

動的 破壞力學에 대하여 (Ⅱ)

李 億 燮 · 金 相 哲

<仁荷大學校 機械工學科>

◆ 현대자동차 주식회사 울산공장의 부품개발부 金承甫部長에게서 강좌(Ⅰ)*에 대한 의견을 제시해 주었다. 의견인즉, 현장에서 쉽게 이해할 수 있도록 강좌를 전개하여 나가는 것이 어떠한 것이었다. 필자들도 될 수 있는 한 쉽게 강좌를 전개해 나가도록 할 작정이다. 의견제시에 감사한다. <필자 註>

강좌 (Ⅰ)에서의 이론은 정적인 하중이 시편이나 실제 대, 소형 구조물에 서서히 작용되어서 재료 내부에 이미 존재하고 있는 균열선단 (crack tip)에서의 응력확대계수가 그 재료의 정적파괴인성치 (K_{Ic})를 초과하여 균열선단이 빠른 속도 [예를들면 플라스틱재료; $V=(100\sim1000)$ m/sec, 철강재료; $V=(400\sim1500)$ m/sec]로 전파될 때 動的 응력확대계수, 動的 에너지해방률 등과 균열전파속도와와의 관계를 이론적으로 규명한 것이다. 만약 하중조건이 이와는 다른 경우 즉, 動的 하중(예를들면, 外的 충격하중이나 熱的 충격하중에 의한 응력波하중)이 시편이나 실제의대, 소형구조물에 작용될 경우는 어떻게 이론적으로 이 문제를 해결할 것인가?

지금 균열표면에 動的하중이 작용한다고 생각하고 이 하중에 의하여 균열은 일정속도 (V)로 전파해 나간다고 하자. 이러한 하중조건하에서는 특이한 현상이 균열거동의 초기에 나타난다. 즉 Achenbach⁽³²⁾가 그의 논문에서 지적했듯이 응력波正面 (stress wave front)의 응력분포가 $r^{-1/2}$ 의 특이성 (singularity)을 나타낼 때는 이러한 응력波 하중에 의한 균열은 이 응력波 하중이 균열선단에 도달 하자마자 균열은 전파하기 시작하나 대부분의 경우 외력이나 熱的 충격하중에

의한 응력波는 연속적이며 이러한 연속적인 응력波가 균열선단에 부딪쳐도 균열을 금방 움직이게 하지 못하며 매우 짧은 지연시간 (delay time) 후에 균열은 전파하기 시작한다. 이것은 연속응력波가 균열선단에 도달한 후 $r^{-1/2}$ 특이성을 형성하기 위하여 다소의 시간이 필요하기 때문이다. 이러한 지연시간의 장단(長短)은 응력波의 크기와 재료의 성질[예를들면 점성(粘性), microstructure, 등]에 관계된다. 아무리 강한 응력波가 시편이나 실제구조물 내부에 존재하는 균열선단에 도달하더라도 도달한 즉시 균열이 전파하지 않는다는 사실이 주목된다. 필자는 재료의 종류나 재료의 상태등이 上記한 지연시간의 장단(長短)에 직접적으로 관계가 있을 것으로 생각하고 있으며 세밀한 動的 실험으로 위의 추측이 증명될 때가 있을 것으로 기대하고 있다.

이러한 動的 하중에 의한 균열선단의 動的 거동과 動的 응력확대계수를 구하는 방법을 아래에 약술한다.

3.1. 動的 하중에 대한 문제설정

그림 1에 보이는 바와 같이 문제를 4 단계로 나누어서 생각할 수 있다.

그림 1의 (A)는 입사응력波正面 (incident stress wave front)이 우리가 해석하려는 구조물

* 大韓機械學會誌 第 24 卷, 第 6 號, pp. 452~458.

