

● 論 文

J 적분을 이용한 원자력 압력용기강의 파괴인성치의 결정

오 세 옥* · 임 만 배** · 김 진 선***

(95년 1월 18일 접수)

A method of Determination of Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessel Steel by J Integral

Sae-Wook Oh* · Man-Bae Lim** · Jin-Seon Kim***

Key Words : Fracture toughness (파괴인성), Reactor Pressure Vessel Steel (원자력 압력용기강), J-integral (J적분), Elastic-Plastic Fracture Resistance Curve (탄소성 파괴 저항곡선), Blunting Line (둔화직선), Unloading Compliance (제하 컴플라이언스), Apparent Negative Crack Growth (균열길이 감소 현상), Offset Technique (오프셋법), Nil Ductility Temperature (무연성 온도)

Abstract

The elastic-plastic fracture toughness(J_{IC}) and fracture resistance(J-R curve) of SA508-3 alloy steel used for nuclear reactor pressure vessel are investigated by using CT-type specimens. Fracture toughness tests are conducted by unloading compliance method and multiple specimen method at room temperature, -20°C and 200°C . The apparent negative crack growth phenomenon which usually arises in partial unloading compliance test is well known. The negative crack growth phenomenon in determining J_{IC} or J-R curve from partial unloading compliance experiments may be eliminated by the offset technique. In this study, the evaluation of J_{IC} multiple specimen method recommended by the JSME gives the most reliable results by using half-size CT(similar-type) specimens.

1. 서 론

현재 국내에서는 원자로 압력용기를 국산화하

였으며, 원자로의 안전성에 대한 문제는 전 세계적으로 관심의 대상이 되고 있다. 특히 원자로 용기는 두께가 250 mm 이상으로 두껍고, 수명 기간

* 동아대학교 공과대학 기계공학과

** 동아대학교 대학원 기계공학과

*** 한국중공업 원자력설계실

동안에는 다른 용기로 교체할 수 없고, 가동중에 고속 중성자 (fast neutron)에 의한 조사취화 (irradiation embrittlement)로 재료의 성질이 취약하여 취성파괴 (non-ductile failure)의 위험성을 내포하고 있으며, 이러한 원인으로 가동에 막대한 제한을 가할 수 있는 가장 중요한 부품이다. 이러한 관점에서 파괴역학적 파라미터인 탄소성 파괴인성치 J_{IC} 및 파괴저항(J-R curve)에 미치는 온도의 영향을 명확히 규명하여야 한다. 따라서 탄소성 파괴인성 평가법은 ASTM E813-81,87^{1,2)}과 JSME S001-81³⁾을 기준으로 하여 복수 시험편법과 단일 시험편법이 잘 알려져 있고, R곡선법과 SZW법등이 있다. 고강도강이나 취성재료의 경우는 평면 변형률 파괴인성의 파라미터인 K_{IC} 로 표준시험법이 이미 확립되어 있고 많은 연구자들에 의하여 여러가지 재료의 종류와 시험편의 형상에 따른 평가법의 신뢰성도 확립되고 있다. 그러나 원자로 압력용기강과 같은 저합금강이나 연성재료의 탄소성 파괴역학적 해석방법에는 평가방법에 따라 문제점이 야기되고 있다. 첫째로는 둔화적선의 기술기가 이론식과 실측에 의한 값과 차이를 가지므로서 파괴인성값이 신뢰성을 가질 수 없기 때문에 이러한 점을 보완할 필요가 있다. 둘째로는 제하 컴플라이언스법으로 J_{IC} 를 평가할 때 제하시 압축응력에 의한 균열 감소현상의 문제점이 발생된다. 특히 원자로 구조재료는 방사능의 위험 때문에 신뢰성을 가지는 정확한 데이터 구축이 매우 중요한 사항이다. 따라서 ASTM E813-87 규정에서는 경제성의 이유로 제하 컴플라이언스법을 권장하고 있으나 복수시험편법에 비하여 균열길이 산정이 복잡하고, 제하 초기에 균열길이가 감소하는 현상이 나타나므로 실험과 해석상의 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제점을 보완하여 두방법을 비교 검토하였다.

2. 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 원자로 압력용기용 저합금 SA508-3강이며 화학적 성질은 Table 1과 같은 기계적 성질은 Table 2와 같다.

