

일반구조용강 열간압연 박판에 대한 K-R 곡선 결정

이억섭*, 이계승**, 백준호**, 편장식**

Determination of K-R Curve for Steel Structure Hot-Rolled Thin Plates

Ouk Sub Lee*, Gye Seung Lee**, Joon Ho Baek** and Jang Sik Pyun**

ABSTRACT

Some materials exhibit a rising K-R curve, while the K-R curve for other materials is flat. The shape of the K-R curve depends on material behavior and, to a lesser extent, on the configuration of the cracked structure. The K-R curve for an ideally brittle material is flat because the surface energy is an invariant material property. However, the K-R curve can take on a variety of shapes when nonlinear material behavior accompanies fracture. Five different hot-rolled thin plates are tested to investigate K-R curve behavior. A special experimental apparatus is used to prevent specimens from buckling.

Key Words : Fracture Toughness (파괴인성치), K-R Curve (K-R 곡선), Crack-Extension Resistance (균열확장저항), Instability (불안정), Plane-Stress Fracture Toughness (평면응력 파괴인성치), Compliance Method (컴플라이언스 방법), Ductile Fracture (연성파괴), Anti-Buckling Plates (버클링 방지판)

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_{Ic} = mode I plane-strain fracture toughness

K_c = plane-stress fracture toughness

K_R, R, G = crack-extension resistance

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

E = Young's modulus

C = compliance

V = output voltage from COD gauge

$L-T$ = transverse crack direction for rolling

$T-L$ = longitudinal crack direction for rolling

*** 2002년 4월 4일 접수
* 인하대학교 기계공학부
** 인하대학교 대학원

1. 서론

고도의 산업기술이 발달함에 따라 인간이 만들어 놓은 구조물의 파괴나 파손에 관한 문제는 더욱 심화되고 있으며, 이를 미연에 방지하고자 하는 설계와 관리 및 보수단계에서의 노력들 또한 더해가고 있다. 본 연구에서는 미국재료시험학회(ASTM E561-94)에서 표준 시험법으로 제시된 R-곡선 실험을 이용하여 일반 구조용강이나 자동차 차체 프레임용으로 널리 활용되는 다양한 열간 압연 박판의 파괴인성치를 결정하는 시험 방안을 제안하고, 시험을 수행하여 얻어진 하중과 개구변위를 통해 파괴인성치를 도출하고 이를 비교 분석하였다.

2. 이론

2.1 K-R 곡선 시험

본 연구에서는 하중 시킨트법의 적용에 따른 응의성과 본 시험이 일반적인 K_{Ic} 시험과 유사한 점을 고려하여 이에 주로 사용되는 소형인장 시편(C(T))을 사용하여 시험하였다^[1].

2.2 R-곡선과 균열의 불안정 성장

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

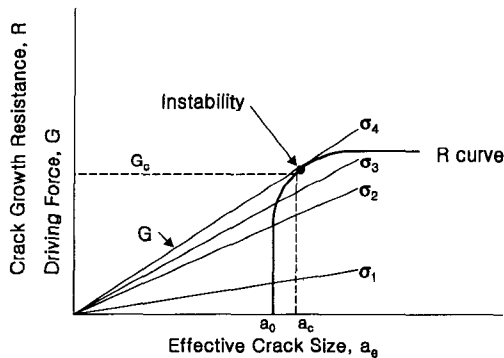


Fig. 1 Schematic driving force or resistance curve diagram for rising R-curve

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^{[2][3]}.

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

2.3 컴플라이언스 방법

효과적인 유효균열길이 결정을 위해 적용하는 컴플라이언스(compliance)방법은 보정된 다양한 균열길이에 해당하는 시편의 탄성효과를 이용한다. 보정 곡선은 실험적으로 탄성영역에 있어서는 비례적으로 증가될 것이다. 스프링 상수 혹은 변화되는 하중(P)에 따른 변위(v)의 기울기의 역수를 결정함으로써 컴플라이언스(c)는 식(3)과 같이 정의된다.

$$C = \frac{v}{P}, \quad \text{컴플라이언스} \propto \text{변위} \propto \frac{1}{\text{강성}} \quad (3)$$

