

실측 둔화직선을 이용한 SB41 강의 J_{IC} 평가에 관한 연구

허 정 원* · 오 세 욱** · 유 재 환*** · 김 득 진**** · 차 귀 준*****

(1994년 6월 15일 접수)

A Study on Evaluation of J_{IC} for SB41 Steel with Measured Blunting Line

C. W. Hue* · S. W. Oh** · J. H. Yu*** · D. J. Kim**** · G. J. Cha*****

Key Words : elastic-plastic fracture toughness(탄소성 파괴인성), blunting line real-measured(실측 둔화직선), smooth compact tension specimen(평활 CT 시험편), side-grooved specimen(측면홈 CT 시험편)

Abstract

The method of JSME S001-83 and ASTM E813-87 have been adapted for evaluation of the elastic-plastic fracture toughness J_{IC} of SB41 steel. This SB41 steel have the characteristics of low-strength CT specimens. The test results obtained have been considered and compared on the basis of resulted data from two kinds of methods(JSME S001-83, ASTM E813-87) and two kinds of specimen configurations(smooth, side-grooved)

On the basis of results from consideration and comparison, the difficulties for its application were presented in case when the standard ASTM E813-87 method was employed for the measurement of J_{IC} in SB41 steel.

A modified method was applied for measuring J_{IC} in SB41 steel that it used the blunting line real-measured by experiment instead of the standard blunting line theoretically determined, and the result from that procedure was analyzed and the usefulness of that method was examined and considered.

* 정회원, 동아대학교 생산기술연구소

** 정회원, 동아대학교 기계공학과

*** 정회원, 세명대학교 산업안전과

**** 정회원, 동아대학교 대학원

***** 정회원, 동명전문대 가스냉동과

1. 서 론

탄소성파괴(elastic-plastic fracture)는 균열 선단에 대규모 소성변형을 동반하면서 균열이 진전하기 시작하여, 비교적 낮은 속도로 균열이 진행해 가는 파괴양식을 의미한다. 균열을 갖는 시험편에서 탄소성 상태의 변형과 파괴저항은 J 적분과 균열진전의 관계를 이용한 균열선단의 소성 둔화직선(blunting line)과 탄소성파괴저항곡선(J-Resistance curve)에 의하여 표시할 수 있다. 이 경우에 탄소성파괴인성(elastic-plastic fracture toughness) J_{IC} 는 초기 균열선단이 완전히 둔화된 후, 새로운 균열진전이 시작될 때의 J값으로 정의된다.^{1),2)}

J_{IC} 의 결정기준은 크게 JSME¹⁾와 ASTM²⁾에서 제안하는 2 종류의 기준이 있다. JSME와 ASTM에서 모두 제안하고 있는 방법 중에서 J-R 곡선법이 있다. 이 방법은 둔화직선과 J-R 저항곡선의 교점을 찾아서 그 점에서의 J 값을 J_{IC} 로 정의하는 방법이다. 두 결정기준은 둔화직선을 결정하는 방법과 J-R 저항곡선을 결정하는 방법 등에서 차이를 보이며, 그에 따라서 J_{IC} 값이 조금씩 변하게 된다.

J-R 저항곡선을 결정하기 위해서는 균열길이의 측정이 필수적이다. 균열길이를 결정하는 방법은 복수시험편법(multi-specimen method)과 단일시험편 제하 컴플라이언스법(single-specimen unloading compliance method)이 사용되며, JSME에서는 전자의 방법만을 채택하고 있고, ASTM에서는 두 결정방법을 모두 채택하고 있다.

둔화직선을 결정하는 방법은 직접 실험에 의해서 결정하는 JSME 방법과 이론식에 의해서 결정하는 ASTM 방법이 있다. 둔화직선을 결정하는 경우에 ASTM에서 제안하고 있는 둔화직선식($J=2\sigma_y \cdot \Delta a$)은 중, 고강도강에 대해서는 적합하지만 저강도, 고연성강에 대해서는 실제로 측정된 것과 현저한 차이를 나타낸다고 보고³⁻⁵⁾되고 있다. 이러한 이유로 저강도, 고연성강의 J_{IC} 는 JSME 방법을 이용하는 것이 타당하며, ASTM 방법은 과대평가되는 등의 문제점이 있음이 보고