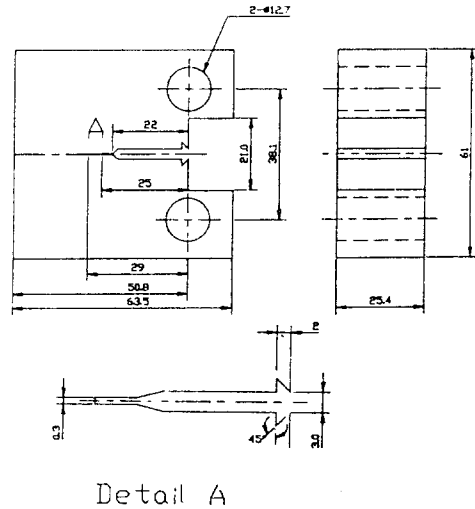
Table 1. Chemical composition of SA508-3 steel(Wt %)

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 the SA508-3 steel

Temp (°C)	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Yield Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Young's Modulus (kgf/mm ²)
-20°C	63.88	48.26	26.8	21810
R T	59.89	45.51	27.8	20930
200°C	56.02	41.33	25.6	19820

원자로 압력용기의 일차 압력경계 내에 있는 압력용기들을 설계할 때 가상하는 결합의 크기가 용기의 내면으로부터 두께의 1/4 이라는 점과 원통 Shell에서는 원주방향으로 응력이 최대가 되고 응력 성분에 수직인 반경방향으로 결합이나 파단면이 가장 취약할 것임을 고려하여 C-R 방향으로 채취한 시험편은 Fig. 1과 같이 가공하였다.



Specimen	B	W	Method
Half-Size CT	12.5	25	Multiple Specimen Technique
1 CT	25.4	50.8	Single Specimen Technique

Fig. 1 Configuration of the compact tension specimen(Unit:mm)

시험편에 폭 3mm 길이 22mm의 기계노치를 가공하고 크랙의 발생을 쉽게 하기 위하여 폭 0.3mm의 크랙발생 노치 (crack starter)를 깊이 3mm로 가공하였으며, 기계노치의 전체길이를 $a_n=0.5a/W$ 로 하였다. 열처리 조건은 Table 3과 같으며 가공후 잔류응력을 제거하기 위하여 응력완화 처리(SR)를 하였다.

Table 3. Heat treatment of the steel

Normalizing	850/925°C × 7hrs:Air Cool
Tempering	640/665°C × 6hrs 20min:Air Cool
Quenching	860/895°C × 5hrs 38min:Water Cool
Tempering	650/675°C × 4hrs 53min:Air Cool
S R	605/626°C × 45hrs 56min :Furnace Cool

3. 실험방법

실험에 사용한 시험기는 유압서보식 피로시험기 (INSTRON model 1331 10tonf) 이다. 시험편의 예비 피로균열은 최대응력 확대계수 $K_{I\max} < 80.7 \text{ kgf/mm}^{3/2}$, 응력비 $R=0.05$ 로 노치 선단에서 4mm 도입하였으며, 최종균열길이 비는 $a/W=0.58$ 로 하였다. 복수시험편법은 ASTM E813-81과 JSME S001-81 규정에 준했으며 단일시험편법은 ASTM E813-87의 제하 컴플라이언스법에 따라 J_{Ic} 및 탄소성 파괴저항곡선을 구하였다. R곡선법과 제하 컴플라이언스법을 기준하여 파괴인성을 측정하는 경우 정적부하(static loading)는 스트로크 제어로 적용하였고 부하속도는 0.1mm/min로 일정하게 유지하였다. 정적부하 후에 정적부하시 최대하중의 약 60%로 시험편을 피로파단시켜서 균열진전량 (Δa)을 측정하였다. 복수시험편의 경우 둔화직선부를 결정하기 위하여 전자현미경을 이용하였으며, 시험편 두께의 8점 및 3점법에 의하여 균열진전량을 측정하여 평균값을 취하여 결정하였다. R 곡선부의 결정을 위한 시험편의 경우는 이동식 공구현미경을 이용하여 동일 위치에서 균열진전량을

측정하였으며, 해석방법은 아래와 같다.

1. 복수시험편법(multiple specimen technique)의 경우 ASTM 과 JSME 규정에 준하여 J적분 계산식은 다음 식을 이용하였다.

$$J = (A/B) b f(a_0/W) \text{-----(Mecle-Corten's)}$$

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

$$\beta = [(2a_0/b) + (2a_0/b) + 2]^{1/2} + [(2a_0/b) + 1]$$

$$J = (2A/B) b \text{------(Rice)}$$

여기서 B=시험편 두께(mm), W=시험편 폭(mm), a_0 =예비 균열길이(mm), b=리가먼트(mm), A=하중-하중선 변위곡선의 면적(kg.mm)이다.

