

응력파에 의한 구조부재의 동적파괴 해석

Dynamic Fracture Analysis of Structural Element due to Stress Wave Propagation

김 경 수*
Kim, Kyung-Su

박 준 범**
Park, Jun-Bum

정 배 훈**
Jeong, Bae-Hun

요 지

본 논문에서는 충격이나 폭발하중에 의해 발생하는 응력파와 균열의 상호작용을 수치적으로 계산하였다. 수치해법으로는 응력파의 물리적 특징을 잘 재현시켜주는 Bicharacteristic Method가 사용되었다. 충격하중에 대한 동적응력확대계수 $K_I(t)$ 가 수치해석적으로 시뮬레이션된 코오스틱광선에 의해 계산되었으며, Kalthoff의 실험에 의해 얻어진 결과와 잘 일치함을 보여주었다. 또한 균열 주변에 구멍이 존재하는 경우에 응력파가 구멍의 효과에 의해 균열의 응력확대계수에 미치는 영향을 조사하였으며 실험과 비교하여 만족할만한 결과를 얻었다.

Abstract

The interaction between cracks and stress wave due to impact and explosive loads is numerically calculated in the study. The interaction and the effects of stress wave are numerically examined with the application of Bicharacteristic Method. This method has been used with confidence for its reliability in reproducing the realistic and physical wave pattern in the complete solution domain. The dynamic stress intensity factor, $K_I(t)$ for cracks under impact loads are numerically simulated and its results are compared favorably with Kalthoff's experimental output. Also the influence of stress wave to the dynamic stress intensity factor for the case of two symmetric holes around cracks are investigated. The results of study are also compared favorably with the experiment and proven to be applied to the structures exposed to impact and explosive loads.

Keywords : impact or explosive loading, stress wave propagation, bicharacteristic method, method of caustic, dynamic stress intensity factor

1. 서 론

구조물에 가해지는 충격이나 폭발하중은 응력파가 되어 전파된다. 이 응력파가 구조부재에 존

재하고 있는 균열부에 도달하면 반사와 굴절 및 회절들을 일으켜 매우 복잡하게 변화되는 응력장을 형성하며, 때로는 순간적인 파괴를 일으키기도 한다. 따라서 응력파와 균열과의 상호작용에

* 성희원·인하대학교 선박해양공학과, 교수
** 인하대학교 선박공학과 대학원

• 이 논문에 대한 투고음: 1998년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시던 1998년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

의한 균열선단의 동적 응력강도계수에 대한 계산은 동적하중을 받는 구조물의 안전성 평가에 중요한 부분이라 하겠다.

본 논문에서는 참고문헌 [1]에서 소개된 수치해석법인 bicharacteristic 방법을 사용하여 충격하중을 받는 구조부재의 균열선단에 대한 동적 응력강도계수를 계산하였다. Mode I 하중에 대한 계산을 수행하였으며 계산된 응력장으로부터 동적 응력강도계수는 수치적으로 시뮬레이션된 코오스틱 곡선을 이용하여 계산하였다. 수치적으로 얻어진 코오스틱 곡선은 실험에서 얻어진 곡선과 직접 비교 및 검증되었다. 또한 충격하중을 받는 구조부재에 볼트 혹은 리벳 등의 구멍이 있는 경우 이들이 균열선단의 동적 응력확대계수에 어떠한 영향을 미치는가가 수치적으로 조사되었다.

2. 응력파와 균열의 상호작용

2.1 응력파의 기본적인 성질

주기가 매우 짧은 충격 하중이나 폭발하중을 받는 구조물은 정적하중이나 긴 주기를 가지는 하중을 받는 구조물과 전혀 다른 응답을 나타낸다. 즉, 구조물전체의 힘의 평형을 만족시키면서 행동하는 것이 아니라 하중에 대한 응력들이 파의 형태를 가지고 빠른 속도로 퍼져나가는 행동을 나타내게 되며, 이를 응력파라 부른다. 이로 인해 응력파의 영향이 미치지 않는 부분은 정적인 상태를 유지하게 된다. 또한 이 응력파의 전파속도는 재료의 물성치에 따라 일정한 값을 갖

게 된다. 그림 1은 bicharacteristic 방법을 이용하여 개발된 수치해석 프로그램에 의해 시뮬레이션된 응력파를 3차원 그래픽으로 나타낸 그림이다. 충격하중으로 인해 파급되는 응력파는 파의 진행방향과 입자의 운동방향이 일치하고 가장 빠른 속도를 갖는 압축파, 파의 진행방향과 입자의 운동방향이 수직을 이루는 전단파, 얇은 층에 높은 에너지를 함유하며 파급되는 표면파인 레일리 파(Rayleigh wave), 압축파로부터 전단파에 접선으로 연결되어 파급되는 폰슈미트 파(Von Schmidt wave)가 나타난다. 이 파들로부터 구조응답은 매우 복잡하면서 불균일한 거동을 보이게 된다.

