

動的 破壞力學에 대하여 (Ⅲ)

李億燮 · 金相哲

<仁荷大學校 機械工學科 教授>

動的 탄성 파괴역학 연구를 위한 動的 광탄성 실험방법 및 자료 해석방법

독일의 Cranz 와 Schardin 에 의해서 최초로 스파이크(spark)에 의한 광원(light source)을 이용하여 고속으로 전파하는 균열선단 부분을 촬영하기 시작한 이후 Kobayashi 와 Dally 등에 의해서 많은 발전을 하여 왔음은 본 강좌의 (I) 과 (II)에서 언급한 바 있다. 동적 파괴역학 연구를 위한 動的 광탄성 방법의 골격도(schematic diagram)을 그림 1 에 보인다. 기본적인 광탄성장치의 배열은 잘 알려져있는 정적(static)인 하중의 원형 편광기(circular polariscope) 장치와 동일하다. 단지 그림 1에서 보이는 바와 같이 스파이크 간극(spark gap)에 의해서 발생하는 섬광(flash light by arc)을 광원으로 사용하

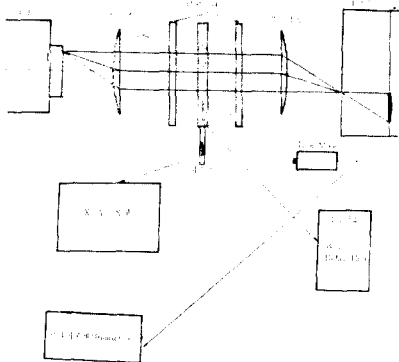


그림 1 광탄성시험에 Cranz-Schardin 장치를 이용한 경우의 시험장치의 골격도

여 짧은 시간동안에 빠르게 움직이는 균열선단 부근의 응력이나 변위를 고정된 박판위에 동결(freezing) 시키는 부수적인 장치가 포함된 것이 틀릴뿐이다.

그러나 이러한 장치를 실제로 제작한다든지 혹은 제작된 것을 구입하려고 할때 꽤 많은 비용이 든다. 왜냐하면 최고 $10^6 \sim 0.2 \times 10^6$ fps (frame per second) 정도의 빠르기로 사진을 찍도록 해야하니 이 요구조건에 합당하게 스파이크 간극이 작동하도록 하는데 필요한 부수적인 장비에 많은 경비가 소요되기 때문이다(약간의 변동은 있겠으나 약 10만弗 정도). 그러나 고속화되고 있는 새로운 재료개발에 대한 기여도 라든지, 또 여러가지 재료들이 가혹한 환경에서 사용되고 있는 경우가 점점 더 많아지고 있는 점을 감안할 때 이러한 초고속촬영장치가 설치 내지는 보급되어서 동적인 파괴역학의 연구 뿐만 아니라 잘 알려져 있지 않은 동적인 재료의 거동이라든가 여러가지의 應力波(stress wave)들의 거동이 재료의 특성에 미치는 영향 또는 미시적인 재료의 動的 거동(microscopic behavior of materials)등을 실험적으로 규명할 수 있으며 理想的인 이론解와 비교하여 새로운 모델링 해석을 할 수 있는 근거를 제공할 수 있다. 그래서, 이러한 분야의 연구에 박차를 가할 수 있고 활력을 불어넣을 수 있는 계기가 우리나라에도 빨리 이루어졌으면하고 필자들은 바라고 있다.

그림 2에 전형적인 동적 등색선의 사진을 보인다.



그림 2 동적인 광탄성 실험법으로 촬영한 동적 등색선

그림 2에 보이는 이러한 동적 등색선을 촬영하기 위하여서는 그림 1에 표시한 보조기기를 사용해야 되는데 이때 문제가 되는 것은 “언제, 어떻게 제일 첫번째의 스파이크 간극을 시동(triggering)시키느냐?”이다. 지금까지 가장 보편적으로 널리 사용되고 있는 방법은 그림 2에서 선명하게 보이는 것과 같이 초기 균열선단 부근에 은분페인트(silver paint)를 얇게(약 1mm 두께) 칠하여 이것으로 전체 시동범위를 닫힌 루우프(close loop)로 만들어두고 임계하중의 파괴시험시편에 작용된후 균열이 성장하여 균열선단이 은분페인트 부분을 절단함으로써 은분페인트 및 capacitor bank와 간극으로 구성된 닫힌 루우프를 개방함으로써 스파이크 간극이 시동되어 플래싱(flashing)되도록 하는 것이다. 이 초기 시동이후는 연속적으로 우리가 원하는 시간 간격으로 setting된 타이머(timer)에 의해서 스파이크 간극이 플래싱 되어 우리들이 원하는 순간순간에서의 사진을 촬영할 수 있게 되는 것이다. 이러한 시동의 단점으로서서는 균열이 처음 성장을 시작할 때의 현상들을 직접 촬영하여 연구, 조사할 수 없으므로 균열성장초기의 과정을 세밀히 연구하기 위하여서는 다른 고속촬영장치

와 光源을 사용해야 한다(예를 들면 pretriggering이 가능한 섬광 레이저 광원과 Rotating mirror형 고속 촬영장치). 스파이크 간극이 플래싱하는 시간 즉 사진이 촬영되는 정확한 시각은 Lite-Mike라는 고속광감지(high speed light sensing)장치를 통하여 오실로스코프에 기록하여 정확히 측정할 수 있다. 이상에서 아주 개략적인 작동원리를 기술하였다. 이 방면에 관심이 있는 독자들은 필자들에게 상세한 내용을 문의 해주기 바란다.

