

## 압력용기용 SA516/70강의 고온파괴인성평가

박경동\* · 김정호\*\* · 윤한기\*\*\* · 박원조\*\*\*\*

\*부경대학교 기계공학부, \*\*부경대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*동의대학교 기계산업시스템 공학부, \*\*\*\*경상대학교기계수송공학부

### Evaluation on High Temperature Fracture Toughness of Pressure Vessel SA516/70 Steel

K. D. PARK\*, J. H. KIM\*\*, H. K. YOON\*\*\* AND W. J. PARK\*\*\*\*

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong national University, Pusan 608-739, Korea

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Pukyong national University, Pusan 608-739, Korea

\*\*\*School of Faculty of Mechanical and Industrial System Engineering, Dong-dui University, Pusan 614-714, Korea

\*\*\*\* School of Transport Vehicle Engineering, Gyeong Sang University, Jinju 650-160, Korea

**KEY WORDS:** Pressure vessel steel 압력용기용, High temperature fracture toughness 고온파괴인성, Fracture resistance curve 파괴 저항곡선, Unloading compliance method 제하컴플라이언스법, Side groove effect 측면홈 효과

**ABSTRACT:** Elastic-plastic fracture toughness  $J_{Ic}$  can be used as an effective design criterion in elastic plastic fracture mechanics. Most of these systems are operated at high temperature and  $J_{Ic}$  values are affected by temperature. therefore, the  $J_{Ic}$  value at high temperature must be determined for use of integrity evaluation and designing of such systems. Elastic-plastic fracture toughness  $J_{Ic}$  tests were performed on SA516 /70 carbon steel plate and test results were analyzed according to ASTM E 813-87, ASTM E 813-89 and ASTM E 1152-87. Safety and integrity are required for reactor pressure vessels because, they 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( $J_{Ic}$ ) 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.

### 1. 서 론

원자로의 압력용기 및 배관은 원전의 안전에 직결되는 대형 구조물로서 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 이 부재의 파괴현상은 전파면에 걸쳐 동시에 일어나기 보다 취약점에서 파괴의 핵 혹은 미세균열이 형성되고 이것이 성장하고 합체가 되는 과정을 거치거나 이미 존재하는 균열상 결함을 기점으로 이 균열이 성장하는 과정으로 진행하게된다(오 등,1986; 석 등,1992). 재료의 파괴거동은 파괴인성에 의하여 평가되고 있으며, 파괴역학에 기초한 파괴인성시험법은 규격화되었고 평면스트레인 파괴인성  $K_{Ic}$ 를 평가하는 시험법은 ASTM E399(ASTM E399,1990)에 규정되어 있으며 널리 통용되고 있다.

$K_{Ic}$  시험조건은 소규모항복상태에서 평면스트레인 조건을 유지해야 하기 때문에 강도에 비하여 연성이 큰재료는 이러한 조건을 만족시키려면 거대한 시험편이 필요하며 실제 용도와는 다른 거대한 규격의 소재가 소요되기 때문에 실제와 다른

조건이 시험이 될 수 있으며 시험조건을 만족시키려면 비경제적인 때도 많다. ASTM E813 (ASTME813-81, 1981; ASTME813-89, 1981) 및 JSME S001(JSME S001, 1981)에 의한  $J_{Ic}$ 시험은 CT시험편과 3점굽힘시험편은 주로 채용하고 있으며 이들 소형시험편에서 안정균열발생을 파괴인성평가의 대상으로 하고 있다. ASTM 규격에서는 복수시험편외에 제하컴플라이언스법에 의한 단일시험편법도 인정하고 있다.

이 방법은 부분제하에 의한 컴플라이언스의 미소한 변화로서 균열진정량을 계산에 의해서 추정하는것이기 때문에 컴플라이언스를 엄밀하게 측정하는데 대단한 어려움이 있으며 특히 균열발생직후의 균열진진이 적은 부분에서 컴플라이언스 변화를 측정하기 곤란한 것이 문제점으로 되어있다(오 등, 1993; 윤 등, 1996).

