Bull. Korean Fish. Tech. Soc. 22(2), 1986 漁業技術 22(2), 1986

CCT 시험편을 이용한 저탄소강의 J 저항곡선에 관한 연구

고 성 위
부 산 수 산 대 학
(1986년 5월 12일 수리)

A Study on J-Resistance Curve of Low-carbon Steel Using Center Cracked Tension Specimen

Sung-Wi Koh
National Fisheries University of Pusan
(Received May 12, 1986)

In this paper, the J-resistance curve of low-carbon steel with 3 mm thickness was investigated for various crack ratios. The experiments were carried out for the center cracked tension (CCT) specimen with about 50 mm width on an instron machine.

The plane stress fracture toughness obtained by the Simpson's formula was $J_{in}=24.96\ kgf/mm$. Simpson's formula which considers crack growth in obtaining J integral showed more conservative J_{in} than Rice's and Sumpter's.

For materials that may be approximated by the Ramberg and Osgood stress strain law, the relevant crack parameters like the J integral, load line displacement are approximately normalized.

Crack driving forces in terms of the J integral are computed for low-carbon steel CCT specimen using the above estimation scheme. Comparison of the prediction with actual experimental measurements by Simpson's formula showed good agreement for several different sized specimen.

서 론

최근 산업의 발달에 따라 많은 구조물에서는 중저인성 박판재료의 사용이 점차 증가하고 있으며, 에너지 감소면에서도 일익을 담당하고 있다. 이러한 박판구조물의 안정성 확보 및 신뢰성 향상을 위하여 사용재료의 고유한 성질인 파괴인성치를 구하는 것은 중요하다.

박판재료의 파괴인성치를 구하려면 선형탄성 파괴역학을 탄소성의 영역까지 확장하여야 하며, 이에 대한 많은 노력이 기울여졌다[1]. 재료의 파괴인성치를 대표하는 여러 매개변수(parameter)가 제안되었으며 이 중 J 적분은 소성변형이론이 적용될 때 크랙선단을 포함하는 HRR (Hutchinson-Rice-Rosengren sftess strain field)응력변형장에서의 크랙선단 응력 및 변형율의 세기를 나타낸다[1,2,3].

우선 J 적분에 대한 실험적 연구를 살펴보면, Begley와 Landes[4]가 크랙성장 시작점에서 J 값을 J_{IC}로 정의하고, J_{IC}의 결정방법을 연구한 이후, 많은 관심의 대상이 되었으며, 이에 대한 실험방법이 ASTM[5]에 표준화 되어 있다.

크랙성장 시작점에서 구한 J_{IC}는 파괴인성치를 대표하고 있지만, 어떤 재료에서는 크랙성장 시작점 이후에도 안정하게 성장하므로, 크랙성장 시작점 이후의 $J-\Delta a$ 곡선을 정확하게 구하는 방법은 현재 연구대상이 되고 있다. 또한, 전술한 연구들은 평면변형률 조건에서의 J 적분이며 평면응력에 관한 연구는 희박하다[6].

J 적분에 대한 수치해석은 Rice[7]가 제안한 J 적분식을 이용하는 연구[8]와 HRR 응력변형율장의 특성을 이용하여 변형경화 재료에 대한 J 적분을 계산하는 연구[9] 등이 있으나 체계적인 연구가 요망되고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여, 평면응력상태의 CCT(center cracked tension) 시험편을 이용하여 J 적분 파괴인성치의 타당성과 저항곡선을 실험적으로 고찰하였으며, 크랙성장을 고려한 J 적분식을 검토하였다. 크랙길이는 하중제거 컴플라이언스법을 사용하였다. 또한, 동일한 조건에 대하여 변형경화재료로 가정하고 HRR 응력변형률장의 특성을 이용하여 컴퓨터 프로그램을 작성하여 J 적분을 구하여 실험치와 상호 비교 검토하였다.

