

◎ 論 文

## SA 508C-3강의 고온에서 J-R Curve 및 Tmat의 평가

임 만 배\* · 차 귀 준\*\*  
(98년 5월 8일 접수)

Evaluation of J-R Curve and Tmat of SA 508C-3 Steel at Elevated Temperature

Man-Bae Lim\* · Gee-Jun Cha\*\*

**Key Words :** J-R Curve(J-저항곡선), Tearing Modulus(찢어짐계수), Unstable Crack Growth(불안정 균열성장), Crack Tip Open Displacement(균열선단 개구변위), Material Tearing Modulus(재료의 찢어짐계수)

### Abstract

In this study, the J-Resistance Curve and material tearing modulus of SA508-C3 steel, which is one of the used nuclear pressure vessel steel, are measured at room temperature, 200°C and 300°C according to load ratio analysis and ASTM E813, ASTM E1152, respectively. It is observed that J-R curve and Tmat value decrease as the temperature level increase. Applicability of  $T_i$  proposed by Paris et al as an instability parameter for ductile material is investigated. It is concluded that results are the  $T_i$  parameter may be used as a crack instability parameter.

### 1. 서 론

최근 산업의 급격한 발달에 따라 고온, 고압용기, 원자력 발전설비 및 특수한 구조물은 사용조건을 대상으로 상태진단 및 잔여수명예측을 통해 가동효율을 극대화 시키려는 노력이 고조되고 있다. 특히 원자로의 경우 가동중 파손 및 파괴는 대형 사고를 초래하여 막대한 인명 및 재산상의 손실을 일으키게 된다. 이러한 파괴사고 원인은 미소균열 등의 발생이 원인이 될 수 있으며 안전성과 경제

성을 고려할 때 파괴역학적인 규명하에 최적설계를 하여야 한다. 현재 국내 원자로의 사용수명을 볼 때 전반적으로 재료의 파괴역학적 성질이 저하하게 된다. 따라서 원자로용기등에 균열이 존재할 때 임계하중을 예측하기 위해서는 파괴인성값과 균열성장저항성 변화에 대한 충분한 연구를 통하여 기계적 물성변화의 규명이 필요하다. 이러한 구조물의 균열 거동을 기술하기 위한 파괴매개변수로 J-적분과<sup>1,2)</sup> 균열선단 열림 변위가 제안되었다.<sup>3~5)</sup> 이러한 매개 변수들은 연성재료에서 균열발

\* 정회원, 동아대학교 생산기술연구소

\*\* 종신회원, 동명대학 가스냉동과

서 b는 시험편의 리가멘트길이이다.

은 균열 열림변위(Crack Opening Displacement)가 균열비 형성 부에 비해 작아야 된다는  
로 균열의 발생, 성장에도 작용할 조건이다.

해중과 비선형 소성하중의 발생영역이 비례  
발생영역에 비해 작기 위한 조건이다.

)은 HRR 특성이 지배하는 영역에서 비례하  
비선형하중항보다 우세하기 위한 조건이다.  
같이 J-제어 균열 성장조건을 만족할 경우에  
소성변형의 안전성 해석이 J-매개변수를 기  
능하게 된다.

### 3. 재료 및 실험방법

#### 시험편 및 실험장치

연구에 사용된 재료는 원자력 발전소의 압력  
에 사용되는 SA508-C3단조재이며 화학적 성  
Table 1에 나타내었다. 단조 과정을 거친 원  
hell의 형태에서 인장시험편과 파괴인성시험편  
취하였다. 인장시험편은 직경이 12.5mm인 환  
검편을 사용하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 파  
괴시험편은 반경방향으로 결합이나 파단면이  
취약할 것임을 고려하여 C-R방향으로 채취  
ASTM 규정에 의거하여 CT형으로 가공하여  
에 나타내었다. 인장시험 및 파괴인성시험은  
압 서어보 피로시험기(Instron Model 1331  
를 사용하였으며 고온 실험 수행은 전기로  
n Model 3111)를 피로시험기에 부착하여 노  
온도 조절장치를 이용하여 실험하였다.