단일시험편법은 실험과 해석의 편리함 때문에 많이 사용되고 있으나 균열길이의 추정에 많은 문제점이 내포되어있다. 최근에는 컴퓨터에 의한 시험기법이 개발됨으로써 연성이 적으며 인성이 적은 재료에 대한  $J_{Ic}$ 평가결과는 많이 축적되어 있으나 저·중강도이며 연성이 큰재료는 R곡선의 구배가 크게 되고, 둔화직선 또는 윗셋선의 교점으로 구하는 안정균열 발생점에 대한  $J_{Ic}$ 평가는 상대적으로 평가작업이 곤란하기 때문에

연구 결과는 적은 편이다.

본 연구에서는 저온 압력용기, 저장용 탱크, 원자로 냉각재 배관, 탑조류 등에 사용되는 SA516/70강에 대하여 파괴인성 거동은 ASTM E813-89(1989) 규정에 따라 파괴인성시험을 시행하였으며 제하컴플라이언스법에 따라 R.T, 150°C, 250°C 및 370°C에서의  $J-\Delta a$ 관계를 구하였으며 안정균열성장점  $J_{IC}$ 를 평가하여 압력용기 구조물 안전설계에 기여하고자 한다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 용접성, 절삭성 및 가공성이 우수한 SA516/70압력용기용 강재이며 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

실험에 사용된 시험편은 CT시험편으로 두께 12.5mm이고, 시험편 채취 방향은 압연방향과 부하방향이 평행하고 균열진전 방향이 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) CT시험편으로 가공하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 측면홈(side grooved) CT시험편 형상과 치수를 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	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

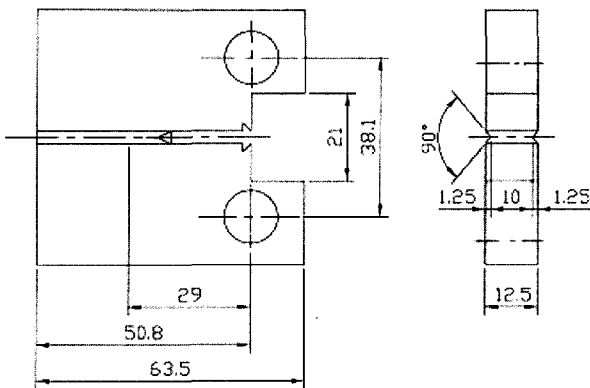


Fig. 1 Configuration of side grooved CT specimen (unit:mm)

### 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 파괴인성 실험방법

실험은 10t용량의 서보 전기유압식 피로시험기(MTS:810)를 사용하여 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 고온챔버내의 온도 분포가 균일하게 자동으로 조절되도록 시편의 균열부와 고온 챔버내에 온도감지장치를 설치하여, 온도를 감지하고 자동으로 조정하여 온도편차는 ±1°C로 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.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 측면홈이 있는 CT 시험편에 의한 탄소성 파괴인성평가

소재인 SA516/70강 재료를 L-T방향으로 측면홈 CT시험편으로 가공하고 제하컴플라이언스법으로  $J-\Delta a$ 관계를 구하여 R.T, 150°C, 250°C 및 370°C의 시험온도에 따라 정리하면 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. 측면홈 CT시험편의  $B_N$ 은 11.5mm이며  $B_e$ 는  $B_e = B - (B - B_N)^2 / B$ 의 규정식에 따라 구하면  $B_e = 12.4mm$ 였다.

Fig. 3은 R.T에서의 탄소성 거동을 나타낸 것으로 Voss등의

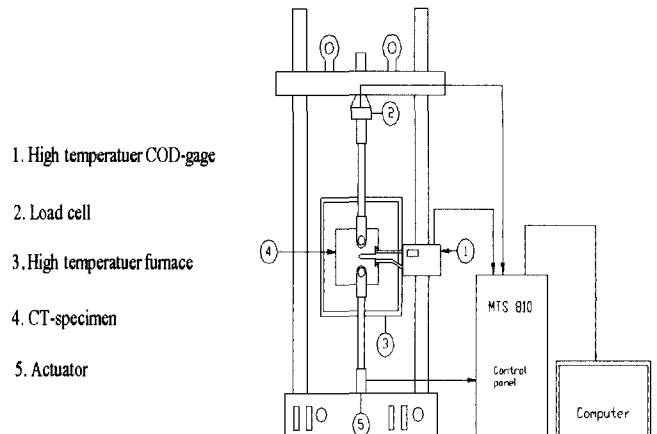


Fig. 2 Schematic diagram of  $J_{IC}$  testing system

윤셋방법에 따라 부균열 부분을 윤셋하고 R곡선을 구하였다(B. Voss et al, 1985 ; R. Bowman et al, 1988).