이러한 실험을 통하여 순간 순간의 촬영으로 얻은 등색선 사진을 이용하여 우리가 필요로하는 정보 즉 동적응력확대계수와 균열전파속도의 관계를 규명할 수 있다. 動的 등색선으로부터 動的 응력확대계수를 구하는 방법은 Kobayashi와 Ramulu가 개발 발전 시켰다.

균열선단 근방에서의 응력상태를 비교적 정확하게 표시하는 응력解를 찾아야 한다. 지금까지 발표된 動的 응력解는 강라(Ⅰ)과 (Ⅱ)에서 나열했거나 강의한 그래프이다. 즉 정적하중을 초기하중으로 받다가 결국 임계정적하중을 견디지 못하여 고속으로 전파하는 균열선단부근의 응력解는 Broberg나 Yoffe나 Freund의 解들이 同一하며 아래와 같다(여기서는 모델Ⅰ의 경우만 보인다).

$$\sigma_{xx}^{dyn} = \frac{K_1^{dyn}}{\sqrt{2\pi}} L_1(c) \left[1 + 2s_1^2 - s_2^2 \frac{\cos(\theta_1/2)}{\sqrt{r_1}} - \frac{4s_1s_2}{(1+s_2^2)} \cdot \frac{\cos(\theta_2/2)}{\sqrt{r_2}} \right] + \sigma_{ox} \quad (1)$$

$$\sigma_{yy}^{dyn} = \frac{K_1^{dyn}}{\sqrt{2\pi}} L_1(c) \left[-(1+s_2^2) \frac{\cos(\theta_1/2)}{\sqrt{r_1}} + \frac{4s_1s_2}{(1+s_2^2)} \frac{\cos(\theta_2/2)}{\sqrt{r_2}} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{xy}^{dyn} = \frac{K_1^{dyn}}{\sqrt{2\pi}} L_1(c) 2s_1 \left[\frac{\sin\theta_1/2}{\sqrt{r_1}} - \frac{\sin\theta_2/2}{\sqrt{r_2}} \right] \quad (3)$$

한편 고속으로 전파하는 균열선단의 변위(displacement field)는

$$\dot{U}_x^{dyn} = -\frac{K_1^{dyn}}{\mu \sqrt{2\pi r}} c L_1(c) \left[\frac{\cos(\theta_1/2)}{\sqrt{r}} \right]$$

$$-\frac{2s_1s_2}{(1+s_2^2)} \frac{\cos(\theta_2/2)}{\sqrt{r_2}} \quad (4)$$

$$\dot{U}_{,dyn} = -\frac{K_I^{dyn}}{\mu\sqrt{2\pi r}} cL_1(c)s_1 \left[\frac{\sin(\theta_1/2)}{\sqrt{r_1}} - \frac{2}{(1+s_2^2)} \frac{\sin(\theta_2/2)}{\sqrt{r_2}} \right] \quad (5)$$

여기서

μ =탄성계수

σ_{0x} =원격응력(remote stress)

$$s_1^2 = 1 - (c/c_1)^2 \quad (6)$$

$$s_2^2 = 1 - (c/c_2)^2 \quad (7)$$

$$r_1^2 = x^2 + s_1^2 y^2 \quad (8)$$

$$r_2^2 = x^2 + s_2^2 y^2 \quad (9)$$

c =균열전파속도

c_1 =시료의 팽창파의 속도(the dilatational wave velocity of the test material)

c =시료의 전단병형파의 속도(the distortion¹ wave velocity of the test material)

x, y =순간 크랙선단에서의 직각좌표계(the rectangular coordinates at the instantaneous crack tip)

r, θ =순간 크랙선단에서의 극좌표계(the polar coordinates at the instantaneous crack tip)

$$L_1(c) = \frac{(1+s_2^2)}{4s_1s_2 - (1+s_2^2)^2} \quad (10)$$

여기에서 보인 응력해를 광탄성 실험식

$$\left(\frac{Nf_{\sigma}^{dyn}}{t} \right) = \left\{ \left(\frac{\sigma_{xx}^{dyn} - \sigma_{yy}^{dyn}}{2} \right)^2 + (\tau_{xy}^{dyn})^2 \right\}^{1/2} \quad (11)$$

여기서 N =프린지차수(the fringe order)

f_{σ}^{dyn} =동적 재료 프린지값(the dynamic material fringe value)

t =시험편 두께

에 대입하면 결국 아래와 같은 식을 얻는다.