2. 단일시험편법(single specimen technique)인 경우 둔화직선은 ①식으로 가정한다.

$$J = 2\sigma_y \cdot \Delta a \tag{1}$$

여기서 $\sigma_y = (\sigma_{ys} + \sigma_u) / 2$, σ_{ys} =항복강도(kgf/mm²), σ_u =인장강도(kgf/mm²)이다.

R곡선은 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 오프셋 선 내의 실험 데이터점을 ②식으로 지수근사 시킨다.

$$J = C_1 (\Delta a_p)^{C_2} \tag{2}$$

여기서 C_1 과 C_2 는 정수이다.

단일시험편법의 제하 컴플라이언스법인 경우 J 적분 계산식은 ③과 같다

$$J_{i+1} = [J_i + (\eta/b)(A_{i,i+1}/B)] [1 - (\gamma/b)(a_{i+1} - a_i)] \tag{3}$$

$$\eta_i = 2[(1+a_i)/(1+a_i)^2]$$

$$a_i = [(2a_i/b_i)^2 + 2(2a_i/b_i) + 2]^{1/2} - [(2a_i/b_i) + 1],$$

$$\gamma_i = 1 + 0.76b_i/W$$

여기서 J_i 는 i번째의 제하에 해당하는 J적분, $A_{i,i+1}$ 는 $i, i+1$ 번째의 제하점 사이의 하중-하중선 변위곡선의 면적(에너지), a_i 와 b_i 는 i번째의 제하에 상당하는 균열길이와 리가먼트의 길이이다.

균열길이는 다음 ④식에 의해서 구하였다.

$$a_i/W = 1.000196 - 4.06319U + 11.242U^2 - 106.043U^3 + 464.335U^4 - 650.677U^5 \tag{4}$$

$$U=1/(B.E.C+1)$$

여기서 $C=V/P(\text{mm/kgf})$, $E=\text{탄성계수}(\text{kgf/mm}^2)$ 이다.

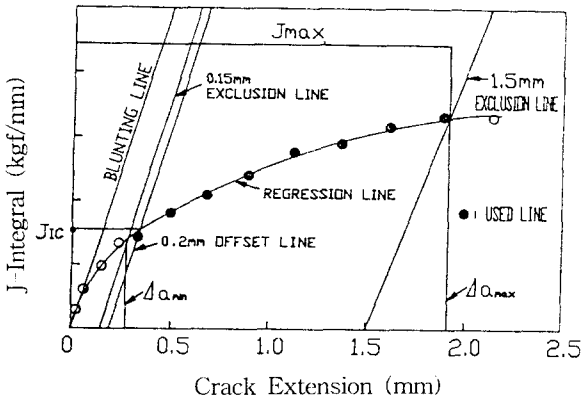


Fig. 2 Determination of J_{IC} by the ASTM E813-87

제하시 균열선단의 압축응력에 의하여 균열길이 감소현상이 나타나므로, 압축응력에 의한 컴플라이언스의 오차를 보정하여, 균열길이 감소현상을 방지할 수 있다. 균열길이 감소현상은 ASTM의 J_{IC} 실험 해석에 있어서 가장 큰 문제점이라 할 수 있으나, 아직 그 연구가 미흡한 상태에 있다. 이러한 균열길이 감소현상의 간편법으로 Voss등¹¹⁾이 제안한 오프셋법을 이용하여 J-R곡선을 수정 보완하여 J_{IC} 를 결정 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. ASTM방법의 R곡선법에 의한 J_{IC} 평가

Fig. 3,4,5는 상온, -20°C 및 200°C 에서 ASTM법에 의하여 J- Δa 의 관계를 나타내었다. ASTM법에서 권장하고 있는 둔화직선($J=2\sigma_{ys}\Delta a$)과 R 곡선을 이용하여 각 온도에 대하여 J_{IC} 를 평가하면 R곡선의 구배조건 $(dJ/da)_R < 1/2(dJ/da)_B$ 및 데이터의 분포 조건인 $(\Delta a_{max} - \Delta a_{min}) > 3(\Delta a_{min} - \Delta a_{in})$ 조건등을 만족하지 않았으며 유효한 J_{IC} 값으로 판정할 수 없었다.