실 험 방 법

본 실험에 사용한 재료는 두께 3 *mm* 인 일반구조용 압연강판을 사용하였으며, 그 기계적 성질을 얻기 위하여 압연방향으로 채취한 후 KS B 0801 5호로 가공하여 시험하였다. 시험재료의 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 1,2와 같다.

Table 1. Chemical composition (%)

C	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
0.13	0.23	0.02	0.01	0.01	0.04	0.04

Table 2. Mechanical properties

Tensile strength	42.1 *kgf/mm²*
Yield strength	28.6 *kgf/mm²*
Elongation	48.5%

시험편은 길이방향을 압연방향으로 하고 크랙진전방향을 압연직각 방향으로 하여 CCT 시험편을 사용하였으며, Fig. 1에 이 시험편의 모양과 치수를 나타내었다. 크랙비 2a/W는 0.45, 0.55, 0.65로 기계가공한 후 표면을 사포와 산화알루미나로 연마하였다.

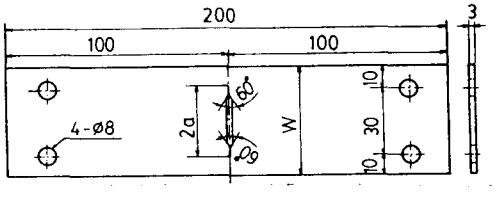

Fig. 1. Geometry and dimensions of CCT specimen.

연마된 시험편은 다음 식(1)과 같은 한계하중의 40% 되는 편진하중을 가하여 예피로크랙을 2.5 *mm* 정도 주어 크랙비가 0.50, 0.60, 0.70이 되도록 한 후 용량 10톤의 인스트론 전기유압식 시험기를 사용하여 파괴시험하였다.

$$P_L=(W-2a)B\sigma_y \tag{1}$$

여기서, W는 시험편 폭, $2a$는 크랙길이, B는 시험편 두께, σ_y는 항복응력이다.

시험은 실온에서 하였으며, 크랙길이는 하중제거 컴플라이언스법을 사용하였으며, 파괴실험이 끝난 후 착색하여 크랙길이를 확인하였다. 하중점변위는 하중과 함께 X-Y기록계에 기록하고, 또 다른 X-Y기록계를 이용하여 증폭시켜 기록하였다. 이 결과를 다음 절에 기술한 식들을 이용하여 J 적분값을 계산하였다.

CCT 시험편에 대한 J 적분 이론

1. 실험계산을 위한 J 적분식

Rice[7]가 2차원 파괴역학에 대한 매개변수로서 정의한 J 적분을 포텐셜에너지(U)에 의하여 표현하면 다음과 같은 관계가 있음이 알려져 있다.

$$J=-\frac{1}{B}\frac{\partial U}{\partial(2a)} \tag{2}$$

또한, Rice 등[10]은 인장하중과 변위와의 관계가 함수관계가 있음을 이용하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$J=G+\frac{2A}{B(W-2a)} \tag{3}$$

여기서 A는 하중변위곡선과 옵셋선(offset line)으로 둘러싸인 면적이고, G는 에너지 해방율(energy release rate)로 $G=K^2/E$의 관계식을 가지며, K는 응력강도계수(stress intensity factor)로서 다음과 같다[11].

$$K=\frac{P}{BW}\sqrt{\pi a}\,f_1\left(\frac{2a}{W}\right) \tag{4}$$

$$f_1\left(\frac{2a}{W}\right)=\left\{1-0.025\left(\frac{2a}{W}\right)^2+0.06\left(\frac{2a}{W}\right)^4\right\}\times\sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{W}\right)} \tag{5}$$

Sumpter 등[12]은 시험편 모양에 무관한 일반적인 J 적분식을 다음과 같이 제안하였다.

$$J=\frac{2\eta_e U_e}{B(W-2a)}+\frac{2\eta_p U_p}{B(W-2a)} \tag{6}$$

여기서, η_e, η_p는 각각 탄성 및 소성계수로서 η_e는 (7)식과 같으며[13], $\eta_p=0.5$이다. U_e와 U_p는 탄성 및 소성 포텐셜에너지이다.