³⁻⁵⁾되고 있다. 그러나 JSME 방법은 복수시험편법이며, 이 방법은 J-R 저항곡선을 결정하기 위한 균열길이를 측정하는 방법에서 균열길이를 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있으나, 시험편의 수가 많아지는 단점이 있다. 반면에, 단일시험편 제하컴플라이언스법은 시험편 한개로 균열길이를 결정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 두 결정 기준에서 장점을 취하여, ASTM 방법에서 문제로 제기되는 둔화직선부를 JSME 방법처럼 직접 실측으로 결정함으로써 J_{IC} 를 측정할 수 있다면, J_{IC} 를 측정하기 위하여 필요한 시험편의 개수를 줄임으로써 실험의 간편성과 경제성을 획득하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 JSME S001 방법과 ASTM E813 방법을 이용하여, 저강도, 고연성강인 일반 구조용 압연강 SB41의 탄소성파괴인성 값을 측정하는 경우에, 이들의 결과를 분석하고 상호 비교함으로써 저강도, 고연성강에 파괴인성 평가기준의 유용성을 조사하며, ASTM의 단일시험편 제하컴플라이언스법에서 둔화직선을 직접 측정하여 적용하는 방법을 제안하고, 이 방법에 대한 파괴인성 평가의 유용성을 검토하고자 한다.

2. 시험기준의 개요

JSME S001¹⁾ 기준과 ASTM E813²⁾ 기준에서 탄소성파괴인성 J_{IC} 의 정의는 동일하지만, 다음의 각 규정들에서 차이점을 보이고 있다.

- ① 둔화직선원 결정
- ② J-R 곡선의 결정
- ③ J 적분의 산출
- ④ 균열길이의 결정
- ⑤ J_{IC} 의 결정

2-1. JSME S001-83

JSME S001-83은 J_{IC} 의 실험을 목적으로 1983년에 규격화되었다. JSME S001은 J_{IC} 결정을 위하여 R 곡선(R-curve)법과 스트레치존(stretch zone)법 등 2 종류가 있다. 본 연구의 대상은 복수시험편을 사용한 R 곡선법이며, 다음의 과정을

거쳐서 J_{IC} 를 결정한다.

① 둔화직선은 실험점을 직선회귀하여 결정한다.

② R 곡선은 균열길이의 진전량 Δa 가 1.0mm 이하인 실험점 및 유효한 실험점을 Fig. 1과 같이 직선적으로 근사시켜 결정한다.

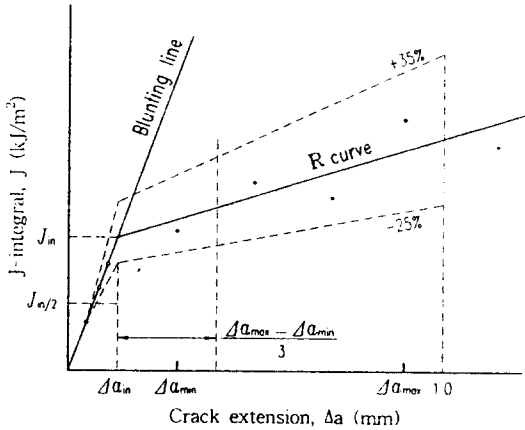


Fig. 1 Definition for data qualification (JSME S001-83)

③ J 적분은 다음식으로 산출한다.

$$J = \frac{A}{B \cdot b_0} f(a_0/W) \quad (1)$$

$$f(a_0/W) = 2(1 + \alpha)/(1 + \alpha^2) \quad (2)$$

$$\alpha = \sqrt{(2\frac{a}{b})^2 + 2(2\frac{a}{b}) + 2 - (2\frac{a}{b} + 1)} \quad (3)$$

여기서, A : 하중-하중선변위곡선의 면적

B : 시험편 두께

W : 시험편 폭

a : 균열길이

a_0 : 초기균열길이

b_0 : $W - a_0$

④ 균열길이 a는 시험편 두께를 8 등분하여, 중

양의 3/8, 4/8 및 5/8 3점의 평균값으로 정의한다.

⑤ Fig. 1에서 보는 바와 같이 둔화직선과 R 곡선의 교점으로 J_m 를 결정한다.

⑥ 이외에 J_m 의 유효조건, 균열길이 증분량 Δa 의 범위, R곡선의 기울기 등에 관한 규정이 있다.

이상은 JSME S001의 R곡선법에 대한 전반적인 사항을 열거하였다. 일반적으로 이 방법을 기준으로 J_{IC} 를 결정하는 경우에, 둔화직선부를 결정하기 위해서 2개 이상, R 곡선부를 위해서 4개 이상 등 최소한 6개 이상의 시험편을 필요로 한다.

2-2. ASTM E813-87

ASTM E813-87은 역시 J_{IC} 의 시험을 목적으로 1987년에 규격화 되었으며, 단일시험편법(single-specimen technique)과 복수시험편법(multi-specimen technique)의 2종류가 있다. 본 연구의 대상은 단일시험편법이며, 다음의 과정으로 J_{IC} 를 결정한다.

