

압력용기용강의 고온파괴인성에 관한 연구

A Study on HIGH TEMPERATURE FRACTURE TOUGHNESS of Pressure Vessel Steel SA516 at High Temperature.

박경동* · 김정호**

* 부경대학교 기계공학부

** 부경대학교 대학원 기계공학과

ABSTRACT Elastic-plastic fracture toughness J_{1c} can be used as an effective design criterion in elastic plastic fracture mechanics. Most of these systems are operated at high temperature and J_{1c} values are affected by temperature. therefore, the J_{1c} valuse at high temperature must be determined for use of integrity evaluation and designing of such systems. Elastic-plastic fracture toughness J_{1c} tests were performed on SA516 carbon steel plate and test results were analyzed according to ASTM E 813-87, ASTM E 813-89. Safety and integrity are required for reactor pressure vessels vecause pthey are operated in high temperature. there are single specimen method, which used as evaluation of safety and integrity for reactor pressure vessels. In this study, elastic-plastic fracture toughness(J_{1c}) and $J-\Delta a$ of SA 516/70 steel used as reactor pressure vessel steel are measured and evaluated at room Temperature, 150°C, 250°C and 370°C according to unloading compliance method.

Key Words : Pressure vessel steel(압력용기용강), High fracture toughness(고온파괴인성), Fracture resistance curve(파괴저항곡선), Unloading compliance method(제하컴플라이언스법), Side groove effect(측면홈 효과)

1. 서 론

원자로의 압력용기 및 배관은 원전의 안전에 직결되는 대형구조물로서 원자로 압력경계중 (pressure boundary)가장 중요한 부품들이다. 이들 구조물의 재료로는 고온,고압에서 장시간 견딜수 있는 강도와 인성 및 내식성 뿐만아니라 충분한 안전의 여유를 가질 수 있는 우수한 파괴특성을 갖춘 소재가 요구된다. 따라서 파괴현상은 전파면에 걸쳐 동시에 일어나기 보다 취약점에서 파괴의 핵 혹은 미세균열이 형성되고 이것이 성장하고 합체가 되는 과정을 거치거나 이미 존재하는 균열상 결함을 기점으로 이균열이 성장하는 과정으로 진행하게된다. 재료의 파괴거동은 파괴인성에 의하여 평가되고 있으며, 파괴역학에 기초한 파괴인성시험법은 규격화되었고 평면스트레인 파괴인성 K_{Ic} 를 평가하는 시험법은 ASTM E399(ASM E399,1990)에 규정되어 있으며 널리 통용되고 있다.

ASTME813 (ASTME813-81,1981;ASTME813-89, 1981) 및 JSME S001(JSME S001, 1981)에 의한 J_{1c} 시험은 CT시험편과 3점굽힘시험편은 주로 채

용하고 있으며 이들 소형시험편에의 안정균열발생을 파괴인성평가의 대상으로 하고 있다. ASTM 규격에서는 복수시험편외에 제하컴플라이언스법에 의한 단일시험편법도 인정하고 있다.

본 연구에서는 저고온 압력 용기, 저장용 탱크, 원자로 냉각재 배관, 탑조류 등에 사용되는 SA516강에 대하여 파괴인성거동은 ASTM E813-89 (1989) 규정에 따라 파괴인성시험을 시행하였으며 제하컴플라이언스 법에 따라 R.T, 150°C, 250°C 및 370°C에서의 $J-\Delta a$ 관계를 구하였으며 안정균열성장점 J_{1c} 를 평가하여 압력용기 구조물 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 용접성, 절삭성 및 가공성이 우수한 SA516 압력용기용 강재이며 시편의 화학적 성분은 Table1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table2에 나타내었다.

실험에 사용된 시험편은 CT시험편으로 두께 15mm이고, 시험편 채취 방향은 압연방향과 부하

방향이 평행하고 균열진전방향이 이에 수직인 L-T방향으로 채취하였으며, 슬로터가공은 와이어 커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)를 사용하여 ASTM E813-89(1989) 규정에 따라 측면홈(side grooved) CT시험편으로가공하였다. Fig.1은 본 연구에 사용된 측면홈20%(side grooved) CT시험편 형상과 치수를 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cn	V	Mo	Cb	Al
0.16	0.30	1.14	0.008	0.001	0.36	0.07	0.20	0.027	0.097	0.018	0.028

Table 2 Mechanical properties of specimen

Temp. (°C)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation (%)
RT	390	558	26
150	373	549	28
250	363	540	31
370	363	550	27

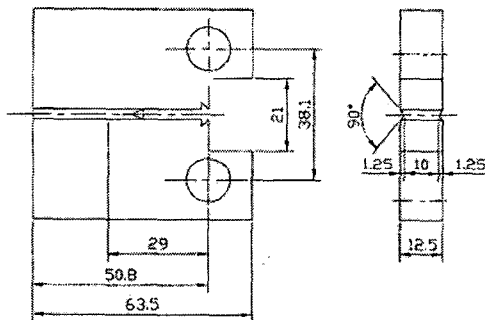


Fig. 1 Configuration of side grooved CT specimen(unit:mm)

2.2 실험장치

본 실험에서 사용된 것은 전기유압식 피로시험기(MTS:10t)이며, 모든 파괴역학적 파라미터는 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 산출하였다.

