

충격하중을 받는 취성재료의 동적응력확대계수 결정

Determination of Dynamic Stress Intensity Factor of Brittle Materials under Impact Loading

이 역 섭 (O. S. Lee, 인하대학교 기계공학과)

아 찬 석 (C. S. Lee, 인하대학교 대학원 기계공학과)

ABSTRACT : This paper describes the dynamic fracture behavior of brittle materials under impact loading by using INSAMCR program with instrumented charpy test machine. To calculate the Dynamic Stress Intensity Factor the finite element analysis methods program, INSAMCR, was used. Dynamic fracture characteristic was researched to verify a relationship between Dynamic Stress Intensity Factor and crack tip propagation velocity in WC-6%Co. The relationship between Dynamic Stress Intensity Factor and crack tip velocity revealed typical I' shape. INSAMCR was run to verify experimental results in WC-6%Co and shows a good coincidence.

1. 서 론

기계구조물들을 안전하게 설계하있음에도 불구하고 예기치 못한 충격하중 등에 의해서 균열이 발생하거나, 기존의 균열이 급격히 진파하여 대규모의 손상으로 발전되는 예가 빈번하여 파괴역학적인 측면에서 이에 대한 정확한 원인 규명과 면밀한 파손방지 대책을 세우기 위하여 많은 연구가 수행되고 있다. 이르기까지 재료들의 기계적, 물리적인 특성들은, 하중, 환경, 온도 등과 같은, 재료들이 사용되는 여러가지 조건들에 적합하게 대응되도록 결정되어야 한다. 예를들면 탄화텅스텐(WC)계의 초경합금은 이들이 갖는 내충격성, 내마모성, 내식성, 고항질력등의 특성때문에 여러가지 공구용 재료로 많이 사용되고 있다(1-3). 그런데 일반적으로 공구용으로 쓰이는 재료들은 동적 하중을 받는 환경에서 사용되는 경우가 많으므로 동적 하중에 대한 기초적인 파괴특성이 규명되어야 한다. 본 논문에서는 탄화 텅스텐으로 만든 충격시험편이 동적 하중을 받으면서 균열이 진파하는 양상을 실험적인 방법과 수치해석적인 방법을 사용하여 균열의 진파속도와 동적 응력확대계수와의 관계를 규명하려는 연구를 수행하였다. 또한 INSAMCR (INha Stress Analysis of Moving CRack) 프로그램과 계장화 샤피 충격시험(instrumented impact test)을 수행하여 균열선단에서의 동적 응력확대계수를 결정함으로써 탄화 텅스텐재료의 동적 하중에 대한 파괴특성을 규명하였다.

2. 이론

본 연구에서는 동적 균열의 진파 및 정지현상을 해석하기 위하여 인하대학교에서 수정·보완하여 개발한 동적 2차원 유한요소해석 프로그램인 INSAMCR을 사용하였다.

이 프로그램의 특성을 간단하게 살펴보면, 요소들은 4절점 Isoparametric 으로 이루어져 있으며 가상일의 원리를 이용하였고 동적 응력확대계수의 계산을 위해 J적분을 사용한다. INSAMCR의 기본 방정식의 기호표시를 Bathe와 Wilson의 기호표시에 준하여 사용하였다(4).INSAMCR에서의 파괴모델링은 균열선단에서의 증분치 증가에 대한 시뮬레이션과 균열선단에서의 응력확대계수의 계산 등 두가지 중요한 요소로 구성된다.

(1)균열선단에서의 증분치 증가

INSAMCR에서 균열의 진파는 대칭축인 r 축 주위에서 발생한다고 가정하므로 균열선단 주위의 절점은 z 방향의 범위가 0인 굴림 경계조건으로 구속하며, 균열선단이 차례로 각 절점에 도달할때 경계조건은 자유단으로 바뀐다. 한 시간 구간에 균열선단이 일반적으로 한 절점에서 다음 절점으로 진행하지 않기 때문에 모델링을 할 때에는 절점사이의 균열선단 조건의 시뮬레이션을 고려할 필요가 있다.