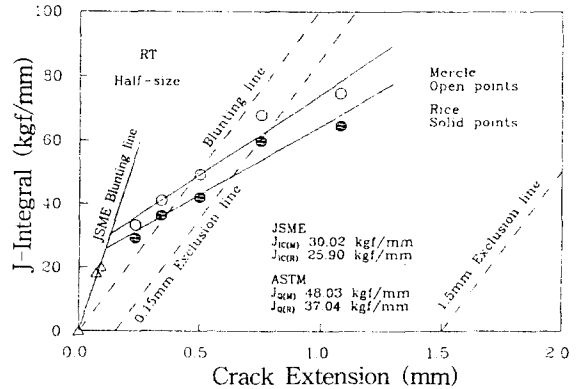


Fig. 3 Determination of J_{IC} by the ASTM R-curve method at the RT

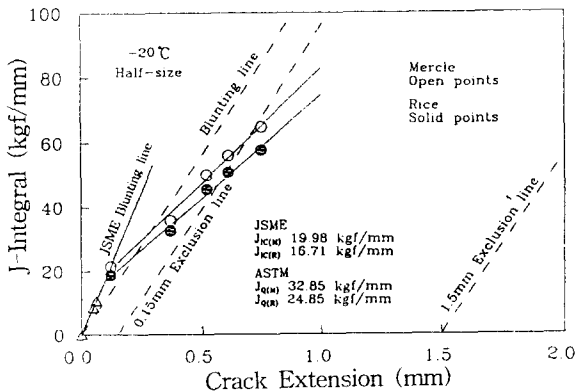


Fig. 4 Determination of J_{IC} by the ASTM R-curve method at the -20°C

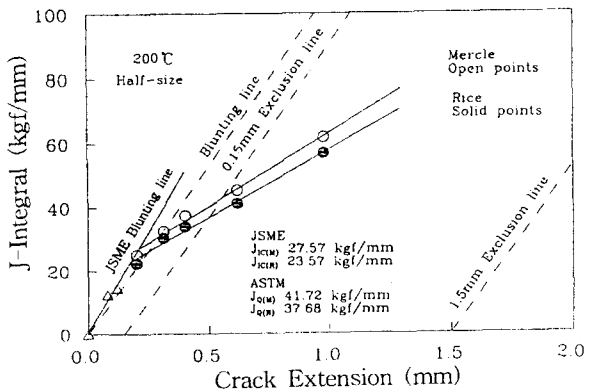


Fig. 5 Determination of J_{IC} by the ASTM R-curve method at the 200°C

따라서 둔화직선부를 JSME 방법으로 구하였으며 이들 둔화직선은 온도의 변화에 따라 약간의 변화를 가진다. 이러한 둔화직선과 R곡선을 이용하여 구한 J_{IC} 값은 유효조건을 만족하여 유효한 값으로 얻을 수 있었다. 결국, 둔화직선의 결정방법의 차이로 인하여 ASTM에서 권장한 둔화직선을 이용한 J_{IC} 값보다 각각의 온도에서 과대평가 됨을 알 수 있다. 취성재료, 고강도강은 ASTM에서 제안한 둔화직선과 실측에 의한 JSME의 둔화직선은 거의 일치하며, 본 실험에 사용한 저강도 및 고인성 재료에서는 둔화직선의 구배가 많은 차이를 가지기 때문에 JSME에서 권장하는 실측에 의해 구하는 둔화직선이 바람직하다고 할 수 있다. 이와 같이 탄소성 파괴인성값 J_{IC} 를 구하는데 둔화직선의 결정이 매우 중요함을 알 수 있었다. 따라서 본 재료는 둔화직선의 결정이 ASTM 방법보다 JSME 방법이 유용함을 확인하였다. 이상의 평가 결과로부터 저강도, 고인성을 가지는 재료의 12.5mm 판 두께를 이용한 ASTM 방법으로 J_{IC} 를 평가하는 것은 불가능함을 알 수 있었다. Carlsson,⁵⁾ 등은 OX 540 구조용강에 대하여 J_{IC} 를 평가할때 ASTM R곡선법은 부적합하다는 보고와도 잘 일치하였으며, 오⁶⁾, Ohji⁷⁾ 등도 재료에 따른 둔화직선의 결정방법의 필요성을 많은 연구를 통해 보고하였다.

4-2 JSME방법의 R곡선법과 SZW법의 J_{IC} 평가

Fig. 6,7,8는 온도에 따른 JSME방법에 의해 J적분 및 균열 증분량($J-A$)의 관계를 나타낸 것이다.

