

◎ 論 文

원자력 압력용기강(SA508-3)의 탄소성 파괴인성 평가⁺

오 세 옥* · 윤 한 기** · 임 만 배***

(1993년 8월 31일 접수)

The Evaluation for Elastic-Plastic Fracture Toughness in a Reactor Pressure Vessel Steel(SA508-3)

Sae-Wook Oh, Han-Ki Yoon, Man-Bae Lim

Key word : Elastic-Plastic Fracture Toughness(탄소성 파괴인성), Blunting Line(둔화직선), R-curve(R곡선), Stretched Zone Width(스트레치존 폭)

Abstract

The elastic-plastic fracture toughness J_{IC} of Nuclear Reactor Vessel Steel(SA 508-3) which has high toughness was discussed at temperatures RT, -20°C , 200°C and 1/2 CT specimen was used for this study. Especially the two methods recommended in ASTM and JSME were compared. It was difficult to find J_{IC} by ASTM R-curve method with the specimen used for this research, while JSME R-curve method yielded good result.

The stretched zone width method gave slightly larger J_{IC} values than those by the R-curve method for SA 508-3 steel.

1. 서 론

원자로 용기등의 핵증기 공급계통(nuclear steam supply system)내에 있는 압력용기들은 원자력 발전소의 안전성(safety) 및 건전성(integrity)에 가장 중요한 부품들로서 제작되는 물론

가동중에도 건전성의 점검이 필요하고 이들 실험과 검사는 파괴역학적으로 해석해서 판단되어야 한다.

파괴에 대한 저항치로써의 파괴인성평가는 재료나 구조물의 설계 및 평가를 위하여 매우 중요하게 되었다. 파괴인성은 소규모항복의 경우에는 선형탄성파괴역학에 따른 에너지해방률 G 혹은

+ 1993년도 해양공학회 춘계 학술대회 발표(1993년 6월)

* 동아대학교 공과대학 기계공학과

** 동의대학교 공과대학 기계설계학과

*** 동아대학교 대학원 기계공학과

응력확대계수 K 로써 표현된다. 응력확대계수 K 를 파괴의 파라메타로 할 때는 크랙선단에서 소성역의 크기가 크랙치수에 비하여 대단히 작을 경우에 한해서 유효하다. 따라서 평면변형을 파괴인성 K_{Ic} 시험에서는 이러한 소규모항복 조건을 감안하여 시험편의 최소치수를 엄격하게 규정하고 있다.¹⁾ 기거나 구조물의 파괴에 있어서 불안정파괴에 선행하여 큰 소성변형이 일어날때 혹은 설계기준으로 어느정도의 한계까지는 소성변형을 허용할때에는 탄소성상태의 파괴인성을 평가하는 것이 유익하다. 이러한 대규모항복상태에서의 파괴인성평가는 비선형적인 탄소성파괴역학에 따른 크랙선단 열림변위 CTOD 혹은 J 적분으로써 표현하게 되었다.

Rice²⁾에 의하여 제안된 J 적분은 탄성 및 탄소성 변형상태에서 크랙선단 주위의 특이응력 및 스트레인의 양의 강도에 대한 대표치로써 소규모 항복상태에서의 응력확대계수 K 와 같은 의의를 갖게 된다. Begley와 Landes³⁾는 탄성상태의 K_{Ic} 평가처럼 탄소성 평면변형율파괴인성치로 J_{Ic} 를 제안하였고, 이러한 J_{Ic} 의 개념은 많은 연구 결과^{4),5)}에 의하여 그 유효성이 확인되었다. J_{Ic} 평가기준인 ASTM E813-81,⁶⁾과 JSME S001-81⁷⁾에서 ASTM의 R곡선법은 시험의 간편성과 재현성에 중점을 두고 크랙길이를 한정하고 있으며, 이 한계를 벗어나는 크랙은 유효실험점에서 제외하고 있다. 한편 JSME법에서는 크랙길이의 작은 한계는 설정하지 않았고, 크랙발생점을 가능한 한 정확히 구하는 것에 중점을 두고 있다.

본 연구는 SA508-3 단조강을 이용하여 파괴인성값을 ASME E813-81⁶⁾과 JSME S001-81⁷⁾의 R곡선법과 SZW법을 비교하여 해석방법의 차이를 고찰하였고 또한 파괴인성 값에 미치는 온도 영향을 고찰하기 위해서 실험온도를 실온, -20°C , 200°C 로 하여 비교검토했다.

2. 시험편과 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 원자로 압력용기에 사용되는 SA508-3 단조강이며, 소재의 화학적 성분은 Table 1과 같으며, 각 온도에서의 기계적

성질은 Table 2와 같다. 시험편은 ASTM E 813-81⁸⁾ 및 JSME S001-81⁷⁾ 규격에 준하여 1/2CT(폭 $W=25.5\text{mm}$, 두께 $B=12.5\text{mm}$) 시험편을 사용했으며, 시험편의 치수는 Fig. 1과 같이 가공하였다. 피로예크랙도입과 파괴인성시험은 전기유압식피로시험기를 사용하였으며 피로 예크랙은 ASTM Standard E399¹⁾와 E813⁶⁾의 규정을 따랐으며, 구체적인 조건은 다음과 같다.

측 분위기는 실온대기중이며, 하중파형은 일정하중의 정현파로 하여 크랙비가 $a/W=0.6$ 이 되게 하였으며, 이때 피로하중의 최대응력확대계수 $K_{I\text{-max}}$ 은 $K_{I\text{-max}}=92.74\text{kgfmm}^{-3/2}$ 되게 하였다. 피로예크랙의 응력비는 $R=0.05$ 주파수는 20Hz 로 하였으며, 응력확대계수폭 $\Delta K=88.1\text{kgfmm}^{-3/2}$ 로 되게 하였다. 실험온도는 저온 -20°C , 상온 200°C 로 하였으며, 저온 -20°C 는 저온로(Instron Model 31

Table 1. Chemical composition of SA508-3(W_t , %)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.17	1.42	0.004	0.003	0.04	0.98	0.22	0.58	0.003	0.045

Table 2. Mechanical properties of SA508-3

Temp($^{\circ}\text{C}$)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Young modulus (kgf/mm ²)
-20	63.88	48.26	26.8	21810
RT	59.89	45.51	27.8	20930
200	56.02	41.33	25.6	19820

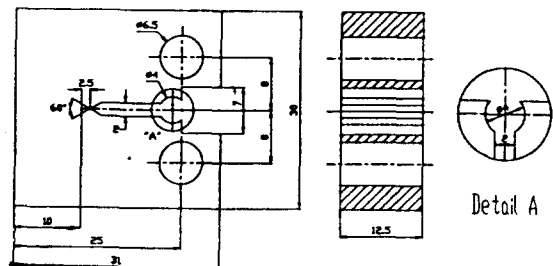


Fig. 1 Configuration and dimensions of compact tension specimen.