(註; 복잡하게 보이나 전산기를 쓰면 아주 간단하게 처리할 수 있는 식들이다).

$$\tau_{max}^2 = \frac{1}{4} \left(H^2 \cdot \frac{1}{r} + 2H \cdot \sigma_{0x} \frac{1}{\sqrt{r}} + \sigma_{0x}^2 \right) + J^2/r \quad (12)$$

여기서

$$H = \frac{K_I^{dyn}}{\sqrt{\pi}} L_1(c) \{ (1+s_1^2) [f(c_1) + g(c_1)]^{1/2}$$

$$- \frac{4s_1s_2}{(1+s_2^2)} [f(c_2) + g(c_2)]^{1/2} \} \quad (13)$$

$$J = \frac{K_{II}^{dyn}}{\sqrt{\pi}} L_1(c) \cdot s_1 \{ [f(c_1) - g(c_1)]^{1/2} - [f(c_2) - g(c_2)]^{1/2} \} \quad (14)$$

$$f(c_1) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_1}\right)^2 \sin^2 \theta}} \quad (15)$$

$$f(c_2) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_2}\right)^2 \sin^2 \theta}} \quad (16)$$

$$g(c_1) = \frac{\cos \theta}{1 - \left(\frac{c}{c_1}\right)^2 \sin^2 \theta} \quad (17)$$

$$g(c_2) = \frac{\cos \theta}{1 - \left(\frac{c}{c_2}\right)^2 \sin^2 \theta} \quad (18)$$

$s_1, s_2, L_1(c)$ 는 각각 (6), (7), (10)식에서 보인 것과 같다.

여기서 (r, θ) 는 그림 3에서 보인 것과 같이 균열선단을 원점으로 했을 때의 극좌표계를 나타낸다. 물론 c, c_1, c_2 는 앞에서 정의한 대로이다.

그림 3에서 보인바와 같이 임의의 여러가지 θ 값을 취해주면 우리가 임의로 선택한 $c, K_I^{dyn}, K_{II}^{dyn}, \sigma_{0x}, \tau_{max}$ 에 대한 r 값을 圖示할 수 있는데, 이것이 이론해를 사용하여 얻은 動的 등색선이다. 그림 3에서는 動的 및 정적 등색선의 차이도 나타나 보이고 있다.

여기서 어떻게 동적응력확대계수를 될 수 있는 데로 정확히 추출(extraction)할 수 있는가를 살펴보도록 하자.

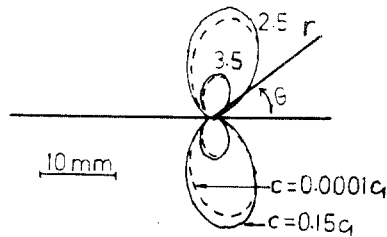


그림 3 이론해를 사용하여 그린 정적 및 동적 등색선 [사용한 자료; 균열전파속도 $c=0.15c_1$, $K_I=800\text{psi}\sqrt{\text{in}}$, $K_{II}=0$, $\sigma_{0x}=-0.25K_I$ (psi)]

동적 실험방법으로 얻은 動的 등색선을 이용하여 K_1^{dyn} , K_1^{dyn} , σ_{0x} 를 추출하는 방법에는 몇가지가 있으나 OD-LSM(overdeterministic-least square method)이 많이 사용되고 있다. 우리가 실질적으로 결정하여야 할 값들은 K_1^{dyn} , K_1^{dyn} , σ_{0x} 들이다. 균열전파속도는 위에서 강의 한 실험으로 이미 결정되었다. 보통 3개의 미지수를 결정하기 위하여는 3개 조합(combination)의 (r, θ) 값들이 필요하나 이렇게 구한 K_1^{dyn} , K_1^{dyn} , σ_{0x} 값들을 역으로 이론적인 동적등색선의 식에 대입하여 동적등색선을 圖示해보면 입력된 3개의 조합인 (r, θ) 점들은 물론 만족되거나 전체적으로는 아주 엉뚱한 동적등색선이 그려지는 경우가 대부분이다. 따라서 많은 점의 조합인 여러개의 (r, θ) 값을 입력하는 OD-LSM 을 이용하여 오차를 극소화시켜야 할 것이다.

이론적인 τ_{max} 값과 실험으로 구한 등색선상의 τ_{max} 값과의 차이가 어느 하나의 (r_k, θ_k) 에 대해서 아래와 같이 범함수(F_k)의 형태로 쓸 수 있다.

$$F_k = \frac{1}{4} \left[H_k^2 \frac{1}{r_k} + 2H_k \sigma_{0x} \frac{1}{\sqrt{r_k}} + \sigma_{0x}^2 \right] + J_k^2 \frac{1}{r_k} - \tau_m^2 \quad (19)$$

여기서 ; H 와 J 는 식(13)(14)로 각각 주어졌다.