둔화직선은 ASTM E813-89(1989) 방법의  $J = 2\sigma_y \Delta a$ 에 따라 구하였으며 소재의  $\sigma_y$ 는 472MPa임으로  $J = 948 \text{ kN/m}$ 였다. 시컨트직선(secant line)은  $J = 4/3 \sigma_y$ , kN/m이며,  $J_{\max}$ 은 시험편 파단 후에  $b_0$ 를 측정하여 구하였으며  $J_{\max} = b_0 \sigma_y / 15$ 임으로  $J_{\max} = 711 \text{ kN/m}$ 로 하였다.

ASTM E1152-87(1987) 규정에서  $J_{\max} = b_0 \sigma_y / 20$ 로 정의하여 유효점을 엄밀히 제한하고 있다. 이에 따르면  $J_{\max} = 533.25 \text{ kN/m}$ 로서 대부분의 실험점이 무효처리되므로 ASTM E1152-87(1992) 규정은 적용할 수 없으며 ASTM E813-89(1989) 규정에 따라 유효점을 결정하였다.

유효실험점은  $J_{\max}$  이하의 실험점으로 둔화직선의 0.15mm 윤셋선과 1.5mm 윤셋선내의 실험점으로써 ASTM에서 규정한  $J = C_1 \Delta a^{C_2}$ 의 회귀곡선을 구한결과 R곡선의 식은  $J = 524.95 \Delta a^{0.407}$ 였다. R곡선과 0.15mm의 제외선(exclusion line)의 교점에서 구한  $\Delta a_{p \min}$ 은 0.6mm였으며, 1.5mm 제외선의 교점에서 구한  $\Delta a_{p \max}$ 은 2.27mm였다. R곡선과 둔화직선의 0.2mm 윤셋선의 교점에서  $J_Q$ 를 구하면  $J_Q = 445.29 \text{ kN/m}$ 였다.  $J_{1C}$ 의 판정조건을 적용하여  $J_Q$ 를 평가하면  $\Delta a_Q$ 에서 R곡선의 구배  $dJ_Q/d\Delta a$ 가  $\sigma_y$ 보다 작으며 다른 조건도 모두 만족되었으므로  $J_Q$ 는  $J_{1C}$ 로 평가할 수 있었다.

ASTM E1152-87(1992)에서는 제한컴플라이언스법에 의한  $J_{1C}$  판정조건을 엄격히 규정하고, 있으며 이에 따르면 시컨트직선을 기준으로 좌측에 5개의 실험점이 있으나 우측에는 6개의 유효점뿐이므로 적어도 8개의 유효점이 있어야 한다는 조건은 만족되지 않았다.

따라서 ASTM E1152-87(1992) 규정에 따르면  $J_Q$ 는  $J_{1C}$ 로 평가될 수 없으나 R곡선의 구배가 전반적인 안정균열의 진전거동을 나타내고 있음을 볼 때, 이런 경우에는  $J_Q$ 는  $J_{1C}$ 로 평가하여도 유효한 평가치가 될 것으로 생각된다(오 등, 1986).

