

양쪽 크랙 인장시험편을 이용한 저탄소강의 J_{1C} 및 J 적분 거동

고 성 위*

 J_{1C} and J -integral Behavior of Low-carbon Steel using Double Edge Tension Specimen

Sung-Wi Koh*

In this paper, the plane stress fracture toughness of cold rolled 4.5 mm thick SS41 steel plate was investigated for various crack ratios respectively in case of base metal, normalized and annealed heat-treated specimens using the method of J -integral. The specimen geometry used was double edge tension(DET) specimen.

The experiments were performed on an Instron machine and all the crack lengths were measured by traveling microscope.

The plane stress fracture toughness obtained by the method of Rice equation was $J_{1C}=22.8 \text{ kgf/mm}$ for the base metal, $J_{1C}=24.7 \text{ kgf/mm}$ for the normalized specimen and $J_{1C}=26.9 \text{ kgf/mm}$ for the annealed.

The J -integral computed at the limit load was found unsuitable for fracture toughness determination, because of large variation depending on the crack ratio.

서 론

크랙을 함유하고 있는 재료 또는 구조물에 있어서 정확한 파괴의 예측은 재료의 선택과 구조물의 설계에 있어서 매우 중요하다.

파괴역학은 설계에 필요한 재료의 고유한 성질인 파괴인정치(fracture toughness)를 구하여 파괴의 예측을 목적으로 하며, 이러한 목적에 따라 선형탄성 파괴역학(linear elastic fracture mechanics)이 발달되었다.

선형탄성 파괴역학은 크랙선단의 소성변형이 작아서 응력상태를 탄성적으로 취급할 수 있으며, 소성변형이 큰 경우는 탄소성 파괴역학(elastic-plastic fracture mechanics)을 적용하여야 한다. 이러한 탄소성 파괴역학의 매개변수로서 J 적분이 많은 관심의 대상이 되었으며¹⁻³⁾ 이에 대한 실험방법이 ASTM⁴⁾에 규정되었다.

그러나, 이 규정에는 CT(compact tension)나 3점 굽힘(three point bending) 시험편에 대해서만 규정

되어 있으며, 이 시험편 모양의에도 자주 사용되는 양쪽 크랙 인장(double edge cracked tension: DET) 또는 중앙크랙 인장(center cracked tension) 시험편에 관한 규정은 없고, 이에 대한 연구결과^{5,6)}도 희박한 실정이다.

본 연구는 이러한 점을 고려하여 양쪽 크랙 인장 시험편을 이용하여 J 적분의 타당성을 검토하고, 크랙비($2a/w$)의 변화와 기계적 성질의 변화에 따른 J 적분의 거동을 고찰하였다. 크랙길이의 측정은 이등현미경에 의한 광학측정법(optical measurement method)⁵⁾을 이용하였다.

실험 방법

본 실험에 사용된 재료는 두께 4.5mm인 일반구조용압연강판(SS41)을 사용하였으며, 그 기계적 성질을 얻기 위하여 인장시험편은 압연방향(L-T)과 압연직각방향(R-T)으로 채취하여 KS B0801 13A호로 가공하여 시험하였다. 또한, 압연강판을 910°C에서

*부산수산대학: National Fisheries University of Pusan

1시간 유지후 노냉 또는 공냉한 균질화 또는 연화처리한 열처리재의 인장시험은 연압방향의 시험편만을 위와 동일한 방법으로 시험하였다. 시험재료의 기계적 성질과 화학적 성분은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Chemical composition of specimen

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu
0.17	0.05	0.47	0.02	0.01	0.02	0.04

Table 2. Mechanical properties of specimen

Specimen	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Yield Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
L-T	46.4	34.1	36.0
R-T	50.2	40.8	32.6
Normal.	40.6	32.6	30.0
Anneal.	42.2	31.6	32.9

시험편은 길이 방향을 압연방향으로 하고 크랙진 전 방향을 압연직각 방향으로 하여 DET시험편을 사용하였으며, Fig. 1에 이 시험편의 모양과 치수를 나타내었다.

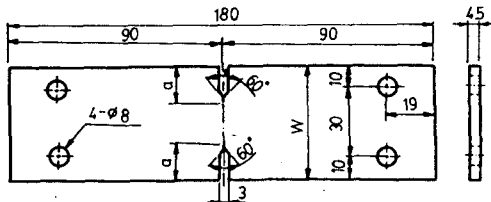


Fig. 1. Geometry and dimensions of DET specimen.