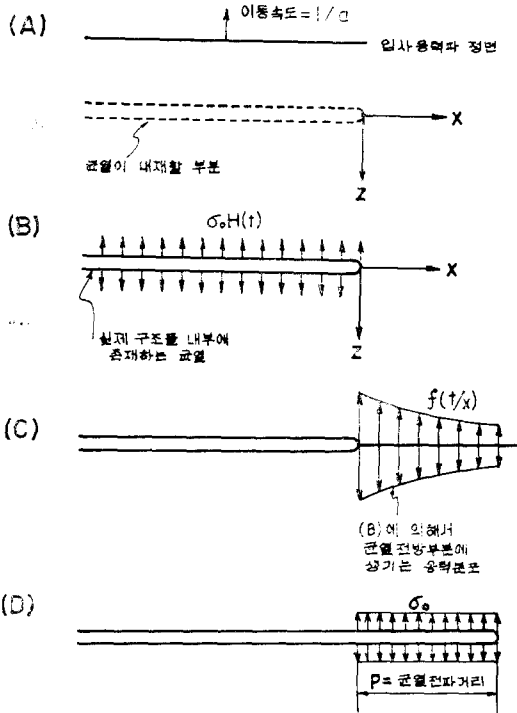


그림 1 응력파 하중이 작용할 때 균열선단 부분에서의 응력해석을 위한 해설도

재료의 내부를 전파하고 있음을 보이며 이 응력파가 지나간 후에도 균열이 내재(內在) 할 부분 및 균열이 전파되어 나아갈 부분 등에 균일응력(σ_0)가 발생될 것이다. 균열표면은 응력자유(stress free) 상태이어야 하므로 그림 1의 (B)와 같은 균일응력(σ_0)에 반대방향이며 동일한 크기의 응력을 작용시켜 주어야 한다. 그러면 그림 1의 (C)에서 보이는 것과 같이 응력자유상태인 균열표면이 생겨난다. 그러나 이 응력[그림 1(B)] 자체에 의해서 균열선단 전방에 발생하는 응력[그림 1(C)]들이 또 문제가 된다. 이 응력 [$f(t/x)$]들에 대해서도 균열전파(crack propagation path)에 연하여서 반대방향이며 同-한 크기의 응력을 작용시켜 전파된 균열표면이 응력자유(stress free) 상태가 되도록 해야 한다. 마지막으로 그림 1의 (D)와 같은 균일응력(σ_0)을 작용시켜서 그림 1(A)의 입사응력波正面에 의해서 발생한 응력을 균열전파로에 연하여서 영(zero)이 되도록 해야 한다. 그러면 결국 그림

1의 (D)에서 보는바와 같이 거리 P 만큼 균열은 전파한 것이 된다. 여기서 위에 논의된 사항들을 이론적으로 전개하여 보자.

그림 1의 (A), (B), (C)에 대한 경계조건은 식 (1), (2), (3)으로 주어진다.

$$\sigma_{zz}(x, 0, t) = -\sigma_0 H(t), \quad x < 0 \quad (1)$$

$$\sigma_{zz}(x, 0, t) = 0, \quad -\infty < x < \infty \quad (2)$$

$$w(x, 0, t) = 0, \quad x > 0 \quad (3)$$

여기서 w : z -방향의 변위(displacement) 위의 경계조건에 의해서 균열선단에 발생하는 시간의 함수인 응력분포, $f(t/x)$ 는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$f(t/x) = \frac{\sigma_0 w_0}{\pi} \int_a^{t/x} \frac{(\eta - C) S_+^0(-\lambda) d\eta}{\eta(\eta - a)^{1/2}} \quad (4)$$

여기서 $t/x > a$

$$S_+^0(\lambda) = \lim_{V \rightarrow 0} S_+(\lambda) = \lim_{d \rightarrow \infty} S_+(\lambda)$$

$$w_0 = a^{1/2} / [C S_+^0(0)]$$

$C, S_+(\lambda), a =$ 강좌 (I)의 456面 참조 즉, 이 $f(t/x)$ 는 응력파하중에 의해서 발생한 균일응력(σ_0)을 갖고 있는 균열표면을 응력자유상태로 해주기 위하여 작용시킨 $\sigma_0 H(t)$ 에 대응하여 발생한 것으로 이 성분은 시간(t)와 고정좌표(x)의 함수로 되어있다. 또 이 $f(t/x)$ 는 x 와 t 의 영차균일함수(homogeneous function of degree zero)이며 (t/x)에만 관계되는 함수이다. 이것은 물리적으로 어떤 고정된 응력분포가 균열선단에서 x 축에 연하여 일정속도 $U = x/t$ 로 발산되어 나온다는 것을 의미한다. 균열이 x 축에 연하여 전파되기 위하여는 이 응력분포도 영(zero)이 되도록 해야한다. 균열전파속도, $V = 0$ 즉, 정지하고 있는 균열의 응력파 하중에 의한 動的 응력확대계수(K_I^{dyn})는 응력확대계수의 일반적인 정의에서 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$K_{V=0}^{dyn}(t, 0) = \lim_{x \rightarrow 0^+} [\sqrt{2\pi x} f(t/x)] = 1.596 \sigma_0 w_0 \sqrt{t} \quad (5)$$

식 (5)에서 알 수 있는 것은 정지하고 있는 균열이 응력파 하중을 받을 때에는 動的 응력확대계수가 응력파가 균열선단에 도달한 직후부터 측정된 시간이 제품근에 비례하여 증가한다는 사실이다.

