계값으로 사용해야 할 것이다^[1]. 동적 파괴역학의 연구는 Yoffe^[2]가 1951년에 인장하중을 받고 있는 무한탄성체 안에서 고정된 크기를 갖는 균열이 일정한 속도로 전파될 때 균열선단응력과 변위를 최초로 해석적으로 유도하였다. 그 후 Well와 Post^[3]는 동적 광탄성 실험법에 의해 빠르게 움직이는 균열선단 부근의 등색선을 고속 촬영하여 정지응력장과 비교하였다. 이 연구방법은 Kobayashi^[4]와 Dally^[5]등에 의해 더욱 깊게 연구되었다. Schardin^[6]은 Multi spark를 광원으로 사용한 고속촬영기술을 개발하여 Plexiglass의 파괴거동을 실험

적으로 규명하려고 시도하였고 균열의 분지(Branching)에 대하여 연구하였다.

동적 응력확대계수는 시편의 형상이나 하중 및 경계조건에 영향을 받고 균열선단부근의 응력장이나 변형장의 지배를 받으므로 응력확대계수를 결정하는 것은 파괴역학의 중요한 연구분야 중의 하나이며, 재료내에서 빠르게 전파하는 균열의 속도와 동적 응력확대계수의 관계를 비교함으로써 재료의 동적 파괴거동을 이해하고자 하는 많은 노력이 있어 왔다.

Polycarbonate와 같은 고분자재료의 경우 동적 균열전파현상을 고속카메라시스템으로 촬영하기 쉽고 데이터를 해석하기 용이하다는 점에서 광탄성 실험재료로 많이 사용하고 있고 또 많은 사람들에 의해서 이 재료의 시편형상과 하중·경계조건에 대한 균열전파속도와 동적 응력확대계수와의 관계가 연구되어 왔다.

그 밖에 특히 혼합모드일 경우 진전하는 균열선단에서의 동적 응력확대계수를 결정하기 위한 기법이 Kobayashi와 Ramulu^[7]에 의해 연구되었고 또한 균열전파가속도가 동적 응력확대계수에 미치는 영향과 균열 휨(Crack curving) 메카니즘을 규명하기 위한 연구가 진행되었다. 이런 맥락에서 빠른 속도로 전파중에 있는 균열이 응력집중이 일어나고 있는 정지한 균열선단에 의해 발생한 혼합모드하에서 어떤 거동을 보이는지에 대한 연구는 동적 파괴현상을 이해하는데 있어 도움이

되리라 생각한다. 본 연구는 동적 광탄성 실험을 통하여 Inclined double edge notched 시편의 두개의 경사진 노치 사이에서 동적 균열의 간섭이 일어나는 양상을 정성적으로 규명한 것이다.

2. 실험방법

2-1. 시험편

광탄성기법을 이용하여 동적 균열의 간섭 양상을 평가하기 위하여 145℃에서 어닐링처리된 두께 3.2mm의 Polycarbonate를 시험편으로 사용하였다. Polycarbonate의 동적 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Polycarbonate의 물성치

Properties	Unit	Value
Dynamic Elastic Modulus	Gpa	2.72
Dynamic Poisson's Ratio	-	0.36
Dynamic Fringe Value	kN/m-fringe	6.70
Density	kg-sec ² /m ³	122
Dilatational Wave Velocity	m/sec	1960
Distortional Wave Velocity	m/sec	910
Plate Wave Velocity	m/sec	1620

시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 두께 3.2mm인 시험편을 폭 127mm로 자른다음 동적 균열의 전파길이를 잴 수 있도록 미리 시험편 표면에 reference line을 표시하였고, 균열이 전파될때까지 계속적으로 하중 P(4000N)를 작용시켰다. 노치 선단은 두께 0.5mm의 saw cutter를 사용하여 Fig. 1에서처럼 시험편의 양쪽에 12°의 각도로 각각 28.6mm, 22.2mm의 길이로 가공한 후 민도날을 사용하여 tip부분을 자연균열에 가깝도록 다듬었다.

길이 28.6mm의 노치를 A노치, 길이 22.2mm의 노치를 B노치라 할때(이후로는 이렇게 부르도록 하겠다.) 균열전파개시가 예상되는 A노치의 끝부분에 은분페인트(silver paint)를 두께 1mm로 칠하여 균열전파개시가 일어나는 순간을 trigger할 수 있게 한다.