① 둔화직선은 다음식으로 가정한다.

$$J = 2\sigma_Y \cdot \Delta a \quad (4)$$

여기서 $\sigma_Y = (\sigma_{ys} + \sigma_u) / 2$, σ_{ys} : 항복강도

σ_u : 인장강도

② R 곡선은 Fig. 2와 같은 오프셋선 안의 실험점(●)을 다음식으로 지수근사시킨다.

$$J = C_1(\Delta a_p)^{C_2} \quad (5)$$

여기서 C_1, C_2 : 정수

③ J 적분은 다음식으로 산출한다.

$$J = J_e + J_p \quad (6)$$

$$J_e = \frac{(1 - \nu^2)}{E} K^2 \quad (7)$$

$$K = \sqrt{\frac{P}{BB_N W}} f(a/W) \quad (8)$$

$$f(a/W) = \frac{(2+a/W)}{(1-a/W)^{3/2}} [0.886 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4] \quad (9)$$

$$J_P = \eta \frac{A_{pl}}{bB_N} \quad (10)$$

$$\eta = 2 + 0.522 \frac{b}{W} \quad (11)$$

- 여기서, J_e : J의 탄성성분
- K : 응력확대계수
- J_p : J의 소성성분
- A_{pl} : Fig. 3의 면적 A
- B_N : 정미두께 (net thickness)

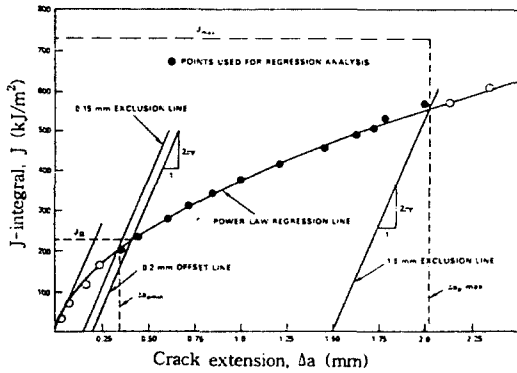


Fig. 2 Definition for data qualification (ASTM E813-87)

④ 임의의 균열길이 a_n은 다음식으로 산출한다.

$$a_n/W = 1.000196 - 4.06319U_{LL} + 11.242U_{LL}^2 - 106.043U_{LL}^3 + 464.335U_{LL}^4 - 650.677U_{LL}^5 \quad (12)$$

$$U_{LL} = \frac{1}{\sqrt{BEC_n + 1}} \quad (13)$$

여기서 초기 컴플라이언스 C₀와 이것으로 산출한 균열길이 a₀를 이용하여 식의 E 대신에 다음의 E_M을 이용하여 보정한다.

$$E_M = \frac{1}{C_0 B} \left(\frac{W+a_0}{W-a_0} \right) [2.1630 + 12.219(a_0/W) - 20.065(a_0/W)^2 - 0.9925(a_0/W)^3 + 20.609(a_0/W)^4 - 9.9314(a_0/W)^5] \quad (14)$$

⑤ Fig. 2에서 보는 바와 같이, 둔화직선에 평행한 0.2m 오프셋선과 R 곡선의 교점으로 J_Q를 결정한다.

⑥ 그외의 J_Q의 유효조건, 유효데이터의 조건, 시험편회전(specimen rotation)을 고려한 수정 탄성컴플라이언스(corrected elastic compliance)의 산출식 등에 관련된 규정이 있다.

일반적으로 ASTM E813 단일시험법으로 J_{IC} 시험을 할 경우에 1개의 시험편이 필요하며, 재현성을 위한 반복시험용까지 최대 3개의 시험편만을 필요로 하기 때문에 경제적인 잇점을 이유로 널리 이용되고 있다.

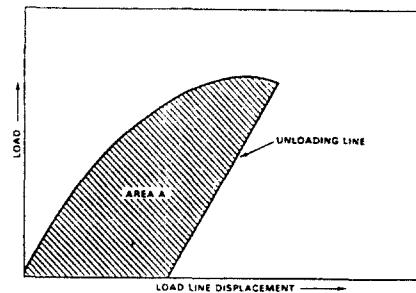


Fig. 3 Definition of area for J calculation (ASTM E813-87)

3. 시험편 및 실험방법

3-1. 재료 및 시험편

본 실험에서 사용한 재료는 일반구조용 압연강재

SB41 강이며, 재료의 화학적 성분은 Table 1에 표시하고, 기계적 성질은 Table 2에 표시하였다.