2.2 기본 방정식

2차원 등방성 선형탄성체에서 응력파는 운동방정식과 시간에 의해 미분된 재료의 구성식에 의해 지배되며, 이들은 함께 쌍곡선형의 편미분방정식의 계를 형성한다. 이들을 평면문제(plane problem)에 대하여 쓰면 다음과 같다³⁾.

$$\begin{aligned}
 -\rho \dot{v}_1 + \sigma_{11,1} + \sigma_{12,2} &= 0 \\
 -\rho \dot{v}_2 + \sigma_{12,1} + \sigma_{22,2} &= 0 \\
 -\sigma \dot{v}_{11} + (\lambda^* + 2G)v_{1,1} + \lambda^* v_{2,2} &= 0 \\
 -\dot{\sigma}_{12} + G(v_{1,2} + v_{2,1}) &= 0 \\
 -\dot{\sigma}_{22} + \lambda^* v_{1,1} + (\lambda^* + 2G)v_{2,2} &= 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 v_1 와 v_2 는 입자의 속도성분, σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} 는 응력성분, 아래첨자 1과 2는 2차원에서의 방향을 표기하며, $\sigma_{i,k}$ 와 $v_{i,k}$ 는 각각 응력과 속도성분의 k방향에 대한 도함수를 나타낸다. 또한 λ 는 Lamé상수, G 는 전단계수, ρ 는 밀도, ν 는 Poisson's ratio를 나타내며, λ^* 은 평면응력상태에서 $\lambda^* = \lambda \frac{1-2\nu}{1-\nu}$ 이며, 평면변형률상태에서는 $\lambda^* = \lambda$ 가 된다.

식 (1)은 경계면에서의 경계조건을 만족해야 하며, 이에 대한 수치해석법은 참고문헌 [1]과 [2]에 수록되어 있다.

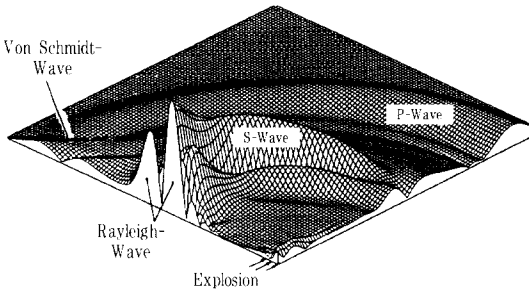


그림 1 수치해석에 의해 시뮬레이션된 폭발하중에 의한 응력파의 파급³⁾

2.3 수치해법

쌍곡선형 편미분 방정식의 계는 수직 도함수가 미정인 시공간의 특이면을 포함하기 때문에 단지 이 면내에 있는 선을 따라서만 수치적으로 적분 되어져야 한다. 그렇지 않는 경우에는 이 방정식의 물리적 특성을 잃어버리게 된다.

시공간의 어떤 해점을 통과하는 모든 특성곡면 은 시간과 공간좌표계에서 하나의 원추를 형성하게 되며, 이 원추를 Monge원추라 하고 그림 2와 같다. 여기서 내부원추는 속도 C_s 를 갖는 전단파의 파급에 관계되며, 외부원추는 속도 C_L 를 갖는 종파의 파급에 관계한다.

이 미분방정식들의 선형조합에 의해 불연속인 수직도함수를 소거하면 특이곡면내에 연속인 도함수만 남게 되는데 이들을 적합 방정식이라 하며, 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & [\rho C_L n v + n v n - t \text{grad} (\lambda t v + C_L n \sigma t) \frac{\Delta \tau}{2}] | P^o \\ & [\rho C_L n v + n \sigma n + t \text{grad} (\lambda t v + C_L n \sigma t) \frac{\Delta \tau}{2}] | P_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & [\rho C_s t v + n \sigma n - t \text{grad} (G n v + C_s n \sigma t) \frac{\Delta \tau}{2}] | P^o \\ & [\rho C_s t v + n \sigma n + t \text{grad} (G n v + C_s n \sigma t) \frac{\Delta \tau}{2}] | Q_i \end{aligned} \quad (3)$$