2-2. 광탄성 시험장치

Fig. 2는 Multi-spark gap high speed camera system의 개략도이다. 이 시스템은 16개의 Spark gap을 가진 Multi-spark light source와 Multi camera, Field lens, Circular polarizer set등의 광학계와 High voltage power supply등으로 구성되어 있고, 순간적인 방전이 조명역할을 하기 때문에 기계적인 셔터가 필요없다.

또한 각각의 Interframe사이의 시간간격을 조절할 수 있어서 동적 균열전파등 동적인 현상들을 가시화할 수 있는 실험장치

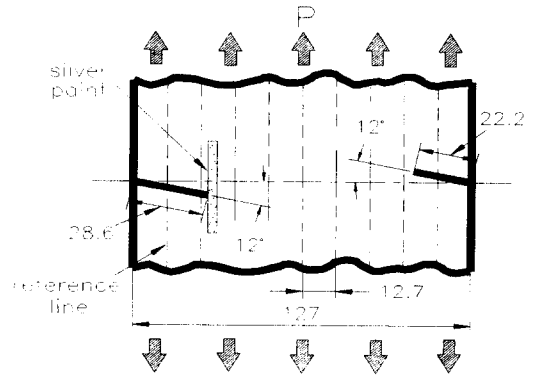


Fig. 1 시험편 형상 (단위 : mm)

이다. 작동원리는 Light source의 Spark gap양단의 Capacitor에 먼저 전기에너지를 저장한 후, Control unit에 미리 설정된 시간에 따라 출력되는 Trigger pulse로 16개의 Spark gap을 순차적으로 Trigger시키면 방전되는 전기에너지가 빛에너지로 전환되어 나온다. 이 빛이 필드렌즈를 거쳐 평광관을 통과하면서 평행광으로 바뀌는데 이 평행광은 시편을 통과하면서 매우 빠른 속도로 진전하는 응력의 흐름을 순간포착하며, 다시 분광관을 지나 필드렌즈를 통과한 뒤 광학계의 중심축에 대칭인 Multi camera의 대물렌즈로 입사하게 되며, Multi camera의 필름면에 상이 맺히게 된다.

3. 실험이론

동적 광탄성 실험에서 전파중에 있는 동적 균열주위의 혼란 모드 응력확대계수 K_{Ia} , K_{IIa} 와 σ_{ox} 를 구하기 위해서는 등색선상에서 r , θ 를 측정할 때 발생하는 측정오차를 최소화하는데 가장 적합한 OD-LSM(Overdeterministic least-square method)를 사용한다^[7].

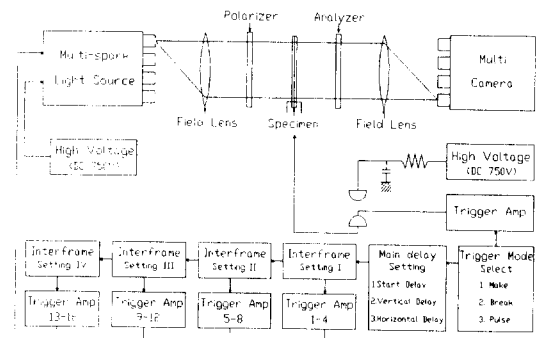


Fig. 2 동적 광탄성 실험장치 개략도

먼저 균열 선단 주위의 Maximum shear stress field는 극좌표계 r, θ 에 대해 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_m^2 = \frac{1}{4} \left(H^2 \frac{1}{r} + 2H\sigma_{\alpha\alpha} \frac{1}{\sqrt{r}} + \sigma_{\alpha\alpha}^2 \right) + J^2 \frac{1}{r} \quad (1)$$

여기서 H와 J는 다음과 같다.