Table 1. Chemical composition of SB41 steel (wt. %)

comp. mat.	C	Si	Mn	P	S
SB41	0.16	0.04	0.78	0.019	0.008

Table 2. Mechanical properties of SB41 steel

item mat	tensile strength (MPa)	yield strength (MPa)	elongation (%)
SB41	470.4	333.2	37

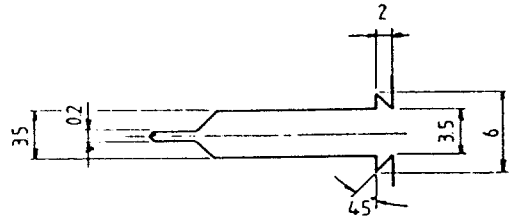
파괴인성실험에 사용한 시험편은 위 소재의 압연강판을 가공할 시험편의 L-T 방향으로 채취하여 CT형으로 준비하였고, 그 형상과 치수는 Fig. 4에 나타내었다. 시험편에서 기계노치는 폭 3.5 mm로 슬로터를 가공하고 크랙의 발생을 쉽게 하기 위하여 폭 0.2mm의 크랙 발생 노치(crack starter)를 깊이 3mm로 가공하였으며, 기계노치의 전체 길이를 $a_n=0.45 a/W$ 로 하였다.

3-2. 실험방법

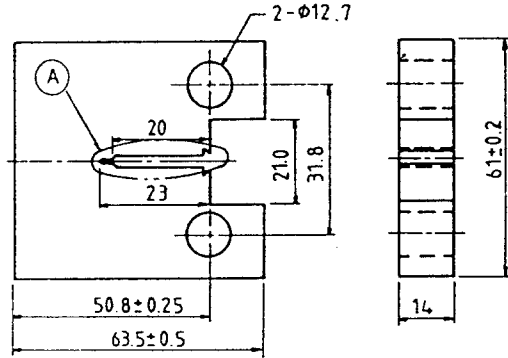
실험에 사용한 시험기는 유압서보식 피로시험기 (INSTRON model 1331, 10 tonf)이다.

준비된 시험편은 모두 JSME S001-83 및 ASTM E813-87 규정에 따라서 피로에크랙을 노치선단에서 4mm 도입하였으며, 초기 균열길이가 최종적으로 $a_0 \approx 0.55 a/W$ 되도록 조절하였다.

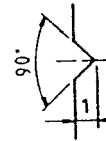
JSME의 R곡선법을 기준으로 하여 파괴인성을 측정하는 경우에, 정적부하(static loading)는 변위제어로 적용하였고, 부하속도는 0.1mm/min로 일정하게 유지하였다. 정적부하 후에 정적부하 시 최대하중의 60%로 시험편을 피로파단 시켜서 균열진전량(Δa)을 측정하였다. 둔화직선부를 결정하기 위한 시험편의 경우는 SEM을 이용하여 시



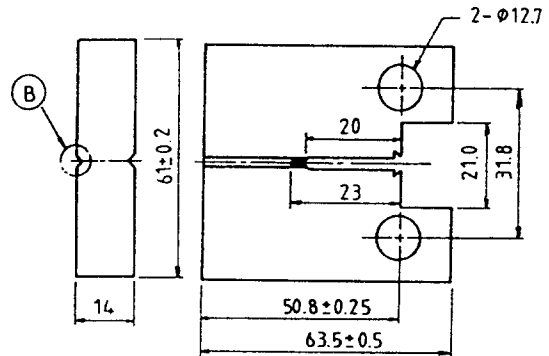
Detail A



(a) Smooth specimen



Detail B



(b) Side-grooved specimen

Fig. 4 Configuration and dimension of specimens

험편 두께의 3/8, 4/8 및 5/8 위치에서 균열진전량을 측정하였으며, R곡선부의 결정을 위한 시험편의 경우는 공구현미경을 이용하여 동일 위치에서 균열진전량을 측정하였다.

ASTM의 단일시험편 R곡선법을 이용한 경우에도 부하조건은 JSME 방법과 동일하였다. 시험편 균열길이를 측정하는 제하 컴플라이언스법(unloading compliance technique)을 적용하기 위한 제하(unloading)의 범위는 부하된 하중의 약 15%이었고, 정적부하 후 최대하중의 60%로 시험편을 파단하여 컴플라이언스에 의하여 측정된 결과를 직접 측정된 최종 균열길이와 비교하여 유용성을 검토하였다.

