

● 論 文

제하 컴플라이언스법에 의한 SA533B강의 J_{1C} 및 J-R 곡선에 미치는 열시효 영향

윤 한 기* · 차 귀 준**
(94년 7월 1일 접수)

Effects of Accelerated Iso-Thermal Aging on Elastic-Plastic Fracture Toughness and Fracture Resistance Curve by Unloading Compliance Method in SA533B Low Alloy Steel

Han-Ki Yoon* · Gee-Jun Cha**

Key Words : Accelerated Iso-Thermal Aging (열시효), Blunting line (둔화직선), Elastic-Plastic Fracture Resistance Curve (탄소성 파괴저항곡선), Unloading Compliance (제하 컴플라이언스), Apparent Negative Crack Growth (균열길이감소현상), Offset technique (오프세트법)

Abstract

Effect of an accelerated iso-thermal aging ($375^{\circ}\text{C} \times 66\text{days}$, $375^{\circ}\text{C} \times 200\text{days}$) on elastic-plastic fracture resistance curve were examined in SA533B low alloy steel. Fracture toughness test are conducted by unloading compliance method at room temperature. But the apparent negative crack growth phenomenon, usually arise in partial unloading compliance test. The phenomenon of negative crack growth may be eliminated by the offset technique. There is no effect of aging on J_{1C} and dJ/da in iso-thermal aged ($375^{\circ}\text{C} \times 66\text{days}$) specimen, but there is very little effect in iso-thermal aged ($375^{\circ}\text{C} \times 200\text{days}$) specimen.

* 동의대학교 공과대학 기계설계학과

** 동명전문대학 가스냉동과

1. 서론

최근 원자로의 안전성에 대한 관심이 매우 높아지고 있다. 국내에서도 원자로 1호기부터 현재 9호기가 가동되고 있고 이들 원자로용 구조용 합금 재료 개발이 완성되어 3호기 이후부터 이들 재료로 건설하고 있다. 그러나 기존 1,2호기에 사용한 저합금강 SA533B강에 대한 안전성 문제가 최근 국내외에서 많은 관심의 대상이 되고 있다.¹⁾⁻⁴⁾ 이들 원자로의 잦은 고장으로 인한 수리 및 가동시 냉각제 상실 문제와 경년열화 문제가 중요시되며 이들 영향중 열시효가 탄소성 파괴인성 J_{1c} 및 파괴저항 (J-R)곡선에 미치는 영향을 명확히 규명해야 한다.

파괴인성 평가법은 복수시험편법과 단일 시험편법이 잘 알려져 있다.⁵⁻⁷⁾ 고강도강 취성재 경우 탄소성 파괴역학의 결정 인자로서 가장 널리 알려진 J적분의 표준시험법은 이미 확립되어 있고 많은 연구자의 결과들로부터 여러 형태의 시험편과 구조물의 재료종류에 따른 평가법의 신뢰성도 수립되고 있다. 그러나 연성재료의 탄소성 파괴역학적 해석방법에서는 균열진전의 시작을 구조물의 파손평가 시점으로 보기에는 몇가지의 문제점이 제기되고 있다. 그 이유중 하나는 균열진전을 시작한 이후에도 파손 즉 불안전 균열을 나타내기까지 어느 정도의 안정한 균열이 성장하므로 이것을 고려해야 되기때문에 이런 점을 보완한 간편 평가법들의 신뢰성에 대한 많은 연구의 필요성이 요구되고 있다.

특히 원자로 압력용기 감시시험의 경우 시험편의 채취 및 확보가 제한적이거나 불가능한 경우도 있기 때문에 많은 시험편을 사용하는 것은 비경제적이므로 단일시험편법으로 신뢰성있는 정보를 얻는 것은 매우 중요한 사항이다. 따라서 ASTM E813-81규정에서는 제하 컴플라이언스법을 권장하고 있으나 복수시험편법에 비해 경제성은 인정되나 해석이 복잡하며 초기 균열길이의 감소현상 즉 시험편 하중을 가하는 초기에 균열길이가 감소하는 현상으로 실제로는 있을 수 없는 현상들이 연성재료에서 나타나므로 실험과 해석상에 약간의