한편 응력波 하중을 받고 일정속도 V 로 균열이 전파하고 있을때는 약간 복잡하다. 강좌 (I)에서 정적하중에 대한 해(解)를 구할때에 먼저 기본解(fundamental solution)를 유도하고 그것을 균열전파 구간에서 중첩 적분하였는데 여기서도 같은 방법을 쓰면 된다. 그런데 지금 이 경우에는 균열선단 근처의 응력분포가 시간에 대한 함수라는 것을 잊지말아야 한다. 기본 解는 다음과 같이 구할 수 있다. 즉 시간 $t < 0$ 일때에는 아무런 하중이 작용하지 않고 있다가 시간 $t=0$ 에서 균열선단에 집중하중 N 이 작용된다고 생각하며 이 순간 균열은 일정한 속도 V 로 전파를 시작한다고 가정한다. 시간 $t > 0$ 에서는 균열은 속도 V 로 계속 전파하고 있으며 집중하중 N 은 시간에 따라 직선적으로 변화하면서 속도 $U=x/t$ 로 균열표면에 연하여 전파되어 나간다. 이것을 圖示하면 그림 2과 같다. 즉 $t=0$ 일때 $x=0$ (초기균열선단)에서는 N 의 집중하중이 작용하고 시간 t 가 변함에 따라 이 N 은 $(Mt+N)$ 으로 변화되면서 속도 U 로 발산되어 나가는 것이다.

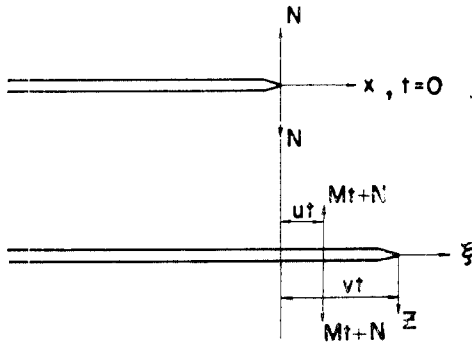


그림 2 응력波 하중에 의한 기본해를 유도하기 위한 하중작용도

이때의 경계조건은 식 (6), (7), (8)과 같다.

$$\sigma_{zz}(x, 0, t) = (Mt + N)\delta(x - Ut)H(t), \quad x < Vt \quad (6)$$

$$\sigma_{xz}(x, 0, t) = 0, \quad -\infty < x < \infty \quad (7)$$

$$w(x, 0, t) = 0, \quad x > Vt \quad (8)$$

여기서 M, N 은 임의의 정수이다. 위의 경계조건으로 균열선단의 동적 응력확대계수(K_I^{dyn})

를 구하는데 필요한 응력성분, $\sigma_{zz}^F(\xi, 0, t)$ 를 계산하여 이에 대응하는 動的 응력확대계수를 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$K_I^{dyn} = \lim_{\xi \rightarrow 0^+} [\sqrt{2\pi\xi} \sigma_{zz}^{dyn}(\xi, 0, t)] \\ = \frac{1.596Mh^2 W_+'(h)t^{1/2}}{(1-a/d)^{1/2}} - \frac{0.798Nh W_+(h)}{(1-a/d)^{1/2} t^{1/2}} \quad (9)$$

여기서 $h = (V-U)^{-1}$

$$W_+(\lambda) = \alpha(\lambda) / [(\lambda + C_2)S_+(\lambda)]$$

['] = h 에 대한 미분

$\alpha(\lambda)$ = 강좌 (I)의 456面 참조

식 (9)의 첫째항은 집중하중이 시간에 따라 직선적으로 증가할때에 이 증가분에 의한 動的 응력확대계수이며 둘째항은 시간 $t=0$ 에서의 하중 N 에 의한 것이다. 위에서 응력波 하중에 의한 기본해(解)를 식 (9)로 구할 수 있음을 보였다.

우리는 이 기본해(解)를 이용하여 응력波 하중이 균열선단에 도달한 후 어느정도의 지연시간 τ 후에 일정속도 V 로 움직이기 시작하는 균열의 動的 거동에 대한 해석을 다음과 같이 할 수 있다. 즉 균열이 전파되기 위해서는 응력波 하중이 균열선단에 도달한 직후($t=0$)부터 균열선단 부근에서 시간과 거리의 함수로 분포하여 변화하는 응력에 대하여 同一한 크기의 응력분포이나 작용방향은 반대인 응력을 작용시켜 응력자유(stress free)인 균열표면을 얻도록 하는 것이다. 이때 응력자유인 균열표면을 얻기 위하여 작용시켜야 할 응력성분은 식 (10)과 같다.

$$\sigma_{zzD}^{dyn}(\xi, 0, t) = \int_0^{V(t-\tau)/t} \sigma_{zzF}^{dyn}(\xi, 0, t-t_0; U, M=-1, N=-t_0) f(1/u) du \quad (10)$$

여기서 $t_0 = V\tau / (V-U) = h\tau / d$; 시간 τ 후에 일정속도 V 로 전파되는 균열선단이 시간 $t=0$ 에서 속도 U 로 발산되어 전파되는 응력성분과 만나는 시간이다.

(註) 속도, U 를 가지고 $\oplus x$ 방향으로 움직이는 하중을 생각할 때 그 하중의 시간에 대한 변화는 $(t-t_0)dUf(1/U) + t_0dUf(1/U)$ 로 나타낼 수 있고 이들 성분에 의하여 발생한 응력을 상쇄시켜 응력자유인 균열표면을 얻기 위하여 $M=-1, N=-t_0$ 를 택하였다.