$$k=1, 2, \dots, n$$

n =등색선의 자료점수

$F_k=0$ 인 경우가 최적값 즉 오차가 전연없는 경우이다. 이는 어떠한 수치해석 방법으로도 달성하기가 어렵다. 따라서 오차를 극소화하기 위하여는 $\frac{\partial F_k}{\partial K_1^{dyn}}$, $\frac{\partial F_k}{\partial K_1^{dyn}}$, $\frac{\partial F_k}{\partial \sigma_{0x}}$ 를 계산하여 보통의 최소자승법의 일반 과정을 따르면 된다. 즉 식 (19)에서 $F_k=0$ 로 놓고 최적의 K_1^{dyn} , K_1^{dyn} , σ_{0x} 를 반복법(iteration method)으로 결정하는 것이다. 물론 구할려는 K_1^{dyn} , K_1^{dyn} 및 σ_{0x} 가 정확한 값이면 $F_k=0$ 로 될 것이나 이것은 불가능한 일이다. 따라서 반복해 가면서 처음 추정된 값을 보정해 나가는 과정이 필요하게 된다. 추정값을 단계적으로 보정하기 위해서는

Taylor 급수전개에 기본을 둔 반복방정식(iteration equation)을 쓴다. 즉

$$(\Delta F_k)_{i+1} = (F_k)_i + \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_1} \right)_i \Delta K_1 + \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_1} \right)_i \Delta K_1 + \left(\frac{\partial F_k}{\partial \sigma_{0x}} \right)_i \Delta \sigma_{0x} \quad (20)$$

여기서, 첨자, i ,는 i 번째의 반복스텝을 의미하여 ΔK_1 와 ΔK_1 및 $\Delta \sigma_{0x}$ 는 $(i-1)$ 반복스텝의 추정값에 대한 보정값이다.

이 보정값들은 $(\Delta F_k)_{i+1}=0$ 로 두고 식 (20)을 식(21)과 같이 고쳐써서 아래와 같이 결정할 수 있다.

$$-(F_k)_i = \Delta K_1 \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_1} \right) + \Delta K_1 \left(\frac{\partial F_k}{\partial K_1} \right) + \Delta \sigma_{0x} \left(\frac{\partial F_k}{\partial \sigma_{0x}} \right) \quad (21)$$

지금, 우리가 균열선단 부근의 몇개의 등색선 상에서 $k=1, 2, \dots, m$ 개의 자료점을 취한다고 하자. 그러면 각각의 자료점에 대하여 식 (21)을 쓸 수 있고 모든 선택한 자료점에 대해서는

$$[F] = [Q][\Delta R] \quad (22)$$

와 같이 쓸 수 있다.

여기서,

$$[F] = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix}_i$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial K_1}, & \frac{\partial F_1}{\partial K_1}, & \frac{\partial F_1}{\partial \sigma_{0x}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial K_1}, & \frac{\partial F_2}{\partial K_1}, & \frac{\partial F_2}{\partial \sigma_{0x}} \\ \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial K_1}, & \frac{\partial F_m}{\partial K_1}, & \frac{\partial F_m}{\partial \sigma_{0x}} \end{bmatrix}_i$$

$$[\Delta R] = \begin{bmatrix} \Delta K_1 \\ \Delta K_1 \\ \Delta \sigma_{0x} \end{bmatrix}_i$$

식 (22)에 대하여 최소자승법을 써서 $[\Delta R]$ 을 극소화시키도록 해야 한다. 즉 식 (22)의 양변에 Tranpose Matrix $[Q]^T$ 를 곱하여 식 (23)을 얻

는다.

$$[Q]^T[F] = [Q]^T[Q][\Delta R] \quad (23)$$

따라서

$$[\Delta R] = [[Q]^T[Q]]^{-1}[Q]^T[F] \quad (24)$$

식 (24)를 이용하여 컴퓨터 프로그램하여 초기 추정값 K_I, K_{II}, σ_{0x} 를 우리가 정하는 오차한계 $[\Delta R]$ 범위내의 실험결정값, K_I, K_{II}, σ_{0x} 로 수렴시킬 수 있다. 많은 자료점을 초기 입력값으로 취할 수 있어 실험결정값 K_I, K_{II}, σ_{0x} 를 이론解에 대입시켜 등색선을 圖示해 보면 실험적으로 얻은 등적 등색선과 매우 대동소이(大同小異)함을 확인할 수 있겠다. 그래서 우리들이 위의 방법 및 과정으로 추출하여 얻은 값들이 옳은 값들이라는 것을 다시 확인할 수 있는 것이다. 그러나 아직도 문제점이 있다고 생각된다. 동적광탄성 실험으로 균열선단 주위의 등색선을 촬영했을 때 정확한 균열선단의 위치가 분명하지 못한 결이다. 모든 자료점은 이 균열선단을 원점(original point)으로하여 측정된 값들이나 정확한 균열선단의 위치를 결정하는 것은 매우 중요한 사항이다. 지금까지 강의한 과정에서 정확한 균열선단의 위치도 미지수로 취급하여 OD-LSM를 쓰는 방법도 개발되고 있으며 더욱 손질을 하여야 할 분야라고 생각된다. 또한 가지 지적해 두어야 할 사항은 균열선단 부근의 응력解에 관한 것이다. 우리는 실험적으로 균열선단 매우 가까이의 응력상태를 기록하기가 거의 불가능하다. 이곳에서는 높은 국부적인 변형이 일어나서 빛의 굴절 및 산란현상이 일어나기 때문이다. 따라서 자료점을 정할 때 이 자료값의 범위 즉 측정된 (r, θ) 의 영역이 동적응력확대계수만으로 표시하여도 충분한 영역인지, 그렇지 않으면 더 고차원의 상수값을 응력값 즉 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ 에 포함시켜야 될지를 결정해야 할 문제가 생긴다. 필자는 필 수 있는 한 K_I 이외의 많은 항(項)들을 포함시켜서 그 항들이 零으로 수렴하는 것을 검토하는 방법이 좋다고 생각된다.

