

일반구조용강 열간압연 박판의 K와 J 파라미터에 대한 R곡선 거동의 비교

이계승*(인하대 대학원 기계공학과), 이억섭(인하대 기계공학부)

Comparison with R Curve Behavior for the K and J Parameter of Structural Steel Hot-Rolled Thin Plates

G. S. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.), O. S. Lee(Mech. Eng. Dept., INHA Univ.)

ABSTRACT

The shape of K-R curve for an ideally brittle material is flat because the surface energy is an unvaried material property. However, the K-R curve can take on a variety of shapes when nonlinear material behavior accompanies fracture. By the way, a general metallic material is nonlinear, structural steel is such. Therefore, the J-R curve form J-integral value instead of K parameters can be used to evaluate elastic-plastic materials with flaws in terms of ductile fracture that can be significant to design. In this paper, R-curve behaviors form K and J parameter is considered for the precise assessment of fracture analysis, in case of JS-SS400 steels.

Key Words : Fracture Toughness (파괴인성치), Crack-Extension Resistance (균열확장저항), Plane-Stress Fracture Toughness (평면응력 파괴인성치), Elastic-Plastic Fracture toughness (탄소성 파괴인성치), K-R Curve (K-R 곡선), J-R Curve (J-R 곡선), Instability (불안정성), Ductile Fracture (연성파괴)

기호설명

- a = crack size
- a_p = physical crack size
- a_0 = original crack size
- a_e = effective crack size
- r_Y = plastic-zone adjustment
- Δa_p = physical crack-extension
- K = stress intensity factor
- K_{Ic} = mode I plane-strain fracture toughness
- K_c = plane-stress fracture toughness
- J = nonlinear energy release rate
- J_c = critical value of J
- K_R, J_R, R, G = crack-extension resistance
- Π = potential energy
- A = crack area
- COD = Crack Opening Displacement

v = displacement at the special point along the crack line

$C(T)$ = Compact Tension specimens

W = total specimen width

B or t : specimens thickness

P = load

Δ = displacement

E = Young's modulus

$L-T$ = transverse crack direction for rolling

$T-L$ = longitudinal crack direction for rolling

1. 서론

파괴인성 시험이란 균열성장에 대한 재료의 저항력을 측정하는 것이다. 이 시험에서 K , J 또는 CTOD와 같은 인성 매개변수와 균열성장의 관계로부터 단일 파괴인성 또는 저항곡선이 얻어진다.

이상적인 취성재료의 경우, 표면 에너지가 변화하지 않는 재료의 성질이 있기 때문에 R곡선은 평평

하다. 그러나 비선형 재료의 거동이 파괴를 동반할 경우에 R곡선은 여러 가지 모양을 나타낼 수 있다. 예를 들면 금속에서의 연성파괴는 일반적으로 증가하는 R곡선을 가진다. 이러한 것에는 K-R 저항곡선과 J-R 저항곡선이 표현될 수 있는데, 전자의 경우는 1960년대 이전에 논의됐던 선형탄성 파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics : LEFM)에 그 적합성을 나타내며, 파손에 앞서 상당한 소성변형이 먼저 생길 때는 이러한 접근은 유효하지 않다. 후자에 관한 이론은 1960년대 이후 균열 전 발생하는 소성변형을 비선형 탄성으로 생각함으로써 기존의 이상적인 탄성재료에 대한 국한된 에너지 해방률을 비선형 재료에 일반화시킬 수 있었다. 그러므로 동일한 재료에서 조차도 접근방법에서 기본적으로 차이를 보이는 K-R 곡선과 J-R 곡선으로부터 얻어지는 파괴인성치와 각각 정량화된 특성은 다소 차이를 보일 것이다.

이에 본 연구에서는 일반구조용강으로 널리 사용되고 있는 JS-SS400 열간압연 박판재료를 시편으로 하여 K-R과 J-R 곡선을 실험을 통해 산출하고, 이 두 관계를 비교 분석하였다.

2. 이론

2.1 K-R 곡선과 균열의 불안정 성장

Fig. 1과 같이 증가하는 R-곡선은 주로 연성파괴를 일으키는 철강재료에서 나타나는 경향이다.