Chemical composition of SA-508 class 3  
steel (wt %)

P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.004	0.003	0.04	0.98	0.22	0.58	0.003	0.045

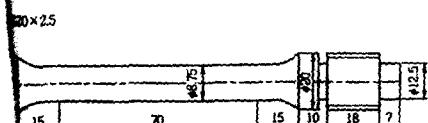


Fig. 1 Shape and dimensions of tensile test specimen

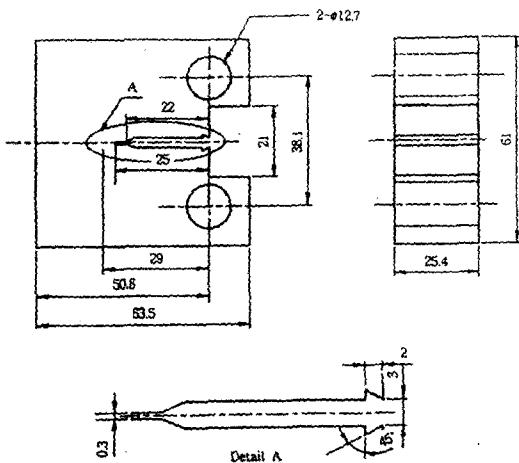


Fig. 2 Shape and dimensions of CT test specimen

#### 3.2 실험 방법

피로하중은 한계하중의 40%이하로 하였으며 파  
괴인성시험과 정적부하는 스트로크제어로 적용하  
였고 부하속도는 0.1mm/min로 일정하게 유지하였  
다. 균열길이는 충분히 진전될 때까지 부하후 정지  
하고 그 후 시험편은 파로균열을 정적부하시 최대  
하중의 약60%로 시험편을 파단시켰다. J-R곡선평  
가 및  $J_{IC}$ 값은 ASTM E813<sup>10</sup>, E1152<sup>11</sup>시험법 규정  
에 따라서 상온, 200°C, 300°C에서 실험을 수행하여  
하중비 해석과 재하컴플라이언스법을 이용하여 평  
가하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4.1 온도에 따른 강도 변화

Table 2 및 Fig. 3은 각 온도에서 인장시험 결과  
를 나타내었다. Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 항복  
강도 및 인장강도는 재료의 온도 변화에 따라 증가  
또는 감소하는 경향이 나타났다. 항복강도의 경우  
상온보다 200°C의 경우가 9.18%감소하였고 300°C  
의 경우는 6.99%감소하였다. 인장강도의 경우도  
200°C의 경우가 6.46%감소하였고 300°C의 경우는  
2.93% 감소하였다. 또한 200°C와 300°C를 비교하  
면 200°C가 항복강도와 인장강도가 감소하는 경향

생을 잘 나타 낼 수 있으나 균열이 안정하게 성장 할 것인가, 불안정하게 성장 할 것인가에 대해서는 잘 기술할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 균열 불안정 성장을 평가하기 위하여 J-적분에 근거한  $T_j^{(1)}$ 와 CTOD에 근거한  $T_\delta^{(2)}$ 가 있다. Shih<sup>7)</sup> 등은 CTOD에 근거한 찢어짐 계수  $T_\delta$ 를 다음과 같이 정의 하였다.

$$T_\delta = E / \delta_0 \cdot d\delta / da \quad (1)$$

Shih<sup>7)</sup> 등은 CTOD-저항곡선(CTOD-resistance curve)에서 얻은 찢어짐 계수 ( $T_\delta$ )<sub>max</sub>가 부하조건에 의해서 결정되는 찢어짐계수인 ( $T_\delta$ )<sub>app</sub>보다 작을 때 불안정 균열 성장이 일어난다고 하였다. 그러나 재료의 불안정성을 판정하는 찢어짐계수를 구하기 위해서는 CTOD-저항곡선을 결정해야 한다. CTOD는 하중선 변위를 측정하여 CTOD-하중선변위 관계식으로 평가하며, 재료의 부하조건에 의하여 결정되는 부하 찢어짐 계수를 구할 때 재료를 처음부터 완전 소성체로 가정하여 한계하중(limit load)을 사용하였다. 그러나 재료는 탄소성 거동을 하므로 완전소성 조건하에서 유도된 한계하중을 사용하면 ( $T_\delta$ )<sub>app</sub>를 정확하게 평가할 수 없는 단점이 있다. Paris<sup>6)</sup>는 J에 근거한  $T_j$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$T_j = E / \sigma_0^2 \cdot dJ / da \quad (2)$$

여기서 E는 탄성계수  $\sigma_0$ 는 유동응력, a는 균열 길이 J는 적분 값이다.