크랙비 $2a/w$ 는 0.50, 0.60, 0.70으로 가공하여 표면을 사포(sand paper)와 산화알루미늄으로 연마하였다. 연마된 시험편은 다음 (1)식과 같은 평면응력 한계하중(P_L)의 40% 되는 편진하중을 가하여 예피로크랙을 2~3mm 주었으며 시험기는 용량 10톤의 Instron 전기 유압식 시험기를 사용하였다.

$$P_L = 1.155B(w - 2a)\sigma_y \quad (1)$$

여기서

$2a$: 크랙길이(mm) w : 시험편폭(mm)

B : 시험편두께(mm) σ_y : 항복응력(kgf/mm²)

시험은 실온에서 행하였으며 크랙길이는 하중을 가하면서 주기적으로 이동현미경을 이용하여 측정하였다. 여기서, 표면크랙 측정법은 시편의 내부크랙은 측정할 수 없으나 평면응력 상태인 박판재료에서는 내부 크랙과 표면크랙의 차는 거의 없으리라 생각한다.

하중점변위는 변위와 하중을 X-Y기록체에 기록

하였으며, 이 결과를 다음 절에 기술한 (6)식과 (8)식을 이용하여 J 적분값을 계산하였다.

J적분에 대한 이론적 고찰

Rice⁷⁾⁻⁸⁾는 2차원 파괴역학에 대한 매개변수로 다음과 같은 J 적분식을 제안하였다.

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \vec{T} \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (2)$$

여기서 Γ 는 Fig. 2에 나타난 것처럼 반시계방향의 임의의 적분경로이고, s 는 경로 Γ 를 따라 변하는 호의 길이이며, x, y 는 직교좌표계의 성분이다. \vec{T} 는 트렉션 벡터(traction vector)로서 $T_i = n_j \sigma_{ij}$ 의 관계가 있고, \vec{n} 는 변위 벡터이다. W 는 변형률 에너지로서 다음과 같다.

$$W = W(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (3)$$

여기서 $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ 는 응력 및 변형률 성분이다.

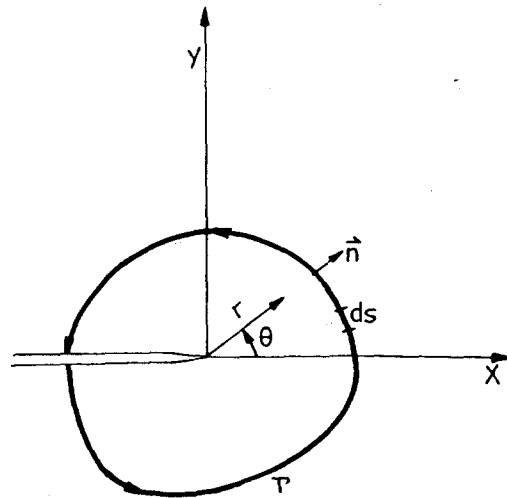


Fig. 2. Crack tip coordinate system and integral contour.

(2)식에서 탄소성체를 비선형 탄성체로 취급하여 소성변형이론을 적용하면 J 적분은 적분경로에 무관하게 되며,⁹⁾ 크랙선단의 응력-변형률장의 특이성의 세기를 나타낸다. (2)식을 포텐셜 에너지(Potential energy; U)로 표시하면 다음과 같다.

$$J = -\frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial (2a)} \quad (4)$$

Bergley와 Landes^{10,11)}는 (4)식을 이용하여 실험적으로 J 적분을 구하였다. 이 (4)식을 다른 방법으로 나타내면,

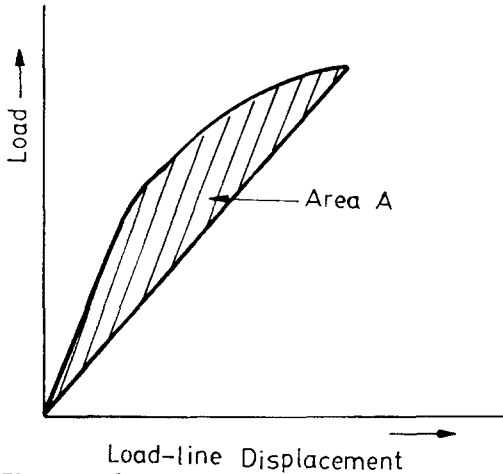


Fig. 3. Load vs. load-line displacement diagram.