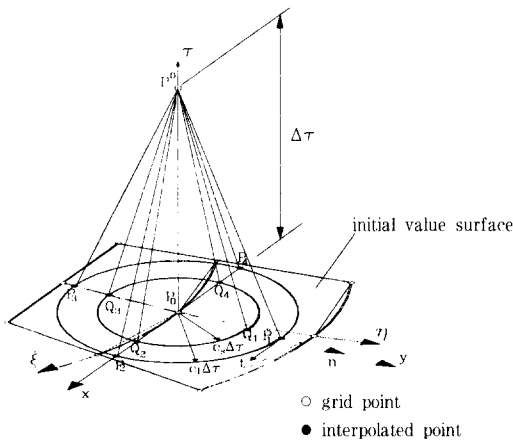


그림 2 곡선좌표계 (ξ, η)의 점 P_0 에 대한 Monge 원추

내부점 P^o 에서 해를 얻기 위하여 식 (2)와 (3)은 각각 4개의 선 P, P^o 와 Q, P^o 에 대한 식들을 형성한다. 여기에서 P_i 와 Q_i 점에서 입자의 속도와 응력요소들의 값 및 도함수값들은 initial value surface의 9개의 격자점으로부터 최소자승법을 통해 얻을 수 있다. 여기에서 미지수로 5개의 독립변수와 8개의 공간도함수가 식에 포함되며, 이들을 소거하기 위하여 식 (2)와 식 (3)로부터 주어지는 8개의 적합 방정식 외에 원래의 식 (1)의 P, P^o 를 따라 적분한 식 5개가 더 필요하다.

$$\rho v - \frac{\Delta \tau}{2} \text{div} \sigma | P^o = \rho v + \frac{\Delta \tau}{2} \text{div} \sigma | P_o \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma - \frac{\Delta \tau}{2} (\lambda^* \text{div} v I + G (\text{grad} v + (\text{grad} v)^T)) | P^o \\ = \sigma + \frac{\Delta \tau}{2} (\lambda^* \text{div} v I + G (\text{grad} v \\ + (\text{grad} v)^T)) | P_o \end{aligned} \quad (5)$$

수치해석적 dissipation을 낮게 하기 위하여는 안전성 조건인 CFL (Courant-Friderichs-Lewy) 수⁴⁾가 1에 가까워야 하기 때문에 가능한 한 정사각형 mesh를 유지하여야 한다.

2.4 동적 응력확대 계수

선형 파괴역학에서는 파괴의 형태를 작용하는 하중의 종류에 따라 3개의 기본모드로 나뉜다. 그림 3과 같이 Mode I을 개구형, Mode II를 전단형, Mode III를 찢어짐형이라고도 한다. 선형 파괴역학에서 균열에 작용하는 모든 하중의 종류는 다음과 같이 이 세가지 모드의 중첩을 사용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_{ij}^{(total)} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)} \quad (6)$$

그러므로 위의 각 경우에 대한 응력상태만 알면 모든 일반적인 하중에 대한 균열의 응력집중상태를 알 수 있다.

균열면에 임의의 하중이 작용할 때 선형탄성재

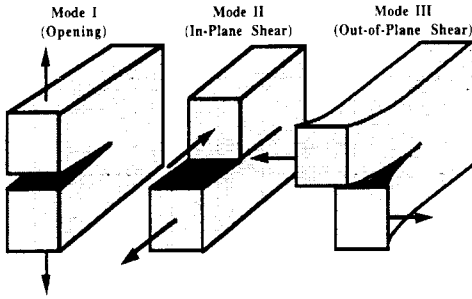


그림 3 선형탄성파괴역학에서의 세가지 기본모드

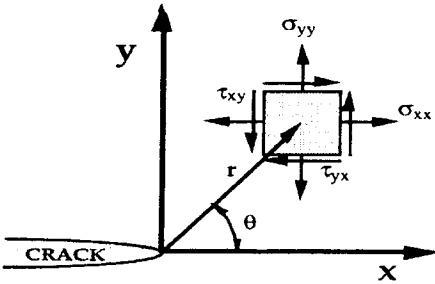


그림 4 균열주변의 응력분포에 관한 개략도

료의 균열선단근처에서 임의의 요소에 작용하는 면내응력을 그림 4와 같이 나타낼 수 있으며, 이 각각의 응력성분들은 단일상수 K_I , K_{II} , K_{III} 에 비례하게 된다.