Paris는 재료의 물질 상수로 가정하는 찢어짐 계수 ( $T_j$ )<sub>max</sub>가 부하조건에 의해서 결정되는 찢어짐 계수( $T_j$ )<sub>app</sub>보다 작을 때 균열 불안정 성장이 일어난다고 하였다. 그후 많은 연구자들에 의하여 효과적인 매개변수로서  $T_j$ 의 타당성이 연구되었다. 그러나 균열진전에 따라 J-저항곡선의 기울기가 변화한다는 점이 지적되고 있으나 실험적으로 편리함 때문에 균열에 대한 불안정성장 평가의 기준으로 많이 사용되고 있다. 따라서 J-저항곡선의 타당성과 Paris가 제안한 찢어짐 계수인  $T_j$ 의 불안정 파괴 매개변수로서 온도변화에 따른 적용가능성을 검토하고자 한다.

따라서 본 연구는 원자로용기에 균열이 검출된 경우 임계운전조건 및 최적설계에 필요한 기본적인 재

료물성치의 중요한 자료로 활용될 수 있을

## 2. J-R곡선의 개념

Hutchinson, Rice and Rosengren<sup>8)</sup>은 선단부근의 응력을 다음과 같이 나타내

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 [EJ / \sigma_0^2 \ln r]^{1/n+1} \cdot f_{ij}(\theta, n)$$

이식을 HRR특이성(HRR singularity)

J-적분은 특이 응력장의 세기를 나타

여기서  $\sigma_0$ 는 항복강도, E는 영계  
단의 좌표, n은 소성계수,  $f_{ij}(\theta, n)$ 는  
응력성분  $\sigma_{ij}$ 에 의해서 결정되는 함  
수에 따른 상수  $\sigma_{ij}$ 는 정지 균열선  
을 나타낸다.

Hutchinson 과 Paris<sup>9)</sup>는 균열성  
적용성을 알아보기 위해 소성변  
상소성재료의 경우 균열성장시:  
다음과 같이 나타내었다.

$$d\varepsilon_{ij} = 1/\alpha \sigma_0 \cdot dJ/r \cdot f_{ij}(\theta) + 1/c$$

$$\text{여기서 } \beta_{ij}(\theta) = n/n+1 \cdot \cos \theta$$

식(4)의 첫째 항은 작용하

하는 변형률의 비례 증가량

진전함에 따라 발생하는 B

증가량이다. 그러나 만일

째 항에 비해 매우 큰 경

경우에도 J-적분이 균열

기를 다음과 같이 나타낼

$$dJ/da \propto J/r$$

즉 균열선단의 아주

비례하중이 작용할 경

장을 특성화 할 수 있

Paris<sup>9)</sup>는 이 경우의

(J-controlled crack

제어 균열성장의 조

$$\sigma_0 b / J_c \gg 1$$

$$\Delta a \ll R$$

$$\omega = b/J \cdot dJ/da$$

용  
분  
통  
을  
봉  
시  
피  
인  
가  
장  
하  
여  
  
Fig. 2  
전기유  
10tonf  
(Instru  
자체의

Table 1

C	M
0.17	1.4

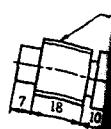


Fig. 1 Sha

이 나타났는데 이는 본 연구에 사용된 재료가 저탄소강임을 고려할 때 청열취성의 온도 구간이 존재함을 알 수 있다.

Table 2 Mechanical properties of SA-508 class 3 steel

Temp (°C)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Young's modulus (MPa)
RT	587.52	446.45	27.8	205.32
200	549.56	405.45	25.6	194.43
300	570.28	415.23	31.2	190.21