11)를 전기유압서보식 피로시험기에 부착하여 저온로에 자동으로 액화 CO₂가스를 사이폰형 봄베에서 공급하였고, 200℃는 노 자체의 온도조절장치를 이용하여 노내의 분위기온도를 유지하기 위하여 약 1시간 온도를 유지하였고, 실험온도의 온도변동은 ±1℃ 이내로 하였다. 변위를 측정하기 위하여 Clip gage를 자작하였으며, 측정범위(gage range)가 3mm 되도록 제작하여 사용하였다. 이것은 측정정밀도가 0.00025mm 있는 캘리브레이터(calibrator)를 이용하여 정밀도를 검사한 결과 최대편차가 0.00228mm 이어서 ASTM standard E 399¹⁾에 규정한 Clip gage의 정밀도를 만족하였다. 파괴인성시험은 단순인장에 의한 하중부하를 매분 0.4mm의 인장속도로 하였고, 제하후에 피로크랙을 다시넣어 표시를 한후 파단시켰다. 실험방법은 ASTM E813-81⁶⁾ 및 JSME S001-81⁷⁾ 기준에 따랐으며, 이동식 현미경(×25)을 이용하여 크랙길이 Δa를 측정하고 주사형 전자현미경(SEM)을 사용하여 스트레치존 폭(SZW)을 측정하였다.

일반적으로 크랙이 진전됨에 따라 항복규모는 크랙전면에 대한 평면응력의 영향을 받아 크랙의 전파상태는 직선형보다는 곡선의 형태를 나타내어지므로 크랙길이의 Δa는 측정방법에 따라 R곡선의 구배 dJ/da가 차이를 나타내므로 Δa측정은 ASTM, JSME방법과 CENTER를 측정하여 각 온도에 따른 J_{IC}를 비교하였으며, 안정파괴 개시점의 J 적분값 J_m(혹은 J_Q)을 구하기 위하여 J적분에 관한 Rice^{8),9)}의 간편식 $J = (2A/B \cdot b)$ 과 Landes¹⁰⁾ 등이 Merkle-Corten¹¹⁾ 식을 간략화한식

$$J = (A/B \cdot b_0) \cdot f(a_0/w)$$

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

$$\alpha = \sqrt{2(a_0/b_0)^2 + 2(2a_0/b_0) + 2} - (2a_0/b_0 + 1)$$

을 이용하여 비교검토 하였다. 여기서 A는 하중-하중선변위 곡선하의 면적 B는 시험편 두께 b₀=W-a₀는 초기 리가먼트 W는 시험편폭 a₀는 초기균열길이 이다. J_m(혹은 J_Q)가 J_{IC}로써 유효한가의 판정은 ASTM 및 JSME의 각각의 기준에 따른 부대조건^{6),7)}에 의하여었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. R곡선법에 의한 J_{IC} 평가

Fig. 2 (a)는 상온에서 ASTM법에 따른 J-Δa_{ASTM}을 나타내었다. 크랙길이 Δa_{ASTM}은 시험편 두께를 8등분하고 표면쪽 2점의 평균치와 내부 7점의 측정치를 합계한 8점의 평균치로 하였다. ASTM 기준에 의하여 권장된 기준둔화직선 $J = 2\sigma_{ys} \Delta a_{ASTM} = 105.41\Delta a_{ASTM}$ 과 R곡선의 교점에서 J_Q를 구하면 J_{Q(M)}}=49.30kgf/mm, J_{Q(R)}}=40.98kgf/mm였다. 여기서 J_Q는 치수조건 b 및 $B < 25J/\sigma_{ys}$ 와 R곡선의 구배조건 $dJ/da < \sigma_{ys}$ 를 만족하지 않기 때문에 J_Q를 J_{IC}로 평가될 수 없었다. 따라서 둔화직선을 실측으로 구하기 위하여 SEM을 이용하여 SZW를 측정하였으며, 파괴개시전에는 SZW=Δa_입으로 둔화직선식은 $J = 3.44\sigma_{ys}\Delta a$ 이었으며, 이 식과 R곡선의 교점에서 J_Q를 구하면 J_{Q(M)}}=27.01kgf/mm, J_{Q(R)}}=24.81kgf/mm였으며, J_Q는 치수조건과 R곡선의 구배조건을 만족하였다. 이와같이 이론식에 의한 둔화직선 $J = 2\sigma_{ys} \Delta a$ 와 실측에 의한 둔화직선 $J = 3.44\sigma_{ys} \Delta a = 181.2\Delta a$ 를 비교하여 불

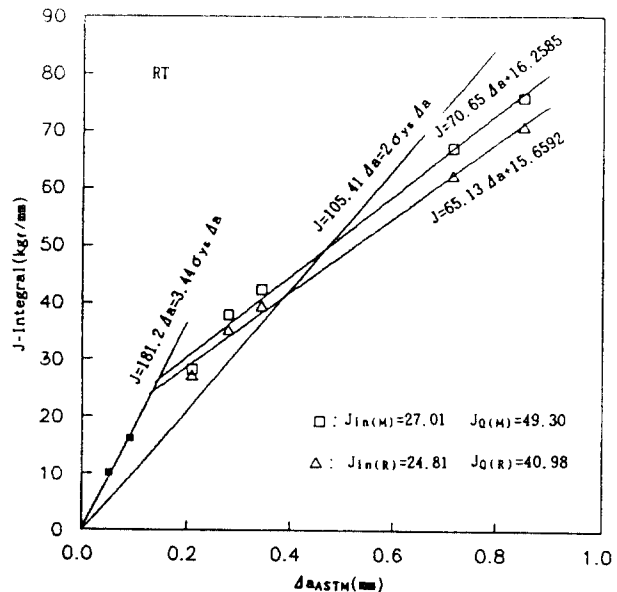


Fig. 2 (a) The determination J_Q with ASTM R-curve Method

때 오차가 크므로 이론식에 의한 둔화직선으로 J_Q 를 평가하는 것은 본 재료에서는 타당하지 않다고 생각된다. 이는 Kobayashi^{(12), (13)} 등이 A533B-1강에 대하여 J_{IC} 를 평가할때 ASTM R곡선법보다 JSME법을 권장하고 있는 보고와도 잘 일치하였다. 따라서 이러한 고인성재에 대한 ASTM R곡선법으로 J_{IC} 평가를 가능하게 하기 위해서는 1) 시험편의 판두께를 증가시키거나, 2) side-groove(측면홈)를 가공하거나, 3) ASTM 기준에서 권장된 기준둔화직선보다 실측둔화직선을 적용해야 할 것이다. 따라서 ASTM R곡선법에 의하여 J_{IC} 를 평가할 때에는 재료에 따른 각각의 둔화직선을 실측하여 구함으로써 유효한 평가가 가능하고 타당한 것으로 생각된다.