문제점 등이 지적되고 있다.⁸⁾⁹⁾ 국내에서도 이들 문제점을 해결하기 위한 연구들이 진행되고 있다.¹⁰⁾¹¹⁾ 이들 연구결과들을 참고하여 본 연구에서는 실제 원자로의 가동연수를 Holloman-Jaffe식¹²⁾으로 시뮬레이션한 가동연수 20년과 40년에 상당하는 열시효 조건에서 탄소성 파괴인성 J_{1c} 와 파괴저항곡선(J-R curve)을 단일시험편법 중 제하 컴플라이언스법으로 평가한 결과와 저자들이 전보^{13,14)}에 발표한 복수시험편법의 결과를 비교하여 그 타당성과 열시효의 영향을 명확히 규명할 목적으로 원자로 구조용강에 사용되는 저합금강 SA533B강을 사용하여 375°C×66일과 375°C×200일에서 열시효 처리한 것을 파괴인성 실험하였다.

2. 재료 및 실험방법

2-1. 시험편 및 열시효처리

본 실험에 사용된 재료는 원자로 구조용 저합금 SA533B강이며 화학적 성질은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다. 원자로 압력용기의 표면균열을 가상하여 L-S방향으로 채취하고 시험편은 Fig 1과 같이 가공하였다. 열처리 조건은 Table 3과 같으며 가공 후 잔류응력을 제거하기 위하여 응력완화 하였다.

열시효처리는 열시효 온도 375°C 에서 열시효 시간 66일, 200일간 유지했다. 이때 온도는 $\pm 5^\circ\text{C}$ 범위로 조정했으며, 정전시는 온도보정을 하였다. 열시효조건은 Hollomon-Jaffe 식으로 상정한 경우로 구조용기의 설계보수 수명 20년과 40년에 해당하는 조건으로 375°C×66일, 200일로 하였다.

Hollomon-Jaffe 식¹⁰⁾의 온도 파라메타 TP값은 다음 식에 의해서 계산하였다.

$$TP = T(C + \log t) \times 10^{-3}$$

여기서 TP:온도파라메타, T:시효처리온도 ($^\circ\text{K}$), t:시효시간, 재료상수 C는 본 실험의 재료에서 10으로 했다.¹⁰⁾

Table 1. Chemical composition of SA533B steel(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.20	0.27	1.45	0.020	0.012	0.60	0.14	0.51
Cu	V	Al	Sn	As	Sb		
0.16	<0.01	0.023	0.010	0.014	0.93		

Table 2. Mechanical properties of SA533B steel

Yield strength σ_{ys} MPa	Tensile Strength σ_b MPa	Elongation %	Reduction in area %
480	631	27.7	65.2

Table 3. Heat treatment of SA533B steel

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

2-2 열시효에 의한 조직관찰

시험편을 두께중앙에 절단하고 표면을 0.3mm 연마한 후 처너재와 375°C×66일 열시효 처리재의 광학현미경 관찰은 저하중에서 예하중을 준 상태의 시험편을 사용하여 배율(×400)로 관찰하였으며, 375°C×200일 열처리재는 실험하기 전에 예균열 삽입상태에서 배율(×400)로 조직관찰을 하였다. 관찰부위는 Fig.2 에 표시한 것과 같이 균열선단부위(A)와 균열선단으로 부터 충분히 떨어진 부분(B)로 구분하여 관찰한 결과를 Fig.3에

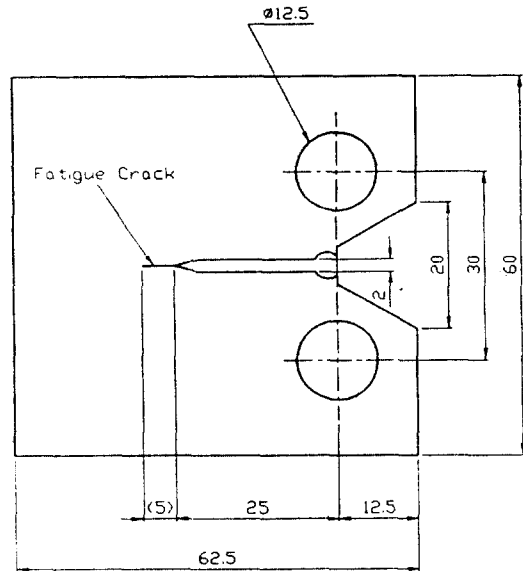


Fig. 1 Compact specimen and its orientation

표시했다.

