

유한요소법에 의한 금속재료의 탄소성파괴인성 예측

선동주 · 박명균 · 박세만 · 최영택

명지대학교 기계공학과
(1997년 10월 6일 접수, 1997년 11월 25일 채택)

Prediction of Elastic-Plastic Fracture Toughness for Metallic Material using Finite Element Method

Dong-Ju Sun, Myung-kyun Park, Sae-Man Bahk and Young-Taek Choi

Dept. of Mechanical Engineering, Myong-ji Univ.
(Received 6 October 1997; accepted 25 November 1997)

요 약

금속재료의 탄소성파괴인성치 측정을 위해서 ASTM E399 시험법에 따라 단순 인장 시험편을 사용하여 유한요소해석을 하였으며 여기에서 얻어진 하중-균열개구변위 곡선을 이용하여 균열개시점을 찾고 이 점에서의 파괴인성치 J_{IC} 를 구하였다. 탄소성 파괴인성치 J 값은 J 적분법 및 M. K. Tseng 등에 의해서 제안된 계산식을 이용하여 구하였다. 해석된 값의 검증을 위해서 고강도 저합금강인 AISI 4130 재료를 이용한 기존 실험값과 비교하였으며 그 결과는 잘 일치함을 알 수 있다.

Abstract - In order to predict the elastic-plastic fracture toughness for metallic materials, Finite Element Method(FEM) was used for analysis of compact tension specimen. ASTM E399 test procedure was adopted for simulation of FEM. The Load-Crack Mouth Opening Displacement curve obtained from this analysis was used to detect the crack initiation point and determine the elastic-plastic fracture toughness J_{IC} . In order to prove the results, they were compared with the results from previous experiments and they agree with experimental results.

Key Words : Fracture Toughness, Compact Tension Specimen, Crack Mouth Opening Displacement, Crack Initiation Point

1. 서 론

핵공학 기술의 발전에 따라 원자로 및 발전소의 건설이 증가하고 있으며 이에 따른 핵시스템의 안전성 및 신뢰성은 더욱더 절실히 요구되고 있다. 핵시스템의 파괴는 방사능 유출

등의 크나큰 재앙을 일으키는 원인이 되기 때문에 무엇보다도 그 안전성은 중요시된다. 핵압력용기의 작업 조건을 고려해 볼 때, 용기의 파괴는 연성이나 광범위한 소성변형으로 인한 파괴가 주된 요인이 된다. 균열이 개시된 후 불안정 성장이 발생하기 전까지 균열은 서서히

성장하게 된다. 선형탄성파괴역학의 관점에서는 이러한 문제를 해결할 수 없기 때문에 그 필요성에 의해서 탄소성파괴역학이 발전하게 되었다. 이와 같은 탄소성파괴역학 기술은 균열과 같은 결함을 가지고 있는 성분의 구조적 안전성 평가에 중점을 두고 발전되었다. 이에 따라 시험편 형상에 따른 파괴인성치 측정방법이 ASTM에 잘 제시되어 있으며 많은 실험들이 이루어지고 있다. 그러나 실험조건 및 실험절차가 까다롭고 시간 및 비용이 많이 드는 관계로 실험이 제대로 이루어지고 있지 못한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 금속재료의 크랙길이에 따른 파괴인성치를 측정하여 그 영향을 알아보고 기존의 실험 결과[1]와 비교해 봄으로써 실제로 실험을 하지 않고도 재료의 파괴인성치를 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 유한요소법에 의한 J 값의 측정은 J. R. Rice[2]에 의해서 제안된 J 적분법과 M. K. Tseng등[3]에 의해서 제안된 식을 이용하여 구하였다.

2. 균열 개시점의 결정

균열개시점은 유한요소해석 결과에 의한 하중-균열개구변위 곡선을 이용하여 결정하였으며 다음의 두 가지 방법을 이용하였다.