(2) 균열선단에서의 응력확대계수 계산

균열선단에서의 응력확대계수는 실험 단성 파괴역학개념을 도입한 J 적분으로부터 얻어질 수 있다. INSAMCR에 사용된 식 중에서, J 적분은 반시계방향 경로 Γ 를 따른 순수 경로적분으로써 다음과 같이 정의된다.

$$J = \int_{\Gamma} [(W_e + W_k) dz - (\vec{T} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x})] \cdot d\Gamma \quad (1)$$

여기서,

$$W_e = \frac{1}{2} (\sigma_{rr} \epsilon_{rr} + \sigma_{zz} \epsilon_{zz} + \tau_{rz} \gamma_{rz})$$

= 2차원 탄성변형에너지밀도

$$W_k = \frac{1}{2} \rho (\dot{u}^2 + \dot{w}^2) = \text{운동에너지밀도}$$

$$\vec{T} = [\sigma_{rr} \sigma_{zz} \tau_{rz}] = \text{Traction 벡터}$$

$$\vec{u} = [u \ w] = \text{변위벡터이다.}$$

J는 에너지해방률 G와 같고 응력확대계수 K는 다음과 같은 식에서 계산된다.

* 평면응력인 경우

$$K = [EG]^{1/2} \quad (2)$$

* 평면변형인 경우

$$K = [\frac{EG}{(1-\nu^2)}]^{1/2} \quad (3)$$

3. 실험 방법

3-1 시편의 형상 및 요소분할

본 연구에서는 Fig. 1a과 같은 형상을 가진 시편을 가지고 충격시험을 하였으며 ①부분에는 집중하중(P=9.8N)을 가하여서 정적인 하중에 대한 변위를 우선 구하였다. Crack의 진전은 X방향으로 증기하도록 하였고, 시편의 폭에 대한 균열의 비(a/W)는 0.2가 되도록 하였다. 본 해석에서는 대칭임을 고려하여 Fig. 1b에 보인 것과 같이 우측 1/2만을 잘라서 생각하였으며, 경계조건으로는 X축은 Y방향의 변위만을 일부 구속하고 X방향으로는 자유롭게 하였으며, Y축은 X방향의 변위만을 일부 구속하고 Y방향으로는 자유롭게 움직일 수 있게 하였다. 균열의 진전은 X축상에서의 구속점만을 하나씩 풀어 주었고, 균열의 길이는 2mm, 시편의 폭은 10mm, 시편의 길이는 55mm, 시편의 두께는 10mm로 하였다. 요소분할은 균열선단 부근의 요소의 크기를 작게 하였으며, 해석에 사용된 모델의 요소 분할수와 절점들 그리고 실험에 사

용된 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다.

3-2 해석과정

3-2-1 INSAMCR의 검증

(1) 검증방법

INSAMCR 프로그램을 사용하여 동적 균열진파해석을 검증하기 위해 미국 Maryland 대학에서 실행하였던 Homalite-100 MCT(Modified Compact Tension)시편을 사용하여 비교하였다. 검증에 사용된 모델의 요소수, 물성치들을 Table 1에 나타내었으며, 이때 입력값으로 들어가는 균열 전파속도와 응력확대계수와와의 관계는 실험으로 구한 V-K 선도로 부터 8점씩 임의로 선택하여 입력하였다.

(2) 검증결과

동일조건하에서의 Homalite-100재료로 만든 MCT시편의 동적 균열 진파해석을 본 연구의 INSAMCR프로그램으로 해석한 내용과 미국 Maryland 대학에서 해석한 내용을 비교하여 Fig. 2에 나타내었으며, 이 선도에서 균열 전파시간에 따른 각 에너지들의 경향이 잘 일치함을 알 수 있다.

3-2-2 동적 응력확대계수의 간편결정

K_I 를 측정하기위해서 잘 사용되는 3점 굽힘 시험편에 대해서는 간편하게 동적 응력확대계수를 구하기 위한 식이 유도되어 있다^[5-6].

$$K_I(t) = K_I \frac{\omega_1}{F(t)} \int_0^t F(\tau) \sin \omega_1(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

ω_1 은 시편의 기본고유진동수이며, K_I 은 핸드북^[7]에 의해서 다음식에서 결정할 수 있다.

$$K_I = \frac{3SF(t)}{2BW^2} \sqrt{\pi a} \psi$$

여기서,

$$\psi = 1.09 - 1.735 \left(\frac{a}{W} \right) + 8.20 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 14.18 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 14.57 \left(\frac{a}{W} \right)^4$$

W = 시편의 폭
B = 시편의 두께
a = 균열길이

위와 같은 식을 사용하여 Application Mode에서 사용될 입력 데이터를 구하였다(Fig. 9).

