

# X20CrMoV 12 1 강의 용접부에서의 균열진전 특성연구

이남우\* · 김광수\*\* · 정용근\*\*\* · 박종진\*\*\*\*

## Time-dependent Crack Growth in X20CrMoV 12 1 Steel Weld joint

N. W. Lee , K. S. Kim , Y. K. Chung , and J. J. Park

**Key Words :** X20CrMoV 12 1 Steel (X20CrMoV 12 1 강), Time-dependent crack growth (시간 의존적 균열진전), heat affected zone (열 영향부),  $C^*$  - integral ( $C^*$  적분)

### Abstract

This paper investigates the time-dependent crack growth in X20CrMoV 12 1 steel weld joints. Crack growth test are carried out 545°C on side-grooved 1/2T CT specimens under static loads. A simulated material is produced for the intercritical HAZ, where fracture normally occurs. Constitutive properties are obtained for the simulated HAZ material as well as for the base metal and weld metal. Finite element analyses of crack growth are performed on the models with and without a HAZ layer, using the experimental crack length-time history. The inclusion of HAZ layer increase the load line velocities significantly. The crack growth rates are correlated reasonably well with  $C^*$ . The smallest crack size for the validity of  $C^*$  is found much smaller than the ASTM crack initiation size for 1T CT specimen of creep-ductile materials.

#### 기호설명

- $\sigma$  : Applied Stress
- $E$  : Elastic Modulus
- $D$  : Plasticity coefficient
- $m$  : Plasticity exponent
- $A$  : Creep coefficient
- $n$  : Creep exponent
- $\dot{V}$  : Load line velocity
- $\dot{V}_c$  : Creep portion of load line velocity
- $a$  : Crack velocity
- $J_p$  : Plastic component of J-integral
- $K$  : Stress intensity factor
- $\nu$  : Poisson's ratio

#### 1. 서론

X20CrMoV 12 1 강은 주로 유럽에서 화학공업과 발전소의 고온 부품(600°C 정도)에 사용되는 고 크롬(12%)계 철강재료이다. 이 재료는 다른 일반적인 크롬계 강보다 크립강도나 내 부식성에서 월등한 성능을 보이며, 이러한 고온 특성은 발전소의 증기관이나 과열기 배관의 더욱 얇고 유연성 있는 설계를 가능하게 한다. 이 재료에 대한 연구들은 Kwala[1], Wu 등[2]의 여러 논문에서 찾아볼 수 있다. 그리고 내 부식성과 고온 강도특성[3-5], 공극생성과 성장, 크립하중 하에서의 rupture 특성 또한 Egger 외[6,7], Tian 외[8]와 Wu 외[2, 9, 10] 등에 의해 연구되어왔다. 그리고 최근에는 이 재료의 모재부와 용접부에서의 시간에 대한 크립 파괴 현상 또한 연구되었다[11].

본 연구는 [11]의 연장으로 X20CrMoV 12 1 강의 용접부의 크립 균열진전에 대한 연구가 목적이다. 따라서 대부분의 초점은 용접부에서의 파괴특성 연구를 위한 모의 intercritical HAZ 부의 simulation 과정과, 선정된 모의 HAZ 부의 물성 데이터를 finite element model에 적용하여 해석을 수

\* 포항공대 대학원  
 \*\* 포항공대  
 \*\*\* 한국중공업 기술원  
 \*\*\*\* 한국중공업 기술원

행하는 데 두께 될 것이다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시편

#### 2.1.1 재료 및 용접방법

본 연구에 사용되는 재료는 DIN17175 규격의 ferritic-martensitic 강인 X20CrMoV 12 1이다. 이 재료는 Suminoto Co.에서 이음매 없는 외경 325mm, 두께 34mm의 파이프 형태로 제작된 것으로 그림 1. 에서와 같이 45°의 사선으로 홈을 낸 뒤

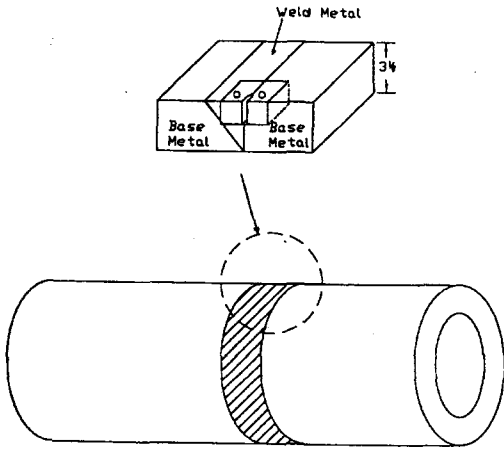


Fig. 1 CT Specimen from welded Pipe

submerged arc welding으로 용접한 후, 750°C에서 한시간 동안 열처리를 한 뒤, furnace 안에서 75.8°C/hr로 300°C까지 냉각한 뒤, 상온으로 냉각하였다. HAZ 부의 두께는 용접 단면을 에칭하여 확인하면 대략 3mm 정도의 폭을 보인다. 광학현미경 사진을 보면 base metal은 coarse grain의 tempered martensite 조직을 보이며, weld metal은  $\delta$ -ferrite가 약간 함유된 fine grain의 martensite 조직을 보인다. 그리고 HAZ 부는 다양한 grain 크기의 martensite 조직을 보인다. base metal과 weld metal의 화학 조성은 표 1.에 정리했다.