재료의 두께와 탄성계수를 의미하는 기울기의 역수와 시편에 대한 균열길이 대 폭비(a/W)에 대한 점을 대응시켜 효과적인 균열길이를 도출해낼 수 있다. 결국 개구변위(COD)를 측정하면 컴플라이언스를 측정하는 것과 마찬가지이다. 무차원 컴플라이언스(BEC)와 무차원 균열길이(a/W)는 주어진 시편의 형상에 따라 식(4)와 같은 관계로 결정된다.

$$BEC = f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

Fig. 2에서는 해당 하중에 따른 컴플라이언스와 균열길이의 관계를 거시적으로 나타내고 있다.

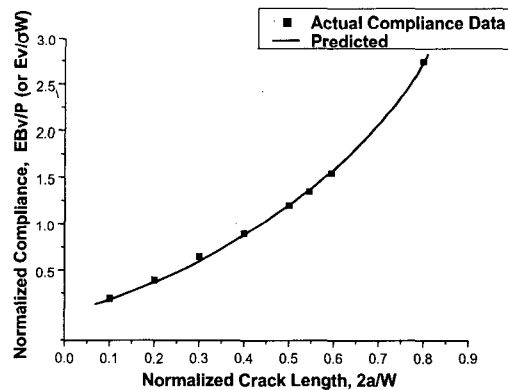


Fig. 2 Compliance calibration curve for crack length of C(T) specimens

C(T)시편으로 시험을 거친 재료에 대한 시험기록과 시편의 두께(B) 그리고 가장 쉽게 이용 할 수 있는 값인 탄성계수를 이용하여 E 값의 초기 선형적 역의 기울기 EBv/P 또는 $E v/\sigma W$ 와 같은 표준화된 컴플라이언스를 결정한다. 알맞은 계수를 사용함으로써 파괴 전까지 발생될 모든 균열길이를 예측한다. 가장 정확하기 위해서는 시험기록의 초기 크랙 사이즈인 a_0 와 초기 탄성영역 내에서의 상대 기울기인 v/P 값이 주어진 상태에서 식(5)와 (6)에서와 같이 탄성계수 (E_M)을 결정하며, 컴플라이언스를 통한 예측되는 균열길이는 식(7)과 같다^{[4][5]}.

$$X = -0.00929 + 0.96868(2\frac{a_0}{W}) - 0.402(2\frac{a_0}{W})^2 + 0.44571(2\frac{a_0}{W})^3 \quad (5)$$

$$E_M B(\frac{v}{P}) = \sqrt{4.584[\ln(1-X)]^2 + (2\frac{Y}{W})^2} \quad (6)$$

$$X = 1 - \text{EXP} \left[-\frac{\sqrt{(E_M \frac{Bv}{P})^2 - (2\frac{Y}{W})^2}}{2.141} \right] \quad (7)$$

여기서, $2\frac{a}{W} = 1.2235X - 0.699032X^2 + 3.25584X^3 - 6.65042X^4 + 5.54X^5 - 1.66989X^6$

2.4 하중 시퀀트법

C(T)시편 적용시, 시험중에 어떤 주어진 점에서 부분적으로 하중을 제거하면 할선으로부터 기울기가 달라져 원상으로 돌아갈 것이다.

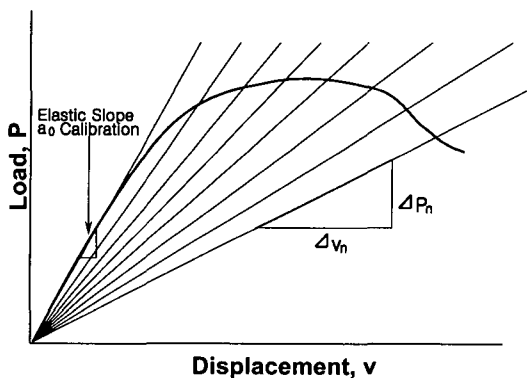


Fig. 3 Schematic test record for C(T) specimens from drawing load secant-method

이때 부분적 제하시 기울기는 물리적인 균열길이에 상응한다. 이와 같은 하중의 반전은 물리적인 균열 길이가 결정될 수 있다는 사실로부터 정확하게 복귀기울기를 입증하기에 충분하다. Fig. 3에서 이러한 하중 할선값을 개략적으로 도시하였다^[6].