$$H = \frac{K_I}{\sqrt{\pi}} B_I(c) \cdot \left\{ (1+s_1^2) [f(c_1) + g(c_1)] \right\}^{1/2} - \frac{4s_1s_2}{(1+s_2^2)} [f(c_2) + g(c_2)]^{1/2} \left\} - \frac{K_{II}}{\sqrt{\pi}} B_{II}(c) \cdot \left\{ (1+s_1^2) [f(c_1) - g(c_1)] \right\}^{1/2} - (1+s_2^2) [f(c_2) - g(c_2)]^{1/2} \right\}$$

$$J = \frac{K_I}{\sqrt{\pi}} B_I(c) \cdot s_1 \left\{ [f(c_1) - g(c_1)] \right\}^{1/2} - [f(c_2) - g(c_2)]^{1/2} \right\} + \frac{K_{II}}{4\sqrt{\pi}s_2} B_{II}(c) \cdot \left\{ 4s_1s_2 [f(c_1) + g(c_1)] \right\}^{1/2} - (1+s_2^2) [f(c_2) + g(c_2)]^{1/2} \right\}$$

$$B_I(c) = \frac{(1+s_2^2)}{4s_1s_2 - (1+s_2^2)^2}, \quad B_{II}(c) = \frac{2s_2}{4s_1s_2 - (1+s_2^2)^2}$$

$$f(c_1) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c_1^2} \sin^2 \theta}}, \quad f(c_2) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c_2^2} \sin^2 \theta}}$$

$$g(c_1) = \frac{\cos \theta}{1 - \frac{c^2}{c_1^2} \sin^2 \theta}, \quad g(c_2) = \frac{\cos \theta}{1 - \frac{c^2}{c_2^2} \sin^2 \theta}$$

$$s_1^2 = 1 - \frac{c^2}{c_1^2}, \quad s_2^2 = 1 - \frac{c^2}{c_2^2}$$

c, c_1, c_2 는 각각 균열전파속도, 종파속도 (Dilatational wave velocity), 횡파속도 (Distortional wave velocity)이다.

등색선상의 임의의 좌표점 (r_k, θ_k) 에서의 이론적인 τ_m 과 실험으로 구한 τ_m 의 차이는 다음과 같이 범함수 F_k 로 나타낼 수 있다.

$$F_k = \frac{1}{4} \left(H_k^2 \frac{1}{r_k} + 2H_k\sigma_{\alpha\alpha} \frac{1}{\sqrt{r_k}} + \sigma_{\alpha\alpha}^2 \right) + J_k^2 \frac{1}{r_k} - \tau_m^2 \quad (2)$$

여기서 $k = 1, 2, \dots, n$ 은 등색선상에서 측정된 임의의 데이터점의 갯수이다.

이론적인 τ_m 값과 측정된 τ_m 값이 일치하기 위해서는 $F_k = 0$ 이 되어야 한다. 그러나 정확하게 $F_k = 0$ 이 되는 것은 기대하기 어렵고 오차를 최소화 하기 위해서는 Taylor 급수전개 한 뒤 $\partial F_k / \partial K_{Id}, \partial F_k / \partial K_{IId}, \partial F_k / \partial \sigma_{\alpha\alpha}$ 를 계산하여 보통의 최소자승법의 과정에 따라 근사시켜야 한다.

위의 (2)식을 Taylor 급수전개하면 다음과 같다.

$$(\Delta F_k)_{i+1} = (F_k)_i + \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_I} \right)_i \Delta K_I + \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_{II}} \right)_i \Delta K_{II} + \left(\frac{\partial F_k}{\partial \sigma_{\alpha\alpha}} \right)_i \Delta \sigma_{\alpha\alpha} \quad (3)$$

여기서 i 는 i 번째 반복스텝을 의미하며 $\Delta K_{Id}, \Delta K_{IId}$ 및 $\Delta \sigma_{\alpha\alpha}$ 는 $(i-1)$ 반복스텝의 추정값에 대한 보정값이다. 이 보정값들은 $(\Delta F_k)_{i+1} = 0$ 으로 놓고 식(3)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-(F_k)_i = \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_I} \right)_i \Delta K_I + \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_{II}} \right)_i \Delta K_{II} + \left(\frac{\partial F_k}{\partial \sigma_{\alpha\alpha}} \right)_i \Delta \sigma_{\alpha\alpha} \quad (4)$$

이제 균열선단 부근의 몇개의 등색선상에서 $k=1, 2, \dots, n$ 개의 자료점을 취한다면 각각의 자료점에 대해서 식(4)를 쓸 수 있고 모든 선택한 자료점에 대해서

$$[F] = [Q] [\Delta K] \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있고 $[F], [Q], [\Delta K]$ 는 다음과 같다.