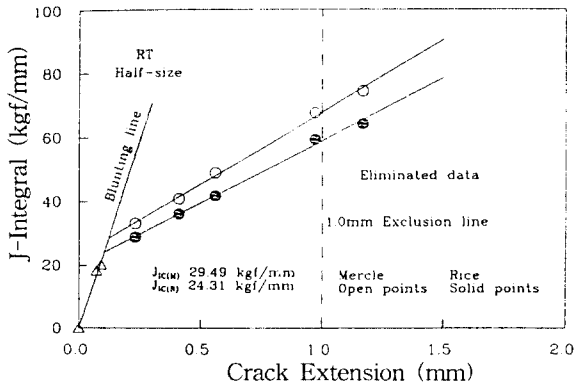


Fig. 6 Determination of J_{IC} by the JSME R-curve method at the RT

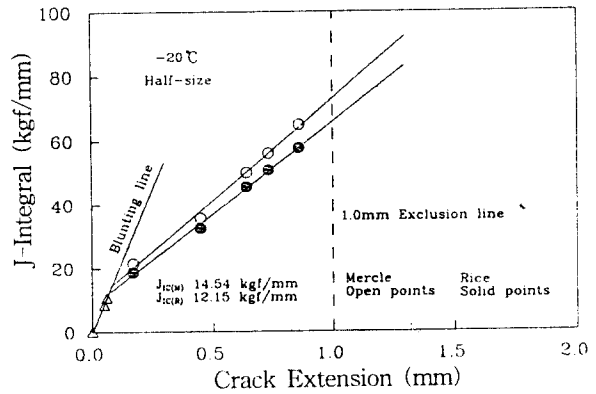


Fig. 7 Determination of J_{IC} by the JSME R-curve method at the -20°C

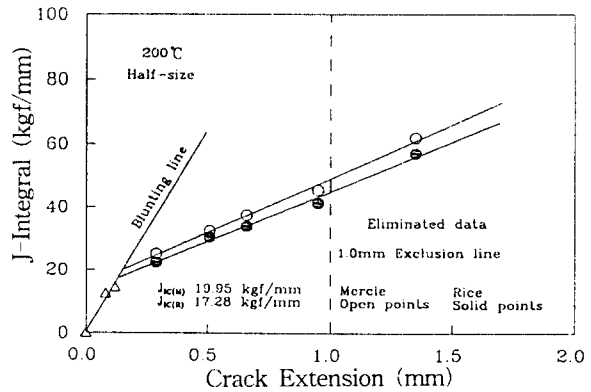


Fig. 8 Determination of J_{IC} by the JSME R-curve method at the 200°C

JSME R곡선법은 ASTM R곡선법과는 다르게 곡선의 기울기 조건과 테이타 분포 조건에 모두 만족하여 정확한 J_{IC} 를 구할 수 있었다. 각 온도에 대한 값을 비교해 보면 상온에서 값이 가장 크게 평가되었으며, -20°C , 200°C 온도 변화에 따라 J_{IC} 값이 약간 변화를 보였다. 일반구조용 재료인 경우 -20°C 의 온도에서는 취성파괴가 발생하기 때문에 탄소성 파괴인성값을 구할 수 없지만 본 재료의 경우 무연성 천이온도(NDT)는 -30°C 이므로 J_{IC} 를 평가할 수 있었다. Fig. 9는 SZW법에 의한 J_{IC} 평가를 나타내었다. SZW는 판 두께의 3/8, 4/8 및 5/8점에서 측정하고 3점의 평균치로

하였다. -20°C , 200°C , RT의 온도에서 SZWc의 평균치는 $\text{SZWc}=200.58\ \mu\text{m}$, $\text{SZWc}=220.40\ \mu\text{m}$, $\text{SZWc}=239.54\ \mu\text{m}$ 이며, 탄소성 파괴인성값은 23.82kgf/mm , 31.42kgf/mm , 29.46kgf/mm 로 평가되었다. 따라서 JSME R곡선법과 SZW법을 각 온도에 대하여 상호 비교하면 R곡선법 보다 SZW법이 약간 과대평가 되었으며, SZW법의 과대평가 원인은 스트레치존은 연성균열 발생 후에도 불안정 균열이 발생될 때까지 어느 정도의 안정한 균열이 성장하기 때문인 것으로 생각된다. Ohji등⁸⁾과 Mutoh등⁹⁾의 연구에서도 증강도 및 저강도 고인성 재료에서 연성균열의 진전에 따라 스트레치존은 변형되며, 이러한 현상은 저강도 고인성재에서 특히 현저하다고 보고하고 있다.