Mode I 인 경우

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Mode II인 경우

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right] \end{aligned} \quad (8)$$

Mode III인 경우

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \tau_{yz} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 K_I , K_{II} , K_{III} 는 각 파괴모드에 대한 응력확대계수가 된다. 상수값 K_I , K_{II} , K_{III} 을 알면 균열선단에서 전체 응력분포가 계산되어질 수 있고, 이 응력값들의 분포는 식 (7), (8), (9)에서 보여주는 바와 같이 균열선단주의에서 $1/\sqrt{r}$ 의 특이성을 갖는다.

선형탄성체인 경우 균열선단 주위의 응력분포는 식 (7), (8), (9)들로부터 응력확대계수를 구할 수 있다.

Mode I 인 경우에는 식 (2)로부터 다음과 같고,

$$\theta_I = \sigma_x + \sigma_y = \frac{2K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (10)$$

이고, 여기서

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2, & \theta &= \arctan \frac{y}{x}, \\ \frac{x}{r} &= \cos\theta, & \frac{y}{r} &= \sin\theta \end{aligned}$$

이로부터 Mode I 의 응력확대계수 K_I 은 다음과 같이 구해진다.

$$K_I = -\sqrt{2\pi} \cdot r^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\partial \theta_I}{\partial x} \cos\frac{3\theta}{2} + \frac{\partial \theta_I}{\partial y} \sin\frac{3\theta}{2} \right) \quad (11)$$

Mode II도 위와 비슷한 방법을 사용하면, 식 (8)로부터 다음과 같다.

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \cdot r^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\partial \theta_{II}}{\partial x} \sin\frac{3\theta}{2} - \frac{\partial \theta_{II}}{\partial y} \cos\frac{3\theta}{2} \right) \quad (12)$$

동적 선형파괴역학에서도 정적인 경우와 마찬가지로

가지로 균열 선단 주위에서 응력장이 $1/\sqrt{r}$ 의 특이성을 갖기 때문에 균열선단주위의 응력장의 세기를 나타내는 응력강도계수를 시간의 함수로 계산하고 이 값이 재료의 충격과피인성치(K_{Ic})를 넘지 않도록 설계하여야 한다.

2.5 코오스틱 곡선

균열이 존재하는 시편에 그림 5와 같이 파괴의 기본모드인 개구형모드의 하중을 받는 경우에 균열선단에는 인장응력이 집중되고 이 균열선단의 단면은 Poisson비로 인해 오목렌즈와 같은 형상을 하게 되어 상에서는 어두운 부분과 밝은 부분이 나뉘게 된다. 이 어두운 부분과 밝은 부분 사이에 형성된 경계선을 코오스틱 곡선이라 한다.

상위의 코오스틱곡선을 직접 형성하는 특정광선은 매우 중요한 의미를 갖으며, 이를 초기광선(initial light ray)이라 한다. 또한 초기광선이 통과하는 시편상의 모든 점에 대한 궤적을 초기곡선(initial curve)이라 한다. 초기곡선에 비해 균열선단에 가까운 시편상의 점을 통과하는 광선은 초기광선보다 더 많이 휘게 되고, 초기곡선에 비해 균열선단에서 먼 시편상의 점을 통과하는 광선은 초기광선보다 조금 휘게 되어, 결국 이 점들도 코오스틱의 외부에 존재하게 된다. 그러므로 상위의 코오스틱곡선은 시편의 초기곡선에 의해 직접 형성이 되고 수학적으로 초기 곡선에서 코오스틱 곡선으로의 사상과정은 비가역적이고 일대일 대응으로 나타나지 않는다.

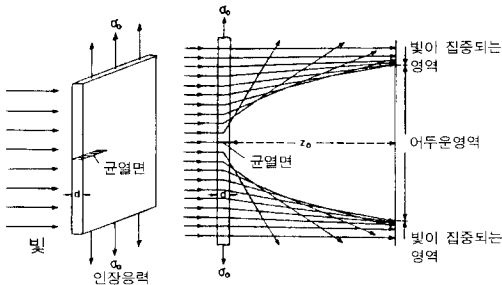


그림 5 응력집중문제에 관한 광선의 분포에 대한 개략도

2.6 코오스틱 곡선의 수치적 시뮬레이션

그림 6과 같이 인장하중(Mode I 하중)을 받는 V자홈이 파진 시편에 평행하게 입사되어진 광선은 응력이 집중되는 영역인 P점을 지날 때 굴절이 일어나며 이로 인한 사상방정식은 다음과 같다.