$$\eta_e=\frac{1}{2g}\left\{\left(1-\frac{2a}{W}\right)\left(\frac{\pi a}{W}\right)\right\}f_1^2\left(\frac{2a}{W}\right) \tag{7}$$

$$g=\left\{\frac{\pi a}{W}\csc\left(\frac{\pi a}{W}\right)\right\}^{\frac{1}{2}}\left[\frac{2}{\pi}\cosh^{-1}\left\{\frac{\cosh\left(\frac{\pi y}{W}\right)}{\cos\left(\frac{\pi a}{W}\right)}\right\}\right.$$

$$-\frac{(1+v)}{W}y\left\{1+\left(\frac{\sin\left(\frac{\pi a}{W}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi y}{W}\right)}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}+\frac{v}{W}y\Bigg] \quad (8)$$

여기서, y는 변위측정거리, v는 포아송비이다.

Garwood 등[14]은 크랙이 성장함에 따라 J 적분값이 과대평가 되는 것을 방지하기 위하여 크랙이 성장한 시험편의 하중변위곡선의 면적 대신에 가상 하중변위곡선의 면적을 J 적분식에 사용할 수 있음을 설명하였다. 즉, Fig.2에서 최초 크랙길이 a_0에 대한 하중변위곡선 OSPQ에 의한 면적 A_1 대신에 가상 하중변위곡선인 ORQ에 의한 면적 A_2를 사용하여야 J 적분이 과대평가되는 것을 수정할 수 있다.

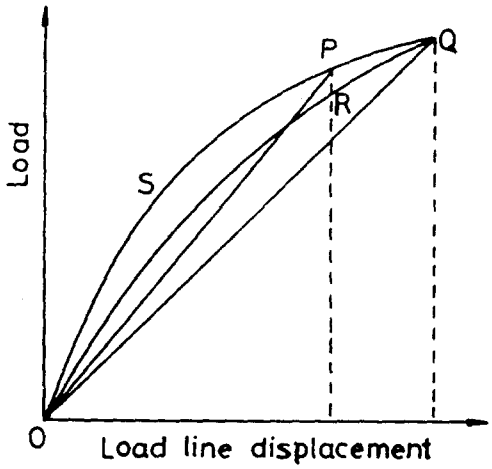

Fig. 2. Load vs. load line displacement diagram.
OSPQ : Actual load-displacement curve
ORQ : Postulated load-displacement curve
OSPQO: Area A_1
ORQO : Area A_2
OPQO : Area A_2-Area A_1

Simpson[15]은 Garwood 등[14]이 제안한 방법과 식(2)를 이용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$J_i=(J_{i-1}-G_i)\frac{W-2a_i}{W-2a_{i-1}}-G_{i-1}+\frac{2(A_i-A_{i-1})}{B(W-2a_{i-1})} \quad (9)$$

여기서 첨자 i는 i번째의 값을 나타내고, 일 예로 J_i는 i번째의 J 적분 값이다.

본 연구에서는 (3),(6)식을 이용하여 J 적분값을 구하고, 동시에 크랙성장을 고려한 (9)식을 사용하여 J 적분값을 구한 후 상호 비교, 검토하였다.

2. 컴퓨터 계산을 위한 J적분식

단순인장의 경우 Ramberg 와 Osgood의 응력 변형률 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}=\frac{\sigma}{\sigma_y}+\alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \quad (10)$$

여기서 ε_y는 $\sigma_y=E\varepsilon_y$에서의 변형률이고 α는 재료상수, n은 변형경화지수이다.

재료는 식(10)을 따른다고 가정하면, J 적분과 변위(Δ)는 다음과 같이 탄성부분과 소성부분으로 나눌 수 있다.

$$J=J(a_e)+J(a,n) \quad (11)$$

$$\Delta=\Delta(a_e)+\Delta(a,n) \quad (12)$$

여기서 a_e는 다음에 정의하는 유효크랙길이이다.