Fig. 4는 온도 150°C에서의 측면홈 CT시험편의 J- $\Delta a$ 관계를 나타낸 것이다.  $\sigma_y$ 는 150°C에서  $\sigma_y = 461 \text{ MPa}$ 이므로 둔화직선은  $J = 922 \Delta a$  kN/m이며 시컨트직선식은  $J = 614.7 \Delta a$  kN/m였다.  $J_{\max}$ 은 691.5kN/m였으며 유효실험점은 5개로서, 회귀곡선을 구하면 R 곡선식은  $J = 488.17 \Delta a^{0.332}$  kN/m였다.  $\Delta a_{p \min}$ 은 0.59 mm였으며  $\Delta a_{p \max}$ 은 2.18mm였다. 여기서 R 곡선과 둔화직선의 교점에서 구한  $J_Q$ 는  $J_Q = 425.70 \text{ kN/m}$ 로서 ASTM E813-89(1989) 규정에 따르면  $J_Q$ 는  $J_{1C}$ 로 평가될 수 있으나 유효점이 5개이므로 ASTM E1152-87(1992) 규정의  $J_{1C}$  평가조건은 만족시킬 수 없으며  $J_Q$ 는  $J_{1C}$ 로 평가될 수 없다. 그러나 R곡선에서 안정균열의 성장거동으로 보아  $J_{1C}$ 로 평가하여도 무방할 것으로 생각된다.

Fig. 5는 온도 250°C에서의 측면홈 CT시험편의 J- $\Delta a$ 관계를

를 나타내었다. Fig. 5에서 둔화직선은  $J = 2\sigma_y \Delta a$  식에, 25 0°C일때의  $\sigma_y = 451.5 \text{ MPa}$ 을 대입하여  $J = 903 \Delta a$  kN/m로 구했고, 시컨트직선은  $J = 4/3 \sigma_y \Delta a$  이므로  $J = 602 \text{ kN/m}$ 였다.  $J_{\max}$ 은 시험편파단후  $b_0$ 를 측정하여  $J_{\max} = b_0 \sigma_y / 15$ 에 대입하면  $J_{\max} = 677.25 \text{ kN/m}$ 로 되었다. 여기서 ASTM E1152-87(1992)에서의 유효점에 대한  $J_{\max} = b_0 \sigma_y / 20$ 을 적용하여  $J_{\max}$ 을 구하면  $J_{\max} = 513.56 \text{ kN/m}$ 로 되었으며 유효점은 5개였다. 유효영역내의 각 실험점으로부터 회귀곡선을 구하면 R곡선식은  $J = 360.34 \Delta a^{0.340}$  kN/m로 표시되었으며  $\Delta a_{p \min}$ 은 0.46mm였으며  $\Delta a_{p \max}$ 은 2.01mm로 되었다. 둔화직선의 0.2mm 윤셋선과 R곡선의 교점에서 구한  $J_Q = 288.35 \text{ kN/m}$ 였으며, ASTM E813-89(1989)에 따른  $J_{1C}$ 의 유효 판정조건은 만족되었으나 ASTM E1152-87 (1992) 조건은 만족되지 않았다.

Fig. 6은 온도 370°C에서 측면홈 CT 시험편의 J- $\Delta a$ 관계를 나타내었다. 둔화직선은 둔화 직선식  $J = 2\sigma_y \Delta a$ 에  $\sigma_y = 456.5 \text{ MPa}$ 을 대입 하여  $J = 913.0 \Delta a$  kN/m로 구하였으며 시컨트 직선은  $J = 608.67 \text{ kN/m}$ 였다. 시험편 파단후의  $b_0$ 를 측정하여 구한  $J_{\max}$ 은 ASTM E813-89 (1989) 규정에 따르면 684.75kN/m였으며 ASTM E1152-87(1992) 규정에 따르면  $J_{\max} = 513.56 \text{ kN/m}$ 였다. 시컨트선의 좌측에는 실험점이 2개 이상이나 우측에는 5개의 유효실험점으로, 8개 이상이어야 한다는 ASTM E1152-87(1992) 규정의 조건은 만족되지 않았다. 유효 영역내의 각 실험점으로부터 구한 지수 곡 선식은  $J = 371.33 \times \Delta a^{0.3344}$ 였다.  $\Delta a_{p \min}$ 은 0.44mm이고,  $\Delta a_{p \max} = 2.02 \text{ mm}$ 였다. 둔화직선의 0.2mm 윤셋선과 R곡선의 교점에서 구한  $J_Q$ 는  $J_Q = 299.86 \text{ kN/m}$ 이며, ASTM E813-89(1989) 규정에 따른  $J_{1C}$ 의 판정조건은 만족되었으나 ASTM E1152-87 (1992) 규정에 의한  $J_{1C}$ 의 유효판정 조건은 만족되지 않았다.