$$[F] = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix}_i, \quad [Q] = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial K_I} & \frac{\partial F_1}{\partial K_{II}} & \frac{\partial F_1}{\partial \sigma_{\alpha\alpha}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial K_I} & \frac{\partial F_2}{\partial K_{II}} & \frac{\partial F_2}{\partial \sigma_{\alpha\alpha}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial K_I} & \frac{\partial F_n}{\partial K_{II}} & \frac{\partial F_n}{\partial \sigma_{\alpha\alpha}} \end{pmatrix}_i, \quad [\Delta K] = \begin{pmatrix} \Delta K_I \\ \Delta K_{II} \\ \Delta \sigma_{\alpha\alpha} \end{pmatrix}_i$$

최소자승법은 식 (5)의 양변에 전치행렬 $[Q]^T$ 를 곱한뒤 다음의 과정을 따른다.

$$[Q]^T [F] = [Q]^T [Q] [\Delta K]$$

따라서

$$[\Delta K] = [[Q]^T [Q]]^{-1} [Q]^T [F] \quad (6)$$

식 (6)을 이용하여 컴퓨터 프로그램하여 초기 추정값 $K_{Id}, K_{IId}, \sigma_{\alpha\alpha}$ 를 우리가 원하는 실험결정값 $K_{Id}, K_{IId}, \sigma_{\alpha\alpha}$ 으로 수립시킬 수 있다.

4. 실험 결과

Fig. 3은 실험에 의해 얻어진 동적 광탄성사진을 나타낸 것으로 균열전파개시후 각각 $4.2\mu s, 27\mu s, 80\mu s, 110\mu s, 135\mu s, 179\mu s$ 에서 촬영된 것이다. 시간이 경과함에 따라 균열선단의 위치와 등색선들은 균열이 전파하는 양상을 보여준다. 그림을 자세히 보면 $80\mu s$ 가 지나서 Fringe pattern이 변하면서 균열의 전파경로가 조금씩 휘어지는 것을 알 수 있다.

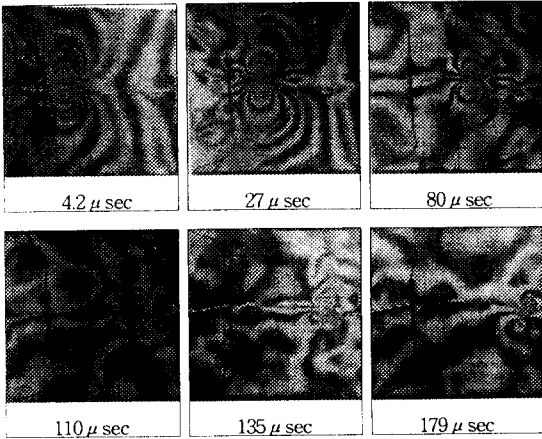


Fig. 3 Dynamic photoelastic fringe pattern

Fig. 4는 균열전파시간에 따른 균열의 전파거리와 속도를 나타낸 그림이다. 균열전파시간에 대해 균열의 전파거리는 거의 선형적으로 증가하며 균열전파속도는 순간적인 감속·가속과 더불어 전체적으로는 감소한다.

Fig. 5는 균열전파거리에 대한 동적 응력확대계수와 remote stress(σ_{ox}), c/c_1 의 관계를 나타낸 것으로 균열전파경로를 표시하였다. 동적 응력확대계수 K_{II} 와 c/c_1 은 균열 전파개시 후 시간이 지남에 따라 순간적인 감속·가속과 더불어 전체적으로는 감소하며 또 동적 응력확대계수 K_{II} 값이 작아질수록 상대적으로 c/c_1 의 감소폭이 큰 것을 알 수 있다. 이에 비해 Mode II에 대한 동적 응력확대계수 K_{II} 는 A노치에서 균열 전파개시가 일어난 직후와 균열이 B노치에 매우 가까워졌을 경우를 제외하곤 거의 "0"에 가까운 값을 갖는데 이것은 K_{II}/K_I 를 비교함으로써 더욱 자세히 알 수 있다. Fig. 6에서 보면 특히 B노치에 매우 가까워졌을 때 K_{II}/K_I 는 최대값(0.22)을 갖는데 이때 혼합모드상태는 분명해진다. 또한 Fig. 5에서 σ_{ox} 는 중간정도(11번째 frame)에서 최대가 되는데(Fig. 4와 비교하면 이점에