식 (10)에서 구한 $\sigma_{zzD}^{dyn}(\xi, 0, t)$ 를 이용하여 이것에 대응하는 動的 응력확대계수를 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$K_D^{dyn} = \lim_{\xi \rightarrow 0^+} [\sqrt{2\pi\xi} \sigma_{zzD}^{dyn}(\xi, 0, t)] \\ = 1.596\sigma_0 K(d) \{w_0 t^{1/2} - [V(t-\tau)]^{1/2}\} \quad (11)$$

식 (11)의 첫째항은 균열표면에 균일응력 σ_0 가 작용할 때의 정적 응력확대계수이다 균열전파속도의 함수인 $K(d)$ 를 곱한 것이며 둘째항은 균열이 전파됨에 따라 발생된 량이다. 그 다음 마지막으로 그림 1(D)의 하중조건에 대한 解는 강좌 (I)의 식 (11)에 Vt 대신에 $V(t-\tau)$ 를 $p(Vt-\eta)$ 대신에 일정응력 σ_0 를 대입하여 계산하면 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$K_{DD}^{dyn} = 1.596\sigma_0 K(d) [V(t-\tau)]^{1/2} \quad (12)$$

여기에서 우리는 그림 1의 (A), (B)에서의 응력場은 전파하고 있는 균열선단, 즉 $x=V(t-\tau)$, $z=0$ 에 특이성(singularity)을 부여하지 않는다는 사실에 주의하여야 한다. 따라서 응력波하중에 의하여 전파되는 균열선단에서의 動的 응력확대계수는 식 (11)과 식 (12)의 합, 즉 그림 1의 (C), (D)에 대한 動的 응력확대계수의 합으로 식 (13)과 같이 계산할 수 있다.

$$K_I^{dyn}(t, V) = 1.596\sigma_0 w_0 K(d) \sqrt{t}, \quad t > \tau \quad (13)$$

식 (13)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 응력波하중에 의해서 전파되는 균열선단에서의 動的 응력확대계수는 지연시간(delay time) τ 에는 관계없다는 것이다. 그러나 임의의 일정시간 후(後) 균열이 전파개시(crack initiation) 할 때의 균열개시인성치(fracture initiation toughness)의 크기에는 관계가 있을 것으로 필자는 추측하고 있다.

우리가 충격시험으로 흡수에너지(absorbed energy) 등을 측정하든지, 충격망치(tup)에 설치한 스트레인 게이지의 출력으로서 여러가지 재료들(금속재료, 플라스틱재료, ceramics, 복합재료 등)의 動的 파괴거동을 특정 지을려고 할 때에는 이와같은 측정값들을 균열선단의 動的 응력확대계수와 직접 관련지우기 위해서 세밀한 실험적인 관찰과 이론적인 검토가 필요할 것이라고 생각된다. 여기에서 최근 Freund⁽³³⁾에 의해

서 지적되어 관심을 끌고있는 두개의 응력場 즉 균열선단부근에서의 眞動的 응력場(true dynamic stress field)과 위에서 구한 動的 응력확대계수에 의한 응력場의 차이점에 대하여 논의해보면 動的 파괴역학 연구의 흥미로움을 다시 한 번 인식하게 될 것이다. 한 예로서 시간에 무관한 하중이 작용하는 경우에 대하여 알아보자.

그림 3에 하중 작용점과 균열선단 좌표계를 보이며 시간 $t=0$ 에서 균열이 일정속도 V 로 움직이기 시작했다고 하자.

이 경우의 경계조건은 식 (14), (15), (16)과 같다.

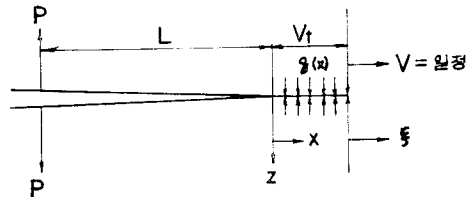


그림 3 시간에 무관한 하중 P가 작용할때의 균열선단좌표계(여기서 $q(x)$ =하중 P에 의해서 구간 $L < x < Vt$ 에 분포하는 응력)

$$\sigma_{zz}(x, 0, t) = P\delta(x+L), \quad x < Vt \quad (14)$$

$$\sigma_{xz}(x, 0, t) = 0, \quad -\infty < x < \infty \quad (15)$$

$$w(x, 0, t) = 0, \quad x > Vt \quad (16)$$

강좌 (I)의 455면 18행에서 지적하였듯이 먼저 위의 경계조건 (14), (15), (16)에 맞는 정지 균열에 대한 균열선단에서의 응력분포 $q(x)$ 를 구해야 한다. 이것은 다음과 같은 간접적인 방법으로 구할 수 있다. 즉 그림 3에서와 같이 $-q(x)$ 를 균열선단의 전파로(path of propagation)에 연하여 분포시켜 $x=Vt$ 에서의 응력확대계수 K_I 를 영(zero)으로 놓아 계산하여 $q(x)$ 를 계산할 수 있다. 강좌 (I)의 식 (11)의 $P(Vt-\eta) = P(x)$ 대신에 $\{\delta(x+L)P - q(x)\}$ 를 대입하여 $K_I=0$ 로 놓으면 식 (17)과 같다.