탄성영역에서의 이 값들은 다음과 같다[9].

$$J=\pi a_e P^2 f_1^2(2a_e/W)/EB^2W^2 \quad (13)$$

$$\Delta=2a_e PV_2(2a_e/W)/EB \quad (14)$$

여기서 f_1는 (5)식과 동일하고 V_2는 (15)식과 같다.

$$V_2\left(\frac{2a}{W}\right)=-1.071+0.250\left(\frac{2a}{W}\right)-0.357\left(\frac{2a}{W}\right)^2+0.121\left(\frac{2a}{W}\right)^3-0.047\left(\frac{2a}{W}\right)^4+0.008\left(\frac{2a}{W}\right)^5-1.071\left(\frac{W}{2a}\right)ln\left(1-\frac{2a}{W}\right) \quad (15)$$

소성영역에서의 이 값들은 다음과 같다.

$$J=\alpha\sigma_y\varepsilon_y a(W-2a)h_1(2a/W,n)(P/P_L)^{n+1}/W \quad (16)$$

$$\Delta=\alpha\varepsilon_y ah_2(2a/W,n)(P/P_L)^n \quad (17)$$

여기서 h_1, h_2는 변형경화와 크랙비의 함수로서 Table 3에 나타내었으며, 각 시험편의 경우에 대한 크랙비에서 내삽(interpolation)하여 사용하였다. 또, P_L는

Table 3. h_1, h_2 for plane stress CCT specimen

2a/W \ n		1	2	3	5	7	10	13	16	20
1/4	h_1	2.544	2.972	3.140	3.195	3.106	2.896	2.647	2.467	2.196
	h_2	0.611	1.010	1.352	1.830	2.083	2.191	2.122	2.009	1.792
3/8	h_1	2.344	2.533	2.515	2.346	2.173	1.953	1.766	1.608	1.431
	h_2	0.807	1.195	1.427	1.594	1.570	1.425	1.267	1.133	0.994
1/2	h_1	2.206	2.195	2.057	1.809	1.632	1.433	1.300	1.174	1.000
	h_2	0.927	1.186	1.256	1.178	1.040	0.867	0.758	0.668	0.560
5/8	h_1	2.115	1.912	1.690	1.407	1.221	1.012	0.853	0.712	0.573
	h_2	0.975	1.053	0.970	0.763	0.620	0.478	0.386	0.318	0.273
3/4	h_1	2.073	1.708	1.458	1.209	1.082	0.956	0.745	0.646	0.532
	h_2	0.933	0.802	0.642	0.450	0.361	0.292	0.216	0.183	0.149

(1)식과 동일하다.

(11)식부터 (17)식을 이용하여 탄소성변형을 하는 전범위의 J 적분식과 변위는 다음과 같이 된다.

$$J=\frac{\pi a_e}{EB^2W^2}P^2f_1^2\left(\frac{2a_e}{W}\right)+\alpha\sigma_y\varepsilon_y a \cdot(W-2a)h_1(2a/W,n)(P/P_L)^{n+1}/W \quad (18)$$

$$\Delta=\frac{2a_e}{EB}PV_2\left(\frac{2a_e}{W}\right)+\alpha\varepsilon_y a h_2(2a/W,n)(P/P_L)^n \quad (19)$$

위의 결과는 소성변형 때문에 약간의 오차를 포함하므로 다음과 같이 유효크랙길이를 이용하여 수정하였다.

$$a_e=a+\phi r_y \quad (19)$$

여기서, r_y는 Irwin의 소성역크기의 개념으로 변형경화에 의하여 수정한 것으로 (20)식과 같고, ϕ는 (21)식과 같다[9].

$$r_y=\frac{1}{2\pi}\left(\frac{n-1}{n+1}\right)\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \quad (20)$$

$$\phi=\frac{1}{1+(P/P_L)^2} \quad (21)$$

본 연구에서는 위의 관계식을 이용하여 FORTRAN으로 프로그램을 작성하여 각각의 값들을 계산하였다.