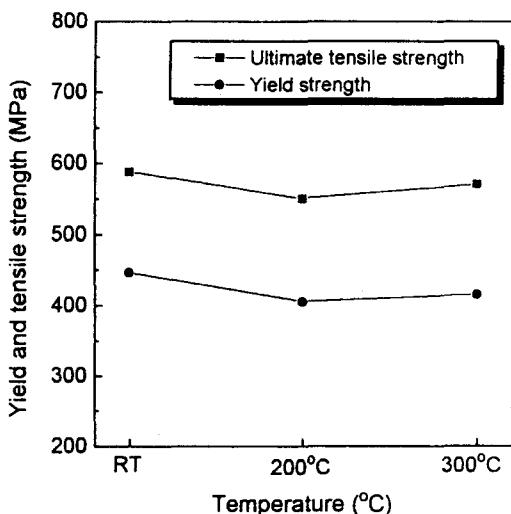


Fig. 3 Tensile test results of SA 508-C3 steel at room temperature, 200°C and 300°C

#### 4.2 온도 변화에 의한 J-R곡선의 변화

##### 4.2.1 제하컴플라이언스법과 하중비 해석의 J-R 곡선 비교

Fig. 4는 제하컴플라이언스법을 사용하여 온도변화에 따른 ASTM 규정에 따른 유효 데이터로 J-R곡선을 나타내었으며, 온도변화에 따라 약간 다르게 나타났다. 일반적으로 지수근사식은  $J = C_1 \Delta a^{C_2}$ 로 표현되며, 온도변화에 따른  $C_1, C_2$ 의 정량적인 값을 비교하였으며  $C_1, C_2$ 의 의미는 J-R곡선 평가에서 곡선의 기울기를 나타내며, 궁극적으로  $J_{IC}$ 의 평가에 밀접한 관계를 가지고 있다. 이와 같이 평가한

$C_1, C_2$  값은 상온의 경우 710.874, 0.607이며 200°C의 경우 667.955, 0.759이고 실제 가동온도범위를 갖는 300°C의 경우 600.307, 0.724로 나타났다. 특히 J-R곡선의 기울기 경향을 살펴보면 상온과 200°C의 경우는 유사함을 나타내며, 300°C의 경우 균열길이 증가와 더불어 많은 차이점을 보였다. 이러한 차이점은 실험온도의 영향 때문에 기인한 것으로 생각되며, 200°C와 300°C의 경우 하중 제하시재료의 연성이 증가하여 하중-하중변위곡선에서 하중제하를 반복하면 하중은 증가하지 않고 변위량이 증가하여 변형시효의 현상이 일어났으며, 온도가 증가함에 따라 더욱더 뚜렷하게 나타났다. 이와 같이 하중-변위곡선은 온도에 영향을 받아 가공경화지수와 변형시효에 의한 실험적인 오차가 발생하기 때문에 설계자료의 기초가 되는 J-R곡선 평가시 사용분위기에 대한 집중적인 연구가 필요하고 생각된다.

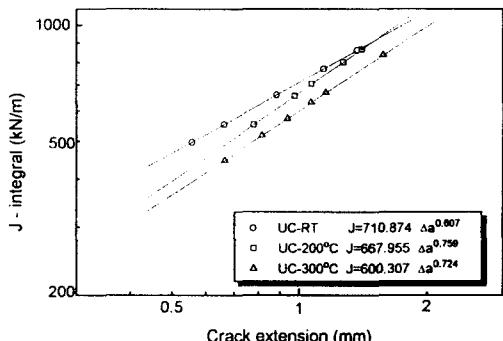


Fig. 4 Comparision with exponential curve fitting for R-curve by unloading compliance method

Hutchinson과 Paris<sup>9)</sup>등이 주장한 J지배균열성장이 만족하는 경우 균열이 성장할 때  $J$ 값의 평가는 ASTM E813에서 제안한 식을 사용하면 하중-변위 곡선하의 면적이 과대 평가되면  $J$ 값이 과대 평가 된다는 이론을 고려할 때 제하컴플라이언스법의 J-R곡선이 과대 평가되어짐을 알 수 있었다.  $J_{IC}$  결정은 J- $\Delta a$ 곡선을 외삽하여 균열의 시작점을 찾는데 목적이 있기 때문에 과대평가량을 수정하지 않아도 무관하지만 J-R곡선을 평가하기 위해서는 균열의 진전에 따른 J의 과대평가량을 수정해

야한다.