다음에 Washington 대학에서 S. Mall이 1978년 발표한 대표적인 실험결과를 간단히 소개한다. 그림 4에 Mall이 사용한 시편의 형상과

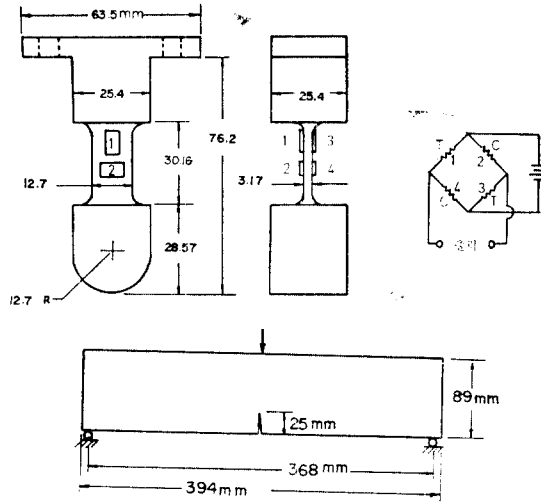


그림 4 動的 Tear 시험(DDT) 시편 및 DROP-Weight Tup 계측장치

DROP-Weight Tup의 계측장치를 보인다.

그림 2에서 위의 실험으로 얻은 대표적인 동적등색선 사진을 보였는데 위에서 지금까지 강의한 내용을 다시 생각하면서 이들 사진을 관찰해보면 균열선단 부근에서의 등색선이 균열선단이 전파되어 감에 따라 변화되는 양상을 조사하여 알 수 있다. 그림 2에서의 동적등색선을 이용하여 위에서 강의한 과정에 따라 K_I^{dyn} 을 구하여 순간순간의 균열선단위치와의 관계를 圖示하면 그림 5와 같다.

여기서 비교적 취성인 Homalite-100 재료의 균열전파 속도가 약 310m/sec 즉 $0.12c_1$ (c_1 =팽창파의 속도)정도로 나타나고 있다. 그림 6과 그

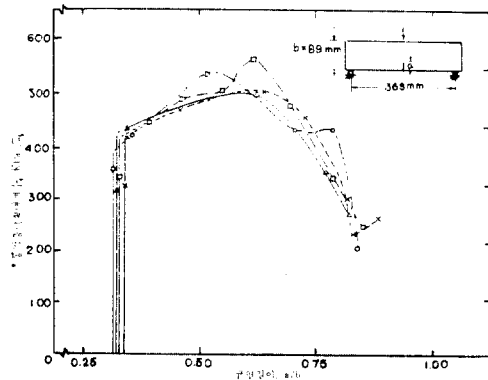


그림 5 動的 응력확대계수와 균열선단 위치와의 관계(DDT 시편; 재료 Homalite-100)

림 7에는 하중-시간사이의 관계와 균열전파거리-시간 사이의 관계를 취성재료인 Homalite-100 및 연성재료인 폴리카보네이트(Polycarbonate) 시편에 대하여 나타내 보이고 있다. 여기에서 특기할 만한 사항은 재료의 취성(brittleness)의 경중에 따라 하중-곡선의 모양이 다르고 이에 따라 균열이 전파시작하는 시각도 현저하게 차이가 난다는 것이다. 일률적으로 최대하중점에서 균열이 전파된다고 생각 하여온 종래의 막연한 생각들이 맞지 않음이 여기서 명백해진다. 여기에서 우리는 강좌(II)에서의 Achenbach의 지연시간(delay time)이론을 상기하여 볼 필요가 있을 것이다.

그림 8에 균열전파속도와 동적응력확대계수의 관계를 圖示하였다.