2.5 K_R 값의 계산

R-곡선을 발전시키기 위한 균열길이와 K_R 을 계산하기 위해 하중(P) 값을 기록하고 이를 활용하며, C(T)시편에서 K_R 값은 식(8)와 같이 결정한다.

$$K_R = (P/B\sqrt{W}) \times f(a/W) \quad (8)$$

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

이 식에서 다루어지는 균열길이는 유효균열길이이고, 이것은 모든 물리적 균열길이와 소성영역의 크기 r_Y 의 합이다. 측정된 균열길이는 식(9)과 같이 수정할 수 있다^{[7][8]}.

$$a_e = (a_0 + \Delta a_p + r_Y) \quad (9)$$

3. 실험

3.1 시험편

3.1.1 재료의 특성

Table 1에서는 본 시험에 시편의 재료로 사용된 POSCO에서 생산되는 5종의 열간 압연 강판의 기본적인 기계적 특성과 기본조성 및 재료의 성질을 나타내고 있으며, 이를 바탕으로 추측된 K_{Ic} 는 시편의 형상 설계에 적용될 것이다^{[9][10][11]}.

3.1.2 시험편 설계

Fig. 4는 설계된 C(T)시편 중 AUTOBEAM 열연 강판의 경우를 나타낸 것으로 다른 재료의 경우도 각각에 알맞게 설계된 이와 같은 형태의 시편형상을 가진다. COD게이지의 측정 위치선택은 적당한 곳에 설치할 수 있지만, 변위값은 컴플라이언스 측정을 위해 사용되므로 하중 작용 편의 중심선으로부터 $0.1576W$ 만큼 떨어진 지점에서 선형적으로 추정하여야 한다. 그러므로 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 하며, 식(10)의 조건에 만족되는 시편을 설계해야한다.

Table 1 Mechanical properties of hot-rolled thin plates specimens

No.	Hot-Rolled Steel	Thick-ness (mm)	Nominal Composition (wt%)							Mechanical Properties			
			C	Si	Mn	P	S	Al	Other	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elongation (%)	Expected Fracture Toughness, K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
1	AUTOBEAM	2.6	0.183	0.32	1.06	0.020	0.004	0.035	0.2Cr 0.025Ti	516.5	670.3	18	110
2	JS-SS400	4.3	0.158	0.01	0.67	0.016	0.010	0.032	-	313.6	482.2	33	77
3	POSHRD2	3.2	0.022	-	0.15	0.013	0.006	0.039	-	213.6	329.3	40	55
4	JS-SAPH440	4.4	0.157	0.01	0.76	0.018	0.009	0.030	-	333.2	488.0	34	88
5	JS-SPFH540	3.2	0.084	0.14	1.38	0.014	0.002	0.025	0.03Nb	454.7	557.6	27	93

$$(W-a) \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (10)$$

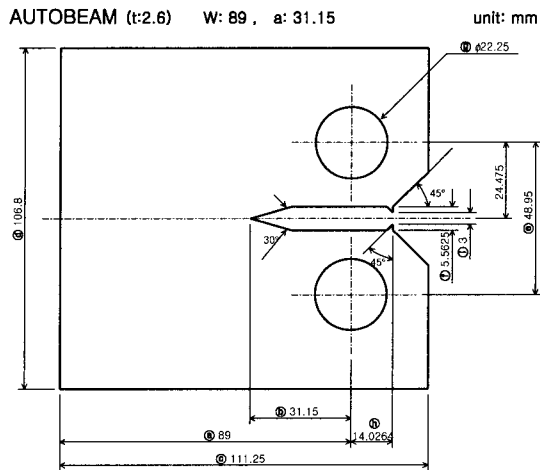


Fig. 4 Configuration of test C(T) specimens

여기서 K_{max} 는 시험에서 최대 K레벨로써 추측된 K_{Ic} 로 간주되며, σ_Y 는 물질의 0.2% 율셋 항복강도이다. C(T)시편에서 초기상태 균열크기와 폭의 비 (a_0/W)는 0.35 ~ 0.55 사이가 되며, 시편의 정확한 데이터생성범위를 극대화하기 위해 가능한 초기 크랙사이즈를 짧게 선택한다. 이러한 과정을 고려하여 시편의 형상 (W, a)를 결정하였다^[12].