$$r' = r + w \tag{13}$$

변위벡터 w 는 Eikonal theory⁵⁾에 의해 다음과 같이 계산되고,

$$w = -z_0 \cdot g \text{ grad } \Delta s(r, \phi)$$

여기서, Δs 는 optical path length의 변화량이며, z_0 는 시편과 상까지의 거리이다. 따라서 시료면의 응력장이 주어지면 이를 통과하는 광선의 상면에서의 위치를 다음 식에 의해 결정할 수 있다.

$$r' = r - c \cdot d_{eff} \cdot z_0 \cdot g \text{ grad } [\sigma_1 + \sigma_2 \pm \lambda(\sigma_1 - \sigma_2)] \tag{14}$$

여기서 c 는 물질의 광학상수이며, d_{eff} 는 유효 시편두께로 투과성시편에 대해 d 이고 반사성시편에 대해 $d/2$, d 는 실질시편두께, σ_1 와 σ_2 는 주응력이다.

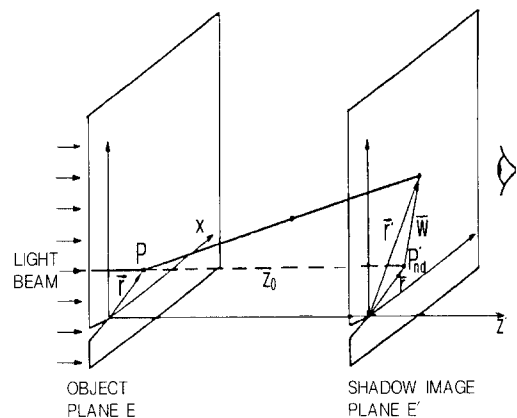


그림 6 광선의 굴절

식 (13) 으로부터 코오스틱 곡선이 형성되기 위해 필요충분조건인 Jacobian이 '0'임이 다음과 같이 포함되야 한다.

$$\frac{\partial x'}{\partial r} \frac{\partial y'}{\partial \phi} - \frac{\partial x'}{\partial \phi} \frac{\partial y'}{\partial r} = 0 \quad (15)$$

여기서, x' 와 y' 는 코오스틱 곡선의 좌표이다. 이 조건으로 인하여 Jacobian이 '0'이 되는 시편 상의 궤적이 초기곡선을 이루고, 이 초기곡선으로 인하여 땀힌 상이 코오스틱곡선을 이룬다.

그림 7과 같이 구해진 코오스틱곡선으로부터 D 값을 측정할 수 있고, 이 값으로부터 각 모드에 해당하는 응력강도계수를 다음 식을 이용하여 구할 수 있다⁶⁾.

$$\text{mode I : } K_I = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3(3.17)^{5/2} z_o c d_{eff}} D^{5/2}$$

$$\text{mode II : } K_{II} = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3(3.02)^{5/2} z_o c d_{eff}} D^{5/2} \quad (16)$$

이를 프로그램으로 구성함으로써, 동적 응력확대계수를 수치해석적으로 계산할 수 있으며, 기존의 extrapolation에 의한 방법⁷⁾보다 안정적인 결과를 얻게 된다.

3. 수치해석 결과

3.1 코오스틱 실험과의 비교계산

그림 8에서는 Kalthoff 등에 의해 수행되어진

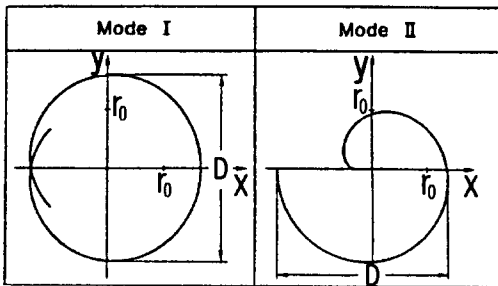


그림 7 모드 I 과 모드 II 하중에 의해 균열 선단에서 나타나는 코오스틱 곡선

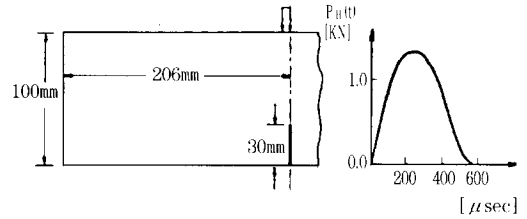


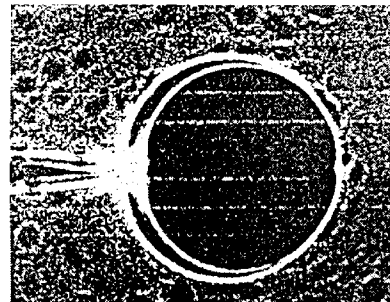
그림 8 시편 및 낙하추에 의한 충격하중

실험⁸⁾에 사용된 Araldit B판과 자유낙하 해머하중의 시간에 대한 분포를 나타내었다. 여기에 사용된 Araldit B의 물질상수는 표 1과 같다.