그림 8에서 보이는 것과 같이 균열속도와 동적과피인성치는 대체로 "I"(gamma)의 형상을

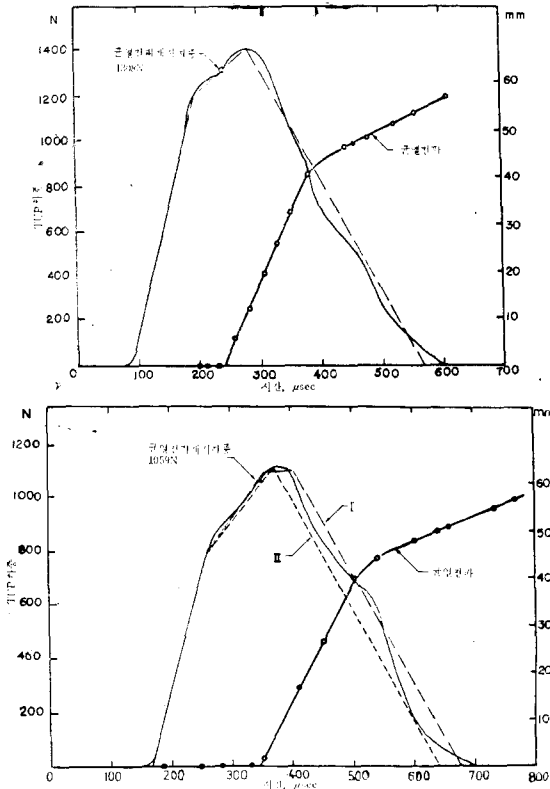


그림 6 하중-시간 및 균열전파거리-시간곡선 (Homalite-100)

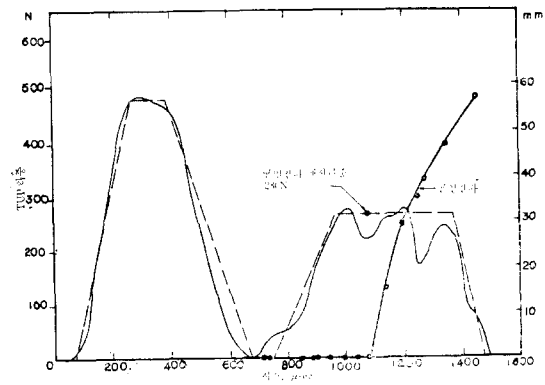
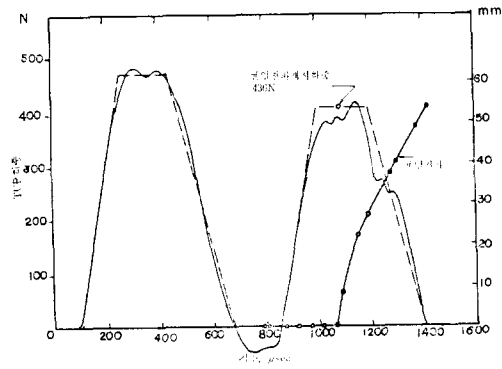


그림 7 하중-시간 및 균열전파거리-시간곡선 (polycarbonate)

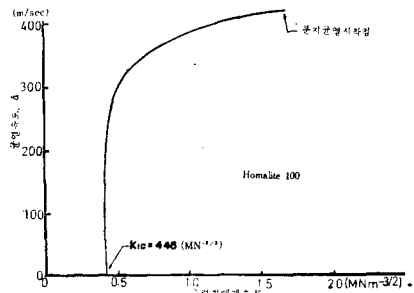


그림 8 균열선단 전파속도와 動的 과피인성치의와의 관계 (Homalite-100)

지니고 있다. 지금 구미(歐美) 각국의 動的과피역학의 연구자들은 이 I 곡선의 형태가 어떤 재료의 動的 과피인성치와 균열선단 전파속도와의 관계를 유일하게(unique) 특성 지어주느냐의 여부에 대하여 많은 논란을 하고 있다. 아직 이에 대하여 이렇다할 뚜렷한 해결 또는 결론이 나

있지 않으며 그 귀추가 주목된다 하겠다.

기타의 동적 탄성 파괴역학 연구를 위한 실험 방법

위에서 지금까지 강의한 동적 탄성 실험 이외에도 여러가지 실험방법 즉 스트레인게이지를 사용하는 방법, 광학적 음영기법(optical shadow technique), 동적 홀로그래피기법(dynamic holography technique), 어쿠스틱에미션기법(acoustic emission technique), 동적모아레방법(dynamic moire method)등을 이용하여 고속으로 전파하고 있는 균열선단의 응력 혹은 변형 내지는 변형율場(field)을 측정하고 모델링하는 연구가 활발하다. 지면관계로 이에 대한 상세한 강의는 다음 기회로 미루겠다.

3.3. 수치해석적인 연구

위에서 강의한 동적탄성 파괴역학의 실험적인 연구방법을 이용하여 얻은 결과들을 금속이라든지 세라믹 등과 같은 불투명한 재료들에 대하여 상사률(scaling law)을 적용하여 이용할 수 없다. 따라서 우리가 수치해석적인 방법을 사용하여 동적으로 전파하는 균열선단의 응력 및 변위들을 일반적으로 시뮬레이션시킬 수 있으면 매우 유익할 것이다.