3.1.3 시편의 형상 제작 및 균열선단 가공

기존의 기계적인 노치면 가공은 회전식 톱날 가공으로 처리되는데, 본 연구에 적용되는 시편의 두께가 얇은 강판으로써 비교적 얇기 때문에 와이어 방전가공을 적용하여 1/1000(mm)정도로 보다 정밀한

시편가공을 가능하게 했다. 그러나 이러한 가공방법은 균열선단이 고전압의 와이어로 절삭처리되기 때문에 와이어 직경이 아무리 가늘다 해도 그것의 직경만큼의 영구소성변형 영역이 발생되므로 균열선단으로써 부적절하다. 그러므로 후처리 과정으로 균열선단에 가늘고 날카로운 톱가공(saw-cut) 균열처리를 수행하였고, 적절한 균열선단의 형상 부여를 위해 균열선단의 형상이 평행 균열선에서 톱가공된 균열선 말단 부위까지의 전체각이 30°가 유지되도록 하였다. Fig. 5는 시편의 균열선단부위가 100배율로 확대된 사진으로써 그림에서 보는 것과 같이 균열선단을 톱가공 후처리한 경우(b)가 와이어방전가공으로 처리된 경우(a)보다 세부조직이 더욱 날카롭게 된 것을 알 수 있다.

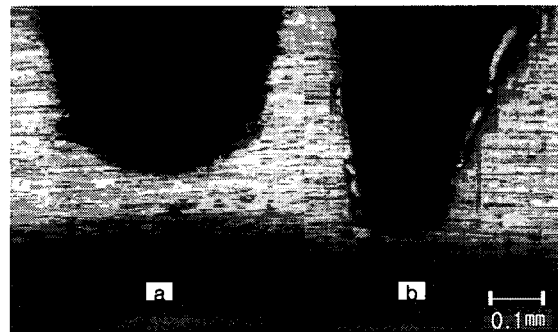


Fig. 5 Optical micrograph (un-etched) of C(T) specimen crack tip by using wire-EDM(a) and by using saw-cutting(b)

3.2 실험장치 및 절차

실험장치는 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 구성되어 있고, 얻어지는 데이터의 처리 과정이 도식적으로 설명되고 있다. 만능인장시험기를 이용하여

하중을 부여하고 로드셀로 도출하며, COD게이지의 변위변화량은 데이터로거로 기록하였다^[13].

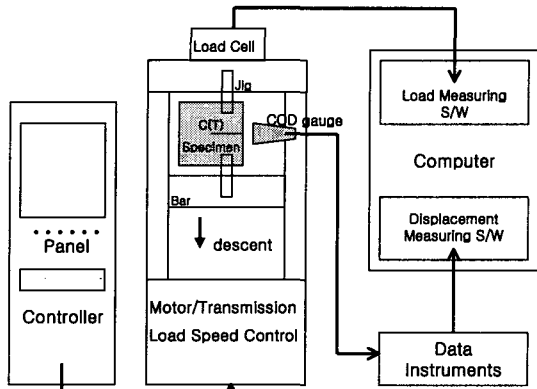


Fig. 6 Block diagram of experimental apparatus for K-R curve tests

3.2.1 시편의 고정 및 게이지 장착

시편은 Fig. 7과 같이 만능인장기의 상단 로드셀과 하단의 하강바 사이에 지그와 핀으로써 고정된다. 이때 시편과 지그 사이가 헐렁하거나 너무 하강되어 시험 전 부적절한 하중이 걸려 있어서는 안 된다.