열시효(375°C×66일)재는 처너재에 비해 조직의 변화가 거의 없으나 375°C×200일재는 시효시간이 길어졌으므로 균열선단에 약간 조대화되어 있다.

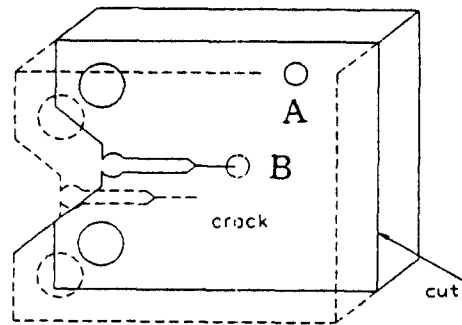


Fig. 2 Location of observation

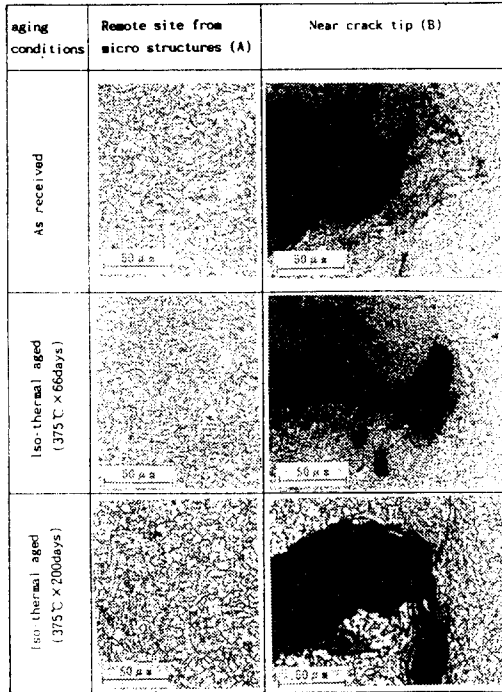


Fig. 3 Micro structures on aging condition

2-3 실험방법

전보¹³⁾¹⁴⁾의 복수시험편법은 ASTM E813과 JSME S001 규정에 준했으며 본 실험은 ASTM E813- 87의 제하 컴플라이언스법에 따라 J_{Ic} 및 탄소성 파괴저항곡선을 구했다. 시험편의 예균열은 최대응력 확대계수 $K_{fmax} < 25 \text{ MPa} \sqrt{m}$, 응력비 $R =$

0.1 로 예균열길이 약 3mm를 삽입했다. 최종 균열길이버는 $a/w = 0.6$ 으로 하였다. 시험은 용량 10tonf의 유압피로시험기에서 복수시험편법은 하중제어로 하고, 제하 컴플라이언스법에서는 변형율 제어로 하였다. 해석방법은 복수시험편의 경우 ASTM과 JSME S001 규정에 준하여 J적분 계산식은 다음식을 사용하였다.

$$J = \frac{A}{Bb} f(a_0/w)$$

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

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

여기서 $B =$ 시험편 두께 (mm), $W =$ 시험편 폭 (mm), $a_0 =$ 예균열길이, $b =$ 리가먼트 $A =$ 하중-하중선변위 곡선의 면적(Kg-mm)이다.

J적분과 Δa 관계를 직선화하고 R 곡선의 구배 dJ/da 을 무차원화 한 tearing modulus T_m 는 (2)식에 의하여 계산했다.

$$T_m = (E/\sigma_{fs}^2)(dJ/da) \quad (2)$$

여기서 $E =$ 탄성계수(MPa), $\sigma_{fs} =$ 유동응력(MPa)이다.

제하 컴플라이언스 법의 경우 J적분 계산식은 (3)과 같다.