고속으로 전파하고 있는 균열을 포함하고 있는 부재(member)의 균열선단에서의 응력해석을 수치적인 방법으로 수행하기 위하여 動的 유한요소법(dynamic finite element method)과 動的 유한차분법(dynamic finite difference method)이 많이 사용되고 있는데, 본 강좌에서는 動的 유한요소법으로 動的응력확대계수(K_1^{dyn})을 추출해 내는 과정을 간략히 설명하겠다.

강좌(Ⅰ)과 강좌(Ⅱ)를 통해서 살펴 보았듯이 무한판에 반무한 균열이 존재하여 이것이 고속으로 전파하는 경우에는 이론解를 구할 수 있었고 균열전파속도와 動的 응력확대계수의 관계등을 이론적으로 논의할 수 있었다. 이 이론解를 직접 유한균열의 전파에 응용시키기는 어렵다. 왜냐하면 유한판의 경계면으로부터 회절이나 반

사되어 돌아오는 응력波들이 균열선단의 응력場이나 변형율場에 미치는 영향을 고려하지 않으면 안되기 때문이다. 이러한 경우는 적당한 수치해석 방법으로 문제를 해결하는 것이 여러가지 측면으로 볼 때 매우 유익하다.

동적 유한요소법을 사용하여 스트레인 게이지나 전위방법으로 결정된 균열선단의 전파속도를 입력으로 주어 동적 응력확대계수를 추출해 낼 수 있다. 물론 이 動的 유한요소법으로 동적응력확대계수를 추출해 내는 과정의 타당성 여부는 앞에서 강의한 동적광탄성실험법 및 자료해석법으로 구한 동적응력확대계수와 일치성을 확인하여 검토하여야 할 것이다.

동적응력확대계수는 식(25)와 같이 Griffith의 에너지 밸런스에 운동에너지항을 첨가하여 구한 動的 균열선단 에너지 해방율(\mathcal{E}_1^{dyn})을 動的 응력확대계수로 전환(conversion)하여 구할 수 있다.

$$\mathcal{E}_1^{dyn} = \frac{dW^{dyn}}{da} - \frac{dU^{dyn}}{da} - \frac{dT^{dyn}}{da} \quad (25)$$

- 여기서 U ; 스트레인 에너지
- T ; 운동 에너지
- W ; 외력이 한일
- a ; 균열길이

보통의 動的 유한요소법(예를들면, 코드 이름; HONDO)은 변위의 초기조건을 처리하지 못한다. 따라서 그림 9에서 보이는 바와 같이 정적(static)인 초기조건과 이에 대응하는 동적解를 중첩(super-position)해야 한다.

대개의 動的 유한요소 프로그램은 연속적으로 전파되는 균열을 시뮬레이션 할 수 없다. 따라서

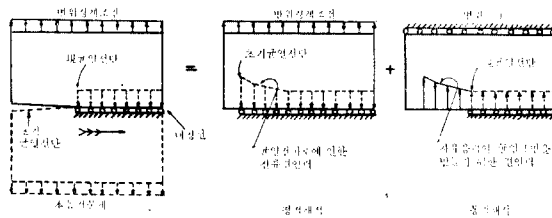


그림 9 외적인 변위가 경계조건으로 주어졌을 때의 Edge 균열을 갖는 인장판에서의 動的 균열에 대한 動的 유한요소 해석 방법圖

균열선단을 주어진 시간간격 안에서 한 절(node)에서 다른 한 절로 움직여가도록 하는 불연속적인 “jumps”로 모델링해야 된다. 실험으로 측정 한 균열전파속도는 “jump”거리를 시간간격으로 나눈값으로 취해주도록 하면 된다. 실제로 이러한 불연속적인 균열전파를 시뮬레이션을 하는 과정에서 균열선단 부근의 변위나 응력場은 매우 심각한 요동(oscillation)현상을 나타내므로 動的응력확대계수를 추출해 내기위해서는 움직이고 있는 균열부근의 動的응력상태나 動的균열개구변위를 시간에 대하여 평균하여 이 값을 모니터(monitor)하여야 한다.

그림 9에서와 같이 정적인 재료의 성질을 가진시험편에 변위 경계조건을 주고 보통의 정적인 유한요소법으로 정적인 해석을 행한다. 그다음 과정은 정적 유한요소법에 의해서 얻어진 정적인 절점력(nodal force)에 等價이고 방향이 반대인 절점력을 새로운 균열선단절에 가하여 주고 동시에, 위에서 강의한 바와같이 정해진 시간간격내에서 현재 고려하고 있는 균열선단절을 자유화(free)시켜줌으로 균열선단을 이동시켜야 한다. 위에서 취한 반대방향의 절점력은 균열선단을 전파하도록 하는 限 유지되어 있도록 해야 한다.

동적으로 계산된 응력場으로부터 동적응력확대계수를 추출해 내는 방법은 불합리한 것으로 알려져 있다. 왜냐하면 이 動的 응력장을 사용하여 계산한 動的 에너지 해방율이 정적 에너지 해방율보다 크기 때문이다(작든지, 적어도 같아야 한다). 그래서 크랙개구변위를 사용하도록 하고 있으나 매우 요동이 심하다. 다른 한 방법은 動的 에너지 해방율을 계산하여 이 값에서 動的 응력확대계수를 추출해 내는 것이다.