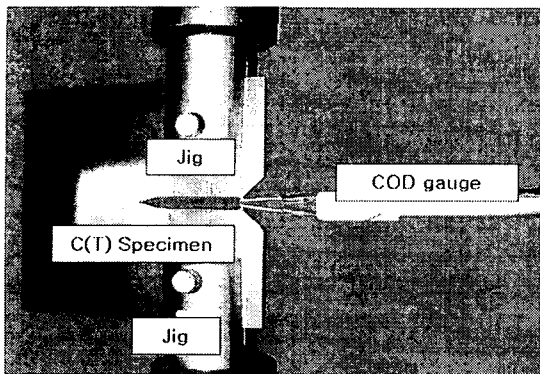


Fig. 7 Setting of C(T) specimens and COD gauge

게이지는 시편의 정확한 고정 후에 개구변위에 정확히 대응되도록 수평을 맞추어 장착해야 하며, 시험 중에 게이지가 밀리거나 혹은 흔들리거나 빠지지 않도록 자석식 거치대를 사용하여 견고히 고정하였다^[14].

3.2.2 변위 측정 게이지

동일한 종류의 클립게이지(COD게이지)라고 해도 제작 당시의 상이성이나 사용상의 불확정성을 감안하여 게이지 자체의 정밀한 보정(calibration)치를 파악하는 것이 실험 전에 선행되어야 한다. Fig. 8은 본 실험에서 사용된 클립게이지의 보정 곡선이다. 이러한 게이지 보정 작업을 수행하여 게이지의 선형성을 입증하였다.

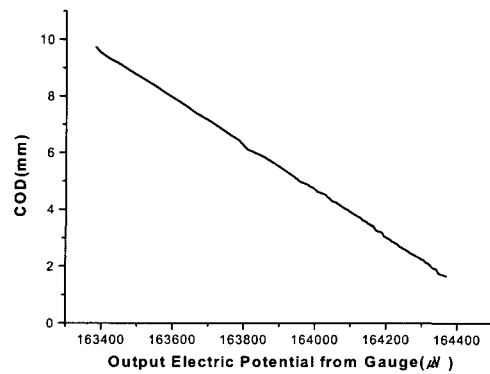


Fig. 8 Calibration of COD gauge by using output electric potential from gauge

3.2.3 하중장치 및 데이터 기록시스템

시험중에 최대하중까지 연속적으로 증가한 후 하강되는 과정에서 매순간 가변되는 하중 값들은 로드셀로 측정되고 그러한 값들은 컴퓨터를 통해 기록된다.

또한 시편 균열의 개구변위(COD)량은 μV 의 신

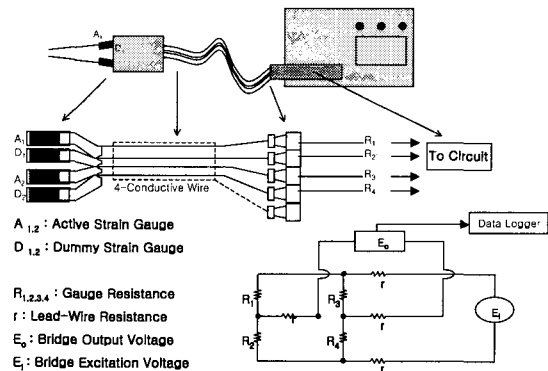


Fig. 9 Configuration of strain gauge correction circuit system for clip-gauge (COD gauge)

호로 데이터로거에 전달되어 자동 기록된다. 여기에서 해당 게이지의 보정 및 실제 변위량(mm)으로의 환산을 위해 Fig. 9와 같은 보정서킷을 활용한 시스템을 적용하였다.

3.2.4 하중속도

균열의 안정된 성장을 위한 단위시간당 적용되는 하중을 부여한다. R-곡선 상에서 변형률 영향의 개입이 최소화 되도록 충분하게 느린 하중속도를 0.5(mm/min)로 설정, 시험기가 가지는 최저 하중속도를 적용하였다.

3.2.5 시편의 버클링 방지

Fig. 10에서와 같이 버클링(좌굴) 현상으로 인해 시편 자체가 과도한 비틀림을 받은 것을 알 수 있고, 이때 정확한 결과치는 기대하기 힘들다.