Mills⁽¹⁴⁾등은 SM50A강의 둔화직선식은 $J=3.7\sigma_{ys}\Delta a$ 이며, 저강도 고 변형경화재는 $J=4\sigma_{ys}\Delta a$ 로 됨을 실측에 의하여 구하였다. 이러한 이론식의 둔화직선보다 실측의 둔화직선이 신뢰성이 크다는 보고를 하였으며, 실측의 필요성을 강조하였다. Fig. 2 (b)는 상온에서 JSME 법에 의하여 $J-\Delta a_{JSME}$ 을 나타내었다. 둔화직선을 실측으로 구하

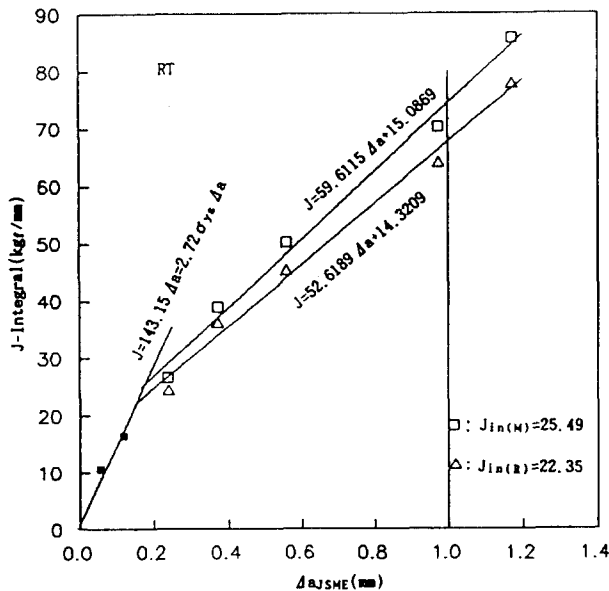


Fig. 2 (b) The determination J_m with JSME R-curve Method(Three point : 3/8~5/8)

기 위하여 SEM을 이용하여 3점에 따라 Δa 를 측정하였으며, 실측에 의한 둔화직선식은 $J=143.15\Delta a_{JSME}=2.72\sigma_{ys}\Delta a_{JSME}$ 로 되었다. R곡선의 Δa_{JSME} 는 판두께의 3/8, 4/8 및 5/8의 3점에서 측정하고 이를 3점의 평균치로 하였다. R곡선은 $\Delta a_{JSME}=1.0$ mm 이내의 실험점 4개로써 최소자승법에 의하여 직선 근사시켜 구하였다. Δa_{JSME} 가 1.0mm 이상의 실험점은 무효처리하였다. 둔화직선과 R곡선과의 교점에서 J_m 을 구하면 $J_{m(M)}=25.49\text{kgf/mm}$, $J_{m(R)}=22.35\text{kgf/mm}$ 로 되었다. R곡선의 구배조건 $(dJ/da)_R < 1/2(dJ/da)_B$ 를 만족하고 $(\Delta a_{max}-\Delta a_m) > 3(\Delta a_{min}-\Delta a_m)$ 의 조건등을 만족하였으므로 JSME R곡선법으로 구한 J_m 은 J_{IC} 로 평가될 수 있었다. ASTM R곡선법으로 구한 J_Q 와 JSME R곡선법으로 구한 J_m 을 비교하면 J_Q 는 J_m 보다 과대평가됨을 알 수 있다. ASTM R곡선법에서도 실측에 의한 둔화직선을 이용하여 J_Q 를 구한다면 J_Q 는 J_m 에 비하여 어느정도 근사한 차이를 보이며, 이 근사한 차이는 첫째 크랙길이의 측정방법 차 때문에 생기는 R곡선의 구배차이에 기인하며, 둘째 ASTM과 JSME 기준둔화직선과의 차이에서 나타난다. 따라서 ASTM의 기준둔화직선이 실측에 의한 둔화직선과 크게 상이한 재질에 대해서는 J_{IC} 평가는 ASTM R곡선법으로 구할 수 없는 것으로 생각되며 JSME R곡선법에 따른 것이 무난하다. Fig. 2 (c)는 상온에서 $J-\Delta a_{max}$ 관계를 나타내었다.

둔화직선과 R곡선의 크랙길이를 중앙부분(4/8) 지점에서 SEM을 이용하여 측정하였으며, 둔화직선식은 $J=138.54\Delta a_{max}=2.63\sigma_{ys}\Delta a_{max}$ 로 되었다. R곡선은 각각 실험점을 최소자승법에 의하여 직선 근사시켜 구하였고, 둔화직선과 R곡선과의 교점에서 J_{max} 을 구하면 $J_{max(M)}=24.74\text{kgf/mm}$, $J_{max(R)}=22.58\text{kgf/mm}$ 로 되었다.

Fig. 3 (a)는 저온 -20°C 에서 $J-\Delta a_{ASTM}$ 관계를 나타내었다. ASTM 기준에 의한 둔화직선식 $J=2\sigma_{ys}\Delta a_{ASTM}=112.15\Delta a_{ASTM}$ 과 R곡선의 교점에서 J_Q 를 구하면 $J_{Q(M)}=32.67\text{kgf/mm}$, $J_{Q(R)}=26.39\text{kgf/mm}$ 였다. 여기서 J_Q 는 치수조건 및 부대조건을 만족하지 않기 때문에 J_Q 를 J_{IC} 로 평가할 수 없었다. 실측한 둔화직선식은 $J=165.09\Delta a=2.94\sigma_{ys}\Delta a$ 로 되었으며, R곡선과의 교점에서 J_Q 를 구하면 $J_{Q(M)}=$

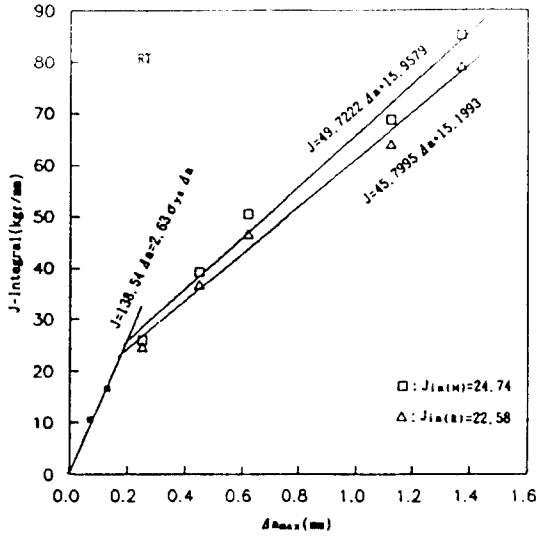


Fig. 2 (c) The determination J_{in} with JSME R-curve Method(One point : 4/8)