$$K_I = 0.798K(d) \int_L^{Vt} (Vt-x)^{-1/2} [\delta(x)P - q(x)] dx = 0 \quad (17)$$

그래서 식 (18)과 같이 $q(x)$ 를 구할 수 있다.

$$q(x) = PL^{1/2} / \{\pi x(x-L)^{1/2}\}, \quad x > L \quad (18)$$

따라서 균열선단 부근의 응력성분 $\sigma_{zz}^s(x, 0, t)$

는 식 (19)와 같다.

$$\sigma_{zz}^i(x, 0, t) = PL^{1/2} / \{\pi x^{1/2}(L+x)\}, \quad x > 0 \quad (19)$$

(註) 식 (18)에서 x 는 식(19)의 x 와 같지 않으며 식 (19)의 x 는 그림 3에 보인바와 같다.

이 경우의 기본 解는 강좌 (I)의 식 (6), (7)에 의해서 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{zz}^p(x, 0, t) = \frac{(d-C)(C_2-t/\xi)}{\pi\xi(d+t/\xi)S_+(d)d^{1/2}} I_n \left[\frac{S_+(-t/\xi)}{d_+(-t/\xi)} \right], \quad t > a_2\xi \quad (20)$$

여기서 $a_2 = a(1-a/d)^{-1} = (V_1 - V)^{-1}$

$V_1 = a^{-1}$; the Dilatational Wave Velocity
 $t = a_2\xi$; 전파하고 있는 균열선단전방 ξ 지점에 Dilatational Wave가 도달하는 시간. 이 시간 t 이후에야 비로소 이 점의 응력은 영(zero)이 아니다.

기본해(fundamental solution)인 식 (20)을 이용하여 강좌 (I)의 식 (10)과 같이 動的으로 전파하는 균열선단 전방의 응력분포를 구할 수 있다. 단 이때의 $P(x_0)$ 는 식 (21)과 같이 치환되어야 할 것이다.

$$PL^{1/2} / [\pi x_0^{1/2}(L+x_0)] \quad (21)$$

그런데 여기에서 우리가 관심을 가지고 있는 지점 즉, 전파하고 있는 균열선단에서 거리 ξ 만큼 전방에 있는점에 균열선단에서 발산되어 나온 회절응력파(diffraction stress wave)가 언제 도달 하는가에 주의해야 한다. 즉 강좌(I)의 식 (10)에서 피적분항의 $(t-x_0/V)$ 가 식 (22)를 만족해야 그 점에서의 응력이 영(zero)이 아닐 것이다.

$$(t-x_0/V) > a_2\xi \quad (22)$$

따라서 적분상한을 식 (23)의 $x_0 = V(t-a_2\xi)$ 로 하여 動的 응력분포를 계산해야 한다.

$$x_0 < V(t-a_2\xi) \quad (23)$$

결과적으로 빠른 속도로 전파하고 있는 균열선단 부근의 動的 응력분포는 식 (24)와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{zz}^d(x, 0, t) = \int_0^{V(t-a_2\xi)} \frac{(d-c)(c_2-t')PL^{1/2}(L+x_0)^{-1}}{\pi^2\xi(d+t')S_+(d)(dx_0)^{1/2}}$$

$$I_n \left[\frac{S_+(-t')}{d_+(-t')} \right] dx_0 \quad (24)$$

여기서 $t' = (t-x_0d)/\xi$

$I_n =$ 복소수의 허수부분

결국 빠른 속도로 전파하고 있는 균열선단 부근의 眞응력분포(true stress distribution)는 식 (19)와 식 (24)를 합하여 식 (25)와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{zz}^{True}(x, 0, t) = \sigma_{zz}^i(x, 0, t) - \sigma_{zz}^d(x, 0, t) \quad (25)$$

식 (25)의 첫째항은 초기균열선단 뒷쪽 $x = -L$ 에 작용된 집중하중 P 에 의한 것이고 둘째항은 집중하중 P 에 의하여 균열선단 부근에 생겨난 응력분포를 균열표면에서 응력자유(stress free)화 시킬때에 발생하는 것이다. 식 (25)에 의한 動的 응력확대계수는 강좌 (I)의 식 (11)을 이용하여 식 (26)과 같이 구할 수 있다.

$$K_{IL}^{dyn} = 0.798 \frac{K(d)PL^{1/2}}{\pi} \int_0^{Vt} \frac{d\eta}{[\eta(Vt-\eta)]^{1/2}(L+Vt-\eta)} \quad (26)$$

(註) 식 (26)을 구하기 위하여 강좌 (I)의 식 (11)중 $P(Vt-\eta)$ 대신에 식 (21)로 치환하였으며 이때 $x_0 = (Vt-\eta)$ 이다.