첫 번째 방법은 균열개시는 하중-균열개구변위 곡선상의 초기 탄성기울기가 5% offset된 위치에서 발생한다고 가정하고 그 때의 균열개시 하중을 찾는 방법이다. 이러한 가정은 취성 파괴 조건하에서의 평면 변형률 파괴인성치인 K_{Ic} 시험에 대한 ASTM E399-83[4]에 제시한 방법과 일치하는 것이다. 이 5% 이동된 점에서의 비가역적 일량은 시험편의 균열을 개시시키기 에 충분한 것으로 소개[5]되고 있다. Fig.1은 ASTM의 과정을 나타낸 것이며 Fig.2는 유한요소법에 의한 균열개시 기준을 하중-균열개구변위 곡선 상에 나타낸 것이다.

두 번째 방법은 하중-균열개구변위 곡선상의 각점에서의 컴플라이언스를 구하고 Fig.2의 first knee point에서 균열이 개시되는 것으로 가정하고 그때의 균열개시 하중을 찾는 방법이다.

3. J_{Ic} 의 계산

3.1. J 적분법

Rice에 의해서 제안된 경로에 관계없는 적분량 J는 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

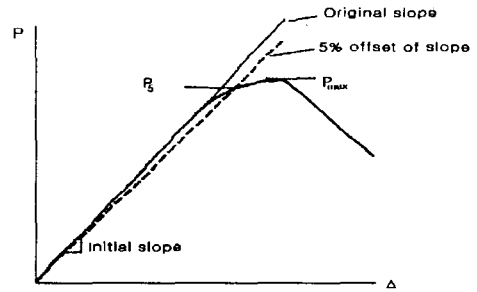


Fig.1 Procedure of ASTM E399

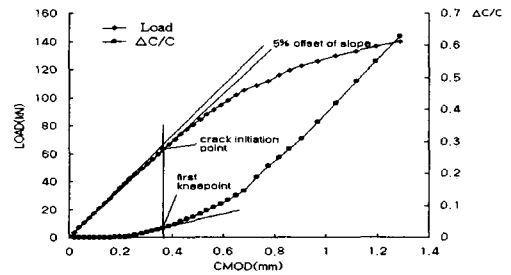


Fig.2 Curve of Load-CMOD and $(\Delta C/C)$ -CMOD

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (1)$$

여기서, Γ 는 균열선단 주위의 임의의 적분경로, W 는 변형률 에너지 밀도, u_i 는 변위벡터, n_i 는 적분경로 Γ 에 대한 수직벡터이다. Fig.3은 균열선단 주위의 적분경로를 나타낸 것이다. t_i 는 traction 벡터이다.

탄소성해석에 있어서 변형률 에너지 밀도 W 는 탄성부분과 소성 부분으로 구분할 수 있으며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W = W^e + W^p \quad (2)$$

여기서,

$$W^e = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon^e_{ij} \quad (3)$$

$$W^p = \int_0^{\epsilon^p_i} \sigma_i d\epsilon^p_i \quad (4)$$

식(2)에서 첨자 e와 p는 각각 탄성성분과 소성성분을 나타내며 ϵ^p_i 는 equivalent plastic strain, σ_i 는 equivalent stress 이다.

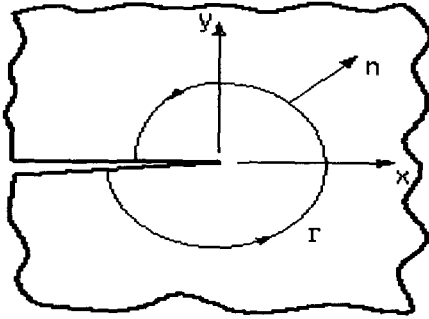


Fig.3 Arbitrary contour, Γ around the crack tip

**3.2. J적분과 컴플라이언스 변화를 $\Delta C/C$ 와
의 관계식**

본래의 균열면상에서 균열이 진전될 때 J 적분은 다음과 같이 표현[6]된다.

$$J = \int_0^p \left(\frac{\partial \Delta}{\partial A} \right)_p dp \quad (5)$$

여기서 Δ 는 하중선 변위, A는 균열 면적, p는 하중이다. 균열이 진전될 때 컴플라이언스는 변화하며 균열길이가 a에서 a + Δa 로 진전된다고 가정하면, 변위 Δ [7]는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta = pC(a + \Delta a) \approx p[C(a) + C'(a) \Delta a] \quad (6)$$

여기서, C(a)는 균열길이 a에 대한 시편의 컴플라이언스, C'(a)는 컴플라이언스의 미분량이다.