$$J = G + \frac{2A}{B(w-2a)} \quad (5)$$

여기서, G 는 에너지 이완률(energy release rate; kgf/mm)로서 평면응력의 경우 $G = K^2/E$ 이며 A 는 Fig. 3에 나타낸 것처럼 하중 변위점의 면적($kgf \cdot mm$)이고 E 는 탄성계수(kgf/mm^2)이고, K 는 응력확대계수(stress intensity factor; $kgf/mm^{3/2}$)로서 Irwin¹²⁾에 의하면,

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{w}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{w}} \quad (6)$$

으로 되고 Tada¹³⁾는 다음과 같이 수정하였다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \left\{ 1 + 0.122 \cos^2 \left(\frac{\pi a}{w} \right) \right\} \sqrt{\frac{w}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{w}} \quad (7)$$

드한 (5)식을 한계하중에 의해 표시하면 다음과 같다⁹⁾.

$$J = G + \frac{1}{E} \left[2 \int_0^{\delta_P} P_L d\delta_P - P_L \delta_P \right] \quad (8)$$

여기서 δ_P 는 한계하중에서의 변위이다.

본 실험에서는 (5)식과 (8)식을 이용하여 J 적분을 구하고 이 J 적분의 크랙분화선 이후의 값을 최소자승법으로 직선화한 후 (9)식과 같은 크랙분화선과의 교점의 값을 평면응력 파괴인성치 J_{1c} 로 하였다.

$$J = 2\sigma_f \Delta(2a) \quad (9)$$

여기서 σ_f 는 유동응력(flow stress)로서 연강응력과 항복응력의 평균값이다.

파괴실험에서 얻은 하중-변위선도의 일예를 Fig. 4에 나타내었다.

결과 및 고찰

1. 크랙비 $2a/w$ 의 변화에 따른 J 적분 거동

Fig. 5는 열처리를 하지 않은 모재에서 $2a/w$ 가 0.66의 경우에 대하여 횡축에 크랙증가량 $\Delta(2a)$ 를 잡고 종축에 J 적분을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 $2a/w$

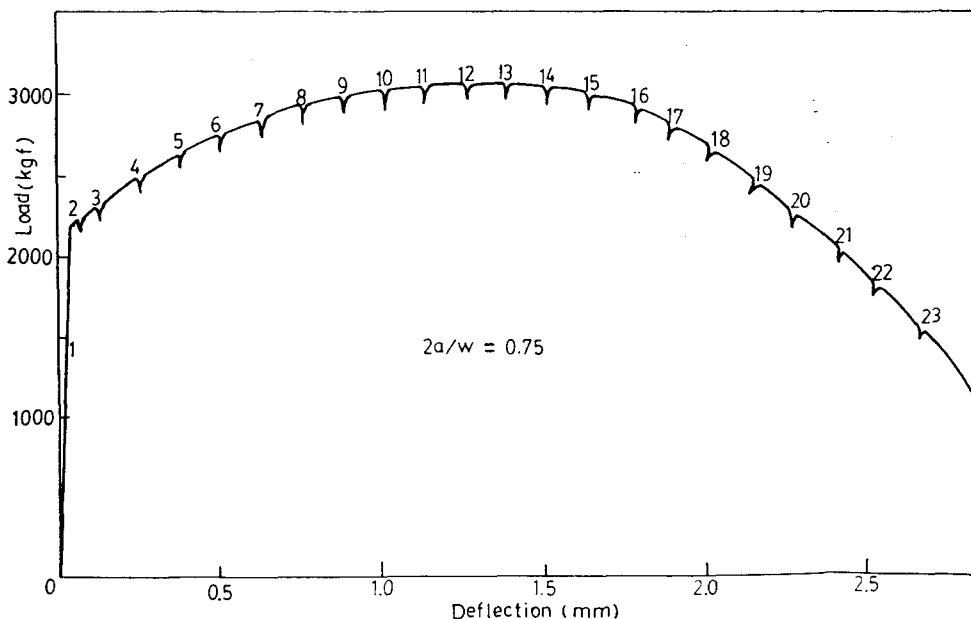


Fig. 4. Example of fracture test record.