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

$$\eta_i = 2\{(1+a_i)/(1+a_i)^2\}$$

$$a_i = \{(2a_i/b_i)^2 + 2(2a_i/b_i) + 2\}^{1/2} - \{(2a_i/b_i) + 1\}$$

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

여기서 J_i 는 i 번째의 제하에 해당하는 J적분, $A_{i,i+1}$ 은 $i, i+1$ 번째의 제하점 사이의 하중-하중선변위곡선의 면적(에너지), a_i 와 b_i 는 i 번째의 제하에 해당하는 균열길이와 리가먼트의 길이이다. 균열길이는 다음 (4)식에 의해서 구했다.

$$a_i/W = 1.000196 - 4.06319U + 11.242U^2 - 106.043U^3 + 464.335U^4 - 650.677U^5 \quad (4)$$

$$U = 1/(\sqrt{B \cdot E \cdot C} + 1)$$

여기서 $C = V/P$, $E =$ 탄성계수이다.

제하시 균열 선단의 압축응력에 의해 균열길이 감소현상이 나타나므로 압축응력에 의한 컴플라이언스의 오차를 보정함으로써 균열길이 감소현상을 방지할 수 있다. CT시험편의 균열길이 측정의 수정식은 Rosenthal등⁵⁾이 수정 함수식을 제안하고 있으나, 이 식의 계산이나 적용이 매우 번거롭다. 이러한 번거로움이 없는 균열길이 감소현상의 간편한 처리방법으로 Voss등⁴⁾이 제안한 offset technique를 사용하여 J_{Ic} 및 J-R곡선을 수정하

여 사용했다.

유효 데이터의 검정은 ASTM 규정과 JSME S001 규정에 의해서 수행하고, $J_{max} = b \cdot \sigma_y / 15$ 개념을 도입하여 본 시험의 재료에 적용가능성을 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 둔화직선

둔화직선(blunting line)은 ASTM에서는 ① $J = 2\sigma_{fs}\Delta a$, ② $J = (E/95)SZW$ 식과 JSME에서는 스트레치존 폭을 실험에서 실측하여 ③ $J = (E/129)SZW$ 식으로 구하도록 권장하고 있다.⁴⁾ 고강도강에서는 ASTM에서 제안한 $J = 2\sigma_{fs}\Delta a$ 의 직선과 JSME의 실측점은 거의 일치하나 본 실험과 같은 저강도 연성재료에서는 이들 오차가 크므로 JSME법에 의해서 구하는 것이 권장되고 있다. 본 실험에서는 SA533B강에 대하여 실측하여 구한 둔화직선의 결과는 Fig. 4와 같으며 이들 실험결과에서 얻은 것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

- ①의 경우 $J = 1110 SZW$
- ②의 경우 $J = 2166 \Delta a$ (5)
- ③의 경우 $J = 1667 SZW$

여기서 $\sigma_{fs} = (\sigma_{ys} + \sigma_B) / 2$ 는 유동응력이고 σ_{ys} 는 항복응력, σ_B 는 최대응력 SZW는 스트레치존 폭이며 SEM에서 관찰한 것과 그때의 J값으로 플롯 해서 얻어진 것이 ③식이다.

①의 경우 ③에 비해 J_{1c} 값이 과대평가되고 ②는 ③에 비해 과소평가된다. 이들 둔화직선을 사용하여 열시효재의 정량적 J_{1c} 값을 비교 평가한다.