식(6)은 균열진전량의 길이가 초기 균열길이에 비해서 상당히 작다고 가정한다. 또한 단순인장 시편(H/W=0.6)의 무차원 컴플라이언스[8]는 다음과 같다.

$$BEC = 11.56(1-a/W)^{-2} - 9.03 \quad (7)$$

여기서, B는 시편의 두께, E는 탄성계수, W는 시편의 폭이다. 균열진전량 Δa 와 컴플라이언스의 변화율 $\Delta C/C$ 와의 관계[9]는 다음과 같다.

$$\Delta a = \frac{W-a}{2} \frac{\Delta C}{C} \quad (8)$$

식(5)-(8)로부터 J는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = \frac{P^2 (23.12 + 34.68 \frac{\Delta C}{C})}{2EB^2W(1-\frac{a}{W})^3} \quad (9)$$

식(9)에서 균열 개시점에서의 하중 P와 $\Delta C/C$ 를 알면 그때의 J_{IC} 를 구할 수 있다.

4. 유한요소 모델링

유한요소해석을 위한 시험편 형상은 Fig.4와 같은 ASTM E399법에 의한 단순 인장 시험편으로 선택하였으며 유한요소 모델링은 상하 대칭이므로 Fig.5와 같이 시편의 절반 부분만을 모델링하였다.

해석에 사용된 요소는 Fig.6과 같은 2차원 6절점 요소로 균열선단 근처는 미세한 메시가 나누어지도록 하였으며 요소수 240개, 절점수

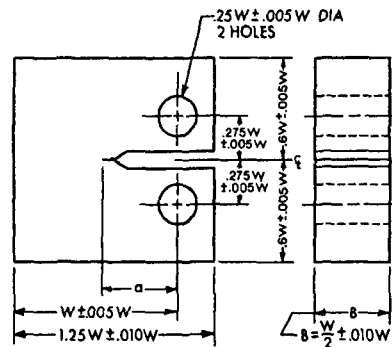


Fig.4 Configuration of compact tension specimen

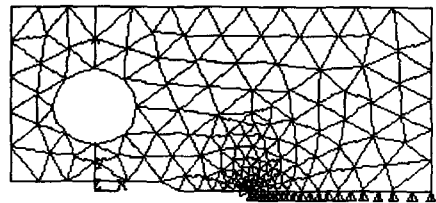


Fig.5 Finite element mesh of compact tension specimen

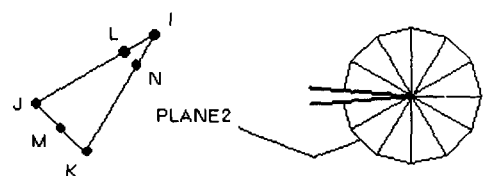


Fig.6 Crack tip element

534개로 하였다. 구속 조건은 상하 대칭이므로 균열을 제외한 부분을 y방향에 대해서 구속하였으며 균열선단절점 한점에 대해서만 x, y방향에 대하여 모두 구속하였다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 Table 1 에 나타내었다. 또한 탄소성해석을 하기 위해 Fig.7과 같은 AISI 4130 재료의 응력-변형률 선도를 이용하여[2] 해석상의 입력데이터로 사용하였으며 재료의 거동이 multi-linear isotropic hardening 조건이 되도록 하였다.

시험편의 형상은 시험편의 두께 B=0.5W(일정)이고 a/W=0.460, 0.530, 0.560, 0.630, 0.710으로 해석하였으며 이때의 W=50.8mm(2인치)로 하였다.

하중은 시편이 소성변형을 할 수 있도록 항복응력 이상이 되는 하중을 가해주기위해 균열의 비에 따라 각각의 경우의 임계하중을 구하여 적용시켰다. 임계하중을 구하기 위해서 균열이 있는 단순 인장 시험편의 임계하중 계산식(10)을 이용[10]하였다.