컴플라이언스를 결정하는 경우에, 하중선변위 (loading line displacement)는 자체 제작한 COD 게이지를 사용하였다. 사용한 COD 게이지는 게이지길이 3mm, 측정범위 8mm, 최대표준편차 0.01mm이었다. 균열길이를 결정하는 경우에 하중은 20배 하중선 변위는 40배 증폭하여 컴플라이언스를 측정하여, 결정 과정에서 발생한 오차를 최소한도로 줄였다.

컴플라이언스를 이용하여 균열길이를 측정하는 경우에 발생하는 균열길이 감소현상에 의한 균열길이 감소량은 석⁶⁾ 등이 제안한 방법을 이용하여 보상하였으며, 보상한 균열길이를 최종균열진전량을 결정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 평활 시험편(smooth specimen)과 측면홈 시험편(side-grooved specimen)을 이용하여 JSME R곡선법을 기준으로 실험한 J적분 및 균열증분량의 관계(J-Δa)를 나타낸 것이다.

둔화직선은 인성실험 후 SEM을 사용하여 실측한 2점의 Δa로 구하였으며, 실측 둔화직선식은 $J=3.4 \sigma_y \cdot \Delta a$ 로 나타났다. 이는 탄소성파괴인성 J_{IC} 시험방법(JSME S001-83) 기준서의 결과²⁾와 오⁵⁾ 등의 보고 결과와 잘 일치하므로 둔화직선식으로 채택하였다. 측면홈 시험편의 둔화직선도 평활시험편으로 측정된 결과를 사용하였다. R곡선은

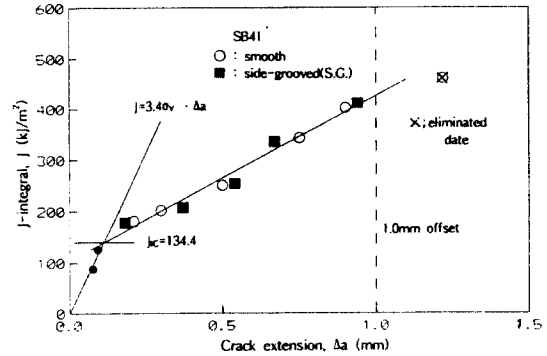


Fig. 5 J resistance curve (JSME S001)

$\Delta a=1.0\text{mm}$ 이하의 실험점을 직선으로 근사시켜 구하였다. 여기서 평활 시험편과 측면홈 시험편에 의한 시험편 종류에 의한 거동의 차이는 거의 나타나지 않아서, 두 시험편의 결과를 합쳐서 R곡선을 구하였다. 둔화직선과 R곡선의 교점 J_{in} 을 구하면, J_{in} 을 구하면, $J_{in}=134.4\text{kJ/m}^2$ 이었다. 이 값은 R곡선의 구배 조건 $(dJ/da)R < 0.5(dJ/da)B$ 및 데이터의 분포 조건인 $(\Delta a_{max} - \Delta a_{in}) > 3(\Delta a_{min} - \Delta a_{in})$ 조건 등을 만족하였으므로 J_{JC}로 결정하였다.

Fig. 6은 평활 시험편을 이용하여 ASTM E813-87을 기준으로 실험한 J-Δa의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 ●, ■ 점과 같이 초기에

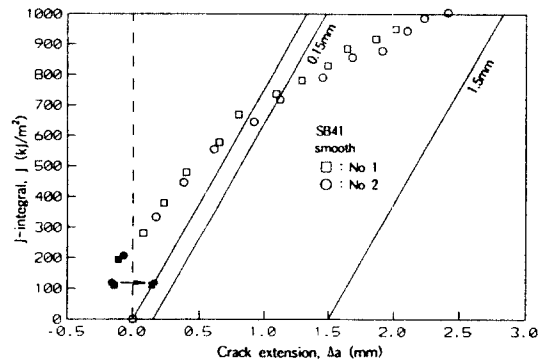


Fig. 6 Negative crack growth phenomenon by unloading compliance method (ASTM E813-87)

균열길이가 감소하는 듯한 현상이 나타나는데, 이를 균열길이 감소현상⁶⁾이라 한다. 이러한 균열길이 감소현상은 ASTM E813의 단일시험편편법으로 저장도, 고인성 재료의 J_{IC} 를 시험할 경우에 나타나는 특이한 현상이며, 제하 컴플라이언스법으로 균열길이를 측정할 때 균열길이가 초기에 초기 균열길이(a_0)보다 오히려 감소한 후에 증가하는 현상이다. 이러한 균열길이의 감소는 실제로 존재하지 않는 현상이며, 결국 실험과 해석상의 오차라고 할 수 있다. 이 현상은 하중을 제거할 때 균열선단의 압축응력에 의한 균열닫힘에 의한 것이며, 연성이나 인성이 큰 재료에서 크게 나타난다고 보고⁶⁾되고 있다. 이러한 결과는 균열길이의 일정한 보정이 필요하며, 여기서는 현재 제안되어 있는 여러가지 보정방법 중에서 석⁶⁾ 등이 제안한 오프셋법을 사용하여 실험 데이터를 보정하였다. 이 방법은 Fig. 6처럼 최대 균열길이가 감소점과 둔화직선 사이의 거리만큼 X축 방향으로 모든 데이터의 Δa 를 증가시킴으로 보정하는 방법이다.