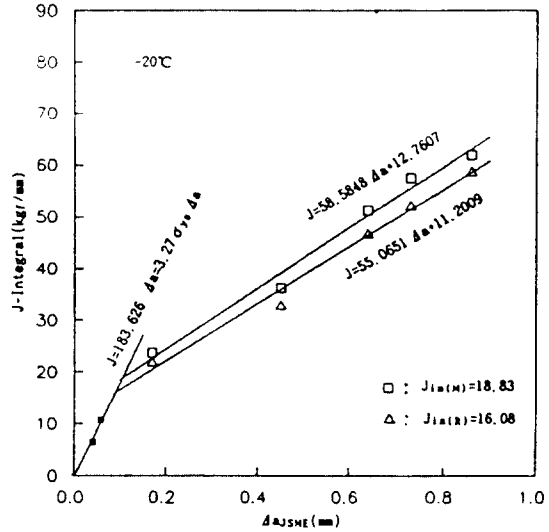


Fig. 3 (b) The determination J_{in} with JSME R-curve Method(Three point : 3/8~5/8)

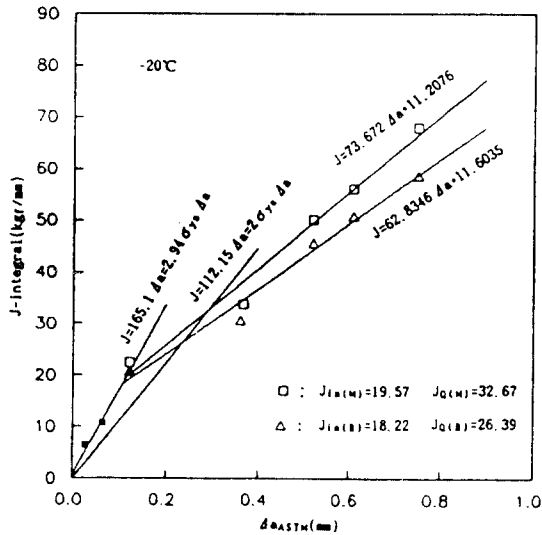


Fig. 3 (a) The determination J_Q with ASTM R-curve Method

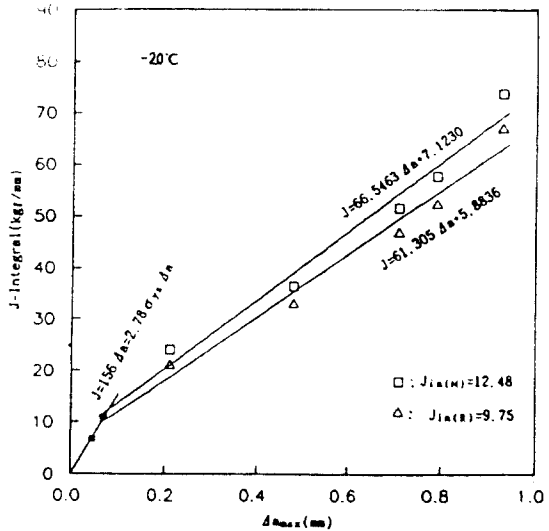


Fig. 3 (c) The determination J_{in} with JSME R-curve Method(One point : 4/8)

19.57kgf/mm, $J_{Q(R)}=18.22$ kgf/mm 였으며, J_Q 는 치수조건과 부대조건을 만족하여 J_{IC} 로 평가 할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3.(b)는 저온 -20°C 에서 $J-\Delta a_{JSME}$ 의 관계를 나타내었다. JSME 기준에 의한 둔화직선식은 $J=183.63\Delta a_{JSME}=3.27\sigma_{ys}\Delta a_{JSME}$ 로

이고 R곡선과의 교점에서 J_{in} 을 구하면 $J_{in(M)}=18.83$ kgf/mm, $J_{in(R)}=16.08$ kgf/mm로 되었고, JSME에 규정되어 만족되어 J_{IC} 로 평가 할 수 있었다. Fig. 3.(c)는 저온 -20°C 에서 $J-\Delta a_{max}$ 관계를 나타내었다. 둔화직선식은 $J=155.99\Delta a_{max}=2.78\sigma_{ys}\Delta a_{max}$

로 되었고, 직선근사시켜 구한 R곡선과의 교점에서 J_{max} 을 구하면 $J_{max(M)} = 12.48\text{kgf/mm}$, $J_{max(R)} = 9.75\text{kgf/mm}$ 였다. Fig. 4 (a)는 200°C 에서 $J-\Delta a_{ASTM}$ 의 관계를 나타내었다. 기준둔화직선은 $J = 2\sigma_{ys}\Delta a_{ASTM} = 97.35\Delta a_{ASTM}$ 이고 R곡선과의 교점에서 J_Q 를 구

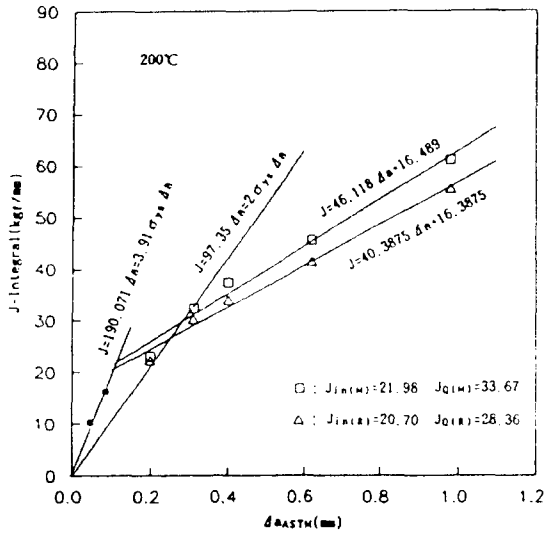


Fig. 4 (a) The determination J_Q with ASTM R-curve Method

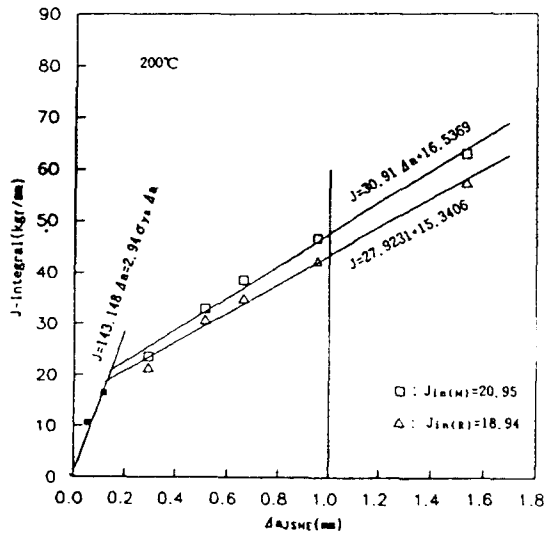


Fig. 4 (b) The determination J_{in} with JSME R-curve Method(Three point : 3/8~5/8)