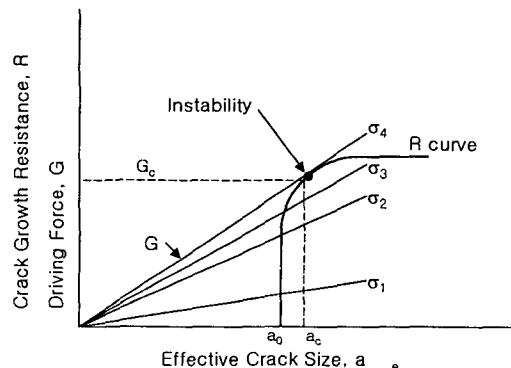


Fig. 1 Schematic driving force or resistance curve diagram for rising R-curve

응력이 σ_4 에 다다를 때 구동력 곡선은 R-곡선에 접하게 된다. 구동력의 변화율이 R-곡선의 경사를 초과하기 때문에 평판에서 균열의 성장은 불안정하게 된다. 안정균열 성장의 조건은 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$G = R \quad \text{그리고} \quad \frac{dG}{da} \leq \frac{dR}{da} \quad (1)$$

그러므로 불안정한 균열성장 조건은 식(2)와 같이 정의된다.

$$\frac{dG}{da} > \frac{dR}{da} \quad (2)$$

2.1.1 K_R 값의 계산

K-R 곡선을 발전시키기 위한 균열길이와 K_R 을 계산하기 위해 하중(P) 값을 기록하고 이를 활용하며, C(T)시편에서 K_R 값은 식(3)과 같이 결정한다.

$$K_R = (P/B\sqrt{W}) \times f(a/W) \quad (3)$$

$$f(a/W) = [(2 + a/W)/(1 - a/W)^{3/2}] [0.886 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4]$$

이 식에서 나누어지는 균열길이는 유효균열길이이고, 이것은 모든 물리적 균열길이와 소성영역의 크기 r_Y 의 합이다. 측정된 균열길이는 식(4)와 같이 수정할 수 있다.

$$a_e = (a_o + \Delta a_p + r_Y) \quad (4)$$

2.2 J-R 곡선과 균열의 불안정 성장

탄소성 재료에서 균열성장의 안정성에 미치는 조건은 탄성의 경우와 사실상 동일하다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 구동력 곡선이 R-곡선에 접할 때 불안정 성장이 발생한다. 이러한 불안정에서의 J값이 곧 임계값인 J_c 가 되는 것이다.

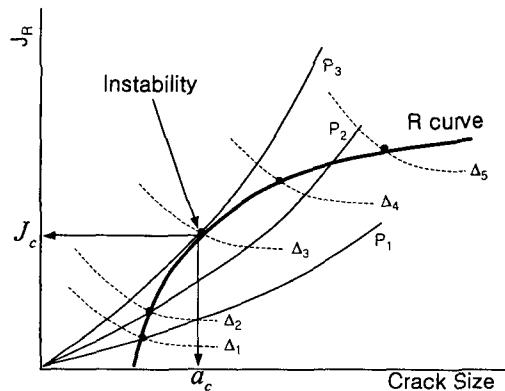


Fig. 2 Schematic J_R driving force (or R curve) diagram which compares load control and displacement control

2.2.1 비선형 에너지 해방률과 J작분

J 개념의 이론적인 기초는 균열을 포함한 비선형 탄성체 내의 에너지 해방률과 동일하다는 사실에 근거한다. 식(5)은 J의 정의이다.

$$J = -\frac{dII}{dA} \quad (5)$$

또한 J는 에너지 정의에 따라 하중과 변위항으로 식(6)과 같이 표현된다.

$$J = \left(-\frac{\partial}{\partial a} \int_0^P \Delta dP \right)_P = \int_0^P \left(\frac{\partial \Delta}{\partial a} \right)_P dP \quad , \text{ or}$$

$$J = - \left(\frac{\partial}{\partial a} \int_0^A P dA \right)_A = - \int_0^A \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_A dA \quad (6)$$

2.2.2 J 값의 계산

소형인장(C(T))시편을 적용하여 시험할 경우의 J 값 계산은 식(7)와 같다.

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (7)$$

여기서 J_{el} : J 의 탄성성분, J_{pl} : J 의 소성성분.