이렇게 구한 動的 응력확대계수, K_{IL}^{dyn} 을 사용하여 빠른 속도로 전파하고 있는 균열선단 부근의 응력성분을 계산할 수 있고 앞에서도 잠깐 언급하였듯이 이 응력분포와 식 (25)에 의해서 계산된 眞응력 분포를 비교 검토하여 그 차이점을 논의해 보면 흥미있는 점들을 발견하게 된다. 식 (26)을 이용하여 動的 응력분포를 구하면 식 (27)과 같이 된다.

$$\sigma_{zz}^{dyn} = \frac{K_{IL}^{dyn}}{\sqrt{2\pi\xi}} = \frac{K(d)PL^{1/2}}{\pi^2(x-Vt)^{1/2}} \int_0^{Vt} \frac{d\eta}{[\eta(Vt-\eta)]^{1/2}(L+Vt-\eta)} \quad (27)$$

그러면 여기서 그림 4에 보인바와 같이 빠른 속도로 전파되고 있는 균열선단의 전방 $x=0.75L$ 에 위치한 관찰점에서의 응력의 크기에 대하여 고찰해 보자.

시간 $t=0$ 에서 균열선단이 일정한 속도 V 로 전파하기 시작하며 $t>0$ 이면 균열선단은 관찰점 (A)로 접근해간다. 이때 균열선단에서 회절되어 나온 Dilatational Wave가 관찰점 (A)에 도

講 座

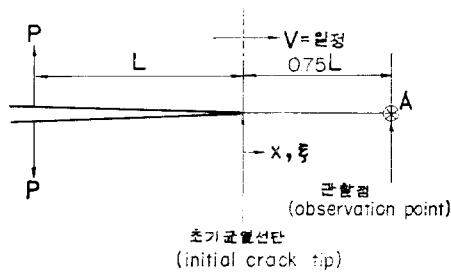


그림 4 초기균열선단 전방 $x=0.75L$ 에 위치한 관찰점 (A)의 진응력(true stress)과 動的 응력확대계수에 의한 動的 응력을 구할 때의 좌표계(이때의 진응력의 의미는 응력해석에 의한 응력이란 뜻이며 응력확대계수를 사용하여 구한 응력에 상대되는 의미를 가진다)

달하기 전까지 이 점 (A)에서의 動的 응력성분은 영(zero)이며 다만 靜的 응력성분만 나타날 것이다.

압축 Dilatational Wave 가 이 점 (A)에 도달하면 動的 응력은 갑자기 줄어들며 Shear Wave 가 이 점 (A)에 도달할 때까지 감소하다가 Rayleigh Wave 가 이 점에 도달하는 시간 후부터 빠르게 증가한다. 이 현상을 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 특기할 사항은 眞응력 성분이 항상 動的 응력확대계수에 의한 응력성분보다 작

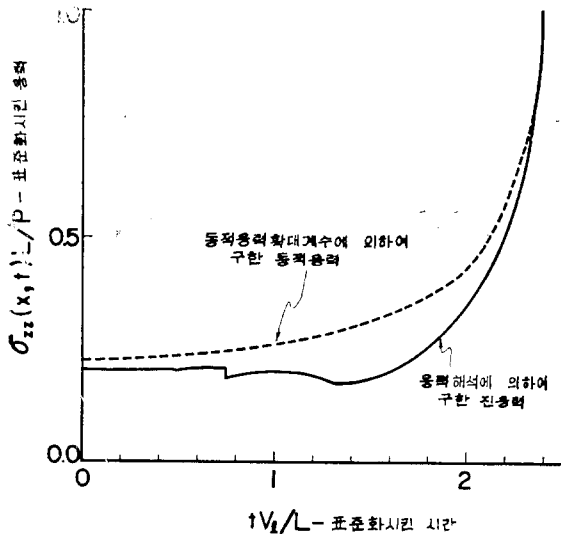


그림 5 그림 4의 관찰점 (A)에서의 動的 응력의 시간에 대한 변화⁽³³⁾

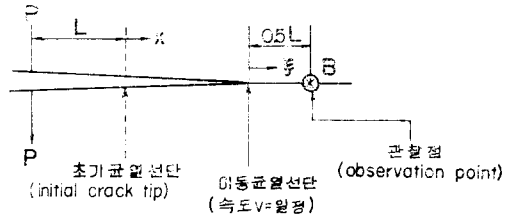


그림 6 이동균열선단 전방 $\xi=0.5L$ 에 위치한 관찰점 (B)의 진응력(true stress)과 動的 응력확대계수에 의한 動的 응력을 구할 때의 좌표계(여기서 $V=0.3C_1$ 으로 택하였음)