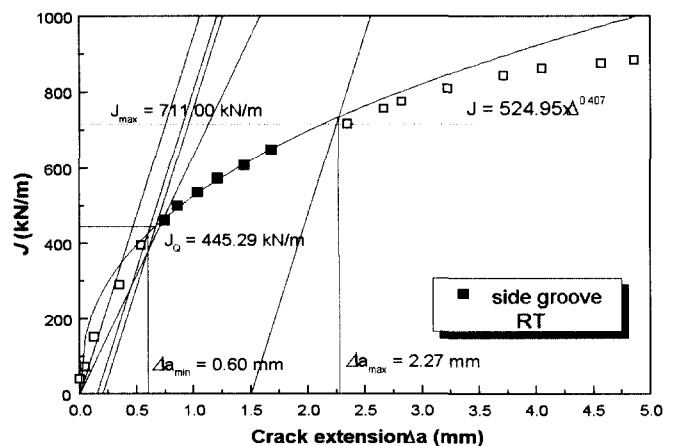


Fig. 3 Relation between J-integral and crack extension at R.T.

3.2 온도변화와  $J_Q$ 와의 관계

Table 3에서 측면홈 CT시험편의  $J=C_1 \Delta a^{C_2}$ 의 지수곡선식에서 계수  $C_1$ 이 RT일 때 524.95이고 온도가 증가함에 따라 점차 감소되어 온도 370°C일 때  $C_1$ 이 371.33으로 되었다. 이러한 점을 미루어 볼 때  $J_Q$ 값은 온도가 증가함에 따라 점차 감소할 것으로 예측할수 있으며 온도에 따라  $J_Q$ 값은 445.29 kN/m에서 299.86 kN/m로 점차 감소하였다.

$C_2$ 는 R.T일 때 0.407이고, 온도가 증가함에 따라 점차 증가하여 370°C일 때  $C_2$ 는 0.334로 되었다. 이는 R곡선이 온도가 증가함에 따라 균열진전속도가 증가하고 곡선화됨을 나타내고 있다. 따라서 온도가 증가함에 따라 안정균열진전에 대한 저항이 감소함을 알 수 있다.