Fig. 5는 하중비 해석에 의해 구하여진 J값과 균열길이의 관계를 나타내었다. 실험온도에 따른 J-R곡선의 계수값  $C_1$ ,  $C_2$ 는 상온일 때 620.689, 0.531이며, 200°C의 경우 540.330, 0.669, 300°C의 경우 488.680, 0.645이었다. 온도 증가에 따른 J-R곡선의 계수를 비교하면 상온을 기준 하여 200°C 일 때 12.95% 감소, 26.04% 증가 하였으며, 300°C 일 때 21.27%감소, 21.59% 증가하였다. 따라서 J-R곡선의 지수식은  $J=620.689 \Delta a^{0.531}$ ,  $J=540.330 \Delta a^{0.669}$ ,  $J=488.680 \Delta a^{0.645}$ 로 나타났다. 이러한 기울기 변화는 하중과 변위곡선상에서 온도의 증가에 따라 가공경화지수가 다르게 나타남을 반증할 수 있다. 즉 하중비 해석에 의한 정량적인 파괴인성치를 결정하는데 시험편의 형상, 용접조건 등을 고려하여 신뢰성을 부여한다면 실험을 위한 많은 장비 및 실험적 경험을 줄여 근사적인 방법으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 방사선시험편의 실험과 같이 시험편의 채취에 한정된 경우 많은 잇점이 있을 것으로 생각된다.

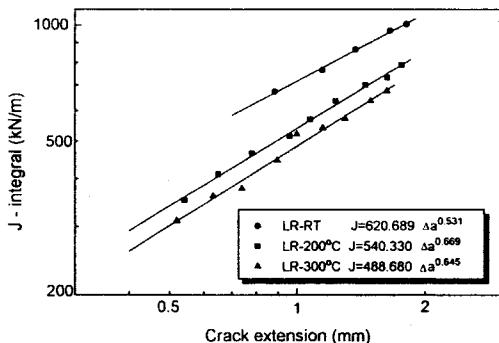


Fig. 5 Comparision with exponential curve fitting for R-curve by load ratio method

Fig. 6은 상온 및 200°C, 300°C의 경우에 대한 제하컴플라이언스법의 J-R곡선과 하중비 해석에 의한 J-R곡선의 지수근사식을 나타내었다. 상온의 경우  $J=710.874 \Delta a^{0.607}$ ,  $J=620.689 \Delta a^{0.531}$  정리되며, J-R곡선 파라메타들을 정량적으로 분석하여 J-R곡선의 계수  $C_1$ 과  $C_2$ 를 비교하면 하중비해석에의 경우 제하컴플라이언스법보다 12.69%, 12.54% 감소하였다. 200°C의 J-R곡선의 지수근사식은  $J=667.955 \Delta$

$a^{0.759}$ ,  $J=540.330 \Delta a^{0.669}$ 로 정리되었다. 계수  $C_1$ 과  $C_2$ 를 정리하면 하중비 해석의 경우가 제하컴플라이언스법 보다 19.11% 감소, 11.81% 감소됨을 알 수 있었다. 300°C의 J-R곡선의 지수근사식은  $J=600.307 \Delta a^{0.724}$ ,  $J=488.680 \Delta a^{0.645}$ 로 표시되고 하중비해석의 경우 계수  $C_1$ 과  $C_2$  값은 18.6% 감소, 10.87% 감소하였다. 각 온도에 대한 J-R곡선의 계수  $C_1$ ,  $C_2$ 를 비교한 결과 하중비해석에 의한 J-R곡선의 정량적인 값이 다르게 나타났다. 이러한 원인은 전술된 바와 같이 균열길이 계산의 차이점이라고 생각되며, 제하컴플라이언스법인 경우 하중비 해석보다 다르게 평가되는 원인은 부하 및 제하시 압축응력, 편 정렬불량등에 의한 균열길이 감소현상이 일어나기 때문에 정확한 균열길이 측정이 어렵다. 따라서 오프셋법<sup>12)</sup>을 이용하여 균열길이를 보정할 수 있지만 초기균열부분의 문제를 탄소성 영역에 대한 전체적인 보정이기 때문에 정확한 보정은 제공될 수 없기 때문에 생각된다. 그러나 하중비 해석은 부하 및 제하가 필요치 않는 하중-변위곡선상의 임의의 위치에서 탄성컴플라이언스는 리가멘트에 걸리는 하중비(실제하중/임계하중)로 부터 계산되며 현재의 균열길이를 예측할 수 있고 하중-변위곡선을 완전 소성해석의 개념을 바탕으로 재료의 경화지수를 고려하여 균열길이를 산출하였다. 따라서 균열길이가 J-R곡선평가에 지배적인 영향인자임을 알 수 있으며, 제하컴플라이언스법에 비하여 하중비 해석이 근사적 해석방법으로써 물리적인 의미를 갖는다고 할 수 있다.