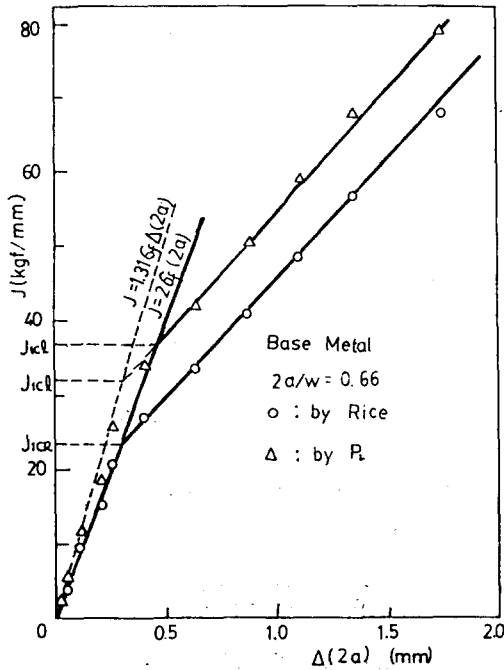


Fig. 5. J -resistance curve for $2a/w=0.66$, DET specimen.

는 파괴실험 전의 최초의 크랙비를 나타내며 ○표시는 Rice의 식에 의한 결과이고 △표시는 한계하중을 이용한 결과이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 Rice에 의한 결과가 한계하중에 의한 결과보다 낮은 값을 나타내며, 또 J_{IC} 를 Rice의 식에 의한 값을 J_{ICR} 로 표시하고 한계하중에 의한 값을 J_{ICL} 로 표시하면 동일한 결과임을 알 수 있다. 여기에서 한계하중에 의한 결과를 살펴보면 크랙분화선의 기울기가 더 급격하므로 크랙분화선의 기울기를 수정하면 $J=1.31\sigma_f\Delta(2a)$ 가 된다. 이렇게 수정된 크랙분화선을 이용하여 얻은 J_{IC} 를 J_{ICL} 로 표시하면 평면응력 파괴인 성치가 약간 저하되나 J_{ICR} 보다는 크게 나타남을 알 수 있다. 이같은 경향은 $2a/w$ 가 다른 시험편의 경우에도 유사한 결과를 나타내며 그 원인은 한계하중을 이용함으로써 인성치가 과대평가 되기 때문이라 생각한다.

또한, $2a/w$ 의 변화에 따라 Rice의 식에 의한 J 적분 거동을 나타낸 것이 Fig. 6이며 $2a/w$ 가 0.55, 0.66, 0.75로 변화함에 따라 J_{IC} 는 22.4, 23.0, 23.0 kgf/mm로 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있으며, 저항곡선의 기울기는 크랙비가 증가함에 따라 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과의 원인을 살펴보면 전자는 J_{IC} 가 재료의 인성치를 나타내는 하

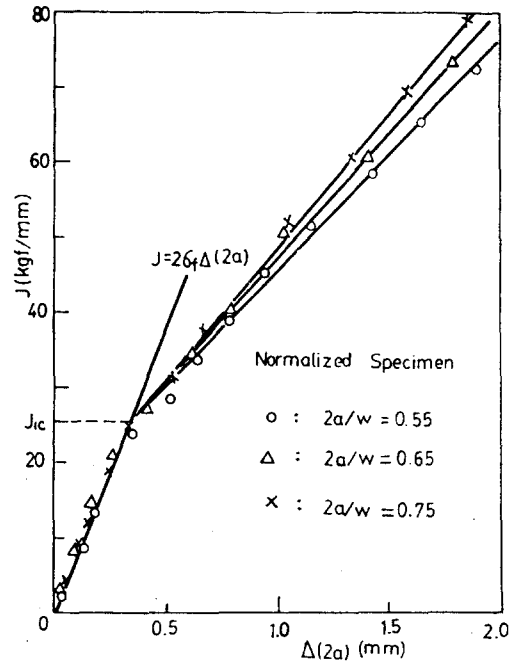


Fig. 6. J -resistance curve for base metal DET specimen.