3-2-3 실험과정

본 연구에서는 공구용 초강합금인 탄화텅스텐(WC-6%Co)의 재료를 사용하였으며, 실험 및 해석과정의 순서는 Fig. 3과 같다. 우선 개장화 살피충격시험기의 텅(tup, impact striker)에 full bridge 회로를 구성하였다. 용량이 300J인 개장화된 Charpy 충격시험기로 시편에 충격하중을 가하면, 텅에서 나온 하중신호 (volt)를 실제하중 (kN)으로 환산하여 시편과 텅이 접촉하는 순간하중으로부터 최고하중까지 빠르게 변화하는 하중을 Oscilloscope에서 기록하여 (Fig. 4), K_{M} 와 속도를 추정하여 Program의 입력자료로 사용한다. 또한 출력된 데이터중 시간에 대한 균열의 진진 데이터를 이용하여 그래프를 작성한후 실제 균열의 진진 양상에 대한 경우와 비교하여서 실제의 실험 양상과 일치하지 않으면 가정된 K_{M} 와 속도를 다시 입력하여 앞의 해석과정을 프로그램의 시간에 대한 균열의 진진양상이 실제와 일치할 때까지 반복하여 수행하였다. 또한 위의 Application Mode에서 구해진 시간에 대한 균열의 진진 길이 데이터들을 입력 데이터로 사용하는 Generation Mode도 실행하였으며, 이로써 구해진 재료의 동적 응력확대계수를 Application Mode에서 구했던 재료의 동적 응력확대계수의 값들과 비교하여 값들이 일치함을 확인하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1 Application Mode의 결과

Fig. 5에서 보는 바와 같이 초기에는 동적 응력확대계수의 값이 일정하며 약 $47\mu\text{sec}$ 이후에는 균열이 전파하는 동안 동적 응력확대계수는 점점 증가하기 시작하여 균열이 진진하기 시작한 후 약 $63\mu\text{sec}$ 에서 최대치를 갖는것을 알 수 있다. Fig. 6에서는 균열이 진진하는 시간에 대한 균열의 전파속도를 나타내었으며 처음에는 균열의 전파속도를 영으로 계속 유지하다가 균열이 전파하기 시작한 후 약 $16\mu\text{sec}$ 동안 거의 일정한 속도를 유지하는 경향을 나타내며 균열의 전파속도가 약 500m/sec 에서 속도가 일정하게 전파하는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서는 시간에 대한 균열의 진진경향 즉, 균열의 진진속도음을 알 수 있는데 Fig. 6과 같이 이 그림에서도 거의 일정한 속도로 균열이 진진함을 알 수 있다. Fig. 8에서는 재료에 가해지는 Load History 에 따라 총 에너지가 변화함을 확인하였으며, 균열이 진진하는 약 $47\mu\text{sec}$ 부터 총 에너지가 작아지면서 균열이 성장을 마친 약 $63\mu\text{sec}$ 부터는 총 에너지가 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. Fig. 9는 동적 응력확대계수와 균열의 전파속도와의 관계를 나타낸 그림으로서 입력한 속도-응력확대계수(V-K) 데이터와 프로

그램을 실행하여 출력된 V-K data와의 관계를 나타낸 그림이다. 입력한 데이터와 출력된 데이터가 잘 일치하고 있으며 이 그림을 통해서 약 $15 < K_{M} < 25 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이며, 속도와 응력확대계수는 전형적인 Γ 곡선 관계를 나타냄을 알 수 있다.

4-2 Generation Mode에 의한 검증결과

Application Mode에서 최종적으로 구해진 시간과 그 시간에 대한 균열의 진진길이, 그리고 Load History를 입력 데이터로 사용하는 Generation Mode를 실행하여서 결과적으로 계산되어진 시간, 균열의 진진길이, 균열의 진진 속도, 동적 응력확대계수, 에너지들의 데이터를 Spread Sheet Package를 사용하여 경향을 살펴보고 AutoCAD Package를 사용하여 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 이 그림들에서 볼 수 있는 바와 같이 Application Mode와 Generation Mode의 결과가 아주 잘 일치함을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 취성재료인 공구용 초강합금인 탄화텅스텐(WC-6%Co)의 균열의 전파속도와 동적 응력확대계수와의 관계에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

균열의 전파속도가 거의 일정한 탄화 텅스텐(WC-6%Co)재료의 경우 균열 전파속도와 동적 응력확대계수와의 관계는 전형적인 Γ 형을 나타냄을 확인하였다.