결과 및 고찰

1. 실험에 의한 J저항곡선의 거동

Fig. 3~5는 크랙비 $2a/W$가 0.50, 0.60, 0.70에 대하여 각각 횡축에 크랙증가량 $\Delta(2a)$를 잡고 종축에 J 적분을 나타낸 것이다. ○표시는 Rice식에 의한 결과이고, △표시는 Sumpter식을 이용하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. 또한, ●표시는 크랙성장을

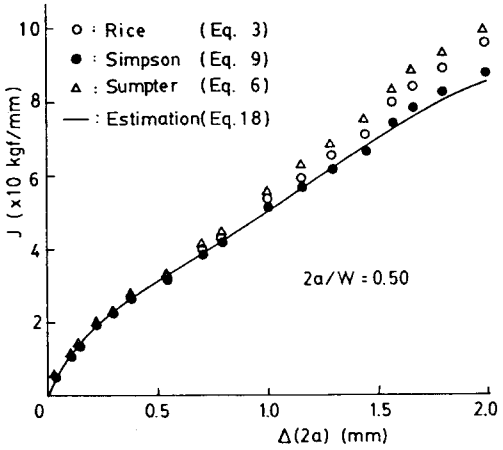

Fig. 3. J-resistance curve for CCT specimen with 2a/W = 0.50.

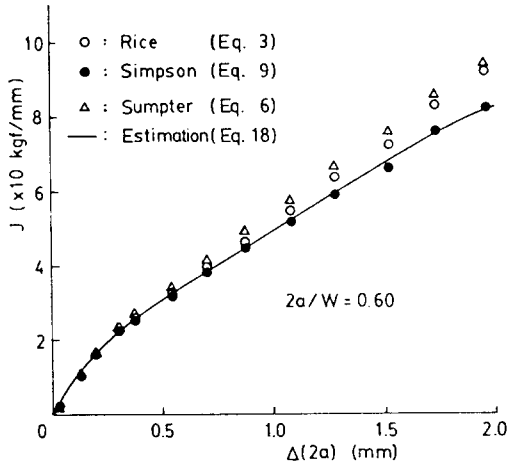

Fig. 4. J-resistance curve for CCT specimen with 2a/W = 0.60.

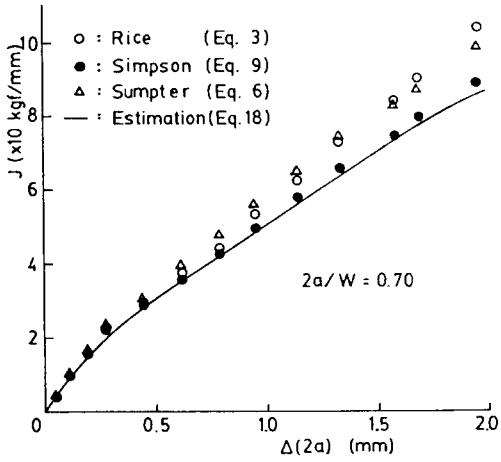

Fig. 5. J-resistance curve for CCT specimen with 2a/W = 0.70.

고려하여 Simpson식에 의한 결과이다.

Fig. 3은 $2a/W=0.50$인 평면응력상태에서 J 저항곡선의 실험 결과를 나타낸 것이다. 이 결과를 살펴보면 Sumpter식에 의한 결과가 Rice식에 의한 결과보다 과대평가 되고 있음을 보여주고 있으며 이 결과는 Chipperfied[16]의 주장과 일치함을 보여준다.