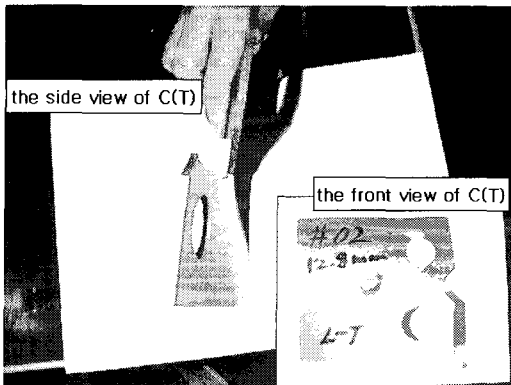


Fig. 10 Buckling effect of thin C(T) specimens after testing without anti-buckling fixture

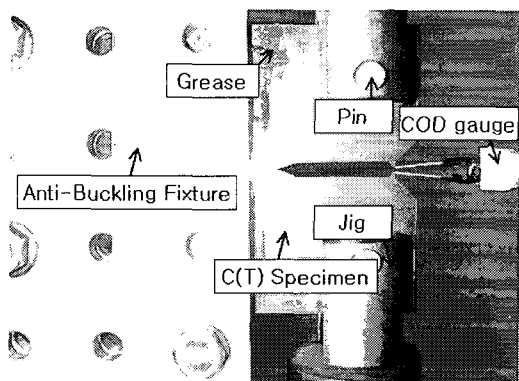


Fig. 11 Anti-buckling fixture for testing thin C(T) specimens

이러한 현상을 방지하기 위해 버클링 방지판을 적용하였다. 이때 버클링 방지판이 시편의 양쪽면을 너무 압박하여 고정된다면 오히려 부정확한 결과를 초래하므로 버클링 방지판의 고정시 주의해야 하며, 시편의 측면과 판의 내측면에 구리스 혹은 윤활유를 골고루 도포하여, 충분히 미끄러질 수 있도록 하였다. Fig. 11은 충분한 강도와 경도를 가지는 스테인리스강으로 제작된 버클링 방지판이 장착된 시편의 모습이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 결과

Fig. 12에서는 시간의 경과에 따른 하중 곡선을 L-T와 T-L 시편의 경우로 나누어 시험한 결과를 나타내고 있다. 시험 초반부는 하중 선도가 선형적인 경향을 보임을 알 수 있고, 최고 하중점 이후에는 하중이 서서히 떨어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 13에서는 시간의 경과에 따른 초기 균열선의 개구변위의 증가량을 나타내고 있다. 균열의 열림은 유사한 기울기로 진행되고 있다.

Fig. 14에서는 하중과 개구변위의 관계를 나타내고 있으며, L-T 시편의 경우가 T-L 보다 하중의 증가면에서 우위를 차지하고 있다.

Fig. 15에서는 균열의 진전에 따라 나타나는 K_{Rc} 값의 상승 그래프를 나타내고 있으며, Fig. 14에서 보았듯이 L-T 시편의 경우가 T-L 보다 균열확장 저항 면에 있어서 다소 유리한 파괴특성을 가지는 것을 알 수 있다.

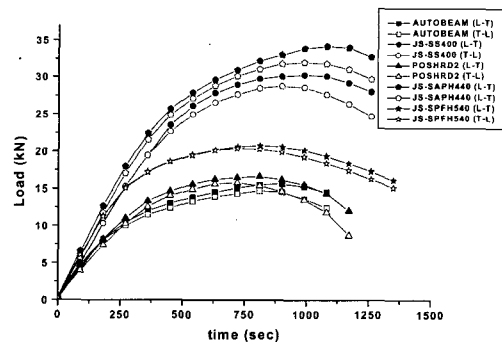


Fig. 12 Comparison of load vs. time curve as a crack growth for L-T and T-L specimens

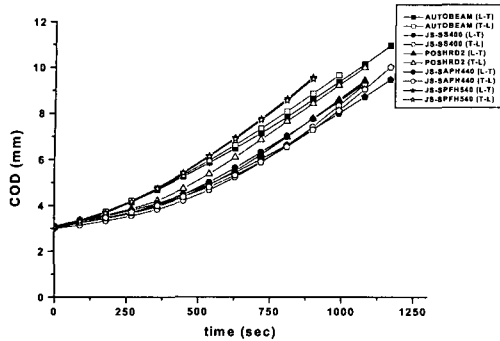


Fig. 13 Comparison of COD vs. time curve as a crack growth for L-T and T-L specimens