탄화텅스텐(WC-6%Co)재료의 동적 응력확대계수의 범위는 약 $15 < K_{M} < 25 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 임을 밝혔다.

가정된 균열의 진진속도와 동적 응력확대계수 그리고 Load History를 입력데이터로 사용하는 Application Mode와, 시간과 그에 대한 균열의 진진길이 그리고 Load History를 입력 데이터로 사용하는 Generation Mode의 결과가 잘 일치함을 밝힘으로써, 실험의 종류 또는 조건에 따라 입력 데이터가 변경될 경우에 융통성있게 Mode를 선택할 수 있음을 밝혔다.

후 기

본 연구는 92년도 과학재단 특정 기초연구과제 지원에 의해서 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- (1) H. J. Scussel, G.T.E. Valenite, "Friction and Wear of Cemented Carbide, Materials for Friction & Wear Application", pp.795-800
- (2) D. Mari, U. Marti and P. C. Silva, 1992, "A new photolithographic technique to detect the local deformation of materials: application to WC-Co composite", Materials Science and Engineering, A158, pp.203-206
- (3) Hidekazu Dot, Yoshio Fujiwara, and Yuzo Oosawa, "Mechanical Behavior of WC-Co Composite Alloys", pp.207-219
- (4) Bathe, K. J. and Wilson, E. L., "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, (1976)
- (5) Kishimoto, K., 외 2명, 1980, "Engineering Fracture Mechanics", pp.501
- (6) 黒田, 외 3명, 昭59, "日本機械學會論文集", 50-453, A, 988
- (7) Tada, H., Paris, P. and Irwin, G., 1973, "The Stress Analysis of Cracks Handbook, 2. 17, Del Research Corporation

Table 1 Division Numbers and Material Properties used for Execution of the INSAMCR Program

		WC-6%Co	Homalite-100
DIVISION NUMBERS	ELEMENTS	150	598
	NODES	176	658
PROPERTIES	ELASTIC MODULUS	524 GPa	3.59 GPa
	POISSON RATIO	0.22	0.35
	DENSITY	14950 N/m ³	26.48 N/m ³

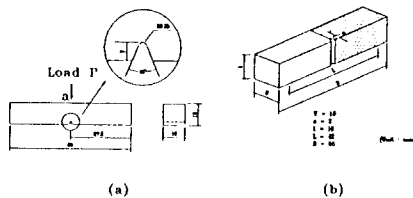
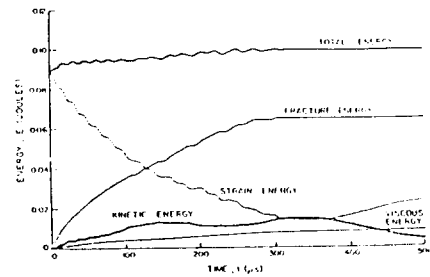
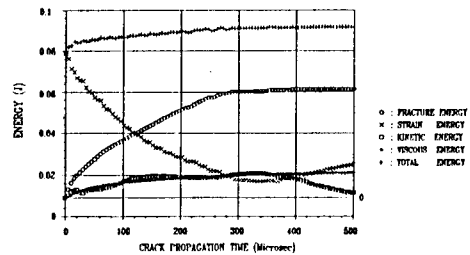


Fig. 1 Specimen Configuration



(a) ORNL Result



(b) INSAMCR Result

Fig. 2 Calculated Strain, Fracture, Kinetic, Viscous and Total Energies as a Function of Time