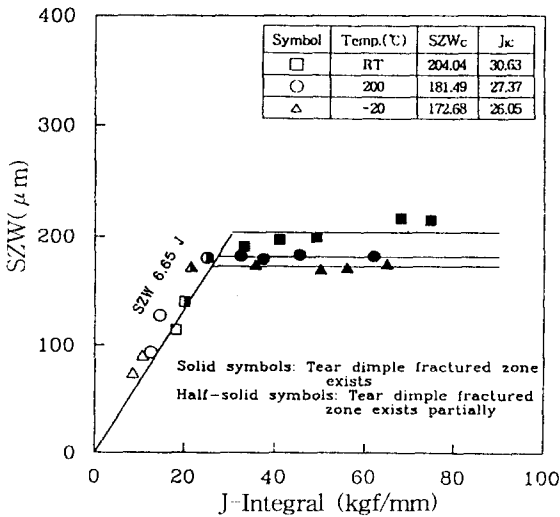


Fig. 9 Relation between SZW and J at RT, -20°C and 200°C

4-3 제하 컴플라이언스법의 균열길이 감소현상 해석

연성 및 인성이 큰 재료에서 제하 컴플라이언스법에 의한 J_c 평가 및 J-R곡선 해석을 실시할 때 균열길이 감소현상이 나타난다. 이러한 균열길이 감소 현상은 초기에 균열길이가 초기 균열 a_0 보다 감소한 후에 증가하는 현상이다. 균열길이의 감소는 실제로 존재하지 않는 현상이며 실험과 해

석상의 오차에 기인된다. Fig. 10은 초기에 균열길이 감소현상이 나타남을 보여주고 있으며, ASTM 둔화직선을 기준으로 최대균열길이 감소점과 둔화직선사이의 거리 만큼 모든 데이터에 균열진전량을 보정하여 줌으로써 균열길이 감소현상을 방지할 수 있다. 이러한 보정의 방법을 오프셋 방법이라고 하며, 오프셋 방법에 의하여 균열길이 감소량을 보정할 경우 비교적 간편하게 균열길이 감소현상을 처리할 수 있는 장점이 있으며, J_{Ic} 값이 과대평가됨을 막을수 있다고 생각된다. 균열길이 감소현상의 원인은 제하를 반복함에 따라 시험편 지그의 편심에 의한 균열선단에서 압축응력의 영향을 받아 하중-변위곡선의 초기 제하부분에서 최대하중과 제하하중의 차이 즉 ΔP 에 영향을 받아 발생하는 것으로 생각된다. 이 원인을 제거하기 위하여 시험편 지그를 ASTM 규정에 따라 정확히 제작하며, 컴플라이언스에 의한 균열길이 산정시 균열길이를 수정하여야 한다. 식④와 같이 컴플라이언스에 의한 균열길이 측정시 보정에 의한 수정식이 제안되고 있으나 이 식을 이용하여 보정할 때 계산이나 적용이 번거로운 결점이 있다.

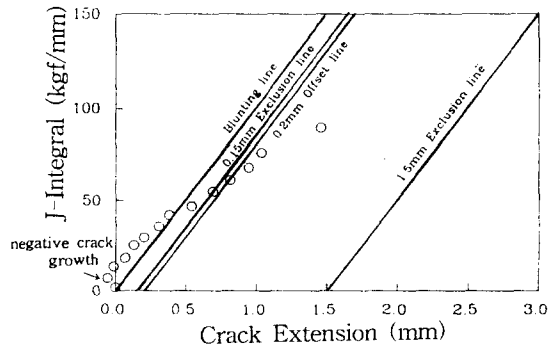


Fig. 10 Negative crack growth phenomenon by unloading compliance method

Voss¹⁾등은 균열길이 감소현상을 클레비스(clevis) 와 핀에 의한 실험상의 문제점으로 보았다. 시험편에 하중을 가할때 핀의 굽힘에 의하여 응력집중이 발생되어 소성변형이 일어나며, 소성변형이 일어난 상태에서 하중을 제거한 후 다시

하중을 가하면 소성변형으로 생성된 홈에 의하여 하중선의 위치가 달라진다. 이러한 원인에 의하여 균열길이 감소현상이 나타난다고 보고 하였다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 핀과 클레비스 사이에 회전할 수 있는 회전판을 넣었으며, 만약 핀이 굽힘변형을 하더라도 회전판이 회전함으로써 응력집중이 일어나지 않도록 하였다. Putscher 등¹⁰⁾은 균열길이 감소현상이 둔화거동(blunting behavior)의 영향으로 인하여 발생한다고 보고하였으며, Bowman 등¹¹⁾은 하중장치에서 발생하는 정렬불량의 영향 때문이라고 해석하였다.