3-2. 복수시험편법의 J_{1c} 및 J-R곡선에 미치는 열시효 영향

Fig. 5 에 처녀재와 열시효처리 375°C×66일,

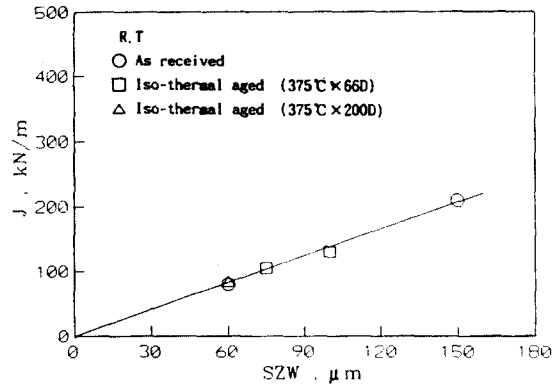


Fig. 4 J-SZW relation

375°C×200일재의 $J-\Delta a$ 관계를 나타내었다. 둔화직선상의 각 심볼 중 solid점은 SZW의 실측점이며 open점은 실험점이다. 이들 각 시험편의 $J-\Delta a$ 관계를 직선화 하고 둔화직선 ①②③식과 교점을 J_{1c} 로 한 값을 Table 4에 표시했다. 이들 결과를 종합하면 탄소성 파괴인성 J_{1c} 에 미치는 열시효 영향은 거의 나타나지 않았다. ASTM에서 제안한 ①②둔화직선은 ③의 둔화직선식에 비해 J_{1c} 값이 과대 과소 평가 되었다. 탄소성 파괴저항 곡선의 기울기 dJ/da 와 dJ/da 를 무차원화한 Tearing modulus의 정량적인 값은 처녀재에서 $dJ/da = 266kN/m^2$, $T_m = 180$. 375°C×66일 열시효재의 $dJ/da = 248kN/m^2$, $T_m = 168$ 이였으며 200일 열시효재의 경우 $dJ/da = 235kN/m^2$, $T_m = 159$ 이었다. 이들 결과를 Table 4에 함께 표시했다. 이들 결과를 참고하면 dJ/da 는 열시효 시간에 따라 약간 감소하나 이 영향은 미소하므로 열시효 영향은 거의 없다고 생각된다. 그러나 375°C×200 열시효재에서는 약간 작아지므로 이 이상조건에서 열시효 영향의 의문이 제기 된다. 따라서 원자로 가동연수 20년, 40년 사용수명에 미치는 열시효에 의한 안정균열 진전에 큰 영향이 없으며 저항곡선에도 큰 영향은 없으나 200일째에서 dJ/da 가 약간 작아지고 있다는 점은 사용수명에 따른 보수기간 및 안정성 평가에 유의해야 되겠다는 정보를 얻을 수 있다.

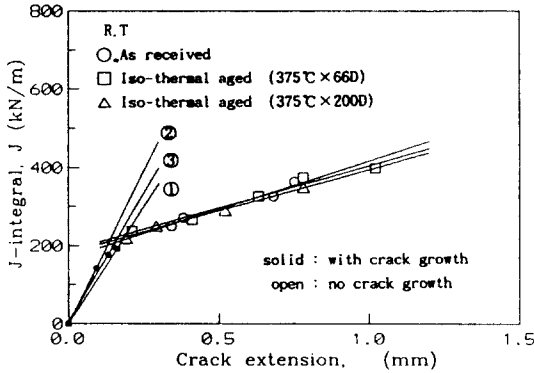


Fig. 5 Effect of iso-thermal aging of 375°C × 66days and 375°C × 200days on J-Δa curve by multi specimen method at R.T.

Table. 4 Fracture toughness test results by multiple specimen method at R.T

Aging condition	Blunting line	J _{1c} (KN/m)	dJ/da (MN/m ²)	T _m
As received	①	230	266	180
	②	200		
	③	210		
Iso-thermal aged (375°C × 66days)	①	230	248	163
	②	210		
	③	215		
Iso-thermal aged (375°C × 200days)	①	225	235	159
	②	200		
	③	210		

- ① $J = 2 \sigma_{fs} \Delta a$
- ② $J = (E/95) SZW$
- ③ $J = (E/129) SZW$

3-3 제하 컴플라이언스의 균열길이 감소 현상의 영향

연성재료의 제하 컴플라이언스에 의한 J_{1c} 및 J-R곡선 해석을 평가할 때 생기는 균열길이 감소 현상은 시험편 지그의 편심에 의한 압축응력 영향에 따라 즉 최대하중과 제하하중의 차이 ΔP에 큰 영향을 받을 수 있다. 이 원인을 제거하기 위해서 시험편 지그를 ASTM규정에 따라 정확히 제작하

고 (4)식과 같이 컴플라이언스에 의한 균열길이 측정시 보정에 의한 수정식이 제안되고 있으나 이 식을 사용하여 보정할 때 계산이나 적용이 번거로운 결점이 있다. 그러나 ASTM과 JSME의 둔화 직선을 기준으로 균열감소현상의 최대치 Δa_{err}를 구하여 offset technique으로 간편하게 처리하면 정도있는 실험결과를 얻을 수 있다.