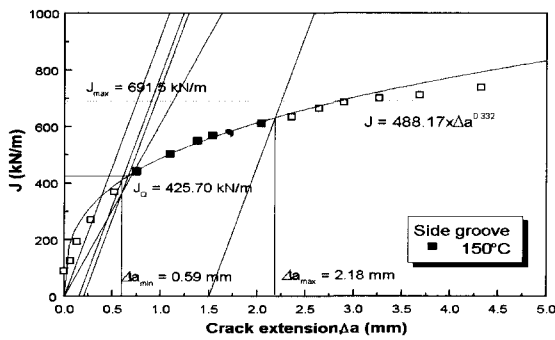


Fig. 4 Relation between J-integral and crack extension at 150 °C

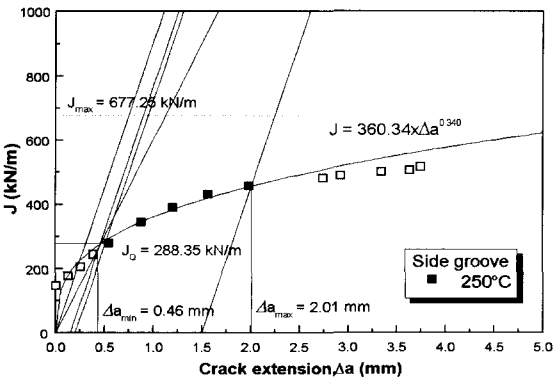


Fig. 5 Relation between J-integral and crack extension at 250 °C

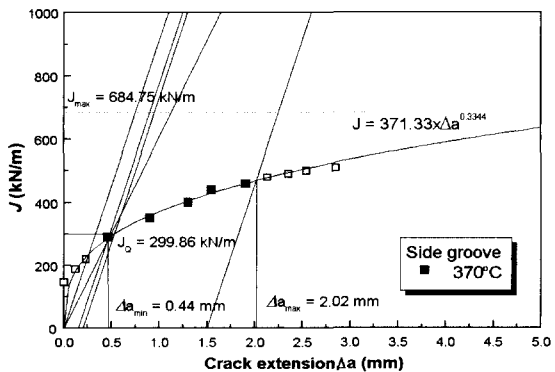


Fig. 6 Relation between J-integral and crack extension at 370 °C

R.T와 150°C에서는 계수  $C_1$ 과 지수  $C_2$ 는 그 차이가 근소함으로 R곡선은 거의 일치되고 따라서  $J_Q$ 값의 차이도 근소하게 될 것이다. 실제로 평가한  $J_Q$ 값은 FIG.7 에 나타난 바와 같이 RT와 150°C에서의  $J_Q$ 는 각각 445.29kN/m와 425.70 kN/m로서 R.T때를 기준으로 4.40%만큼 150°C에서 감소되었다.

250°C에서  $J_Q$ 는 288.35 kN/m이고 150°C에서의  $J_Q$ 와 비교할 때  $J_Q$ 값이 크게 하락하였다. 이는 온도에 따른 천이현상이 150°C에서 250°C내의 온도범위에서 발생하는 것으로 생각되며, 250°C이상의 온도에서  $J_Q$ 의 변화가 거의 일정하게 되거나 약간 상승 할 것으로 생각된다. 이는 다른 실험 결과의 SA516/70강에 의한 온도에 따른  $J_Q$ 값의 연구결과와 거의 일치함을 보였다.

Table 3은 ASTM E813-89(1989) 법에 따른 지수곡선식과 수정 윌렛방법에 따라 구한 지수곡선식을 나타내었다.

4. 파면해석

재료의 파단면에 나타나는 파괴의 과정을 고찰하고 파괴기구 혹은 원인을 고찰하기 위하여 주사전자현미경(SEM)을 이용

Table 3 R-curve by exponential curve fitting  $J=C_1 \Delta a^{C_2}$

Specimen	Exponential curve		$\Delta C_1$ : $\Delta C_2$		$J_Q$	Remark
	curve		(%)	(%)		
Smooth. R.T	$J = 534.80 \Delta a^{0.513}$	1.88	20.66	0.5	2.38	431.18 invalid (ASTM E813-89) (ASTM E115-87)
Side groove R.T	$J = 524.95 \Delta a^{0.407}$	0	0	0.6	2.27	445.29 valid (ASTM E813-89)
Side groove 150°C	$J = 488.17 \Delta a^{0.332}$	7.01	18.43	0.5	2.18	425.70 valid (ASTM E813-89)
Side groove 250°C	$J = 360.34 \Delta a^{0.340}$	31.36	16.46	0.4	2.01	288.35 valid (ASTM E813-89)
Side groove 370°C	$J = 371.33 \Delta a^{0.334}$	29.26	17.94	0.4	2.02	299.86 valid (ASTM E813-89)

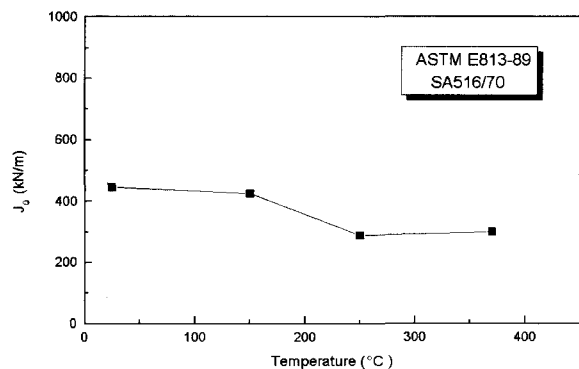


Fig. 7 Relations between  $J_Q$  and temperature

하여 저배율과 고배율의 관찰을 시행하였다. 재료의 소재인 SA516/70강으로 균열진전형태는 대칭적인 만곡(Tunnelling)형태이다. 양쪽 표면부는 20%의 측면홈의 CT시험편으로서 소성변형에 의하여 단순한 만곡형이 아닌 변형된 만곡형으로 나타났다.