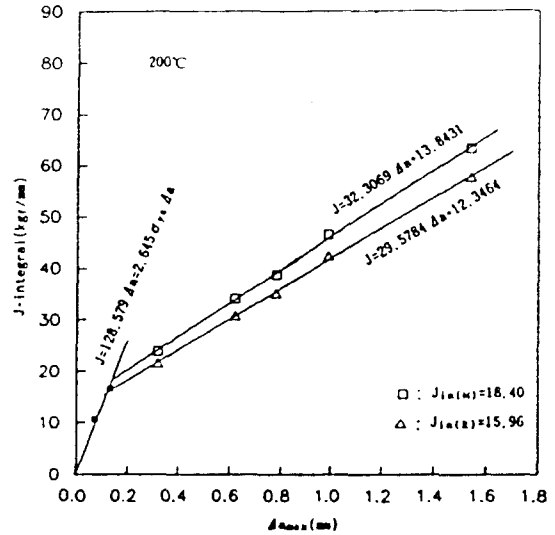


Fig. 4 (c) The determination J_{in} with JSME R-curve Method(One point : 4/8)

하면 $J_{Q(M)} = 33.67\text{kgf/mm}$, $J_{Q(R)} = 28.36\text{kgf/mm}$ 이고 200°C 에서도 J_Q 의 치수조건 및 부대조건을 검토한 결과 만족되지 않았다. 따라서 실측한 둔화직선식은 $J = 190.0\Delta a_{ASTM} = 3.91\sigma_{ys}\Delta a_{ASTM}$ 이었으며, R곡선의 교점에서 J_Q 를 구하면 $J_{Q(M)} = 23.96\text{kgf/mm}$, $J_{Q(R)} = 21.06\text{kgf/mm}$ 이었다. 여기서 J_Q 는 치수조건 및 부대조건이 만족되어졌다. Fig. 4 (b)는 200°C 에서 $J-\Delta a_{JSME}$ 의 관계를 나타내었다. 둔화직선식은 $J = 143.14\Delta a_{JSME} = 2.94\sigma_{ys}\Delta a_{JSME}$ 로 되었으며, 둔화직선은 R곡선의 교점에서 J_{in} 을 구하면 $J_{in(M)} = 20.95\text{kgf/mm}$, $J_{in(R)} = 18.94\text{kgf/mm}$ 로 되었다. Fig. 4 (c)는 200°C 에서 $J-\Delta a_{max}$ 의 관계를 나타내었고, 둔화직선식은 $J = 128.58\Delta a_{max} = 2.65\sigma_{ys}\Delta a_{max}$ 이고 R곡선과의 교점에서 $J_{max(M)} = 18.40\text{kgf/mm}$, $J_{max(R)} = 15.43\text{kgf/mm}$ 이었다.

3-2. 스트레치존(SZW)법에 의한 J_{IC} 평가

Fig. 5 (a)(b)(c)는 상온에서 $SZW_{ASTM}-J$, $SZW_{JSME}-J$, $SZW_{max}-J$ 의 관계를 나타내었다. Fig(a)는 시험편 두께를 8등분하고 표면쪽 2점의 평균치와 내부7점의 측정치를 합제한 8점평균치로 SZW를 측정하였다. 측정된 SZW가 크랙길이 Δa 보다 작

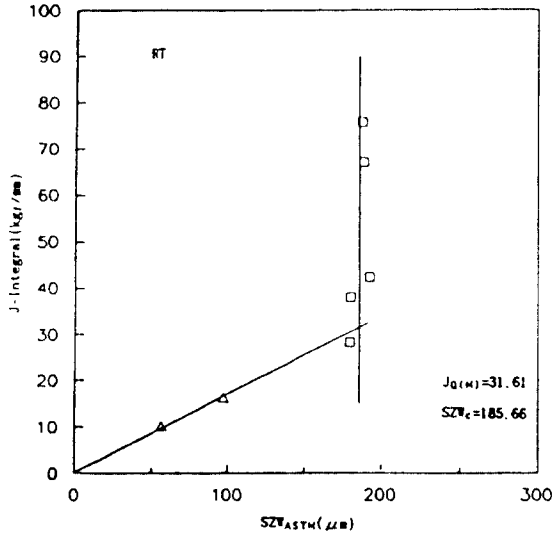


Fig. 5 (a) The determination J_Q with SZW_{ASTM} Method

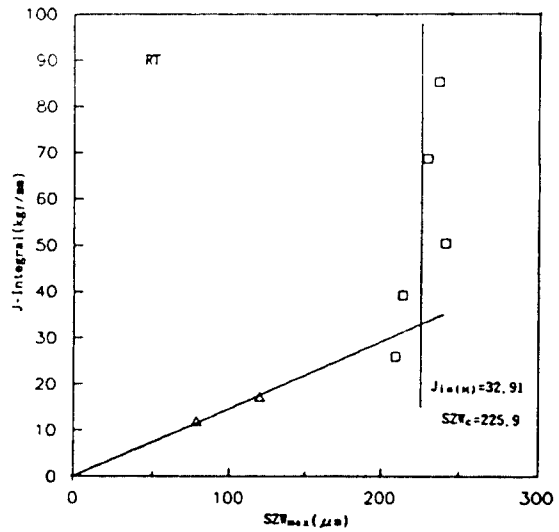


Fig. 5 (c) The determination J_{In} with SZW_{max} Method (One point : 4/8)

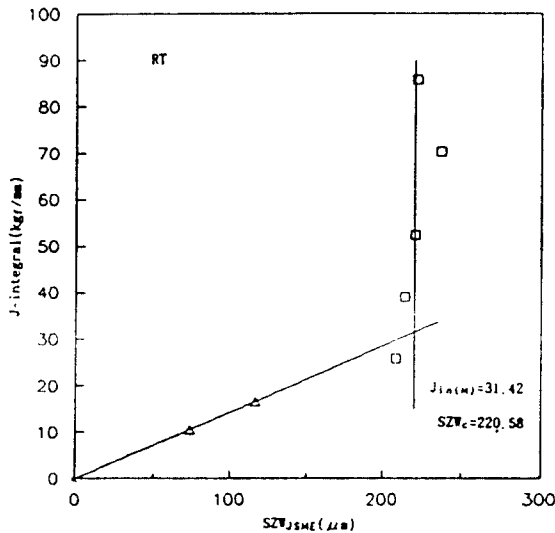


Fig. 5 (b) The determination J_{In} with SZW_{JSME} Method (Three points : 3/8~5/8)

거나 각 측정위치에서 SZW와 이에 인접한 연성 인열 파괴영역의 경계길이 총합이 $\sum_{i=1}^n L_i$ 의 20% 이상의 것은 SZW_c 로 보았다. 본 실험재 SA508-3 장에서 SZW를 측정함에 있어서 스트레치존(SZ)과 덤플(dimple) 영역의 경계가 불명확한 부분도

관찰되어졌으며, 특히 200°C 분위기에서 많이 관찰되어졌다. 상온에서의 $SZW_{c(ASTM)}$ 의 평균치는 187.5 μm 였고, 둔화직선과 교점에서 구한 $J_{Q(M)} = 31.7 \text{ kgf/mm}$ 였다. Fig. 5 (b)는 시험편두께의 3/8, 4/8, 5/8점에서 SZW를 측정하여 평균치로 하였으며, $SZW_{c(JSME)}$ 의 평균치는 220.85 μm 이고 둔화직선과 교점에서 구한 $J_{IC} = 31.42 \text{ kgf/mm}$ 였다. Fig. 5. (c)는 중앙부분의 SZW를 측정한 $SZW_{c(max)}$ 는 225.9 μm 이고 둔화직선과의 교점에서 구한 $J_{IC} = 32.91 \text{ kgf/mm}$ 였다.