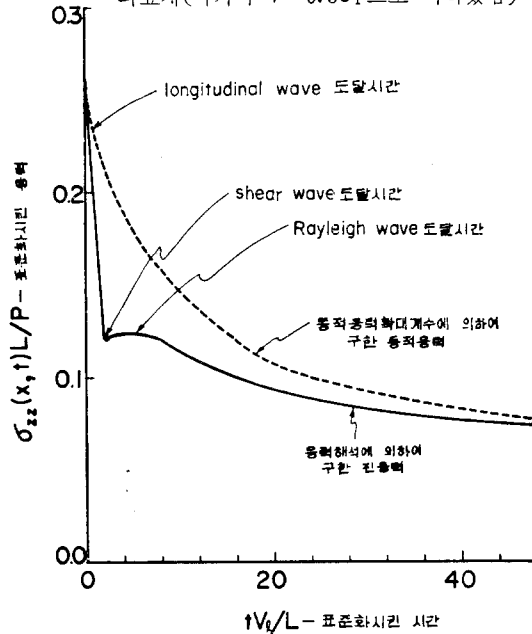


그림 7 그림 6의 관찰점 (B)에서의 動的 응력의 시간에 대한 변화⁽³³⁾

다는 사실이다. 즉 우리가 실험을 통하여 측정할 수 있는 動的 응력확대계수는 과대평가된 것이며 특히 그림 5의 경우를 보면 표준화 시킨 시간좌표가 2보다 적은 경우는 큰 오차를 나타내는 것을 알 수 있다.

따라서 실험으로 動的 응력확대계수를 구하려 할 때에는 위와같은 오차의 가능성에 대하여 세밀한 주의가 필요하다. 그런데 이러한 動的 실험의 시간범위(time scale)는 수 μsec 이거나 매우 정밀한 측정기기 및 기술이 필요하다.

그 다음 또 하나의 예로 그림 6에 보인바와 같

이 $\xi=0.5L$ 을 관찰점 (B)로 한 경우를 살펴 보자.

이 경우 관찰점 (B)의 응력변화되는 모양을 그림 7에 圖示하였다.

이 경우도 역시 시간 $t=0$ 에서 균열선단이 저파되기 시작한 후 응력波들이 빠른 시간내에 관찰점 (B)를 통과하게 된다. 균열선단의 전파속도가 $0.3C_1$ 이라면 그림 7의 표준화시킨 시간좌표 즉 0.714에서 Dilatational Wave가, 시간좌표 즉 1.8에서 Shear Wave가, 시간좌표 즉 2.17에서 Rayleigh Wave가 이 관찰점 (B)를 통과한다. 따라서 우리들이 실험적으로 어느 특정점, 즉 빠르게 전파하고 있는 균열선단 전방의 어느 점[예를들면 관찰점 (B)]의 응력성분을 측정하여 動的 응력확대계수를 구하려고 할 때에는 위에서 논의한 3개의 응력波(Dilatational, Shear, Rayleigh Waves)들이 관찰점을 통과한 후의 응력성분을 측정하여야 오차를 적게할 수 있을 것이다.

시간에 따라 변화하는 하중에 관하여서도 위와 같은 과정으로 이론적으로 해석하여 두 응력 성분분포(진응력분포와 動的 응력확대계수에 의한 응력분포)의 차이에 대하여 흥미있는 고찰을 할 수 있다. 하중조건이 그림 1에 상당(equivalent)할 경우의 진응력성분은 식 (28)과 같이 주어진다.

$$\sigma_{zz}^{True} = f(t/x) + \sigma_{zzF}^{dyn} \quad (28)$$

또 이에 대응하는 즉 動的 응력확대계수 [식 (11)]에 의한 動的 응력은 식 (29)로 주어진다.

$$\sigma_{zz}^{K^{dyn}} = \frac{K_D^{ynd}}{\sqrt{2\pi\xi}} = 0.637\sigma_0 K(d)\xi^{-1/2} \quad (29)$$

$$\{v_0 t^{1/2} - [V(t-\tau)]^{1/2}\}$$

이 두 응력場이 시간에 대하여 변화하는 양상을 살펴보자. 균열선단 전방 ξ 에 위치한 점을 관찰점으로 취하여 균열전파 속도 $V=0.4C_1$ 이고 무차원화시킨 지연시간(delay time) $\tau C_1/\xi=50$ 일때의 $\sigma_{zz}^{True}/\sigma_{zz}^{K^{dyn}}$ 을 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 보는바와 같이 두 응력이 근사하게 같아지기 위하여서는 꽤 긴 시간이 필요하다. 이러한 사실들은 動的 파괴역학을 정확히 실험