소형인장(C(T))시편을 적용하여 시험할 경우, 하중-변위 데이터 상에서 임의의 하중점($P_{(i)}$), 변위($v_{(i)}$) 그리고 균열길이($a_{(i)}$)에서의 J 계산은 식(8)과 같다.

$$J_{(i)} = \frac{(K_{(i)})^2}{E} + J_{pl(i)} \quad (8)$$

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{\eta_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \times \left[1 - \gamma_{(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right]$$

하므로, 식(9)의 조건에 만족해야 한다.

$$(W-a) \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (9)$$

여기서 K_{max} : 최대 K레벨(추측된 K_{lc}).

JS-SS400 (t:4.3) W: 118, a: 41.3 unit: mm

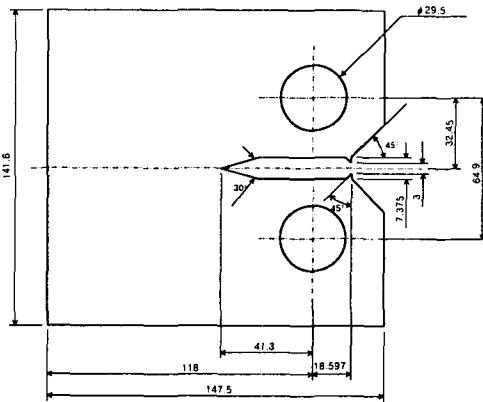


Fig. 3 Configuration of test C(T) specimens

3. 실험

본 연구에서는 하중 시퀀트법의 적용에 따른 용의성과 본 시험이 일반적인 K_{lc} 시험과 유사한 점을 고려하여 이에 주로 사용되는 소형인장 시편(C(T))을 사용하여 시험하였다.

Table 1 Properties of JS-SS400 specimens

Hot-Rolled Steel	Nominal composition (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Al	Other
JS-SS400	0.158	0.01	0.67	0.016	0.010	0.032	-
Mechanical properties							
Thickness (mm)	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (GPa)	Expected Fracture Toughness, K_{lc} (MPa \sqrt{m})		
4.3	313.6	482.2	33	163.998	77		

3.1 재료의 특성 및 시험편 설계

Table 1에서는 본 시험에 시편의 재료로 사용된 POSCO에서 생산되는 JS-SS400 열간 압연강판의 기본적인 기계적 특성과 화학적인 기본조성 및 재료의 성질을 나타내고 있으며, 이를 바탕으로 추정되는 K_{lc} 는 시편의 형상 설계에 적용된다.

Fig. 3은 JS-SS400 재료 C(T)시편의 설계 형상이다. 시험 결과가 C(T)시편에 확실히 반영되도록 하기 위해, 시험의 후반부에서 나머지 균열이 발생하지 않은 부위가 최소한 $(4/\pi)(K_{max}/\sigma_Y)^2$ 와 같아야

3.2 실험장치 구성 및 데이터처리 과정

실험장치는 Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 구성되어 있고, 얻어지는 데이터의 처리 과정이 도식적으로 설명되고 있다. 만능인장시험기를 이용하여 하중을 부여하고 로드셀로 도출하며, COD계이지의 변위차는 데이터로거로 기록하였다.

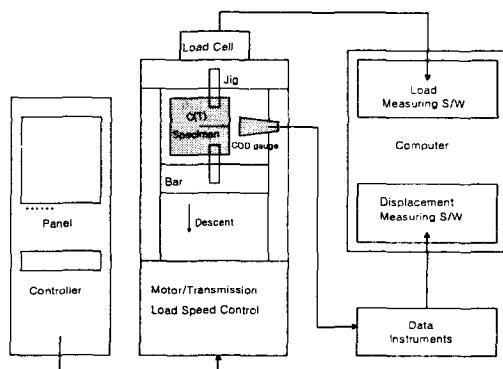


Fig. 4 Block diagram of experimental apparatus

3.3 K-R 과 J-R 곡선의 결과

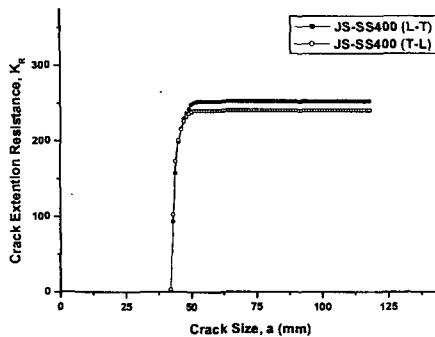


Fig. 5 K-R curve, comparison of crack-extension resistance(K_R) vs. crack-size(a) as a crack growth for L-T and T-L specimens