본 실험에서 상온 R곡선으로 J_{IC} 를 평가한 것보다 스트레치존쪽으로 평가된 J_{IC} 가 과대 평가되어졌다. Ohji¹⁵⁾ 등은 연성이 풍부한 재료에서 스트레치존법으로 구한 J_{IC} 가 R곡선에 의해 구한 것보다 과대평가된다고 보고하고 있으며, Mutoh¹⁶⁾ 등은 스트레치존은 연성균열 발생후에도 그 길이가 짧은 사이에 변형을 받기 때문인 것으로 생각된다고 보고하고 있다. 이러한 원인은 안정균열성장후에도 소성둔화가 계속일어나거나 또는 소성둔화영역에 연성분단이 일어나 덤플(dimple)이 개재되어 한계 스트레치존쪽(SZW_c)이 과대평가되기 때문이라고 지적하고 있다.

Fig. 6 (a), (b), (c)는 저온 -20°C에서 SZW_A -

STM-J, $SZW_{J_{SME}}-J$, $SZW_{max}-J$ 의 관계를 나타내었다. Fig. 6 (a)에서 한계스트레치존(SZW_c)은 $SZW_{c(STM)} = 153.26\mu m$ 이었고, 둔화직선과의 교점에서 $J_Q = 24.37\text{kgf/mm}$ 였으며, Fig. 6 (b)에서는 $SZW_{c(J_{SME})} = 200.58\mu m$ 였고, $J_{IC} = 23.82\text{kgf/mm}$ 였다. Fig. 6 (c)에서는 $SZW_{c(MAX)} = 219\mu m$, $J_{IC} = 26.1\text{kgf/mm}$ 이

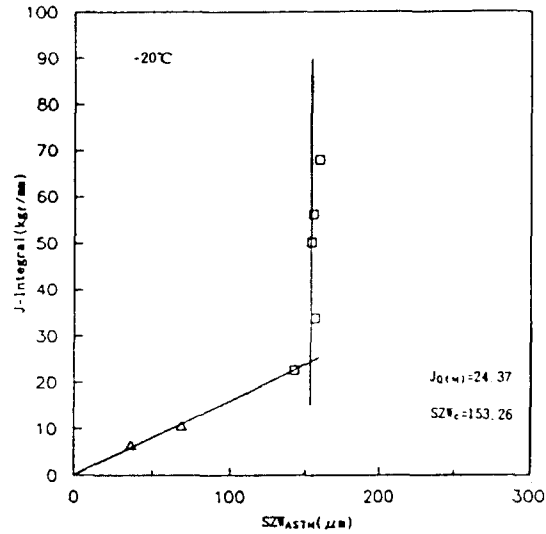


Fig. 6 (a) The determination J_Q with SZW_{ASTM} Method

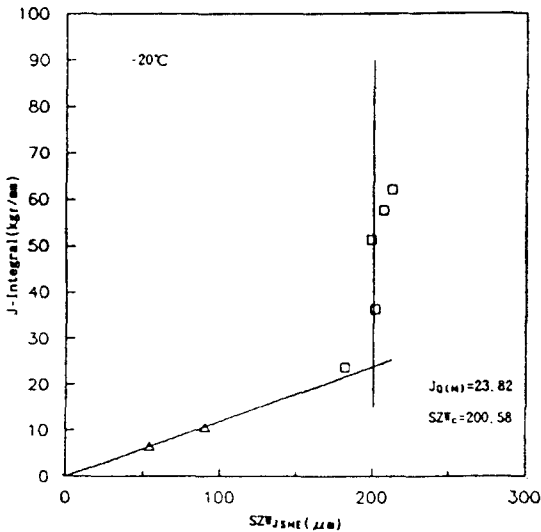


Fig. 6 (b) The determination J_{in} with $SZW_{J_{SME}}$ Method(Three point : 3/8~5/8)

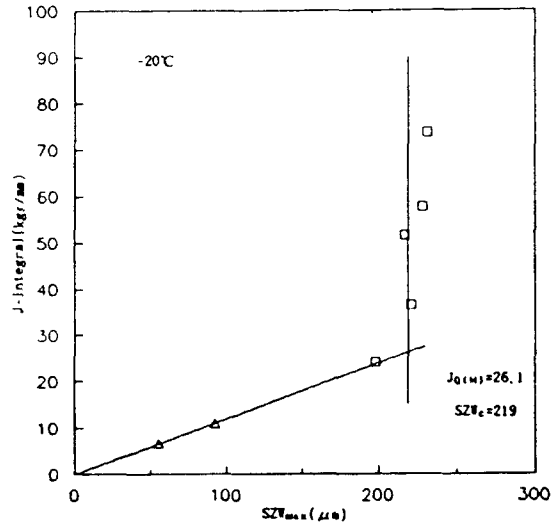


Fig. 6 (c) The determination J_{in} with SZW_{max} Method(One point : 4/8)

었다. Fig. 7 (a), (b), (c)는 $200^\circ C$ 에서 $SZW_{ASTM}-J$, $SZW_{J_{SME}}-J$, $SZW_{max}-J$ 의 관계를 나타내었다. Fig. 7.(a)에서 $SZW_{c(STM)} = 185.66\mu m$, $J_Q = 29.67\text{kgf/mm}$ 이었고, Fig. 7 (b)에서는 $SZW_{c(J_{SME})} = 239.54\mu m$, $J_{IC} = 29.46\text{kgf/mm}$, Fig. 7 (c)에서는 $SZW_{c(max)} = 244.32\mu m$, $J_Q = 29.89\text{kgf/mm}$ 로 평가 되었다.