이는 시험편의 두께가 얇기 때문에 표면부가 완전한 평면변형률상태로 유지되지 않음으로서 평면응력의 영향이 나타나고 소성구속에 의하여 변형된 것으로 생각된다. 표면부에서 변형된 만곡현상이 나타나는 것은 Kikuchi(M.kikuchi *et al.*, 1985)이 보고한 유한요소법에 의한 균열형태의 해석에서 나타나는 것과 일치하는 현상이다.

파면을 미시적으로 해석하기 위하여 R.T, 및 370℃에서 각각의 배율을 40× 및 300×로 파면형태를 주사전자 현미경사진으로 나타내었다.

Fig. 8 는 연성재료이고 파괴형태(fracture mode)가 모드 I (mode I)이기 때문에 미소공동의 합체에 의한 딴플(dimple)의 모양이 등축딴플과 신장형딴플로 나타났고 스트레치영역(stretched zone)에서는 슬립(slip)면 파괴를 나타내는 사형(serpentine glide)과 리플(ripple)등으로 이루어진 스트레칭면이 관찰되었다. 피로에균열 영역에서는 피로파괴의 전형적인 형태인 스트라이에이션(striation)무늬가 존재하며 스트레치 영역에서 이러한 스트라이에이션 무늬가 존재할수 없으므로 둔화(blunting)에 의한 파괴영역과 피로에균열 영역간의 경계의 지표로 된다.

그러나 저배율 40×에서는 이를 관찰할수 없으나 피로예균

열 영역과 스트레치 영역의 경계가 명확히 관찰되었다. 스트레치 영역에서는 사형형태와 리플이 관찰되었으며 리플이 끝나고 딴플영역이 시작되는 경계근방에서는 신장형딴플이 타원형태로 나타나있다. 이는 둔화후에 발생된 연성인열(tear)에 의한 균열임을 알수 있으며 균열이 진전됨에 따라 파면은 등축딴플의 영역으로 되었다. 미소공동(microvoid)혹은 딴플의 중심부에는, 대부분의 경우 미소개재물(inclusion)과 제2상인 석출물들이 존재하며 이러한 것을 핵으로 대부분의 딴플이 생성되었음을 알수 있다. 딴플영역에서는 석출물과 입자의 형태에 따라서 등축딴플의 치수가 균일하지 않게 나타나 있다.

Fig.9 는 370℃에 대한 전자 현미경 사진이다.파면전체에 걸쳐 개재물과 제2상의 석출물이 현저하게 많이 나타났으며 스트레치영역에 많은 사형파면과 리플면이 나타나 있다. 신장형 딴플영역은 감소되어 있으나 등축형 딴플영역은 큰 개재물에 의한 공동과 석출물에 의한 작은 딴플이 혼존하고 있으며 이는 낮은 온도 R.T, 150℃ 및 250℃ 에서의 파면과 유사하다.

딴플의 크기는 석출물과 개재물간의 거리에 의존하며 재료의 연성은 석출물과 개재물의 체적율에 의존하는 것으로 알려져 있으나 연성과 딴플사이의 일반적인 대응관계는 성립되지 않는 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

압력 용기용 SA516/70강의 파괴인성실험에서의 상온, 고온에서 측면홈 CT시험편에 의한 탄소성 파괴인성평가 및 온도 변화에 대한  $J_Q$  관계 등을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 측면홈 CT시험편에 의한  $J_{IC}$  평가는 ASTM E813-89방법에 따르면 R.T, 150℃, 250℃ 및 370℃에서 부대조건이 만족되고  $J_Q$ 는  $J_{IC}$ 로서 유효하나 ASTM E1152-87방법에 따르면 부대조건이 만족되지 않으며 유효한  $J_{IC}$ 평가치를 구할 수 없다.
- (2) ASTM E813-89방법에 의한  $J_{IC}$ 값은 R.T에서 445.29 kN/m, 150℃에서 425.70 kN/m, 250℃에서 288.35 kN/m, 370℃에서는 299.86 kN/m 였다.
- (3) 평활시험편은 ASTM E813-89 및 ASTM E1152-87규정에 의한 유효값  $J_{IC}$ 값을 평가할 수 없다.
- (4) 측면홈 CT시험편에 의한 탄소성 파괴인성치  $J_{IC}$ 는 온도가 상승함에 따라 감소되며 150℃에서 250℃사이에서 천이현상이 나타난다.
- (5) 파면에 있어서 스트레치 영역에는 사형파면이 존재하며 온도증가에 따라 점차 확장되며 딴플은 신장된 타원형태로 나타난다. 인성과 딴플사이의 일반적인 대응관계는 성립하지 않는 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