Fig. 7은 Fig. 6의 결과에서 균열감소량을 보정한 Δa 를 이용하여 $J-\Delta a$ 의 관계를 정리한 것이다. 유효한 데이터의 처리 항목 중에 $J_{max}=b \cdot \sigma_Y/15$ 에 의한 오프셋을 적용하지 않고 J_Q 를 구하면 J_Q 는 $J_Q=634.4$ 및 558.8 kJ/m^2 이 되어 평균 J_Q 는 $J_Q=596.6 \text{ kJ/m}^2$ 이 되었다. 이값은 $B \cdot b \geq 25(J/\sigma_Y)$ 로 주어지는 J 의 유효조건을 만족하지 않으며, JSME S001 기준으로 결정된 J_{IC} =

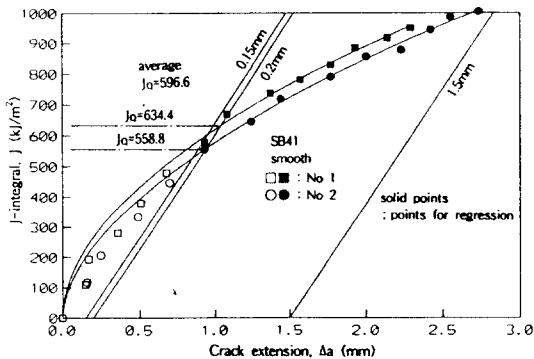


Fig. 7 J resistance curve corrected by offset technique (ASTM E813-87)

133.4 kJ/m^2 에 비하면 현저히 과대하게 평가되고 있어서 유효한 값으로 판정할 수가 없었다.

Fig. 8은 측면홈 시험편을 이용하여 실험한 $J-\Delta a$ 의 결과를 나타낸 것이다. 측면홈 시험편의 경우는 평활 시험편의 경우처럼 균열감소현상은 발생하지 않았다. J_{max} 에 의한 오프셋을 적용하면 2-3개 정도의 유효한 데이터가 존재하지만 이를 적용하지 않고 J_Q 를 구하면, $J_Q=436.6$ 및 431.7 kJ/m^2 이 되어 평균 $J_Q=434.2 \text{ kJ/m}^2$ 이었다. 이값을 평활 시험편의 J_Q 값과 비교하여 감소하기는 하였으나, 역시 $B, b \geq 25(J_{IC}/\sigma_Y)$ 의 J_{IC} 의 유효조건을 만족하지 않으며, JSME S001-83 기준에 의하여 평가한 J_{IC} 값에 비하여 과대하여 평가되어 유효한 값으로 평가할 수 없었다.

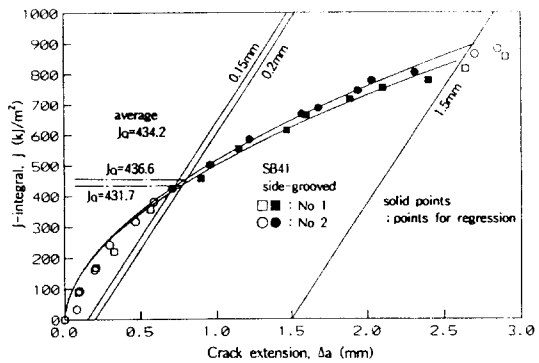


Fig. 8 J resistance curve (ASTM E813-87)

Fig. 9는 평활 시험편과 측면홈 시험편의 파괴 거동을 비교하기 위하여 Fig. 7 및 Fig. 8의 결과를 동일 그림에서 나타낸 것이다. 측면홈 시험편은 평활 시험편에 비해서 R곡선의 기울기가 작게 나타나며 전체 데이터에서 동일 Δa 에 대한 J 값이 작게 나타나고 있다. 이러한 $J-\Delta a$ 거동에 따라 결과적으로 측면홈 시험편의 J_Q 값이 작게 되지만 ASTM E813 기준에 의하여 J_{IC} 평가를 실시한 두 경우 모두 유효한 J_{IC} 값을 구할 수 없었다.