나의 변수이므로 J_{IC} 가 거의 일정하게 된다고 생각할 수 있으며, 후자는 치수효과에 의하여 재료가 갖고 있는 저항치의 차 때문에 발생한다고 생각한다. 여기서 한계하중에 의한 결과는 그 차가 일정하지 않고, 또 상당히 크게 나타나므로 제외할 것이다. 위와 같은 결과는 균질화 또는 연화처리한 열처리재의 경우에도 유사한 경향을 나타낸다. 따라서 본 연구에서 실험한 크랙비($2a/w$)범위 0.55~0.75에서 $2a/w$ 의 변화에 따라 평면응력 파괴인성치 J_{IC} 는 거의 일정한 값을 나타내고 크랙분화된 후의 J 적분 기울기는 더 급격함을 알 수 있다.

2. 기계적 성질의 변화에 따른 J 적분 거동

Fig. 7과 Fig. 8은 Rice의 제안식을 사용하여 균질화 처리재와 연화처리재의 기계적 성질의 변화에 따른 J 적분의 거동에 대하여 처리한 결과를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 우선 J_{IC} 를 살펴보면 전절에서 고찰한 것과 유사하게 거의 일정한 값을 나타내고, 그 평균값은 24.7kgf/mm였다. 또한 크랙분화후의 저항곡선의 기울기도 크랙비에 따라 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 연화 처리재의 결과인 Fig. 8에서도 유사하게 나타남을 알 수 있다.

양쪽 크랙 인장시험편을 이용한 저탄소강의 J_{IC} 및 J 적분 거동

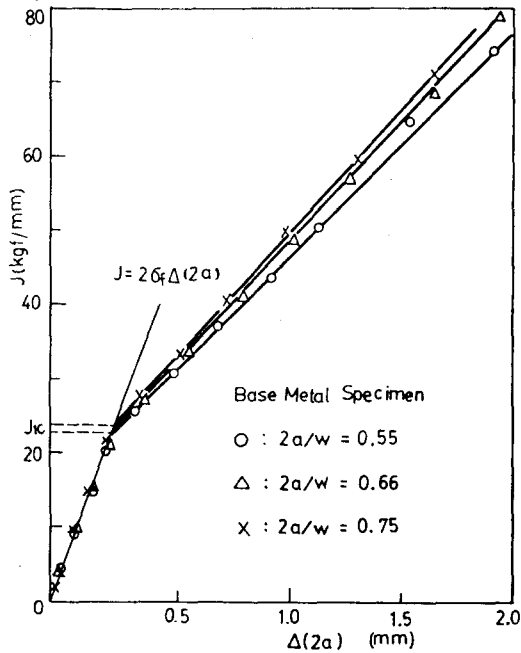


Fig. 7. J -resistance curve for normalized, DET specimen.

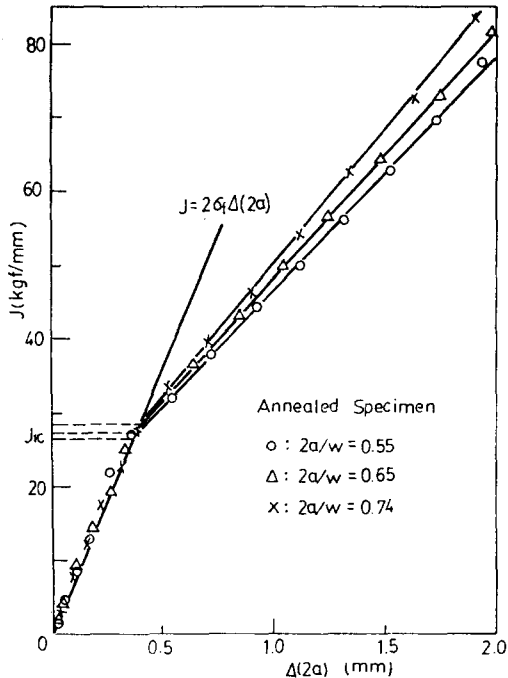


Fig. 8. J -resistance curve for annealed, DET specimen.

각각의 시험편에 대하여 얻은 J_{IC} 의 평균값을 나타낸 것이 Fig. 9로서 그 값은 모재는 22.4kgf/mm, 균질화처리재는 24.7kgf/mm, 연화처리재는 26.9kgf/mm를 얻었다. 이 결과를 동일재료 및 동일 조건에 대한 타실험 결과가 없어 직접적인 비교는 곤란하지만 전보¹⁴⁾에서 CT시험편에 대한 결과와 비교하면 3% 이내의 오차가 발생하므로 간접적인 비교이지만 DET시험편을 이용하여 서로 J_{IC} 를 구할 수 있음을 알 수 있다.