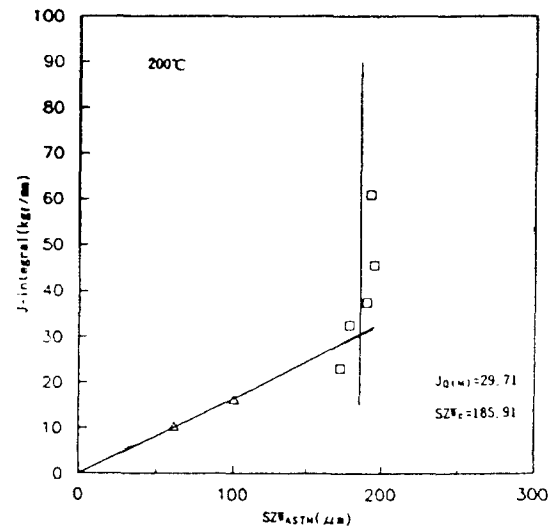


Fig. 7 (a) The determination J_Q with SZW_{ASTM} Method

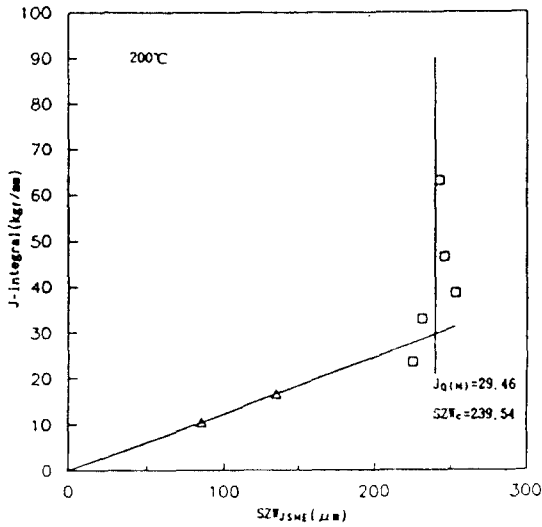


Fig. 7 (b) The determination J_{in} with SZW_{JSME} Method(Three point : 3/8~5/8)

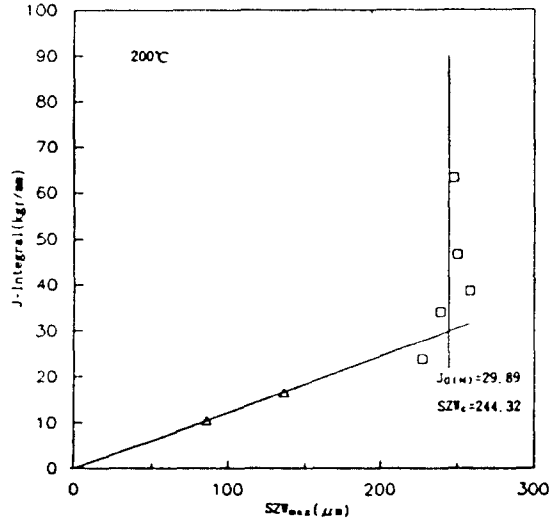


Fig. 7 (c) The determination J_{in} with SZW_{max} Method(One point : 4/8)

3-3. 온도에 따른 J_{IC} 의 평가치 비교

Table 3-1, Table 3-2, Table 3-3은 상온 -20°C, 200°C의 J_{IC} 의 평가를 ASTM R곡선법, JSME R곡선법, SZW_{ASTM} , SZW_{JSME} , SZW_{max} 법에 따른 J_{IC} 값의 실험결과를 비교하여 나타내었다.

상온과 -20°C에서 JSME R곡선과 스트레치존 폭(SZW_{JSME})와의 J_{IC} 를 평가한결과 -20°C의 분위기에서 J_{IC} 값이 낮게 평가되었으며, 그 원인은 저온분위기에서는 항복강도의 영향때문에 둔화직선의 구배와 R곡선의 구배에 기인되며, 또한 SZW_c 의 양차이에 기인되는 것으로 생각된다. 상온과

Table 3-1. The test result of SA508-3 at RT

SZW_c (μm)	SZW_{ASTM}	185.66
	SZW_{JSME}	220.58
	SZW_{MAX}	225.9
Blunting line	ASTM	$J = 2\sigma_{ys}\Delta a = 105.41\Delta a$, $J = 3.44\sigma_{ys}\Delta a = 181.2\Delta a$
	JSME	$J = 2.72\sigma_{ys}\Delta a = 143.15\Delta a$
	MAX	$J = 2.63\sigma_{ys}\Delta a = 138.54\Delta a$
R-line	ASTM	$J_{(M)} = 70.65\Delta a + 16.25$, $J_{(R)} = 65.13\Delta a + 15.66$
	JSME	$J_{(M)} = 59.61\Delta a + 15.09$, $J_{(R)} = 52.62\Delta a + 14.32$
	MAX	$J_{(M)} = 49.72\Delta a + 15.96$, $J_{(R)} = 45.80\Delta a + 15.20$
$J_{IC(M)}$ SZW (kgf/mm)	ASTM	31.61
	JSME	31.42
	MAX	32.91
$J_{IC(M,R)}$ R-line (kgf/mm)	ASTM	49.30, 40.98 (27.01, 24.81)
	JSME	25.49, 22.35
	MAX	24.74, 22.58

Table 3-2. The test result of SA508-3 at -20°C

SZW _C (μm)	SZW _{ASTM}	153.26
	SZW _{JSME}	200.58
	SZW _{MAX}	219
Blunting line	ASTM	$J = 2\sigma_{ys}\Delta a = 112.15\Delta a$, $J = 2.94\sigma_{ys}\Delta a = 165.09\Delta a$
	JSME	$J = 3.27\sigma_{ys}\Delta a = 183.63\Delta a$
	MAX	$J = 2.78\sigma_{ys}\Delta a = 155.99\Delta a$
R-line	ASTM	$J_{(M)} = 73.67\Delta a + 11.20$, $J_{(R)} = 62.83\Delta a + 11.60$
	JSME	$J_{(M)} = 58.59\Delta a + 12.76$, $J_{(R)} = 55.07\Delta a + 11.20$
	MAX	$J_{(M)} = 66.55\Delta a + 7.12$, $J_{(R)} = 61.31\Delta a + 5.88$
J _{IC(M)} SZW (kgf/mm)	ASTM	24.37
	JSME	23.82
	MAX	26.1
J _{IC(M, R)} R-line (kgf/mm)	ASTM	32.67, 26.39 (19.57, 18.22)
	JSME	18.83, 16.08
	MAX	12.48, 9.75