고온실험을 위한 장치는 MTS(810)사의 고온용 챔버를 이용하여 1000°C까지 자동온도조절이 가능한 온도조절기와 고온용 COD게이지(high temperature COD gage)를 사용하였다.

Fig.2는 본 실험에서 사용한 실험장치의 구조도이다.

2.3 실험방법

실험은 10t용량의 서보 전기유압식 피로시험기

(MTS:810)를 사용하여 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 고온챔버내의 온도분포가 균일하게 자동으로 조절되도록 시편의 균열부와 고온챔버내에 온도감지장치를 설치하여, 온도를 감지하고 자동으로 조정하여 온도편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 하였다. 하중선 변위는 고온용 COD 게이지(high temperature COD gage, maximum temperature, 1000°C)를 사용하여 측정하였으며, 게이지 길이는 12.5mm로 하였다. 파괴인성시험을 ASTM E813-89(1989) 규정에 따라 제하컴플라이언스 법으로 고온용 COD 게이지를 이용하여 R.T, 150°C, 250°C 및 370°C에서 하중속도(0.05mm/min)와 온도변화에 따른 $J-\Delta a$ 관계를 구하고 J_{IC} 값을 평가하였다.

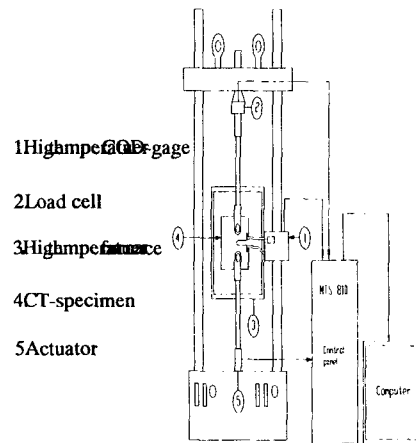


Fig.2 Schematic diagram of J_{IC} testing system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상온에서 평활CT 시험편에 의한 파괴인성 평가

SA516강 재료를 LT방향으로 CT시험편을 제작하여 ASTM E 813-89 규정에 의하여 제하 컴플라이언트법에 의한 R곡선법에 의해 상온(25°C)에서 파괴인성시험을 한 결과를 Fig.3에 나타내었다. 본 시험의 둔화직선은 ASTM 813-89 방법에 의해 $J=2\sigma_y \Delta a$ 에 따라 구하였으며 σ_y 값은 유효 항복강도를 $(\sigma_{ys} + \sigma_B)/2$ 로 계산한 $474\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 $J=948\Delta kN/m$ 으로 하였다. J_{max} 은 시험편 파단후 b_0 를 측정하여 계산하였으며 $J_{max} = b_0 \cdot \sigma_y/15$ 에서 $J_{max} = 711\text{ kN/m}$ 로 하였다. R곡선과 제외선의 교점에서 구한 Δa_{min} 은 0.57mm였고 Δa_{max} 는 2.38mm였다.

이 조건에 의해 R곡선과 둔화직선의 0.2mm 윗

셋선의 교점에서 J_{Ic} 를 구하면 $J_{Ic} = 431.18 \text{ kN/m}$ 였다. 이 재료의 상온(25°C)의 탄소성파괴인성치 $J_{Ic} = 431.18 \text{ kN/m}$ 이었다고 생각되어진다.

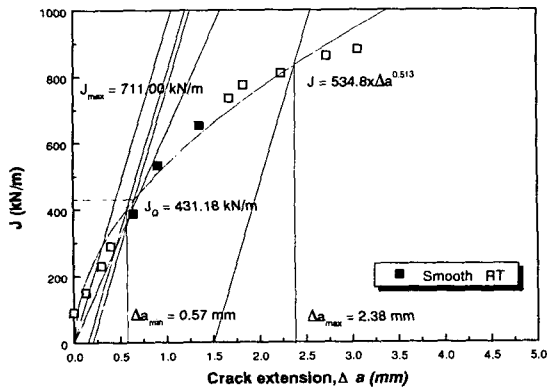


Fig.3 Relations between J-integral and crack extension at RT

3.2 상온에서 평활 및 측면 홈 CT 시험편에 의한 파괴인성 관계

Fig.4에 상온(25°C)에서 양측면에 20%의 side groove으로 방전가공한 측면홈 CT 시험편에 의한 ASTM E 813-89의 규정에 의해 시험한 $J-\Delta a$ 관계에서 구한 결과와 3-1의 평활시험편의 $J-\Delta a$ 의 관계를 비교하여 나타내었다.