또한, 크랙성장을 고려한 J 적분 결과인 ●표시의 값이 앞의 두 결과보다는 적게 나타나고 있는데 이것은 크랙성장을 고려함으로서 J 적분 값이 과대평가 되는 것이 수정되기 때문이라고 생각된다. 이와 같은 경향은 Fig. 4, 5에서도 유사한 경향을 나타내고 있다. 따라서, 크랙성장을 고려한 J 적분식에서 얻은 J 적분값이 크랙성장을 고려하지 않은 그것보다

더 낮아짐을 알 수 있다.

각 그림에서 J 저항곡선과 크랙둔화선의 교점을 평면응력 파괴인성치 J_{in}라 정의하면, $2a/W$가 0.50, 0.60, 0.70으로 증가함에 따라 Simpson식을 이용하면 J_{in}는 23.78, 26.06, 25.05 kgf/mm로서 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 그 평균값은 24.96 kgf/mm를 얻었다.

2. 실험 및 컴퓨터 계산에 의한 J적분 비교

Fig. 6은 횡축에 크랙길이, 종축에 J적분을 하중과 변위에 대하여 전절에서 설명한 프로그램에 의하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. 파선은 변위를 나타내고, 1점쇄선은 대응되는 하중을 표시한 것이며, 실선은 실험에 의하여 얻은 J 저항곡선을 동시에 나타낸 것이다. 여기서 α와 n은 정밀한 인장시험을 통하여 (10)식에 의해 얻은 값으로 각각 $\alpha=19.715$, $n=7.521$이며, $E=20950\ kgf/mm^2$이고 그외 여러 값들은 앞의 실험조건과 동일하게 사용하였다. 하중과 변위거동의 결정은 다음과 같다. 최초 크랙길이 35.10 mm에서부터 실험치에 대응되는 하중과 변위를 결정한다. 마찬가지 방법으로 크랙길이를 증가시켜 가면서 여러 점의 그것들을 결정한다. 이렇게 결정된 하중과 변위를 사용하여 얻은 J 저항곡선을 Fig. 3~5에 실선으로 실험치와 함께 나타내었다. 이 결과에서 알 수 있듯이 크랙성장을 고려한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 전술한 방법으로 얻은 하중과 변위를 실험치의 그것과 비교하여 일 예를 나타낸 것이다.

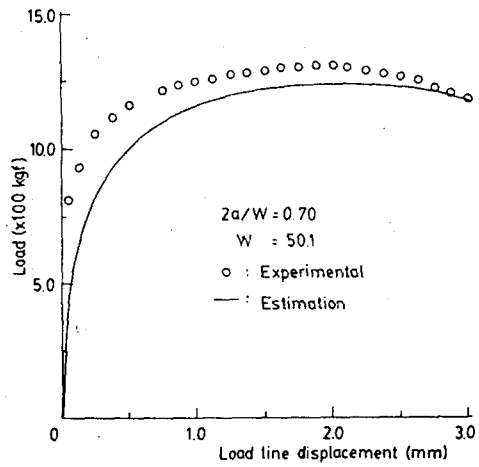

Fig. 6. J crack driving force diagram for CCT specimen, $\alpha=19.715$, $n=7.521$.

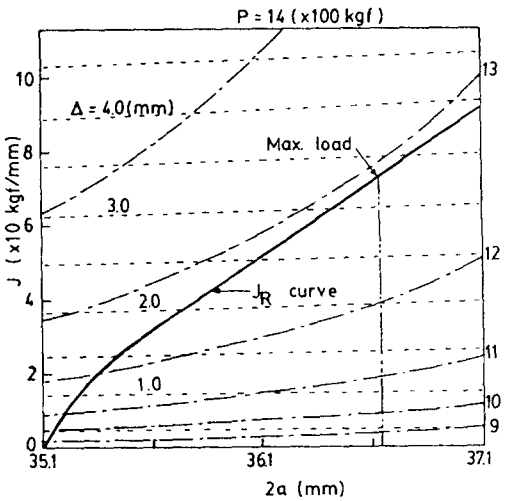

Fig. 7. Comparison of predicted and experimentally measured load-displacement curve for CCT specimen with 2a/W = 0.70.

o표시는 실험에 의하여 얻은 결과이고 실선은 컴퓨터 프로그램에 의하여 계산된 결과이다. 이 그림에 의한 결과는 최대 오차가 10% 이내이며 변위가 증가함에 따라 잘 일치하고 있다.