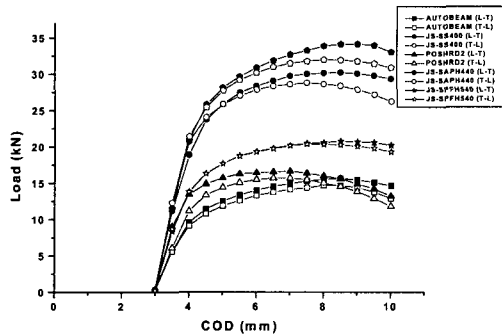


Fig. 14 Comparison of load vs. COD curve as a crack growth for L-T and T-L specimens

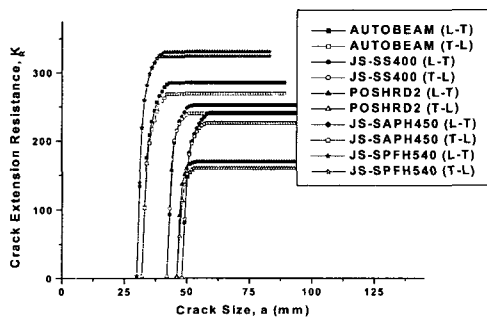


Fig. 15 K_R curve, comparison of crack-extension resistance(K_R) vs. crack-size(a) as a crack growth for L-T and T-L specimens

결과로써 얻을 수 있는 열간 압연강 박판 재료의 평면응력 파괴인성치는 Table 2에서와 같으며, 이 또한 L-T 시편의 경우가 우월함을 보인다. 그러나 설계시 파괴인성이 낮은 T-L의 경우를 채택하여 파괴인성치가 과대평가 됨을 피해야할 것이다.

Table 2 The result of plane-stress fracture toughness(K_{Ic}) at critical crack size(a_c) for L-T and T-L specimens

Specimens (L-T)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m}) @ a_c (mm)	Specimens (T-L)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m}) @ a_c (mm)
AUTOBEAM	200 @35.0	AUTOBEAM	190 @34.5
JS-SS400	210 @45.0	JS-SS400	200 @45.5
POSHRD2	150 @49.0	POSHRD2	145 @48.5
JS-SAPH440	180 @51.0	JS-SAPH440	175 @50.0
JS-SPFH540	250 @33.0	JS-SPFH540	220 @32.0

4.2 평가

4.2.1 실험 회수 및 처리 데이터수

본 연구에서는 한 시편에 대해서 적어도 3회 이상 동일한 시험이 적용되었으며, 뿐만 아니라, 시험 도중 순간순간 가변하는 10000~20000여 개의 하중치와 500~1000여 개의 개구변위 값을 데이터로 처리하여, 최종 R-곡선에 적용되는 데이터 수를 50여 개 이상의 수준으로 유지하여 결과치의 정확성을 향상시켰다.

4.2.2 실험 결과치 평가

아무리 정밀한 시험절차를 유지한다고 해도 시편에 부적절하게 발생되는 미량의 주기적인 제하와 재부하는 하중의 상승과정에서 부분적으로 수반 될 것이다. 그러나 시험을 수행해 본 결과 1/9800 N 정도의 범위에서 하중치가 소폭으로 상승-하강을 수 없이 반복하며 전체적인 상승-하중곡선을 그렸으며, 버클링 방지에 따른 부적절한 제하 현상은 나타나지 않았으므로 이를 신뢰할 수 있었다.