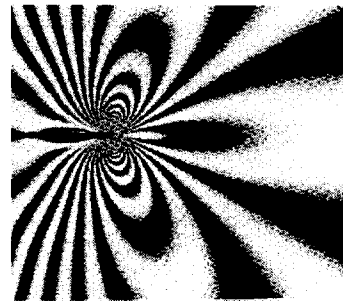
Araldit B는 광학적으로 이방성이기 때문에 그림 9와 같이 이중 코오스틱곡선을 형성한다. 이 코오스틱곡선의 바깥쪽이나 안쪽지름을 읽어

표 1 Caustic 측정을 위한 물질 상수

Young's modulus (N/m ²)	General optical constants		Shadow optical constants	
	A (m ² /N)	B (m ² /N)	c (m ² /N)	λ
0.366E10	-0.056E-10	-0.620E-10	-0.970E-10	-0.288



(a)



(b)

그림 9 실험적으로 얻어진 코오스틱 (a) 과 등색선 루프 (b)

아래의 식에 대입하면 그 시간에서의 동적 응력 강도계수를 다음과 같이 얻게 된다.

$$K_I(t) = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3f_{o,i} z_o d_{eff}} D_{o,i}^{1/2} \quad (17)$$

여기서 $D_{o,i}$ 는 코오스틱 곡선의 지름(o : 바깥쪽, i : 안쪽)이며, $f_{o,i}$ 는 수치적 상수로 단일 코오스틱에서는 3.17의 값을 갖고, 이중 코오스틱에서는 $-\lambda$ 값에 따라 f_o 는 선형적으로 증가하고, f_i 는 선형적으로 감소하여, f_o 는 3.31, f_i 는 3.05의 값을 가지게 된다.

그림 10은 수치해석으로 시뮬레이션된 코오스틱 곡선과 등색선 루프를 보여준다. Mode I 하중에 대한 실험에 의해서 얻어진 그림 9의 형상과 잘 일치함을 보여준다.

그림 11에서는 수치적 시뮬레이션을 통해 얻은 코오스틱곡선으로부터 구한 동적 응력강도계수를 Kalthoff등에 의한 실험결과⁸⁾와 비교하였다. 두 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2 균열선단 주위의 구멍이 동적응력 확대계수에 미치는 영향

균열선단 주위에 구멍이 대칭적으로 존재하는 경우 이 구멍이 동적 응력확대계수에 어떠한 영향을 미치는지⁹⁾를 조사하였다. 그림 12는 계산에 사용된 시편으로 대칭임을 고려하여 그 절반만을 나타내었으며, 진폭 1Pa과 주기 240 μ s을 갖는 sine형상의 하중을 120 μ s 동안 5mm의 범위에 가하였다. 시편의 재료는 polycarbonate으로 그 물성치는 표 2와 같다. 또한 본 계산은 표 3에 보이는 바와 같이 3가지 경우에 대하여 수행되었다.