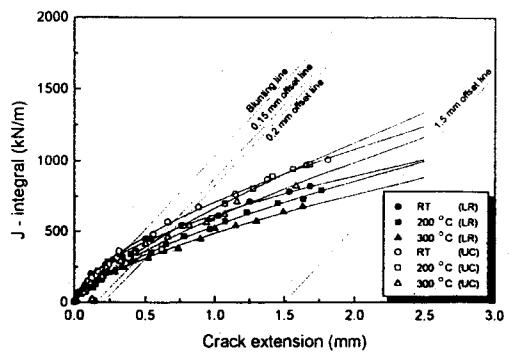


Fig. 6 Relation of J-R curve on the unloading compliance method and load ratio analysis at room temperature, 200°C, 300°C

4.2.2 온도 변화에 따른  $J_{IC}$  및  $T_{mat}$  평가

Fig. 7-9에는 ASTM E813, E1152 절차에 의해 결정한 J-R곡선 데이터가 유효한 한계를 나타내는 최대 균열길이( $\Delta a_{max}$ )선을 함께 나타내었다. 각 온도 변화에 따라 구한 최대균열길이( $\Delta a_{max}$ )에 대한  $J_{max}$ 는 상온의 경우  $\Delta a_{max}=2.85\text{mm}$ ,  $J_{max}$ 는=657(KN/m), 200°C의 경우  $\Delta a_{max}=2.85\text{mm}$ ,  $J_{max}$ 는=606(KN/m), 300°C의 경우  $\Delta a_{max}=2.85\text{mm}$ ,  $J_{max}$ 는=626(KN/m)이었다. 이 영역내의 찢어짐 계수  $T_{mat}$ 측정은 이 범위 내에서만 유효하며, 이 범위 밖에서의 찢어짐 계수를 결정하기 위해서는 J값 계산에 Ernst<sup>(13)</sup>가 제안한 수정 J값 평가식을 사용하여야 한다는 것으로 알려져 있다. Fig. 7-9에서 알 수 있듯이 J-R곡선 데이터가 대부분 유효데이터 내에 존재하였으며, 이 범위에서는 J-지배 균열성장조건이 성립함을 알 수 있었다. 그러나 균열전진량이 1.5mm 이상 성장하면 약간의 분산도를 가지며 균열성장 조건이 만족되기 위해서 Ernst등이 제안한 수정 J값으로 평가하여 정확한 J-R곡선을 해석하여 신뢰성을 갖는  $J_{IC}$ 값을 평가해야 할 것으로 사료된다.