즉 식 (26)과 같이 동적 에너지 해방율을 나타낼 수 있다.

$$\Delta E = \mathcal{E}^{dyn} \cdot \Delta a = 2[\sigma_{yy}^{dyn}]_{ave} \cdot [U_y^{dyn}]_{ave} \cdot \Delta a \quad (26)$$

여기서 ΔE ; 해방된 에너지

\mathcal{E}^{dyn} ; 동적에너지 해방율

Δa ; 균열선단 전파거리, 실제로 유

한 요소의 한변의 길이로 될 것이다.

$[\sigma_{yy}^{dyn}]_{ave}$; 균열이 전진을 시작한 후 시간증분(Δt)동안에 이 요소의 시간-평균응력

$[U_y^{dyn}]_{ave}$; 균열이 전진을 시작한 후 시간증분(Δt)동안에 이 요소내의 균열표면상의 자유절(freed node)의 시간-평균 균열개구변위.

이 \mathcal{E}^{dyn} 에서 K_I^{dyn} 을 직접 계산할 수 있다. \mathcal{E}^{dyn} 와 K_I^{dyn} 의 관계는 정적인 경우와 같으며 다만 속도項이 포함되는 것만 틀릴뿐이다.

그림 10에 Single-Edge-Notch 시편에 대한 결과를 圖示하였다. 본 강좌(Ⅲ)의 앞부분에서 강의한 실험법으로 구한 動的 응력확대계수와 수치해석적인 방법으로 구한 동적 응력확대계수는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 단 동적 유한요소법을 사용하여 얻은 값은 심히 요동하고 있음을 알 수 있는데 이것은 수치해석적인 “noise”로 알려져 있다. 이 “noise”를 없애는 방법이 알려져 있으나 여기서는 생략한다.

그림 10에서 흥미있는 현상은 정적인 응력확대계수 값이 동적 응력확대계수 값보다 크다는 사실이다. 이것은 주어진 경계조건에 기인하며, 경계조건이 다른, 즉 Wedge-Loaded Contoured DCB 시편에서의 값들은 그림 11에서 보이는 것

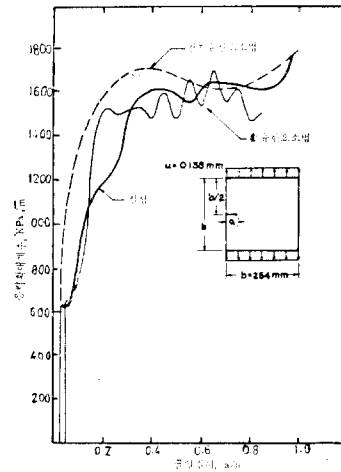


그림 10 Single-Edge-Notch 시편의 동적 응력확대계수

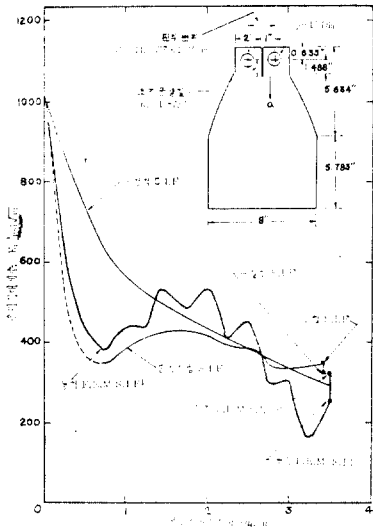


그림 11 Wedge-Loaded Contoured DCB 시편의 응력확대계수

과 같이 매우 다른 양상을 나타낸다.

여기서 참고로 動的 Tear 시험 시편의 여러가지 에너지를 동적 유한요소법으로 계산한 것을 그림 12에 보인다.

이들 에너지 분포의 양상도 주어진 경계조건

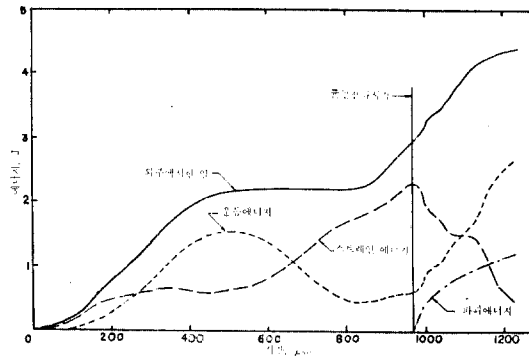


그림 12 動的 Tear 시험의 여러가지 에너지 분포

이나 시편에 따라 판이하게 달라진다. 예로서 일정변위를 경계조건으로 취했을 경우는 총 에너지는 항상 일정하다는 등이다.

[다음 호에 계속]

후 기

본 강좌에서 제시한 도면작성에 계속 협조해 주고 있는 인하대 대학원생 김주연군과 권오건군에게 매우 감사한다.