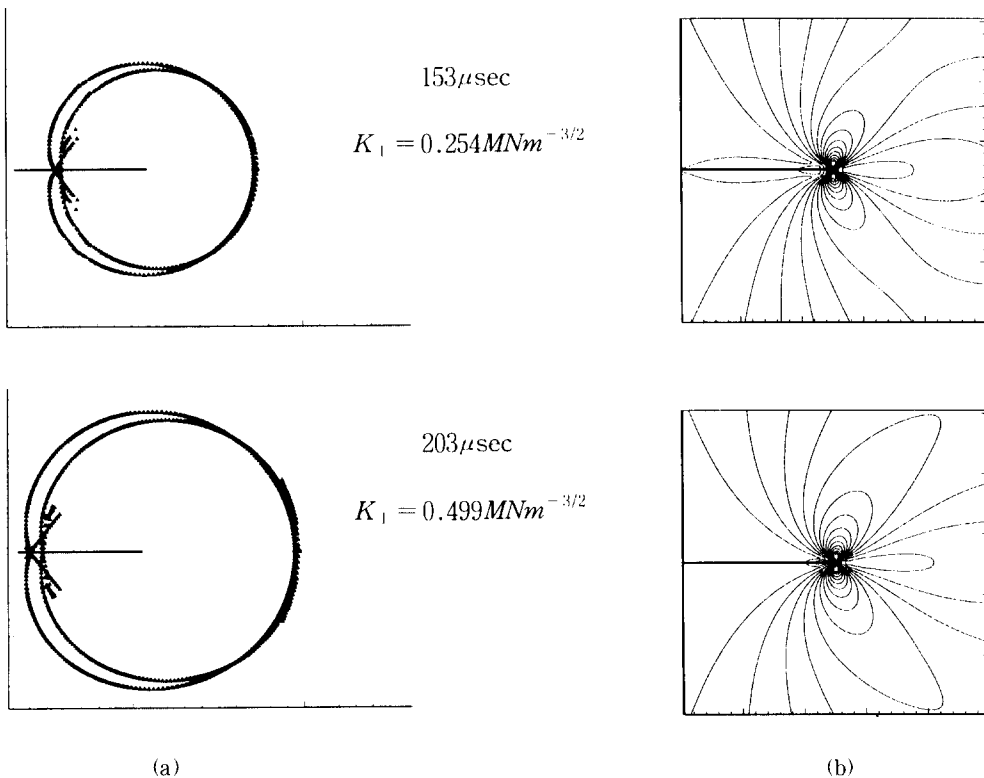


그림 10 수치적으로 시뮬레이션 된 코오스틱 (a)과 등색선 루프 (b) (Mode I 하중)

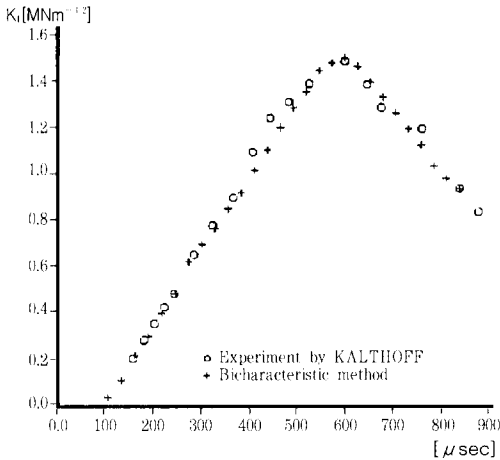
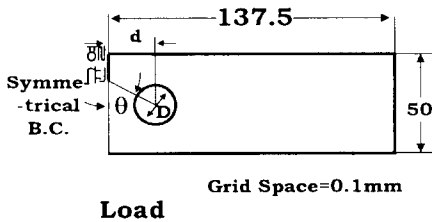


그림 11 시간에 대한 동적응력확대계수 곡선



Load

그림 12 모델의 형상

표 2 Polycarbonate의 물성치

Properties	Unit	Quantity
Static Young's Modulus	GPa	2.38
Dynamic Young's Modulus	GPa	2.72
Poisson's Ratio		0.36
Density	kg/m ³	1196
Plate Wave Velocity	m/sec	1616.4
Distortional Wave Velocity	m/sec	914.4
Rayleigh Wave Velocity	m/sec	856.04

표 3 Cases

	Case 1	Case 2	Case 3
d (mm)	10, 15, 20, inf	15	15
θ(deg)		30, 47.5, 76.5, 90	47.5
D (mm)	10	10	0, 5, 10, 15, 20

그림 13은 case2의 $\theta=30^\circ$ 에서 최대 전단 응력의 전파과정을 시간에 따라 시뮬레이션한 것이다. 구멍이 계산된 동적응력확대계수에 미치는 영향은 그림 14와 같이 구멍과 균열선단의 거리가 작을수록, 구멍과 균열이 이루는 각이 작을수록, 구멍의 지름이 클수록 동적응력확대계수가 커짐을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 충격하중에 의해 형성된 응력파와 균열과의 상호작용에 대한 해석이 bicharacteristic 방법에 의해 수치적으로 수행되었다.

코오스틱 실험결과와의 비교 계산에서는 동적응력확대계수의 계산에 수치적으로 시뮬레이션된 코오스틱이 사용되어 직접 비교되었으며, 균열주위의 구멍이 동적응력확대계수에 미치는 영향을 조사하였다.