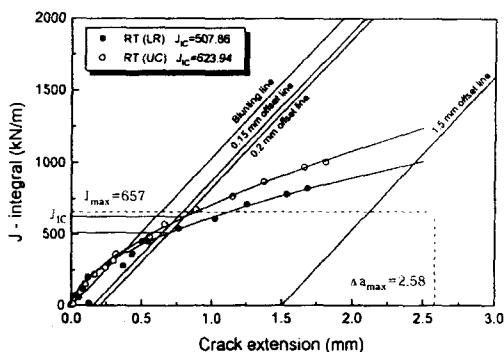


Fig. 7 J-resistance curve at room temperature

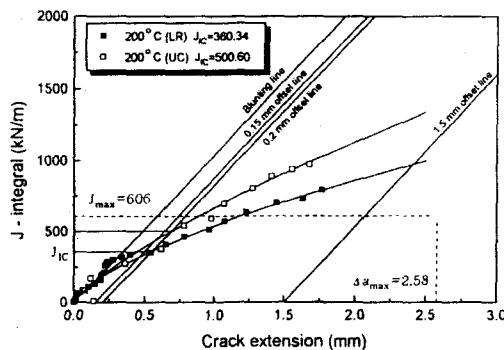


Fig. 8 J-resistance curve at 200°C

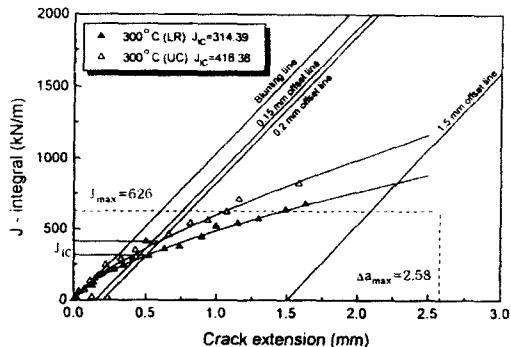


Fig. 9 J-resistance curve at 300°C

Fig. 10은 ASTM E1152의 유효한 범위 내에서 측정된 찢어짐 계수  $T_{mat}$ 의 값을 비교하기 위하여 모든 J-R곡선을 나타내었다. J-R곡선의 경사 부에 해당하는  $dJ/d\alpha$ 의 미분 값을 이용하였으며,  $dJ/d\alpha$  값은 J값을 균열길이에 대하여 1차 미분값이기 때문에 각 온도변화에 따른 저항곡선의 변화를 알 수 있다.  $J_{IC}$ 값의 경우 마찬가지로  $dJ/d\alpha$ 의 값은 온도의 변화에 따라 상온의 경우보다 200°C, 300°C일 때가 찢어짐 계수가 낮게 나타나는 경향을 알 수 있다.

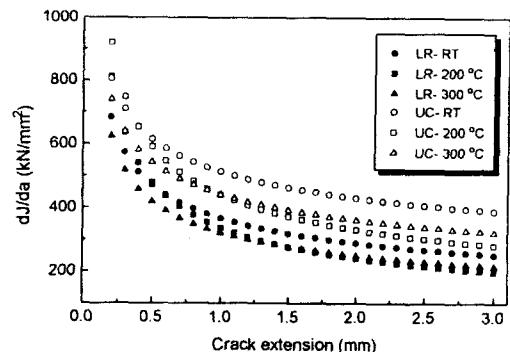
Fig. 10 The variation of  $dJ/d\alpha$  with crack extension for SA 508-C3 steel at room temperature, 200°C, 300°C

Fig. 11은 J값과  $dJ/d\alpha$ 의 미분 값으로 나타내어 온도의 변화에 따른 저항곡선의 변화를 나타냈다. Fig. 10에서 나타낸 것 보다 약간의 산포를 가지지만 상온의 경우가 200°C,300°C보다 불안정 균열성장에 대한 저항력이 뚜렷이 크게 나타남을 알 수 있었다.

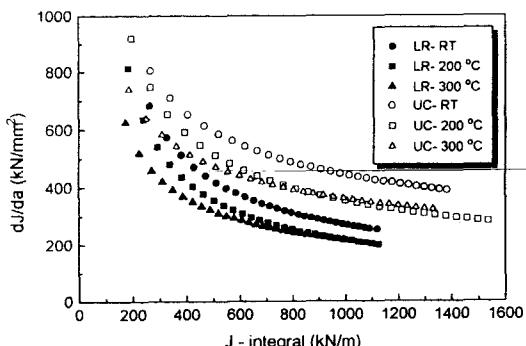


Fig. 11 The variation of  $dJ/da$  with  $J$ -integral for SA 508-C3 steel at room temperature, 200°C, 300°C

Fig. 12는  $dJ/da$ 를 Paris가 제안한  $T_i$  값으로 환산하여 나타내었다. 각 온도의 저항곡선의 변화는  $dJ/da$  1차 미분 값으로 나타낸 것과 같은 경향이 나타났다. 이러한 경향으로부터 상온의 경우가 온도의 영향을 받은 경우보다 불안정 균열성장(unstable crack growth)에 대한 저항력이 큼을 알 수 있으며 온도가 증가하면 증가할수록 저항력이 떨어짐을 알 수 있다.