본 실험에 사용한 치너재의 제하 P-δ곡선을 사용하여 컴퓨터에 의한 자동데이터로 J-Δa관계를 구하면 Fig.6의 □형상의 J-Δa곡선을 나타낸다. 이때 초기의 균열감소현상이 본 재료에서도 생기며 이 균열길이의 감소는 계산상의 오류에 의한 것이며 균열의 찢어짐(tearing)이 시작되기 전에는 둔화 직선상의 점까지 균열이 진전해야 한다. 이러한 오차는 하중을 제하할 때에 균열선단의 압축응력에 의한 균열단합(crack closure)에 의한 것이라 생각되며 이 균열단합의 양 만큼 전 균열 길이를 보정해야 한다. Fig.6 에서 최대 균열감소점인 A점의 균열길이 감소량 만큼 다른 데이터에도 균열길이가 감소되었다고 가정하고 최대 균열길이 감소점과 둔화직선 사이의 거리 Δa_{err}만큼 모든 데이터에 균열진전량을 보정해야한다. 이 결과 Fig.6의 ○형상의 J-Δa곡선으로 수정할 수 있다. 이 곡선과 ASTM E813-87규정에 의한 실선 ①의 둔화직선과 0.15% offset line과 1.5% offset line의 데이터를 최소자승법에 의한 직선식과 만나는 교점을 J_{1c}로 평가하고 점선③의 둔화 직선과도 비교 평가하였다. 균열길이감소현상을 보정한 단일시험편 제하 컴플라이언스에 의해 얻어진 ①의 (J_{1c})_{mod.} = 362KN/m이므로복수시험편의 값과 비교하면 57% 과대평가되며 ③의 (J_{1c})_{mod.} = 300KN/m도43% 과대평가되고 있다. 이들 값은 $B \cdot b \geq 25(J/\sigma_y)$ 로 주어지는 J의 유효조건은 만족하나, 복수시험편법에 비해 과대평가된다. 따라서 JSME S001 규정에서 권장하고 있는 유효 데이터의 범위를 $J_{max} = b \cdot \sigma_y / 15$ 의 개념을 도입하여 Fig. 6에서 J 유효조건을 만족하는 데이터를 ⊖형상으로 표시했다. 이 5개의 점을 최소자승법으로 직선화하여 둔화직선① 및 ③과 만나는 값 ①의 (J_{1c})_{eff.} = 300KN/m, ③의 (J_{1c})_{eff.} = 230KN/m이므로 ③의 값은 복수시험편

의 $J_{IC}=200\text{KN/m}$ 과 거의 일치하는 결과를 나타냈다. 따라서 본 연구의 시험편과 같은 연성재료의 경우도 제하 컴플라이언스법으로 2%이내 오차를 갖는 유효한 탄소성 파괴인성 (J_{IC})_{eff} 값을 구할 수 있다. 이들 결과를 Table 5에 나타내었다.

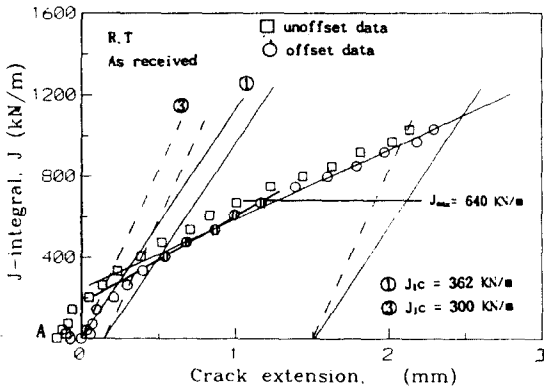


Fig. 6 J-R curve obtained for as received by unloading compliance at R.T.

Table. 5 Fracture toughness test results on modified negative crack growth of offset technique by unloading compliance method at R.T

Aging condition	Blunting line	(J_{IC}) _{eff} (KN/m)	(J_{IC}) _{mod} (KN/m)	dJ/da (MN/m ²)	T _m
As received	①	300	362	335	226
	③	230	300	340	230
Iso-thermal aged (375°C×66days)	①	210	343	341	230
	③	235	290	345	233
Iso-thermal aged (375°C×200days)	①	280	327	262	177
	③	230	285	270	182

- ① $J = 2 \sigma_{fs} \Delta a$
- ② $J = (E/129) SZW$
- ③ $J = b \cdot \sigma_r/15$

3-4 제하컴플라이언스법의 J_{IC} 및 J-R곡선에 미치는 열시효 영향.