Table 3-3. The test result of SA508-3 at 200°C

SZW _C (μm)	SZW _{ASTM}	185.91
	SZW _{JSME}	239.54
	SZW _{MAX}	244.32
Blunting line	ASTM	$J = 2\sigma_{ys}\Delta a = 97.35\Delta a$, $J = 3.91\sigma_{ys}\Delta a = 190.07\Delta a$
	JSME	$J = 2.94\sigma_{ys}\Delta a = 143.14\Delta a$
	MAX	$J = 2.65\sigma_{ys}\Delta a = 128.58\Delta a$
R-line	ASTM	$J_{(M)} = 46.12\Delta a + 16.75$, $J_{(R)} = 40.39\Delta a + 16.39$
	JSME	$J_{(M)} = 30.91\Delta a + 16.54$, $J_{(R)} = 27.92\Delta a + 15.34$
	MAX	$J_{(M)} = 32.31\Delta a + 3.84$, $J_{(R)} = 29.58\Delta a + 12.35$
J _{IC(M)} SZW (kgf/mm)	ASTM	29.71
	JSME	29.46
	MAX	29.89
J _{IC(M, R)} R-line (kgf/mm)	ASTM	33.67, 28.36 (21.98, 20.70)
	JSME	20.95, 18.94
	MAX	18.40, 15.96

200°C 를 비교하면 고온분위기로 갈수록 시험편의 열적활성화로 인하여 시효변형^{17), 18)}이 일어나 J_{IC} 값이 낮게 평가됨을 알 수 있다. 200°C 에서는 이러한 열적활성화가 SEM으로 한계스트레치존폭을 측정할 때 한계스트레치존폭에 tear에서 형성된 덩플(elongated dimple)이 개재 되는 수가 있기

때문에 R곡선법에 의한 것 보다 스트레치존폭으로 평가한 J_{IC}값이 과대평가의 원인이 된다. 상온 -20°C , 200°C 분위기에서 JSME R곡선과 스트레치존폭(SZW_{JSME})을 비교하면 상온에서 스트레치존폭의 J_{IC}값이 23.3%, -20°C 에서는 20.9%, 200°C 에서는 28.8% 과대평가되어 짐을 알 수 있다.

4. 결 론

원자력압력용기(SA508-3)강을 이용하여 상온, -20°C , 200°C 의 온도범위에서 복수시험편법으로 J_{IC} 실험을 하였으며, 그 결과의 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SA508-3강의 1/2CT 시험편에 대하여 상온, -20°C , 200°C 를 실험한 결과 ASTM R곡선법으로 J_{IC} 값을 평가할 수 없었으며, 둔화직선을 실측하여 평가하는 것이 바람직하다.
- 2) 둔화직선을 실측하여 ASTM R곡선법에 적용하면 부대조건이 만족되고 유용한 J_{IC} 평가가 가능하며, 실측한 둔화직선식은 상온에서 $J=3.44\sigma_{ys}\Delta a$ 이고 -20°C 에서는 $J=2.94\sigma_{ys}\Delta a$, 200°C 에서는 $J=3.91\sigma_{ys}\Delta a$ 였다.
- 3) 200°C 의 실험분위기에서는 시효변형(strain-aging)이 일어났고, 열적활성화로 기인하여 tear에서 형성된 딥플(elongated dimple)이 개재되는 수가 있어 R곡선으로 평가한 J_{IC} 값보다 스트레치존법(SZW)으로 평가한 J_{IC} 값이 과대평가 되었다.
- 4) 본 연구에서 JSME 규정 R곡선법과 SZW법에 의한 J_{IC} 값이 일치하지 않았고, 전체적으로 SZW법에 의한 J_{IC} 값이 과대평가 되어졌으며, 상온에서 JSME R곡선법과 스트레치존법(SZW_{JSME})으로 평가된 $J_{IC(M)}$ 비교하면 SZW_{JSME}의 J_{IC} 가 23.3%, -20°C 에서는 20.9%, 200°C 에서는 28.8% 과대평가 되었다.

참 고 문 헌

- 1) ASTM Standard E399, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", ASTM Annual Standard, Vol. 03, 01, pp. 518~553, 1983.
- 2) J. R. Rice., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 379~386, 1968.
- 3) J. A. Begley and J.D Landes., "The J Interral as a Fracture Criterion", ASTM STP 514, pp. 1~23, 1972.
- 4) H.Kobayashi., H.Nakamura., H.Takahashi., "Evaluation of Brittle Fracture Toughness and Ductile Crack Growth in the Transition Region," JSME, Vol. 52, No. 473, 1986.
- 5) H.Kobayashi., H.Nakamura., K.Kashiwagi., "Evaluation of Elastic-Plastic Fracture Toughness and Frature Resistance of Carbon Steel STS 42(Comparison of JSME and ASTM Method)" JSME, Vol. 53, No. 494, 1987.
- 6) ASTM E813-81, "Standard Test Method for J_{IC} , a Measure of Fracture Toughness", ASTM Annual Standards, Vol. 03, 01, pp. 762~780, 1983.
- 7) JSME S001-1981, "Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness J_{IC} ", JSME Standard, pp. 1~88, 1981.
- 8) J.R.Rice., "Mathematical Analysis in Mechanics of Fracture-Fracture 2", Academic Press, pp. 191~311, 1971.
- 9) J.R.Rice., P.C.Paris., and J.G.Merkle., "Some Further Results of J Integral Analysis and Estimates, ASTM STP 536, pp. 231~245, 1973.
- 10) J.D.Landes., H.Walker., and G.A Clarke., "Evaluation of Estimation Procedure used in J-Integral Testing", ASTM STP 668, pp. 266~287, 1979.
- 11) J.G.Merkle and H.T Corten., "A J Integral Analysis for the Compact Tension, Considering Axial Force as well as Bending Effect", Journal of Pressure Vessel Technology Nov. pp. 286~292, 1974.
- 12) J Carlsson., S.Kaiser., K.Markstrom., C.Wuthrich and H.Oberg., "Experimental Studies of Stable Crack Growth, ICF 5. Advances, in Fracture.Research, Vol. 2, pp. 863~869, 1981.
- 13) H.Kobayashi., H.Nakazawa., H.Nakamura., "Evaluations of Elastic-Plastic Fracture Tou-

- ghness and Resistance in A533B-1 Steel”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 31, pp. 1340~1344, 1983.
- 14) Mills, W. J., “J-Testing and Evaluation”, 9-1, 56, 1981.
- 15) Ohji., S.R.Kang., K.Ogura., T.Kita., “J_{IC} Evaluation by Means of R-curve and Stretched-Zone-Width Method on HT80 and SA50A Steels and 2017-T4 Aluminum Alloy”, Journals of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 31, pp. 425~429, 1982.
- 16) Y.Mutoh., I.Sakamoto., M.Sekine., “Observation of Blunting Process in J_{IC} Tests”, Journals of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 33, pp. 1160~1165, 1984.
- 17) Y.S.Choy., W.H.Yang., “A Study on the Effect of Temperature on the Elastic-Plastic Fracture Toughness. J_{IC} of Materials (II)”, KSME, Vol. 14, No. 4, pp. 866~872, 1990.
- 18) 이동녕, “금속강도학”, 문운당, pp. 174~178, 1991.