Table 1 Mechanical Properties of AISI 4130 Material

Elastic modulus	209.426 GPa
Yield Strength	1176 MPa
Tensile Strength	1266 MPa
Elongation	7.86%
Poisson's ratio	0.33

$$\begin{aligned}
 P_L &= 1.455 \eta B b \sigma_Y && (\text{평면변형률}) \\
 P_L &= 1.072 \eta B b \sigma_Y && (\text{평면응력}) \\
 \eta &= \sqrt{\left(\frac{2a}{b}\right)^2 + \frac{4a}{b} + 2} - \left(\frac{2a}{b} + 1\right)
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서, a는 균열길이, b는 시편의 넓이에서 균열을 제외한 길이, σ_Y 는 flow stress로 항복응력과 인장응력의 평균값이다. 본 해석에서는 평면응력 조건식을 이용하여 하중을 계산하였다. 식(10)을 이용해서 구한 각각의 a/W에 따른 임계하중을 Fig.8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 a/W가 0.46~0.71로 커질수록 즉, 균열길이가 커질수록 임계하중은 낮아짐을 알 수 있다.

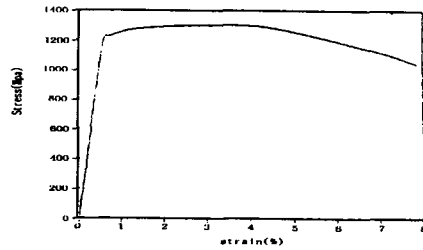


Fig.7 Typical stress-strain curve of tensile specimens

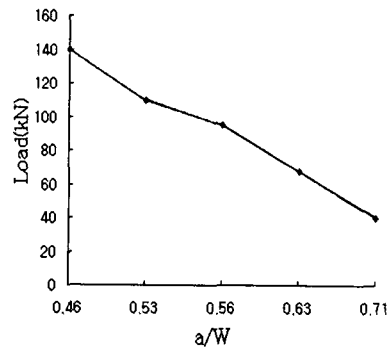


Fig.8 Load vs. crack ratio, a/W

5. 결과 및 검토

5.1. 균열 개시점의 결정

균열 개시점은 유한요소해석에 의해서 구해진 하중-균열개구변위 곡선 상에서 5% offset 방법 및 컴플라이언스 변화율 방법에 의해서 결정하였으며 각각의 a/W에 따른 임계하중까지의 Load-CMOD 및 $\Delta C/C$ -CMOD 선도를 Fig. 9~Fig.13에 나타내었다.

5% offset 방법에 의해서 구해진 균열 개시점에서의 값을 실험 값과 비교해보면 상대적으로 크게 나타났으나 약 3%정도 offset 시켰을 경우에 있어서 실험값과 상당히 일치하는 값을 얻을 수 있었다. 따라서 본 해석에서는 3% offset된 지점에서의 값을 취하였다. 한편 컴플라이언스 변화율 방법으로 균열개시점을 찾을 경우 Fig.9~Fig.13에서 보는 바와 같이 정확한 first knee point를 찾는 데 어려움이 있으며 약간은 모호한 면도 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 재료의 특성, 즉 취성재료인지 연성재료인지에 따라 달라질 수 있으며 해석하고자 하는 재료에 적합한 방법을 찾아서 적용시킨다면