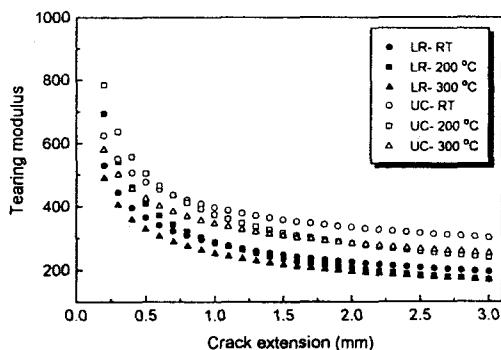


Fig. 12 The variation of tearing modulus with crack extension for SA 508-C3 steel at room temperature, 200°C, 300°C

본 연구에서 관찰한 바와 같이 SA508-C3재는 사용온도 범위가 300°C 부근 인점을 고려할 때  $J_{IC}$  값과  $T_{mat}$  값이 온도 변화에 따라 감소하므로 고온에서 사용중인 원자로 압력용기의 경우 임계운전 조건 및 잔여 수명평가를 위해서는 균열성장량 및 거동 평가가 보다 정확한 기초자료를 이용하여야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

원자로 압력용기용 소재인 SA508-C3강을 사용하여 상온 200°C, 300°C 온도 분위기에서 인장 및 파괴인성시험을 수행하고 하중비해석, 제하컴플라이언스법에 의한  $J_{IC}$  및  $T_{mat}$ 를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 제하컴플라이언스법에 의한 지수식은  $J=710.874 \Delta a^{0.607}$ ,  $J=667.955 \Delta a^{0.759}$ ,  $J=600.307 \Delta a^{0.724}$  이었으며, 하중비해석에 의한 지수식은  $J=620.689 \Delta a^{0.531}$ ,  $J=540.330 \Delta a^{0.669}$ ,  $J=488.680 \Delta a^{0.645}$  이었다.
- 상온의 경우 탄소성파괴인성값 및 불안정 균열성장에 대한 저항력이 가장 크게 나타났으며 온도가 증가함에 따라 균열성장에 대한 구속력이 약화되어 저항력이 점점 감소하였다.
- SA508-C3강은 온도가 증가함에 따라 항복강도 및 인장강도는 300°C보다 200°C에서 감소되었으며  $J_{IC}$ 값 및  $T_{mat}$ 값이 계속 감소하였으며, 뒷어진 계수인  $T_i$ 가 불안정파괴 매개변수로서 적용 가능성이 있음을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- Rice.J.R "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notch Crack" Journal of Applied Mechanics, Vol.35, pp.379-386 1968
- Landes.J.D, and Begley.J.A, "J-integral as a Fracture Criterion", in Fracture Toughness, ASTM STP 514, pp 1-20, 1972
- Wells.A.A "In Proceeding Canadian Congress of Applied Mechanics, Calgily, Canada, pp 59-77, 1971
- British Standard Institution, "Method for Crack Opening Displacement(COD) Testing", Draft for Document, 1972
- Pratap.C.R, "A Composite Crack Profile Model for CTOD Determination 2, An

- Experimental Application to a Small Scale Yielding Situation", Engineering Mechanics Vol,24, No,4 pp 539-552, 1986
- 6) Paris..C Tuda.H,Zahoor.A and Ernst.H, "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth", Elastic-Plastic Fracture, ASTM, STP 668, pp.5-36, 1979
- 7) Shih,C.F, Dellorrenzi. H.G., and Andrews, W.R., "Studies on Crack Initiation and Stable Crack Growth", Elastic-Plastic Fracture, ASTM. STM 668. pp.65-120, 1979
- 8) Rice.J.R. and Rosengren,G.F., "Prance Strain Deformation Near Crack Tip in Power-Low Hardening Material." Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol.16, No.1, pp.1-12,
- 1968
- 9) Hutchinson.J.W. and Paris,P.C., "Stability Analysis of J-controlled Crack Growth," Elastic-Plastic Fracture, ASTM.STP 668, pp.37-64, 1979
- 10) "Standard Test Method for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness", ASTM E813-89
- 11) "Standard Test Method for Determining J-R Curves," ASTM E1152-87.
- 12) 최용식, 석창성, "J-R 곡선에 의한 균열길이 감소현상에 관한 연구(1)" 대한기계학회 논문집 ,제16권, 제6호,pp.1115-1120,1992
- 13) H.Ernst, P.C.Paris, M.Rossow and J.W. Hutchinson, "Analysis and Tearing Instability Material Properties" , ASTM STP 667, pp.581-599, 1979