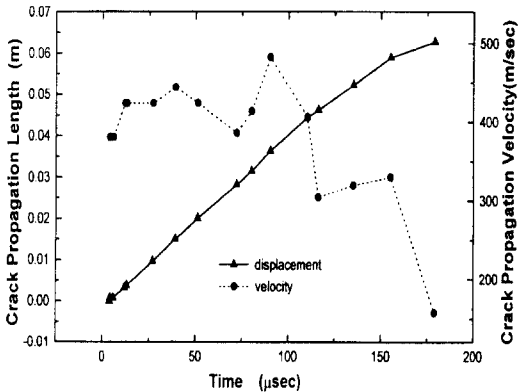


Fig. 4 시간에 따른 균열전파거리와 균열전파속도

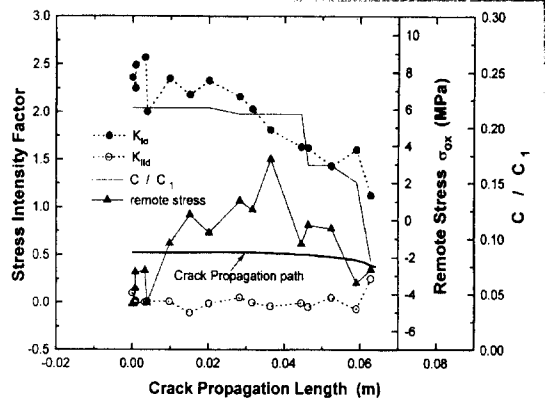


Fig. 5 균열전파거리에 대한 K_{II} , K_I , σ_{ox} , c/c_1 의 변화와 균열전파경로

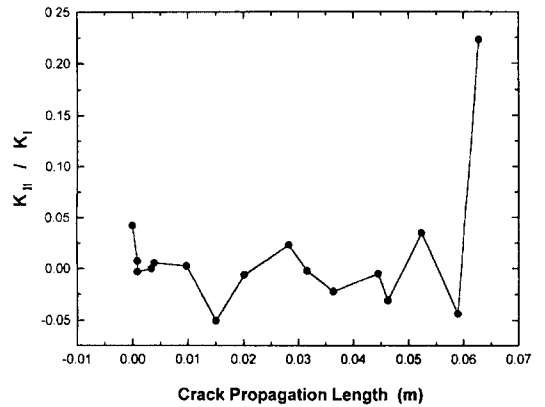


Fig. 6 균열전파거리에 대한 K_{II} / K_I 의 변화

서 균열전파속도가 최대값으로 점프하는 것을 알 수 있다) 이것은 균열개시와 함께 균열선단에서 발생한 압축파가 B노치의 free surface에서 반사된 뒤 다시 전파중인 균열선단으로 입사되면서 σ_{ox} 의 값에 영향을 준 것으로 생각된다. 그림에서 보면 이 σ_{ox} 가 최대가 되는 점에서부터 균열의 전파경로가 조금씩 휘기 시작하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 균열의 동적 거동에 대한 실험에서 흔히 "Γ"로 표시되는 균열전파속도-응력확대계수의 관계를 나타내는 것이다. 산포된 데이터들은 역시 "Γ"의 형태임을 알 수 있다. 이때 동적 균열전파속도의 최대치는 Dilatational wave velocity (1960 m/sec)의 약 25%인 482.6 m/sec로 나타났으며 c/c_2 의 최대값은 0.53이다. Fig. 8은 균열전파시간에 대하여 A노치에서 전파개시한 동적 균열선단과 응력집중이 일어나는 B노치에서의 혼합모드 응력확대계수 K_{II} , K_{II} 를 비교한 것인데 전파중인 동적 균열의 K_{II} , K_{II} 가 정지한 B노치의 K_{II} , K_{II} 보다 상대적으로 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 동적 균열의 K_{II} 값과 B노치의 K_{II} 값이 시간이 지남에 따라 점점 거의 같은 크기로