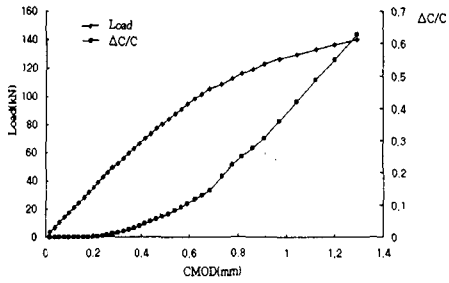


Fig.9 Curve of Load-CMOD and (ΔC/C)
-CMOD a/W=0.46

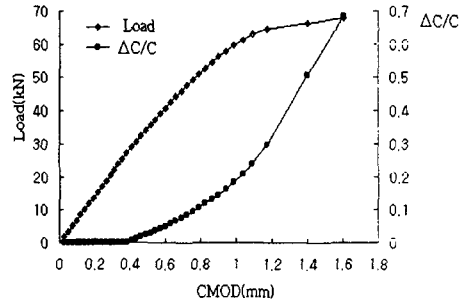


Fig.12 Curve of Load-CMOD and (ΔC/C)
-CMOD a/W=0.63

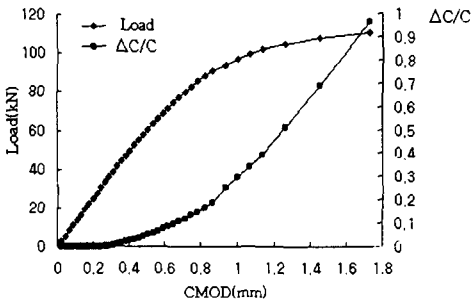


Fig.10 Curve of Load-CMOD and (ΔC/C)
-CMOD a/W=0.53

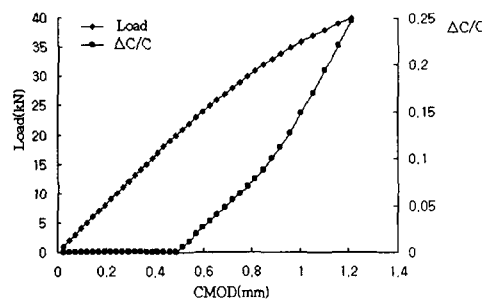


Fig.13 Curve of Load-CMOD and (ΔC/C)
-CMOD a/W=0.71

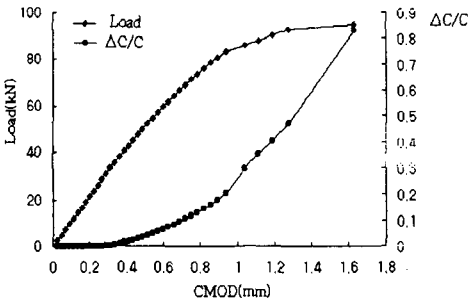


Fig.11 Curve of Load-CMOD and (ΔC/C)
-CMOD a/W=0.56

여러 금속재료의 균열개시점을 실험을 통하지 않고도 예측할 수 있다.

5.2. J_{IC} 의 예측

J_{IC} 값을 예측하기 위해서는 균열 개시점 및 균열개시 하중을 알아야 한다. 균열개시점 및 그때의 하중은 위의 방법중 실험값과 잘 일치하는 3% offset 시킨 점에서 구해진 값을 이용하여 균열개시 하중을 찾고 그때의 J_{IC} 값을 구하였다. 유한요소해석을 통해서 계산된 즉 J 적

분법에 의해서 구한 J 값은 균열선단 주위의 5 개의 경로에서 구한 값을 평균하여 택하였다. 식(9)를 이용하여 J_{IC} 값을 구하기 위해서 균열 개시 하중 P 와 킥플라이언스 변화율 ΔC/C 값을 대입하여 계산하였다. Fig.14는 J 적분값 및 식(9)에 의한 값을 기존 실험값과 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 a/W 가 변화함에 따라 다소 차이는 있으나 3가지 방법 모두에서 J_{IC} 값이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 시편의 넓이에 대한 균열의 비 a/W가 다양하고 기존 실험 값과 두께나 형상을 다르게 해석하였음에도 불구하고 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해서 J_{IC} 값은 시편의 크기나 형상에 무관한 값임을 확인 할 수 있다. Fig.15는 유한요소 해석에서 구한 CMOD값과 기존 실험 값의 비교한 것이다. 균열의 비가 가장 큰 a/W=0.71인 경우를 제외하고는 CMOD값 역시 실험 값과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험결과의 Case1과 Case2는 각각 음향방출법에 의해서 검출된 균열개시 하중점에서의 실험값과 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다.

Table 2에 각각의 경우에 대한 유한요소해석 결과 및 기존 실험값과의 비교를 나타내었다.