Fig.7은 375°C×66일 열시효 처리한 시험편의 결과를 나타냈다. 균열감소 길이를 보정한 J- Δa 곡선을 ○형상으로 표시하고, 보정하지 않은 결과를 □형상으로 표시했다.

375°C×66일 열시효 처리재에서도 처녀재와 같은 경향으로 균열감소 길이를 수정한 경우 ①의 (J_{IC})_{mod}=343KN/m, ③의 (J_{IC})_{mod}=298KN/m 이므로 복수시험편법의 J_{IC} 값보다 역시 과대평가되고 있다. 따라서 앞에서 제안한 $J_{max}=b \cdot \sigma_y/15$ 값을 제외한 유효 데이터를 구한 (J_{IC})_{eff}값으로 정리하면 ①의 경우 298KN/m, ③의 경우 235KN/m이므로 복수시험편 $J_{IC}=215\text{KN/m}$ 법의 값과 비교하면 ③의 경우는 거의 일치하므로 유효한 값을 얻을 수 있다.

Fig.8은 375°C×200일 열시효 처리재의 J- Δa 실험 결과이다. Fig.7과 같은 (J_{IC})_{mod} 와 (J_{IC})_{eff} 경향을 얻었으며 이들 결과를 종합하여 Table 5에 표시했다. 이 결과 Table 4의 복수시험편의 결과를 비교하면 (J_{IC})_{mod}에 미치는 열시효의 영향은 거의 나타나지 않았으며 복수시험편법의 결과와 같은 경향이나, 정량적인 (J_{IC})_{mod}값들은 복수시험편법에 비해 과대평가되고 있다. 그러나

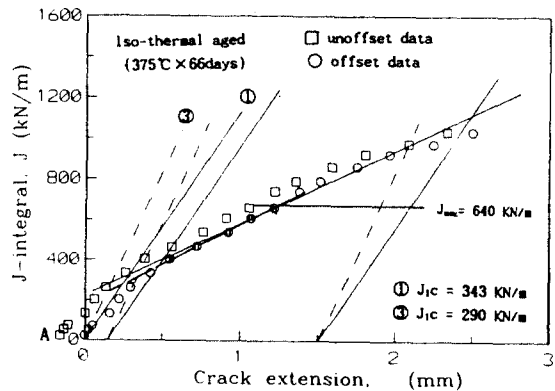


Fig. 7 J-R curve obtained for iso-thermal aged(375°C×66days) by unloading compliance at R.t.

$(J_{IC})_{eff}$ 로 평가하면 복수시험편의 값과 거의 일치하는 값을 얻을 수 있었다.

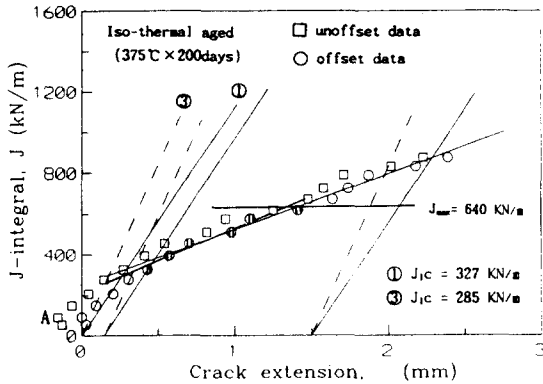


Fig. 8 J-R curve obtained for iso-thermal aged(375°C×200days) by unloading compliance at R.T.