4.3 고찰

R-곡선의 정확성은 복잡한 공통적인 함수에 의존되며, 시험물의 설치 그리고 시험의 수행에 사용된 기기의 정밀성과 같다고 하겠다. 시험의 정밀도를 높이면 불안정상태에 가장 근접한 부근에서의 K_{Ic} 값을 결정할 수 있으며, 궁극적으로 해당 재료가 갖는 파괴특성을 표현하는데 충분할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 얇은 연성재료에 속하는 일반구조용 열간 압연 박판에 대한 실험적인 K-R 곡선의

측정을 위해 버클링 방지판이 장착된 C(T)시편을 사용한 인장시험과 COD게이지 전위차에 의한 방식을 통하여 파괴인성치를 결정하는 실험적 방법을 제안하였다. 이와 같은 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시험 초반부에는 재료 고유의 탄성특성인 선형적인 양상을 나타냈으며, 최대 하중점 이후에 전개된 완만한 하중선의 하강을 통해 예상되었던 연성파괴의 특성을 확인할 수 있었다.

(2) 본 연구에 사용된 연성재료에 속하는 열간 압연강 박판 재료의 R-곡선은 증가하는 곡선의 형태를 보였으며, 응력이 R-곡선의 불안정 점에 접하는 시점을 개기로 균열의 성장은 불안정해졌다. 이는 비선형 재료의 거동을 보이는 금속재료의 일반적인 연성파괴 특성과 일치한다.

(3) 본 연구에 사용된 얇은 판재의 경우 균열선단의 주위는 평면응력 상태이기 때문에 평면변형 상태의 두꺼운 재료에 비해서 다소 경사가 급한 R-곡선을 나타냈다.

(4) L-T시편의 균열전파 개시가 T-L시편의 경우보다 다소 늦게 진행되고, 같은 균열의 진행상 소요 시간이 더욱 오래 걸린다는 것이 확인되었다. 이는 L-T시편의 경우가 파괴저항 면에서 우월함을 의미한다. 그러나 실제 구조물 설계시 파괴인성이 낮게 나타나는 T-L의 경우를 채택하여 파괴인성치가 과대평가 됨을 피해야할 것이다.

(5) 정확한 K_{Rc} 값을 결정하기 위해서는 그에 합당한 정밀한 시험을 수행해야 하며, 이때 고려될 수 있는 제반 사항으로는 시편과 클립게이지의 올바른 고정, 정적인 수준에 가까운 느린 하중속도유지, 효과적인 버클링방지, 균열선단의 날카로움 가공 부여 등을 들 수 있다. 뿐만 아니라 더욱 정확한 파괴인성치를 결정하기 위해서는 반드시 다수의 연구실에서 동시에 Round-Robin Test가 이루어져야 할 것이다.

후 기

POSCO의 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. S. Y. Kim and C. S. Seok, "Variation of the Fracture Resistance Curve with the Change of Size in the CT Specimen," 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제12호, pp. 2963-2971, 2000.
4. Bahram Farahmand, George Bockrath and James Glassco, "Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Parts," Kluwer Academic Pub, pp. 169-176, 323-357, 1997.
5. K. H. Chang, C. S. Seok and W. H. Yang, "A Study on the Compliance of a Compact Tention Test Specimen," 대한기계학회 논문집 A권, 제24권, 제12호, pp. 3010-3017, 2000.
6. 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.
7. 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.
8. John D. Landes, "Fracture Toughness Testing," ASM International Handbook Committee, Vol. 19, pp. 393-400, 1997.
9. The Articles Developed from ASM Source, "Fracture Mechanics Properties of Carbon and Alloy Steels," ASM International Handbook Committee, Vol. 19, pp. 614-617, 1997.
10. POSCO(주) 열연품질관리팀 제공(Table 1. 시험 재료의 물성치).
11. 조강형, 이성진, 박내학, "압연 강판의 권취 형상 계측 및 패턴 분류," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 28-31, 1999.
12. Ashok Saxena and Christopher L. Muhlstein, "Fatigue Crack-Growth Testing," ASM International Handbook Committee, Vol. 19, pp. 171-179, 1997.
13. 이역섭, 나경찬, "스트레인 측정에 의한 응력확대계수의 결정," 한국정밀공학회지, 제12권, 제8호, pp. 147-155, 1995.
14. O. S. Lee, Y. P. Lee, I. M. Kang, S. Y. Kim and S. G. Kim, "Fracture Toughness of Thin Sheet Materials by Using CT Specimens," 대한기계학회 논문집 A권, 제21권, 제12호, pp. 2090-2095, 1997.