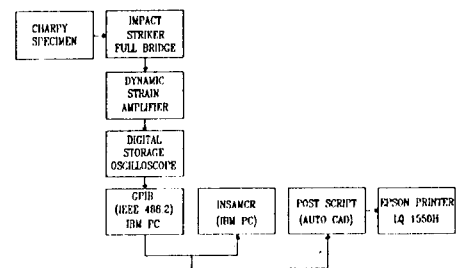


Fig. 3 Flow Chart of the Test and Analysis Process

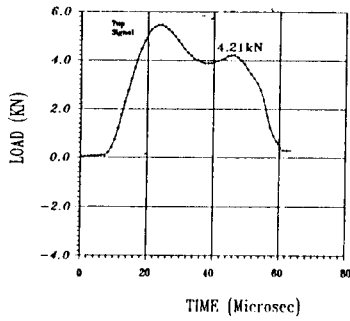


Fig. 4 Load History from of Impact Tup

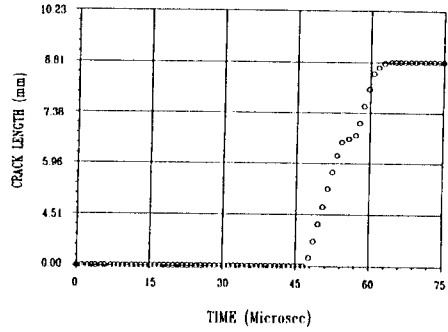


Fig. 7 Relationship between Crack Length and Time in Application Mode

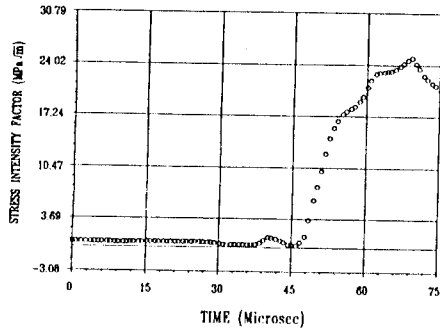


Fig. 5 Relationship between Dynamic Stress Intensity Factor and Time in Application Mode

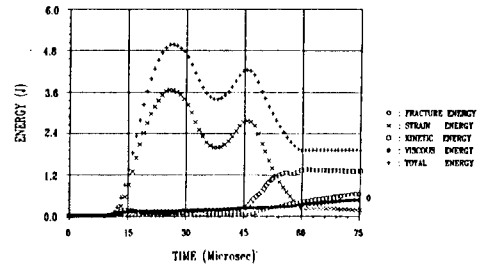


Fig. 8 Predicted Energy as a Function of Crack Propagation Time in Application Mode

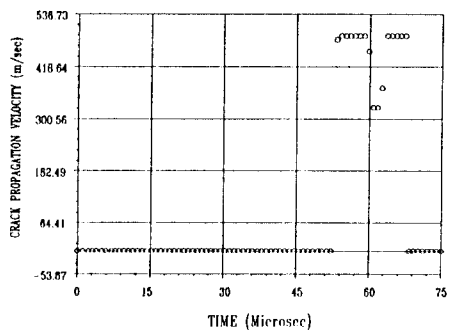


Fig. 6 Relationship between Velocity and Time in Application Mode

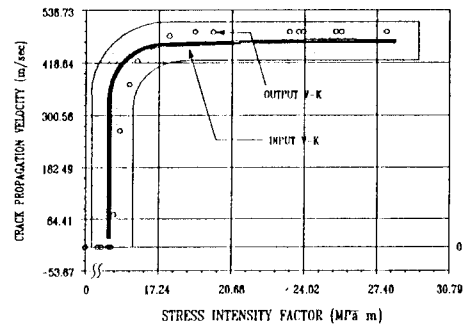


Fig. 9 V-K data to Execute the Program in Application Mode and Output V-K
(V : Crack Propagation Velocity
K : Dynamic Stress Intensity Factor)

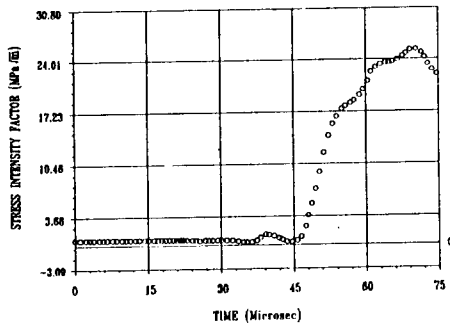


Fig. 10 Relationship between Dynamic Stress Intensity Factor and Time in Generation Mode

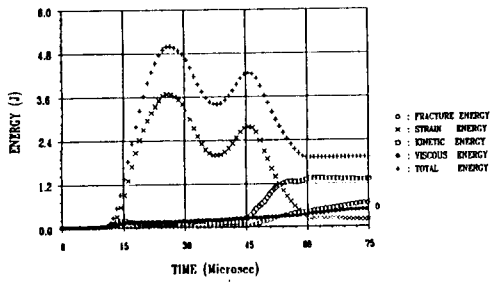


Fig. 11 Predicted Energy as a Function of Crack Propagation Time in Generation Mode