이와 같은 코오스틱곡선을 계산된 응력장으로

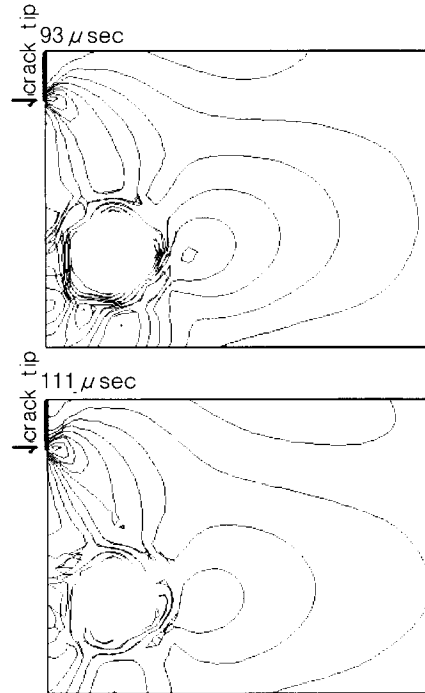
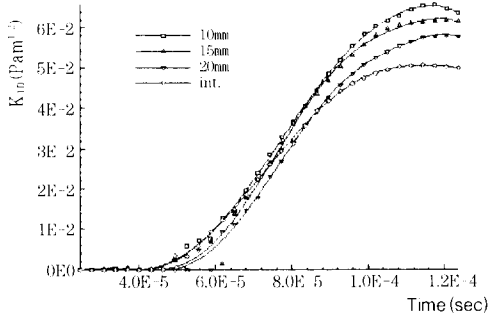
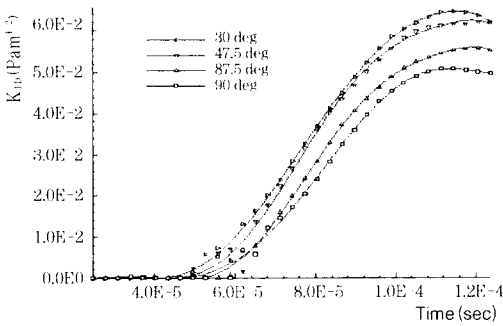


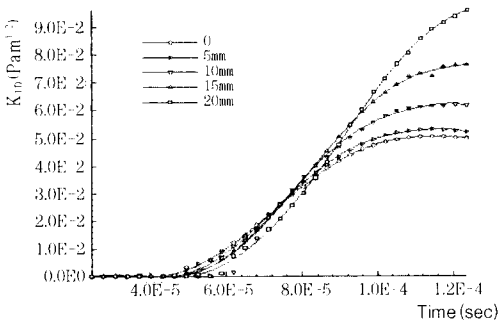
그림 13 응력파의 분포



(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3

그림 14 각 case에서의 동적 응력 확대 계수의 비교

부터 수치적으로 시뮬레이션하는 작업은 번거로운 점이 있으나 이론적인 코오스틱곡선과 비교하여 계산 프로그램을 검증할 수 있으며, 균열선단 부근에서 몇 개의 계산점으로부터 동적 응력확대계수를 얻는 것보다 정확도가 뛰어나다는 장점이 있다.

이상과 같이 bicharacteristic법에 의한 수치해석결과가 코오스틱 실험결과와 잘 일치함을 보여 주어 응력파에 대한 분야 뿐만아니라 앞으로 동

적 파괴역학 분야에도 성공적으로 적용되어질 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 '96년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김경수, "물질경계면을 갖는 판에서의 응력파에 대한 수치해석", 대한조선학회 논문집, 제 32권 제 4 호, 1995년.
2. R. J. Clifton, "A Difference Method for Plane Problems in Dynamic Elasticity", Quart. Appl. Math, Vol. 25, 1967.
3. K. S. Kim, "Spannungswellen an Grenzflächen in Linearelastischen Scheiben", VDI Verlag, Reihe 18, Nr.91, 1991.
4. Th. Meis, U. Marcowitz, "Numerische Behandlung Partieller Differentialgleichungen", Springer-Verlag, 1978.
5. M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics", Pergamon Press, New York, 1970.
6. J.F.Kalthoff, The Shadow Optical Method of Caustics, Chapter 9, Handbook on Experimental Mechanics, Ed. A.S. Kobayashi, Prentice Hall. p430-500, 1986
7. Y. M. Chen, "Numerical Computation of Dynamic Stress Intensity Factor by a Lagrangian Finite-Difference Method", Eng. Fracture Mech., 7, p653-660, 1975,
8. W. Bohme, J. F. Kalthoff and S. Winkler, "Modell untersuchungen zu dynamischen Effekten beim Kerbschlagbieguversuch", 12.Sitzung des Arbeits Kreises Bruchvorgange im DVM, Freiburg, 1980.
9. 이 역섭, 김 재우, "균열선단 부근의 구멍이 동적 균열전파에 미치는 영향", 대한기계학회 96년 추계학술대회논문집 A. pp. 204-208, 1996

(접수일자 : 1997. 6. 17)