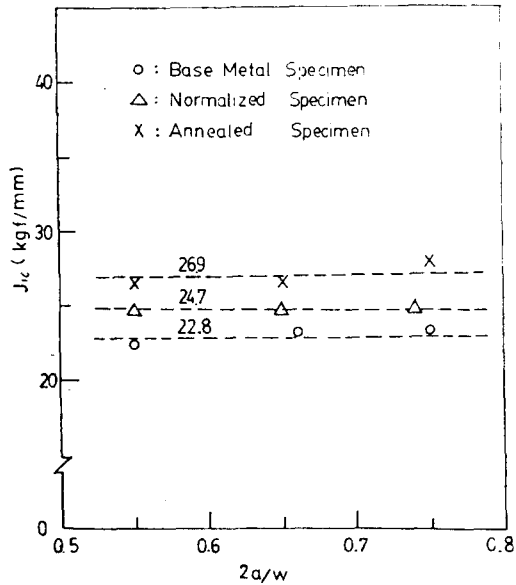


Fig. 9. The relationship between J_{IC} mean values and crack ratio ($2a/w$).

결 론

본 연구에서는 양쪽크랙 인장시험편을 이용한 결면응력 파괴인성치 J_{IC} 를 검토하기 위하여, 두께 4.5 mm 일반구조용 압연강판(SS41)을 균질화 및 연화처리하고 각각의 경우에 대하여 크랙비가 0.55, 0.65, 0.75인 시험편을 준비하여 J_{IC} 및 저항곡선의 거동을 고찰하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 양쪽 크랙 인장시험편을 사용하여 J_{IC} 를 구한 값은 한계하중에 의한 방법이 Rice가 제안한 방법보다 크게 나타남을 알 수 있다.

2) Rice가 제안한 방법으로 J_{IC} 는 실험한 크랙비 범위 0.55~0.75에서 거의 일정한 값을 나타내고 저항곡선의 기울기는 크랙비에 따라 증가하였다.

3) Rice가 제안한 방법으로 [SS41의 J_{IC} 의 평균값은 모재는 22.8kgf/mm, 균질화 처리재는 24.7kgf/mm, 연화처리재는 26.9kgf/mm를 얻었다.

참 고 문 헌

1. Clarke, J.R., Andrews, W.R. Paris, P.C. and D.W. Schmit (1976): Single Specimen Test for J_{IC} Determination. ASTM STP 590, 27-42.
2. Landes, J.D. and J.A. Bergley (1977): Recent Development in J_{IC} Testing. ASTM STP 632, 57-81.
3. Rice, J.R., Paris, P.C. and J.G. Merkle(1973): Some Futher Results of J-integral Analysis and Estimates. ASTM STP 536, 231-245.
4. ASTM E813-81(1981): Standard Test Method for J_{IC} , Measure of Fracture Toughness. 810-828.
5. Hickerson, J.P. (1977): Experimental Confirmation on the Jintegral as a Thin Section Fracture Criteria. Engin. Fracture Mech. 19, 75-85.
6. Markstrom, K. (1977): Experimental determination of J Data using different Types of Specimen. Engin. Fracture Mech. 19, 637-646.
7. Rice, J.R. (1968): A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. J. of Applied Mech. 35, 379-386.
8. Rice, J.R. (1971): Mathematical Analysis on the Mechanics of Fracture, in Fracture II. Academic press, 191-311.
9. Hutchinson, J.W. (1968): Plastic Stress and Strain Fields at a Crack Tip. J. of the Mech. and Phy. of Solids 16, 1-12.
10. Bergley, J.A. and J. D. Landes(1972): The J-integral as a Fracture Criterion. ASTM STP 514, 1-20.
11. Landes, J.D. and J.A. Bergley (1972): The Effect of Specimen Geometry on J_{IC} . ASTM STP 514, 24-39.
12. Irwin, G.R. (1957): Analysis of Stress and Strain End of Crack Transversing a Plate. J. of Applied Mech. 24, 361.
13. Tada, H., Paris, P.C. and G.R. Irwin (1973): The Stress Analysis of Cracks Handbook. DEL Reserch Corp. Hellrtown Pa., 26-29.
14. 고성위(1985): 소형시험편을 이용한 저탄소강의 평면응력 파괴인성치 결정(CT 시험편을 중심으로), 한국박용기관학회 추계 학술강연회 초록집, 72-76.