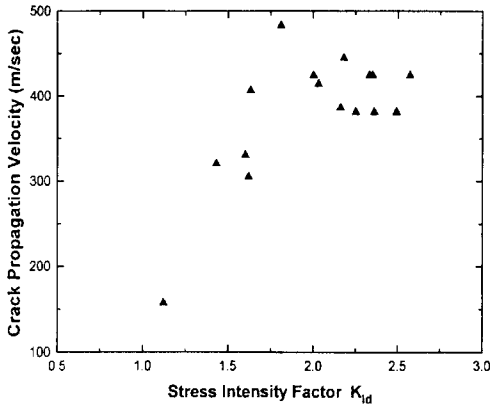


Fig. 7 K_{Ia} 와 균열전파속도와와의 관계

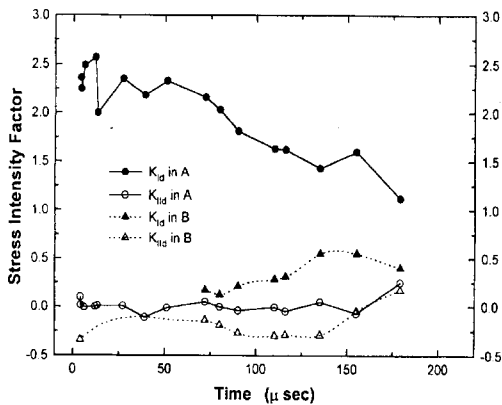


Fig. 8 균열전파시간에 대한 진전하는 동적 균열선단과 B노치의 선단에서의 K_{Ia} , K_{IIa} 의 비교

증가하는데 이것은 Figs. 5~6과 함께 전파중에 있는 동적 균열이 B노치에 의해 어떤 간섭 양상을 보이는지 예측할 수 있게 해준다.

5. 결론

Inclined double edge notched specimen에서 동적 균열이 어떤 간섭양상을 보이는지를 동적 광탄성방법으로 실험한 결과 본 연구의 범위내에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동적 균열의 σ_{ox} 는 균열전파개시와 함께 발생한 압축파가 B노치의 free surface에서 반사되어 다시 전파중인 균열선단으로 입사되는 시점에서 최대치(tensile stress)로 나타났고, 이때 균열전파는 불안정(unstable)하게 되어 균열전파경로가 조금씩 휘기 시작하였다.

2. 전파중에 있는 동적 균열의 K_{Ia} , K_{IIa} 는 초기에는 균열전파가 없는 B노치의 K_{Ia} , K_{IIa} 에 비해 상대적으로 큰 값을 가지고 B노치의 영향을 받지 않고 거의 독립적(Mode I)으로 거동하지만, 동적 균열이 B노치에 가까이 갈수록 그 차이가 점점 줄어들어 동적 균열의 K_{IIa}/K_{Ia} 는 최대치에 이르고 B노치의 K_{IIa} 값도 증가하여 균열가속효과와 균열 휨 현상이 더욱 크게 나타났다.

3. 동적 응력확대계수와 동적 균열전파속도의 관계는 순간적인 가속 감속과 더불어 연속적으로 증가하는 전형적인 Γ 형태로 나타났다.

참고문헌

- [1] 이 역 섭, "파괴 강도 설계", 인하대학교출판부, 1990
- [2] E. H. Yoffe, "The Moving Griffith Crack", *Phil. Magazine*, Vol. 18, 1960, p.739
- [3] A. A. Wells and D. Post, "The Dynamic Stress Distribution Surrounding Running Crack-A Photoelastic Analysis", *Proceedings of the SESA*, Vol. 16, No. 1, 1958, p.69
- [4] A. S. Kobayashi, S. Mail and W. B. Bradley, "A Dynamic Photo-elastic Analysis of Crack Branching", *Proc. of the 12th Annual Meeting of the Society of Engineering Science, the University of Texas at Austin, Oct.*, pp.1005-1015
- [5] J. W. Dally, "Development in Photoelastic Analysis of Dynamic Fracture", *Proc. I.U.T.A.M. Symposium on Optical Methods in Mechanics of Solids, Poitiers, France, September, 1979*
- [6] H. Schardin, "Velocity Effects in Fracture", In *Fracture* (eds. B. L. Averbach et. al), Wiley, New York, 1959
- [7] A. S. Kobayashi and M. Ramulu, "Dynamic Stress-intensity Factors for Unsymmetric Dynamic Isochromatics", *EXPERIMENTAL MECHANICS*, 21 (1), Jan. 1981, pp.41-48