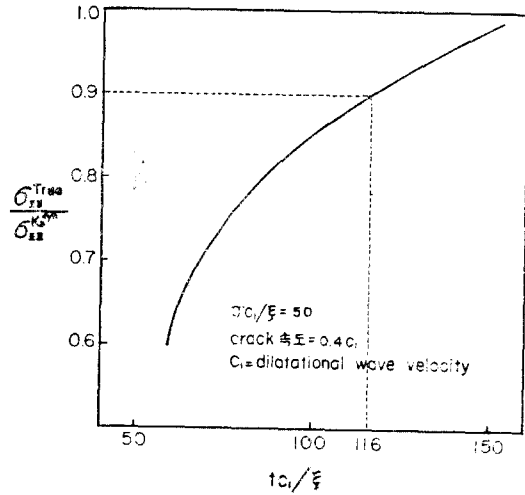


그림 8 응력波하중을 작용시켰을 때 진응력(true stress)와 動的 응력확대 계수에 의한 동적 응력의 비(比)와 시간과의 관계⁽³³⁾

으로 연구할때에 충분히 연구 검토되어야 할 사항들이다. 여러가지 종류의, 시간에 따라 변화하는 응력波하중에 대하여도 흥미있는 고찰을 할 수 있으며 또 응력波의 입사각이 균열과 어떤 각(角)을 이루고 있을때는 균열선단에서 K_{II}^{dyn} 의 성분도 생겨나게 되어 좀 더 복잡하게 되나 지금까지의 강좌내용과 비슷하게 해석할 수 있다. 그러나 지면(紙面)관계로 다음 기회로 미루기로 한다.

3.2. 실험적인 연구

動的 탄성 파괴역학 문제들을 실험적으로 연구하기 위해서는 우선 빠르게 전파하고 있는 균열선단(전파속도 $V=100\text{m/sec} \sim 1000\text{m/sec}$ for various polymers) 부근의 응력분포 상태나 변위분포 상태등을 기록하는 실험장치가 필수적으로 필요하다. 먼저 Wells와 Post⁽⁷⁾에 의하여 처음으로 사용되었고 Kobayashi^(18,19,20)와 Dally⁽²¹⁾ 등에 의해서 발전, 개선된 動的 광탄성 실험법에 대하여 설명하고 이 실험에 의하여 動的 응력확대계수를 추출하는 방법을 아울러 강의하고 그의 문제점 등을 논의 하고자 한다.

빠른 속도로 전파되고 있는 균열선단의 像

■ 講 座

(image)을 기록하기 위하여서 몇개의 섬광(a multiple spark)을 光源으로 한 고속촬영장치가 많이 사용되고 있다. 光源으로 사용되는 빛의 강도(intensity)는 실험에 사용하는 사진필름을感光시키기에 충분해야 할 것이며 매우 빠른시간 내에 최대 강도에 도달해야 한다[보통 100nsec 이내에 빛은 강도, 영(zero),에서 최대 강도로 상승해야 한다]. 또 이 최대강도로 어느 정도의 시간동안(대강 400~500nsec) 유지해야 한다. 간단한 예로서 균열전파속도가 500m/sec 이라면 400nsec 동안의 노출시간동안 균열선단의 이동거리는 0.2mm 가 될 것이다. 선명한 균열선단의 像

(image)을 얻기위하여 이에 맞는 필름을 선택해야 하고 가능한 짧은 노출시간으로 우리가 원하는 動的인 현상을 기록해야 한다.

지금 사용되고 있는 고속사진기의 성능은 대개 20,000~800,000fps(frames per second)이며 균열전파—균열정지 실험을 할 때에는 20,000fps 정도, 균열전파—균열分枝(crack branching) 실험을 할 때에는 100,000~200,000fps 정도의 속도로서 촬영하여 연속으로 촬영한 사진의 시간 간격이 10 μ sec~5 μ sec 정도인 것이 보통이다.

—다음호에 계속—



'85 한국 국제컴퓨터 그래픽스 세미나 및 전시회

Korea International Computer Graphics Conference and Exhibition 85' 약칭 KIC '85)

대한 무역진흥공사(KOTRA)는 세계 컴퓨터 그래픽스 협회(WCGA)와 함께 국내 최초로 컴퓨터 그래픽스 분야에 관한 세미나 및 전시회를 개최키로 하였다. 컴퓨터 그래픽을 통한 생산 및 경영의 합리화로 생산성 향상을 기할 목적으로 열리게 되는 등 전시회에는 세계 유수의 컴퓨터 업체 40여개사가 최신 그래픽스장비 및 프로그램을 전시하며, 국내외 전문가들이 연사로 참가하는 대규모 국제 세미나가 동시 개최된다.

1. 개최일정

가. 세미나 : '85. 10. 28(월)~11. 1(금) (5일간)

나. 전시회 : '85. 10. 29(화)~11. 2(토) (5일간)

2. 장 소

대한무역진흥공사 종합전시장(KOEX)

대회의실 및 특별전시실

3. 세미나 주제 및 전시분야

전산보조설계(CAD), 전산보조제조(CAM), 전산보조엔지니어링(CAE), 전산보조기획(CAP), 전산이용제조(CIM), 프로젝트 매니지먼트, 유한요소법(FEM), 이미지처리 및 도형인식(IPPR), 자료제시, 매니지먼트, 그래픽스, 시뮬레이션 및 애니메이션, 인공지능, 문자 및 이미지 통합.