4-4. 제하 컴플라이언스에 의한 J-R곡선에 미치는 온도의 영향

Fig. 11,12,13은 RT, -20℃ 및 200℃ 온도에서 제하컴플라이언스법에 의한 실험결과를 나타내었으며, 각 온도에서 균열길이 감소현상은 모두 나타났으며 오프셋법을 적용하지 않은 J_Q값들은 유효 데이터 항목 J_{MAX}=b σ_y/15 및 J_{IC}의 유효조건 B b ≥ 25(J/σ_y)를 만족하지 않고 현저히 과대평가되었다.

따라서 오프셋법을 이용하여 나타낸 결과 유효 데이터 항목 및 유효조건들을 만족하여 J_{IC}로 평가할 수 있었다. 그 결과 J_{IC}값을 상온과 비교하여 볼 때 온도가 낮아짐에 따라서 J_{IC} 값은 감소하는 경향을 보이고 있고 J-R곡선 식이 변화되었으며 온도가 증가, 감소하면 J-R곡선 뿐만 아니라 J-R

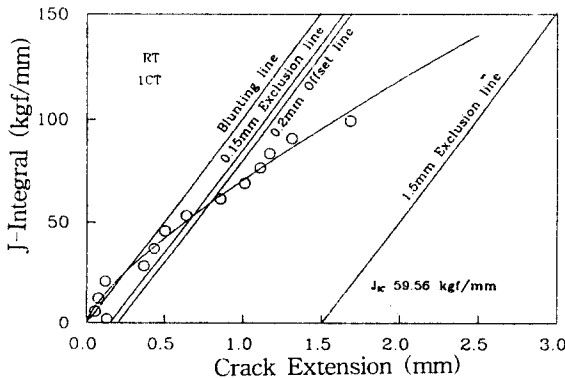


Fig. 11 J-R curve obtained by unloading compliance at the RT

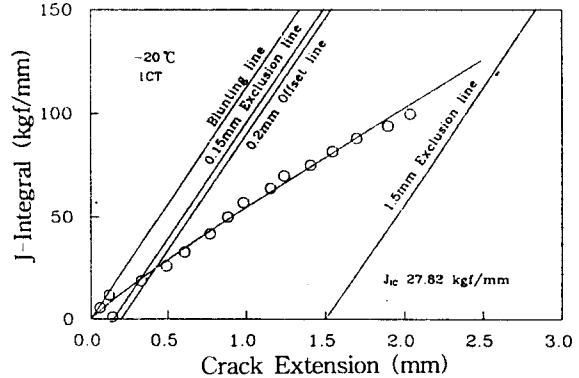


Fig. 12 J-R curve obtained by unloading compliance at the -20℃

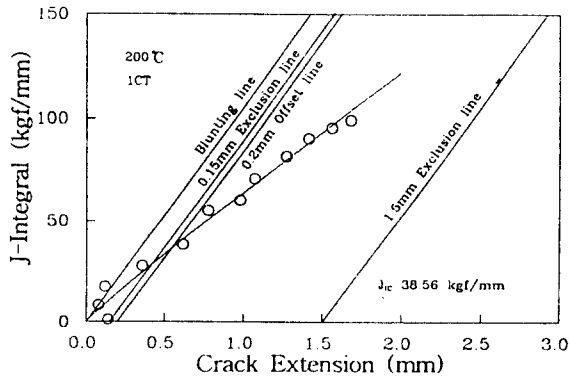


Fig. 13 J-R curve obtained by unloading compliance at the 200℃

곡선의 식 $[J=C_1(\Delta a)^{C_2}]$ 에서 상수 C₁과 C₂가 감소하였다. 특히 200℃에서는 재료의 연성이 증가하여 하중-하중변위곡선에서 시효변형의 현상이 나타났으며, J_{IC} 값이 낮게 평가되는 원인이 되었다.

따라서 Fig. 10에서 나타난 것과 같이 균열길이 감소현상은 실험초기에 나타나는 현상임을 알 수 있고, 균열길이 감소현상을 처리하지 않으면 유효한 정량적인 값을 얻을 수 없음을 입증하고있다. 본 연구에서는 균열길이 감소현상을 오프셋법에 의하여 처리하여 각온도에 대하여 나타내었다. 그 결과 탄소성 파괴인성값을 정확한 정량적인 값으로 얻을 수 있었다. ASTM 방법에서 실측 둔화곡선을 이용한 복수시험편법과 제하 컴플라이언스법의 정량적인 값과 비교하여 보면 제하 컴플라이언

Table 4. Fracture toughness values by R-curve method, SZW and unloading compliance method at RT, -20°C and 200°C