결 론

CCT 시험편을 이용한 평면응력 J 저항곡선의 거동을 고찰하기 위하여 두께 3 mm 일반 구조용 압연강판을 크랙비 0.50, 0.60, 0.70인 시험편을 준비하여 J 저항곡선의 거동을 고찰하였다. 또한, 변형경화재료로 가정하여 프로그램을 작성하여 그것을 실험치와 비교, 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. J 적분 계산식에서는 Sumpter 식이 Rice 식보다 높은 J_{in} 값을 얻으며, 크랙성장을 고려한 Simpson 식에서는 그 값이 더 낮아진다.

2. 평면응력 파괴인성치 J_{in} 값은 크랙비에 관계없이 거의 일정하게 나타나며, 그 평균값을 Simpson 식을 이용하여 24.96 kgf/mm를 얻었다.

3. 컴퓨터 계산에 의한 하중은 실험치의 그것보다 최대 10% 적게 나타나지만 하중변위곡선은 잘 일치하며, 이 방법으로 결정된 J 저항곡선은 Simpson 식에 의한 그것과 잘 일치한다.

문 헌

1. Rice, J.R. and G.F. Rosengren(1968): Plane strain deformation near a crack tip in a power

law hardening materials. J. Mech. Phys. Solids 16, 1-12.

2. Hutchinson, J. W. (1968): Singular behavior at the end of a tensile carck in a power law hardening materials. J. Mech. Phys. Solids 16, 13-32.
3. Hutchinson, J. W. (1968): Plastic stress and strain fields at a crack tip. J. Mech. Phys. Solids 16, 337-347.
4. Begley, J. A. and J. D. Landes(1972): The J-intergral as a fracture criterion. ASTM STP 514. 1-20.
5. ASTM E813-81(1981): Standard test method for J_{IC} a measure of fracture toughness. 810-828.
6. Hickerson, Jr., J. P. (1977): Experimental confirmation on the J-intergral as a thin section fracture criteria. Eng. Fracture Mech. 9, 75-85.
7. Rice, J. R. (1968): A path independant integral and approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. J. of Applied Mech. 35, 379-386.
8. Parks, D. M. (1978): Virtual crack extension: a general finite element technique for J-integral evaluation. Numerical Method in Fracture Mech., 464-478.
9. Kumar, V. and C. F. Shih(1980): Fully plastic crack solutions, estimation scheme, and stability analyses for the compact specimen. ASTM STP 700, 406-438.
10. Rice J. R., P. C. Paris and J. G. Merkle(1973): Some futher results of J-integral analysis and estimates. ASTM STP 536, 231-245.
11. Tada, H., P. Paris and G. Irwin(1973): The stress analysis of crack handbook. Del Research Corporation, Hellertown, Pa., 2.1-2.2.
12. Sumpter, J. D. and C. E. Turner (1976): Method for laboratory determination of J_C. ASTM STP 601, 3-18.
13. Etfis, J. and H. Liebowitz(1972): On the modified Westrgaard equations for certain plane crack problems. Int. J. of Fracture 8(4), 383-392.
14. Garwood S. J., J. N. Robinson and C. E. Turner (1975): The measurement of crack growth resistance curve(R curve) using the J-integral. Int. J. of Fracture 11, 528-530.
15. Simpson, L. A. (1981): Effects of specimen geometry on elastic plastic R-curve. Advances in Fracture Research 2, 833-843.
16. Chippefield, C. G. (1978): A summary and comparison of J estimation procedures. J. of Testing and Evaluation 6(4), 253-259.