유효점에 의해 구한 지수곡선식은 평활 시험편의 경우 $J = 534.8 \Delta a^{0.513}$ 이고, 측면홈 시험편의 경우 $J = 524.95 \Delta a^{0.407}$ 이므로 측면홈 시험편의 균열진전이 평활시험편의 균열진전보다 진행 속도가 빠르게 나타남을 알 수 있다.

그리고 0.2mm의 윗셋선과 지수곡선의 교점에서 구한 평활시험편의 $J_{Ic} = 431.18 \text{ kN/m}$ 이고, 측면홈시험편의 경우 $J_{Ic} = 445.29 \text{ kN/m}$ 로 측면홈이 평활시험편보다 J_{Ic} 값이 크게 평가되었다.

따라서 측면홈을 기준으로 3.16%의 차이로 이는 극히 근소한 차이로서 측면홈시험편이나 평활 시험편의 경우나 동일하게 평가할 수 있다고 볼 수 있다.

$J-\Delta a$ 관계에서 Δa_{min} 의 값은 평활시험편이 0.57mm이고 측면홈 시험편에서는 0.60mm이므로 0.03mm차이는 있으나 거의 일치한 것으로 볼 수 있다.

그리고 Δa_{max} 의 경우는 평활시험편이 2.38mm,

측면홈 시험편의 경우가 2.27mm로서 거의 일치하고 있다.

따라서 탄소성파괴 인성 측정에는 측면에는 측면홈 시험편을 기준으로 하여 J_{Ic} 를 결정하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

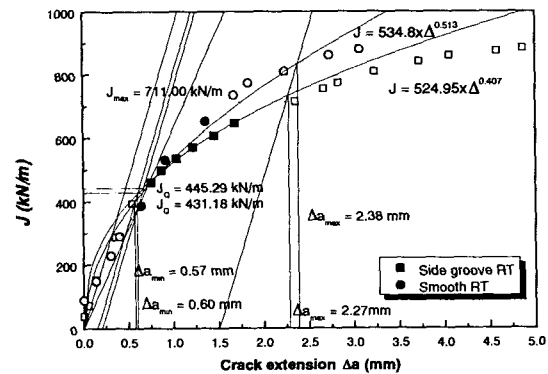


Fig.4 Comparison with side groove and smooth specimen at RT

3.3 고온에서의 탄소성파괴인성 평가

Fig.5에 SA516강을 LT방향으로 20%의 측면홈 CT시험편에 의한 시험온도 150°C, 250°C 및 370°C에서 ASTM E 813-89규정에 의해 제하킴플라이언스법 구한 $J-\Delta a$ 관계를 나타내었다.

둔화직선은 상온의 경우와 마찬가지로 $J = 2 \sigma_y \Delta a$ 식에 의해 구하였다.

상온 평활시험편의 경우 $\sigma_y = 474 \text{ MPa}$ 이므로 $J = 922 \Delta a \text{ kN/m}$ 이며, Δa_{min} 은 0.59mm, Δa_{max} = 2.18mm이며, R곡선과 둔화직선의 교점에서 구한 $J_{Ic} = 425.81 \text{ kN/m}$ 로서 R곡선법에 의해 안정 균열이 성장거동으로 평가할 수 있다.

그리고 250°C의 $J-\Delta a$ 의 관계에서 둔화직선식은 $J = 2 \sigma_y \Delta a$ 식에서 $\sigma_y = 451.5 \text{ MPa}$ 를 대입하여 $J = 903 \Delta a \text{ kN/m}$ 로 하였으며 Δa_{min} 은 0.44mm, Δa_{max} = 2.02mm로 둔화직선의 0.2mm 윗셋선과 R곡선의 교점에서 구한 $J_{Ic} = 299.86 \text{ kN/m}$ 였다. 탄소성 파괴인성치 J_{Ic} 를 비교해 보면

상온(25°C)의 경우 $J_{Ic} = 445.29 \text{ kN/m}$ 이고,

150°C의 경우 $J_{Ic} = 425.71 \text{ kN/m}$,

250°C의 경우 $J_{Ic} = 288.35 \text{ kN/m}$,

379°C의 경우 $J_{Ic} = 299.86 \text{ kN/m}$

로 상온(25°C)에서 250°C까지의 탄소성 파괴인성치 J_{Ic} 의 값이 온도의 상승에 따라 감소하였으나 370°C의 경우는 250°C의 경우보다 약간 J_{Ic} 의 값이 증가함을 보였다. 이의 결과를 온도에 따라 J_{Ic} 의 값은 감소하였다. 이는 온도가 증가함에 따라 안정균열진전에 대한 저항이 감소함을 나타내었다.