dJ/da 는 열시효 375°C×66일재는 처녀재와 비슷하나 375°C×200일재는 약간 감소하였다. 이 결과도 복수시험편법의 결과와 유사한 경향이나, dJ/da 의 정량적인 값은 복수시험편법에 비해 과대평가되고 있다. 이상 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8의 결과를 비교하면 열시효 영향이 정량적으로 미소한 차이를 나타내고 있으나 이 영향을 Fig. 3의 조직변화의 측면에서 생각해 보면 열시효(375°C×66일)재는 처녀재에 비해 조직 변화가 거의 없으므로 파괴인성치의 변화도 나타나지 않았으나, 750°C×200일재는 열시효 기간의 증대로 조직이 균열선단에 약간 조대화 되어 있으므로 파괴인성치도 약간 저하하는 것으로 생각된다. 현재 상용화되고 있는 제하 컴플라이언스 법의 프로그램중 자동데이터 처리에 의해 $J-\Delta a$ 곡선을 얻는 것을 연성재료에 사용할 때 본 실험결과의 □형상의 결과를 가져오므로 균열감소 현상을 수정하지 않고 그대로 평가하여 설계수명 데이터로 사용하면 과대평가 되므로 본 연구에서 사용한 유효데이터 범위에서 정리한 $(J_{IC})_{eff}$ 로 평가하면 경제적이고 신뢰성 있는 정보를 얻을 수 있다.

4. 결론

SA533B강의 모재와 375°C×66일과 375°C×200일 열시효 처리재의 제하 컴플라이언스법에 의한 파괴인성의 실험결과와 복수시험편법의 실험결과를 비교 검토한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 균열감소 현상을 보정하지 않은 컴플라이언스법으로 본 실험과 같은 연성재료의 J_{IC} 및 dJ/da 평가시 복수시험편법에 비해 매우 과대평가되므로 간편한 offset법에 의해 균열감소 현상을 보정하고, $J_{max}=b\cdot\sigma_Y/15$ 범위이내의 유효데이터로 구한 $(J_{IC})_{eff}$ 가 복수시험편법의 결과와 거의 보수적인 결과가 나타났다.

2. 유효탄소성파괴인성 $(J_{IC})_{eff}$ 에 미치는 열시효 영향은 거의 나타나지 않았다. 탄소성 파괴저항곡선에 미치는 열시효 영향은 375°C×66일 열시효재 경우는 거의 나타나지 않고, 375°C×200일 재에서는 dJ/da 가 약간 저하하는 현상이 나타나고 있다. 이 영향은 미소하므로 공학적 설계개념에서는 무시할 수 있으나 안전성평가와 수명보수 기간 측면에서는 중요한 자료가 될 것으로 생각된다.

참고 문헌

- Hong, J.H., Proc. of KIM-KSME Joint Symposium '90, pp.1-11, 1990
- Hur, S.K., Proc. of KIM-KSME Joint Symposium '90, pp.30-35, 1990
- Oldfield, et al., Fracture Toughness Prediction for Pressure Vessel Steels, ASTM, MPC-24, pp.9-26, 1984.
- Kanninen, et al, A Critical Survey on the Application of Plastic Fracture Mechanics to Nuclear Pressure Vessels and Piping, NUREG/CR-2110, 1981

5. Standard Test Method for J_{IC} , ASTM E813-87, 1987
6. Standard test Method for J_{IC} , JSME S001, 1981
7. Standard Test Method for Determining J-R Curves, ASTM E1152-87, 1987
8. Voss, B. and Mayvile, 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
9. Rosenthal, Y.A. et.al., J_{IC} Data Analysis Methods with Negative Crack Growth Correction Procedure, Journal of Testing and Evaluation, ASTM, Vol. 18, No.4, pp.301-304, 1990
10. 석창성, 최용식, J-R 곡선에서의 균열길이 감소현상에 대한 연구 (II), 대한기계학회 논문집, 제16권, 제9호, pp.1627-1631, 1992
11. 최용식, 석창성, J_{IC} 해석에서의 균열길이 감소현상에 대한 고찰 (III), 대한 기계학회 '91년도 추계학술대회 논문집 pp.100-103, 1991
12. Hollomon, J.H. and Jaffe, L.D., Trans.of ASME, Vol.162, p.223, 1945
13. 윤한기, 차귀준, 동의대학교 산업기술연구지, 제7권, pp.1-9, 1993
14. Yoon, H.K. et.al, Proc. KIM-KSME Joint Symposium '90 on Mechanical Behavior of Materials Aug. Daejeon, pp.187-192, 1990.