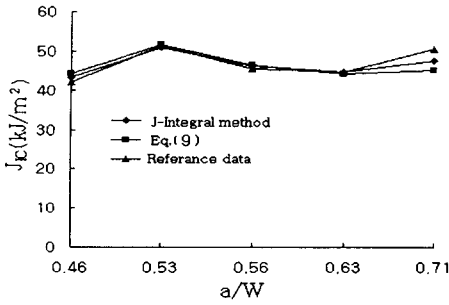


Fig.14 Results of J_{IC} for compact tension specimen

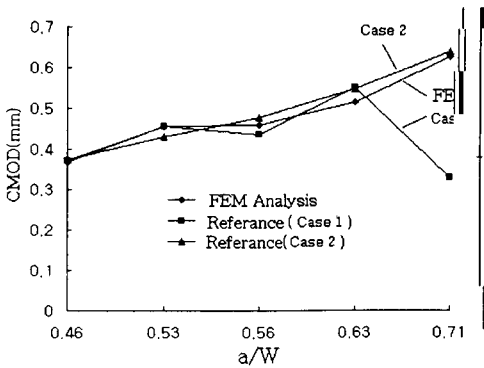


Fig.15 Results of CMOD for compact tension specimen

6. 결 론

유한요소 해석을 통해서 구한 Load-CMOD 및 $\Delta C/C$ -CMOD 선도를 이용하여 균열개시점 및 균열개시 하중을 찾고 J_{IC} 값을 예측하는 방법에 관한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 균열개시점은 하중-균열개구변위 곡선상에서 5% offset 방법 및 컴플라이언스 변화율 방법을 이용하여 구할 수 있으며 3% offset 시켰을 경우에 기존 실험 값과 거의 일치하는 값을 얻을 수 있었다.
- (2) 수치해석에 의한 값과 실험 값의 비교를 통해서 재료의 특성에 따라 적절한 균열개시점을 찾는 방법을 적용해서 보다 정확한 값을 얻을 수 있다.
- (3) 유한요소해석 결과에 의한 J 적분 값과 식 (9)에서 구한 값은 잘 일치하였으며 기존 실험 값과도 거의 일치하였다.
- (4) 유한요소법에 의해서 균열개시점 및 균열개시 하중을 찾아 J_{IC} 값 과 CMOD 값을 구하였으며 실험 값과도 잘 일치하였다.

Table 2 Comparison of experimental and analysis results

Specimen No.	Crack ratio (a/W)	Experimental results[1]		J_{IC} (kJ/m ²)	Analysis results			
		Case 1	Case 2		Crack Initiation		FEM	Eq.(9)
		CMOD (mm)	CMOD (mm)		CMOD (mm)	LOAD (kN)	J_{IC} (kJ/m ²)	J_{IC} (kJ/m ²)
1	0.46	0.370	0.374	42.14	0.367	63	43.42	44.23
2	0.53	0.456	0.429	51.55	0.456	55	51.01	51.69
3	0.56	0.434	0.477	45.57	0.459	47.5	46.29	46.61
4	0.63	0.551	0.549	44.79	0.515	35.7	44.80	44.34
5	0.71	0.33	0.641	50.76	0.628	25	47.82	45.32

참고문헌

1. 용장우, 문순일, 설창원, 이기범, "AISI 4130 균열 판재시편의 파괴인성 평가", 대한기계학회 논문집, 제19권, 제10호, pp.2431 ~ 2439(1995).
2. Rice, J. R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches And Cracks," Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379 ~ 386(1968).
3. Tseng, M. K., Marcus, H. L., "A single specimen determination of J_{IC} for aluminum alloys", Vol.16, No.6, pp.895 ~ 903(1981).
4. Standard method of test for plane-strain fracture toughness of metallic materials. ASTM E399-83, Vol. 03. 01, ASTM Annual Standard (1985).
5. Cordes, J., Chang, A., Nelson, N. and Kim, Y., "A computational method to predict elastic-plastic fracture", Engineering Fracture Mechanics, Vol.51, No.1, pp.151 ~ 159(1995).
6. Chen, C. et al., Engineering Fracture Mechanics, Vol.1, pp.73(1977).
7. Chen, C. et al., Engineering Fracture Mechanics, Vol.1, pp.86(1977).
8. Chen, C. et al., Engineering Fracture Mechanics, Vol.1, pp.125(1977).
9. Clarke, G. A. et al., ASTM STP 590, pp.27 ~ 42(1976).
10. Anderson, T. L., "Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications", 2nd ed., CRC Press, Inc., Florida(1995).