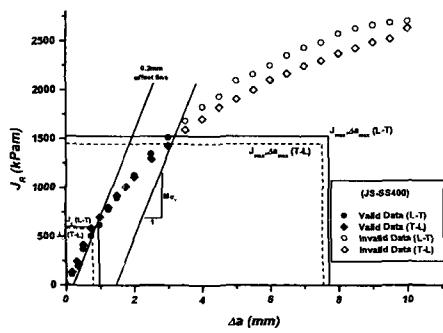


Fig. 6 J-R curve for AUTOBEAM, comparison of crack extension resistance(J_R) vs. crack extension (Δa) curves for L-T and T-L specimens

4. 결론

본 연구에서는 JS-SS400 일반구조용 열간압연 박판재료에 대한 K-R곡선과 J-R곡선 비교 분석실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 연구에 사용된 열간압연 박판재료의 K-R곡선은 증가하는 형태를 나타냈다.
- (2) 얇은 판재의 경우 균열선단의 주위는 평면응력 상태이기 때문에 평면변형 상태의 두꺼운 재료에 비해서 다소 경사가 급한 K-R곡선을 나타냈다.
- (3) J-R곡선 초기단계에서는 균열은 정지 상태에 있으며 곡선의 유한한 경사는 균열선단의 무더짐에 기인한다. 불안정성 구간에서 균열은 개시되고 성장하는데, 이는 균열선단의 응력과 변형률이 무더짐 현상에 영향을 받은 결과이다. 이때 증가하는 곡선은 J지배영역의 소규모 항복조건에 있으며, 단지 균열진전에만 종속적이다. 이는 J-R곡선이 재료의 특

성임을 뒷받침한다.

(4) 증가하는 J-R곡선에서 하중변화가 곡선에 접하는 불안정 시점에서 균열의 성장은 불안정해졌다. 이는 비선형 재료의 거동을 보이는 금속재료의 일반적인 연성파괴 특성과 일치한다.

(5) L-T시편이 T-L의 경우보다 다소 높은 K_R 과 J_R 값을 보이는 것은 L-T가 파괴저항 면에서 우위를 차지함을 의미한다.

(6) 현저한 탄소성 거동을 수반하는 재료에 있어서, 균열의 저항성은 J 파라미터를 이용한 R 저항곡선의 경우가 탄성영역을 표현하는 K 파라미터의 경우 보다 비선형 재료의 연성파괴의 정량적 특성을 보다 잘 표현한다.

후기

POSCO의 시험편 재료 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. T.L. Anderson, "Fracture mechanics," CRC, pp. 46 ~ 49, 279 ~ 305, 365 ~ 402, 1995.
2. Richard W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," Jone Wiley & Sons, pp. 354 ~ 362, 417, 757 ~ 758, 1996.
3. R. H. Heyer and D. E. McCabe, "Crack Growth Resistance in Plane-Stress Fracture Toughness Testing," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, pp. 413 ~ 430, 1997.
4. K. H. Schwalbe and W. Setz, "R-curve and Fracture Toughness of Thin Sheet Materials," Journal of Testing and Evaluation, Vol. 9, No. 4, 1981.
5. John D. Landes, "Fracture Toughness Testing," ASM International Handbook Committee, Vol. 19, pp. 393 ~ 400, 1997.
6. The Articles Developed from ASM Source, "Fracture Mechanics Properties of Carbon and Alloy Steels," ASM International Handbook Committee, Vol. 19, pp. 614 ~ 617, 1997.
7. ASTM, 1996, "Stanard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness", ASTM (E 1820-96), pp. 992 ~ 994.
8. 조강형, 이성진, 박내학, "압연 강판의 권취 형상 계측 및 패턴 분류," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 28 ~ 31, 1999.
9. 이억섭, 나경찬, "스트레인 측정에 의한 응력확대 계수의 결정," 한국정밀공학회지, 제12권, 제8호, pp. 147 ~ 155, 1995.
10. POSCO(주) 열연 품질 관리팀 제공, 2001, "Table 1 시험재료의 물성치".