결과적으로 ASTM R곡선법을 이용하여 J_{IC} 결정하는 이상의 결과에서 저장도, 고인성재인 SB41 강을 현재의 시험편의 사이즈 조건($W=$

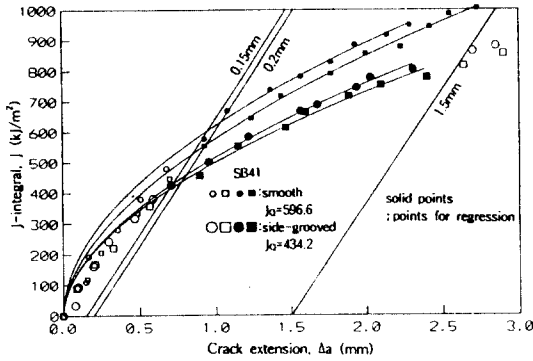


Fig. 9 J resistance curve (ASTM E813-87)

50.8mm, $t=14\text{mm}$)으로 J_{IC} 를 평가하는 것은 부적합함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 SM50A를 사용하여 실험한 Ohji³⁾ 등의 보고에서도 보여지며, 유효한 R곡선이 구하여진 경우에도 J_{IC} 값이 과대하게 평가되는 위험이 있음이 지적되고 있다. 이는 일반적으로 둔화직선이 $J=2\sigma_Y \cdot \Delta a$ 이라는 가정이 잘못되었기 때문에 발생한다는 보고³⁻⁵⁾가 있다. 본 실험에서 JSME S001에서 추천하는 3점(3/8, 4/8, 5/8)을 평균한 Δa 를 이용하여 평가한 SB41 강의 둔화직선식은 $J=3.4\sigma_Y \cdot \Delta a$ 이며, Ohji 등이 SM50A에 대하여 구한 경우는 $J=3.7\sigma_Y \cdot \Delta a$ 이고, Mill⁴⁾ 이 4종류의 저항도, 고변형을 경화재에서 구한 둔화식은 $J=4\sigma_Y \cdot \Delta a$ 이었다. 이는 실측하여 구한 둔화직선식은 이론식과 상당한 차이가 있음을 말한다. 그러므로 ASTM E813법에 기준하여 고인성재의 파괴인성을 시험하는 경우에 둔화식의 문제는 고려해야할 사항이다.

따라서 ASTM E813법으로 본 재료의 J_{IC} 평가를 가능하게 하기 위해서는 시험편의 사이즈 조건(특히 두께)을 증가시키거나 ASTM E813에서 추천하는 기준둔화직선보다 실측에 의한 둔화직선을 적용하는 것이 고려되어야 한다. 이러한 문제와 관련하여, ASTM E813-83 기준에 대한 연구 중에 실측의 둔화직선을 사용하면 저항도, 고인성의 재료에서도 유효한 데이터를 얻을 수 있다는 보고^{5,7)}가 있으나 ASTM E813-87에 대한 연구는 아직 보고되지 않고 있다.

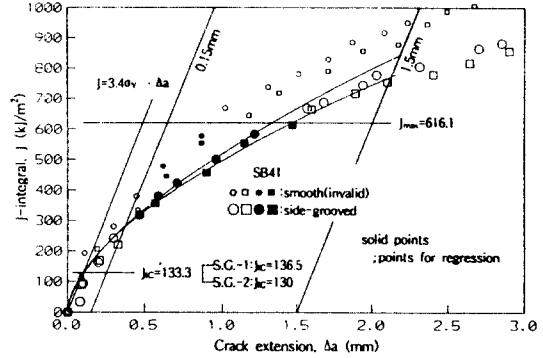


Fig. 10 J_{IC} determination technique by blunting line and J-R curve

Fig. 10은 평활 및 측면홈 시험편을 이용하여 ASTM E813-87를 기준으로 실험한 $J-\Delta a$ 데이터를 실측한 둔화직선을 이용하여 J_{IC} 를 평가하기 위한 그림이다. 둔화직선식은 JSME S001-83에서 추천하는 3점(3/8, 4/8, 5/8)을 평균한 Δa 를 이용한 Fig. 4의 결과($J=3.4\sigma_Y \cdot \Delta a$)를 이용하였다. R곡선부는 0.15mm, 1.5mm 및 J_{max} 에 의한 오프셋선 범위 안에 존재하는 데이터를 사용하여 지수근사(power law regression)시켜서 구하였다. J_Q 는 실측 둔화직선과 R곡선의 교점으로 결정하였다.