석창성, 최용식(1992). "J-R 곡선에서의 균열길이 감소 현상에 관한 연구 (1)", 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, pp 1115~1120.  
 오세욱, 안광주, 운영재(1986). "SB41강의 평활 및 측면홈 CT

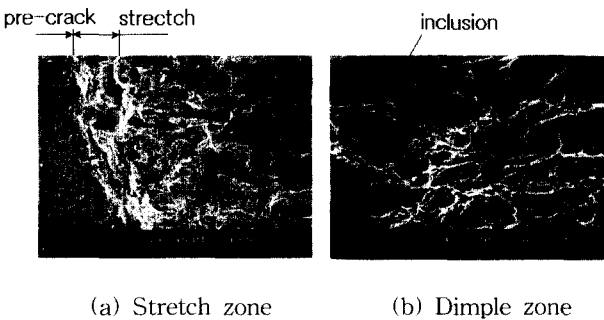


Fig. 8 SEM fractographs showing fracture surface of SA516/70 specimen at RT

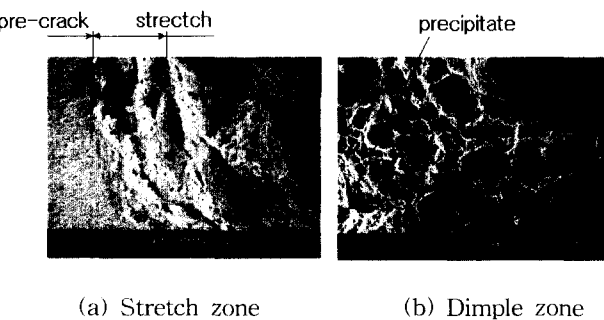


Fig. 9 SEM fractographs showing fracture surface of SA516/70 specimen at 370°C

- 시험편의  $J_{Ic}$  평가”, 대한기계학회논문집, 제10권, 제4호, pp 494~503.
- 오세욱, 윤한기, 임만배(1993). “원자력 압력용기강 SA508C-3의 탄소성 파괴인성 평가”, 한국해양공학회지, 제7권, 제2호, pp 269~280.
- 윤한기, 차귀준(1996). “Load-Ratio 법에 의한 SA508C-3 및 Al 6061재의 탄소성 파괴저항곡선 평가”, 한국해양공학회지, 제10권, 제2호, pp 107~112.
- Voss, B. and Mayrille, R. A.(1985). “The use of the partial unloading compliance method for the determination of J-R curve and  $J_{Ic}$ ”, ASTM STP. 856, pp 117~130.
- Kikuchi, M. Atluri, S.N. and Miyamoto, H.(1985). “Studies on size effect and crack growth of side-grooved CT specimen”, ASTM STP, 868, pp 251~278.
- Bowman, R. Antolovich, S. D. and Brown, R. C.(1988). “Demonstration of problems associated with crack closure measurement techniques”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 31, No. 4, pp 703~711.
- Standard Test for  $J_{Ic}$ , A measure of fracture toughness, ASTM E813-81.
- Standard Test for  $J_{Ic}$ , A measure of fracture toughness, ASTM E813-89, 1989.
- Standard Test for  $J_{Ic}$ , A measure of fracture toughness, ASTM E813-87, 1987.
- Standard test method for plane strain fracture toughness of metallic materials, ASTM E399-90, 1990.
- Standard test method for determining J-R curves, ASTM E1152-87, 1992.
- 
- 2000년 11월 9일 원고 접수  
2001년 4월 2일 수정본 채택