상온(25°C)와 150°C의 경우 R곡선에 의한 J_{Ic} 의 값은 근소한 차이인 4.40%만 감소하였다. 그러나 250°C와 비교하면 상온(25°C)의 경우가 44.29 kN/m, 150°C 425.70 kN/m였으나 250°C는 288.35 kN/m로 250°C의 경우가 크게 감소함을 보였다.

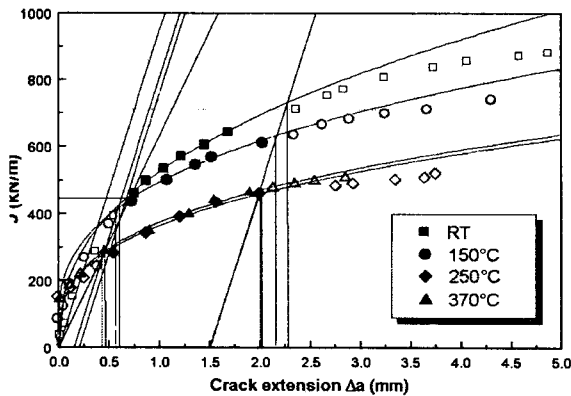
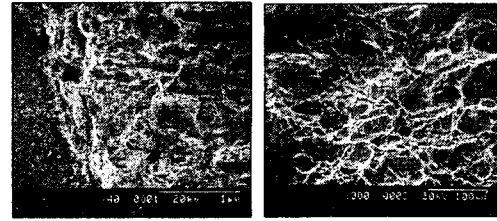


Fig.5 Relations between J-integral and crack extension at RT, 150°C, 250°C and 370°C

이는 J_{Ic} 의 천이 온도현상이 150°C에서 250°C의 온도범위에서 발생하는 것으로 생각되며 250°C에서 370°C의 온도에서는 J_{Ic} 의 변화가 거의 일정하게 나타나거나 약간 상승한 것으로 나타났다. 그러므로 370°C이상의 J_{Ic} 의 값은 크게 변화 없을 것으로 예상된다.

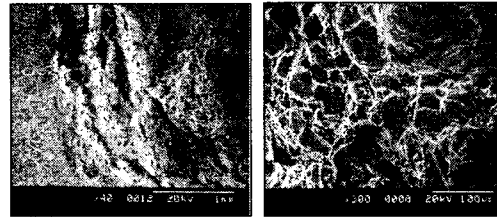
3.4 파면해석

Fig. 6과 Fig. 7은 상온 및 370°C에 대한 전자현미경 사진이다. 파면전체에 걸쳐 개재물과 제 2상의 석출물이 현저하게 많이 나타났으며 스트레치영역에 많은 사행파면과 리플면이 나타나 있다. 신장형 뒨플영역은 감소되어 있으나 등축형 뒨플영역은 큰 개재물에 의한 공공과 석출물에 의한 작은 뒨플이 혼존하고 있다.



(a) Stretch zone (b) Dimple zone

Fig. 6 SEM fractographs showing fracture surface of SA516/70 specimen, RT



(a) Stretch zone (b) Dimple zone

Fig. 7 SEM fractographs showing fracture surface of SA516/70 specimen, 370°C

4. 결론

압력용기용 SA516 강의 파괴인성실험에서 상온, 고온에서 측면홈 CT시험편에 의한 탄소성 파괴인성실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 측면홈 CT시험편에 의한 J_{Ic} 평가는 ASTM E813-89방법에 따르면 R.T, 150°C, 250°C 및 370°C에서 부대조건이 만족되는 유효한 J_{Ic} 를 구할 수 있었다.
- (2) ASTM E813-89방법에 의한 J_{Ic} 값은 R.T에서 445.29 kN/m, 150°C에서 425.70 kN/m, 250°C에서 288.35kN/m, 370°C에서는 299.86 kN/m 였다.
- (3) 측면홈 CT시험편에 의한 탄소성 파괴인성치 J_{Ic} 는 온도가 상승함에 따라 감소되며 150°C에서 250°C사이에서 천이현상이 나타난다.
- (4) 파면에 있어서 스트레치 영역에는 사행파면이 존재하며 온도증가에 따라 점차 확장되며 뒨플은 신장된 타원형태로 나타난다.

참고 문헌

1. 오세욱, 안광주, 운영재. "SB41강의 평할 및 측면홈 CT 시험편의 J_{Ic} 평가," 대기기계학회논문집, 제 10권, 제 4호, PP.494-503, 1986.
2. 석창성, 최용식. "J-R 곡선에서의 균열길이 감소현상에 관한 연구 (1)," 대기기계학회논문집, 제 16권, 제6호, pp. 1115-1120, 1992.