결과적으로 평활 시험편의 경우는 두 시험편 모두 유효한 데이터가 2개만 나타나서 유효 데이터가 4개이어야 하는 조건을 만족하지 않았기 때문에 J_Q 로 결정할 수 없었다. 그러나 측면홈 시험편의 경우는 두 시험편 모두 모든 유효조건을 만족하고 각각 $J_Q=136.6$ 및 130.0 kJ/m^2 을 나타내어, 평균값이 $J_Q=133.3 \text{ kJ/m}^2$ 이었다. 결과값 $J_Q=133.3 \text{ kJ/m}^2$ 는 시험편의 사이즈 조건 등을 만족하여 J_{IC} 로 결정할 수 있었다.

이 결과값은 이론적인 둔화직선($J=2\sigma_Y \cdot \Delta a$)을 이용한 기존의 ASTM E813-87법을 기준으로 구한 J_Q 와 현저한 차이를 보였으며, JSME S001 방법을 이용하여 평가한 $J_{IC}=133.4 \text{ kJ/m}^2$ 값과 비교하며 2% 이내의 오차를 보이는 좋은 결과를 나타냈다. 따라서 이는 저항도, 고인성 재료인 SB41 강재의 경우에도, 본 연구의 시험편 사이즈

조건($W=50.8$ mm, $t=14$ mm)의 측면홈 시험편을 사용하여, 실측한 둔화직선과 ASTM E813-87 단일시험편법으로 구한 R곡선의 교점을 이용하면 유효한 탄소성파괴인성 J_{IC} 값을 구할 수 있는 가능성을 제시한다.

5. 결 론

JSME S001 방법과 ASTM E813 방법을 기준으로 저강도, 고인성 재료인 일반구조용 압연강재 SB41 강의 평활 시험편과 측면홈 시험편을 사용하여 각각 탄소성파괴인성 J_{IC} 시험을 실시하고, 두 시험 방법 및 시험편의 결과를 비교 및 검토하였으며, 시험이 결과를 기초로 기존의 ASTM E813 방법의 적용한계를 구명하였다.

ASTM E813 단일시험편법에서 둔화직선을 직접 측정하여 실측둔화직선을 J_{IC} 평가에 적용함으로써, J_{IC} 를 평가하는 경우에 결과를 분석하여 이 방법의 유용성을 검토하였다.

실험을 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. ASTM S001-83 기준으로 R곡선부를 결정한 경우에, R곡선에 대한 평활 시험편과 측면홈 시험편에 따른 시험편 영향은 나타나지 않았으며, 이 기준에 의한 본 SB41 강의 탄소성파괴인성값은 $J_{IC}=134.4$ kJ/m²이었다.
2. ASTM E813-87 단일시험편법을 기준으로 본 SB41 강의 J_{IC} 를 평가하는 경우에는 유효한 값을 얻을 수 없었다.
3. 실험에 의하여 직접 측정된 실측 둔화직선은 $J=3.4 \sigma_Y \cdot \Delta a$ 로 나타났으며, 이는 ASTM E813에서 제시한 이론 둔화직선 $J=2 \sigma_Y \cdot \Delta a$ 과는 상당한 차이가 있었다.
4. ASTM E813-87 단일시험편법에서 둔화직선을 실측하여 적용하고, 둔화직선과 R곡선의 교점을 이용하여 $J_{IC}=133.3$ kJ/m²이로 평가되어 JSME S001-83 방법으로 구한 결과 값과 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

1. ASTM standard, "Standard Test Method for J_{IC} , A MEASURE OF FRACTURE TOUGHNESS", E813, 1987.
2. 日本器械工學會基準, "彈塑性破壞韌性 J_{IC} 試驗方法", JSME-S001, 1983.
3. 大路青嗣 外 3名, "R曲線法およびストレッチゾン幅法によるHT80, SM50Aおよび2017-T4の破壊じん性評價", 日本器械學會論文集, 第31卷, 第344號, pp. 425-429, 1982.
4. Mills, W.T., J. Testing and Evaluation, Vol. 9, No. 1, p. 56, 1981.
5. 오세욱, 안광주, 윤영재, "SB41 鋼의 平滑 및 側面홈 CT 試驗片의 J_{IC} 評價", 대한기계학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 494-503, 1986.
6. 석창성, 최용식, "J-R곡선에서의 균열길이 감소현상에 대한 연구(II)", 대한기계학회논문집, 제16권, 제9호, pp. 1627-1631, 1892.
7. 中村春夫 外 3名, "A533B-1 鋼의 彈塑性破壞じん性および破壊抵抗の評價", 材料, 第32卷, 第63號, pp. 1340-1344, 1983.