Temp(°C)	ASTM R-curve Method(modify)	JSME R-curve method	SZW	Unloading Compliance Method
	J _Q or J _{IC} (kgf/mm)			
R T	J _{IC(M)} =30.02 J _{IC(R)} =25.90	J _{IC(M)} =29.49 J _{IC(R)} =24.31	J _{IC} =30.63	J _{IC} =59.56
-20	J _{IC(M)} =19.98 J _{IC(R)} =16.71	J _{IC(M)} =14.54 J _{IC(R)} =12.15	J _{IC} =26.05	J _{IC} =27.82
200	J _{IC(M)} =27.57 J _{IC(R)} =23.57	J _{IC(M)} =19.95 J _{IC(R)} =17.28	J _{IC} =27.37	J _{IC} =38.56

스법이 약간 과대평가되었다. 그 원인으로서는 균열 길이 측정시 실측과 이론식에 의한 차이라고 생각되어지며, 그 정량적인 값들을 Table 4 에 나타내었다. 따라서 연성재료 및 고인성재료의 탄소성 파괴인성값을 평가할 때 균열감소현상을 수정하지 않고 평가 한다면 과대평가의 위험이 있으므로 주의를 해야 할 것이다.

5. 결 론

1. 본 연구에 사용된 재료를 이용하여 J_{IC} 값을 평가하면 ASTM R곡선법보다 JSME R곡선법의 탄소성 파괴인성 평가법이 정확한 신뢰성을 가질 수 있었으며, ASTM R곡선법에서 둔화곡선을 실측하여 구한 J_{IC} 값과 제하 컴플라이언스법으로 구한 J_{IC}값은 약간 차이를 보였다.

2. JSME 방법의 R곡선법과 SZW법으로 평가한 J_{IC} 값은 SZW법이 과대평가되었으며, 온도의 영향을 고려하여 볼때 상온에 비하여 -20°C, 200°C 온도에서는 적게 평가 되었다.

3. 제하 컴플라이언스법에서 균열길이 감소 현상을 보정하지 않고서는 J_{IC} 값을 얻을 수 없었으며 간편한 오프셋법으로 균열길이를 보정하여 신뢰성을 갖는 정량적인 J_{IC}값을 구하는 것이 바람직

하다.

4. 제하 컴플라이언스법으로 평가한 200°C에서는 재료의 연성이 증가하여 하중-하중변위 곡선에서 시효변형이 일어났으며, 이러한 원인으로 J-R 곡선의 기울기가 감소되어 J_{IC}값이 적게평가되는 결과를 가져왔다.

참 고 문 헌

- 1) Standard Test Method for J_{IC}, a Measure of Fracture Toughness, ASTM E 813-81, 1981
- 2) Standard Test Method for J_{IC}, a Measure of Fracture Toughness, ASTM E 813-87, 1987
- 3) Standard Test Method for J_{IC}, JSME S001-81, 1981
- 4) Voss, B. and Mayville, R.A., The Use of the Partial Unloading Compliance Method for the Determination of J-R Curve and J_{IC}, ASTM STP 856, pp. 117-130, 1985
- 5) Carlsson, J., Kaiser, S., Markstrom, K., Wuthrich, C. and Oberg, H., Experimental Studies of Stable Crack Growth ICF 5 Advances, in Fracture Research, Vol.2, pp. 863-869, 1981

- 6) 오세욱, 안광주, 윤영재, SB41강의 평활 및 측면홈 CT 시험편의 J_{IC} 평가, 대한기계학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 494-503, 1986
- 7) Ohji, K., Kang, S.R. and Iwakiri, S., Effects of Side-Grooves and Thickness of Fracture Toughness Specimens on Crack Initiation in J_{IC} Tests of Two Steels, Journals of the Society of Materials Science, Japan, Vol.33, pp. 1006-1011, 1984
- 8) Ohji, K., Kang, S.R. and Iwakiri, S. and Nakagawa, S., Relations between Stretched Zone Width and Crack Tip Opening Displacement in J_{IC} Test of Steel, Transaction of JSME, Vol.50, pp. 264-269, 1984
- 9) Mutoh, Y., Sakamoto, I. and Sekine, M., Observation of Blunting Process in J_{IC} Tests, Journals of the Society of Materials Science, Japan, Vol.33, pp. 1160-1165, 1983
- 10) Purtscher, P.T, Absence of Stretch Zone in Austenitic Stainless Steels Fractured at Cryogenic Temperature, JTEVA, Vol.15, No.5, pp.296-298, 1987
- 11) Bowman, R, Antolovich, S.D. and Brown, R.C., Demonstration of Problems Associated with Crack Closure Measurement Techniques, Engineering Fracture Mechanics, Vol.31 No.4, pp. 703-711, 1988