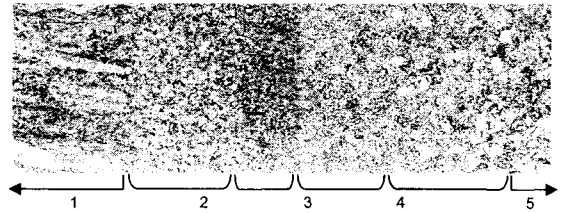
표 1. Chemical Composition of X20CrMoV 12 1 & Weld metal

Element	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	W
X20CrMoV 12 1	0.2	0.69	11.32	0.83	0.27	0.42	0.07

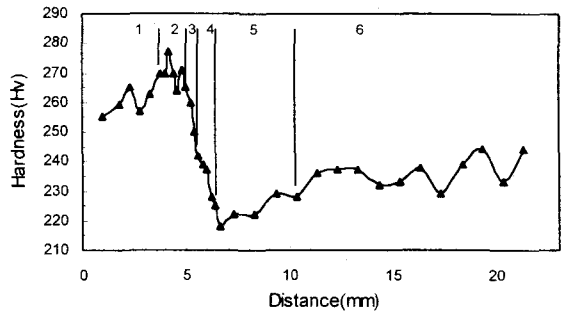
Weld metal	0.19	0.58	10.65	0.83	0.39	0.32	0.54
------------	------	------	-------	------	------	------	------

#### 2.1.2 모의 HAZ부

용접부의 미세구조는 weld metal, fine-grained HAZ, coarse-grained HAZ, intercritical HAZ, softened base metal, 그리고 unaffected base metal의 6가지 영역으로 나누어진다. 광학현미경 사진과 위 영역의 경도측정치는 그림 2에 나타나있다. Interrupted creep rupture 실험결과 대부분의 파괴는 intercritical HAZ 부에서 일어난다고 밝혀졌으며[12], 실제 광학현미경사진을 보면 대부분의 공극이 이 부분에서 형성된 것을 볼 수 있다. 또한 용접부 여러 영역의 경도는 시간이 지나도 거의 변하지 않는다.



(a)



1. Weld metal 2. Coarse-grained HAZ 3. Fine-grained HAZ  
4. Intercritical HAZ 5. Softened base 6. Unaffected base

Fig. 2 (a) Optical micrograph & (b) microhardness of X 20 CrMoV 12 1 welded joint

적절한 모의 intercritical HAZ의 선정을 위해 9 종류의 시편을 준비하여 각각의 미세조직, grain의 크기와 경도를 실제 intercritical HAZ 부와 비교하였다. 이 시편들은 250°C로 예열된 후, 각각 780, 800, 820, 840, 860, 880, 900, 940, 1050°C의 온도로 가열한다. 그리고 실제와 같은 속도로 각 시편을 120°C까지 냉각한 뒤, 실제와 같은 방법으로 용접 후 열처리(750°C에서 한시간 열처리, furnace에서 최대 시간당 100°C의 온도로 냉각)를 실시한다. 780~1050°C라는 온도범위는 재료가  $\alpha$ 에서  $\gamma$  상

으로 변화하는 온도범위를 포함하는 온도이다. 이후 각각의 시편에 대한 SEM 사진관측결과, grain size 그리고 경도측정치를 종합하였다. 그 결과 860℃로 가열했던 시편을 가장 적절한 모의 HAZ 부로 선정하였다. 그리고 이렇게 선정된 모의 HAZ 부 재료를 가지고 지름 9mm 의 원형시편으로 creep 실험을 수행하여 결과를 base metal 과 실제 HAZ 부의 결과와 함께 Larson-Miller 파라미터 그래프를 그렸다(그림 3.). 온도 조건으로는 545~700℃, 하중조건으로는 30~300MPa 를 사용하였는데, 결과를 보면 실제 HAZ 부와 모의 HAZ 부가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 다른 기계적 특성들은 [12]에 잘 나타나 있다.

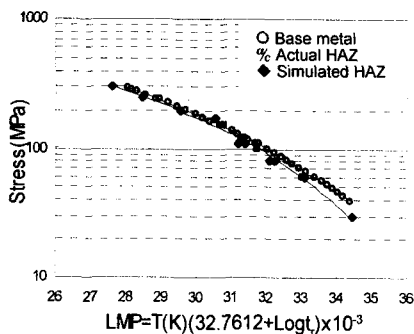


Fig. 3 Master curve of Larson-Miller parameter for simulated HAZ, actual HAZ, and base metal

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 고온 인장 및 크립 실험

본 연구에 사용된 온도조건은 545℃이며, base metal, weld metal 과 모의 HAZ 부 시편을 가지고 인장과 크립 실험을 수행하였다. 시편은 지름 8 또는 9mm 의 원형단면 시편을 사용하였고 extensometer 를 사용하여 displacement 를 측정하였다. 실험은 rupture 가 일어날 때까지 진행하였다.

### 2.2.2 크립 균열 진전실험

크립 균열 진전 실험은 545℃의 온도 조건에서 옆면에 0.1B 깊이의 side groove 를 낸 표준형 1/2T CT 시편(W=25.4mm, B=12.7mm)을 사용하였다. 이때 균열 진전면은 예칭을 통해서 intercritical HAZ 부의 위치를 확인한 뒤, 이곳에 균열 진전면을 위치시켰으며, 대략 2.5mm 정도의 pre-crack 을 내었다. 크랙 길이는 DCPD(direct current potential drop) 시스템을 사용하였으며, load point displacement 는 loading pin 에 고정시킨 extensometer 를 사용하여 측정하였다. 그리고 DCPD 와 extensometer 의 신호는 strip-chart recorder 를 사용하여 기록했다. 실험은 시편이 rupture 가 일어날 때까지 진행하였다.3.

## 3. Finite Element Method 해석

### 3.1 구성방정식

고온 인장 실험과 크립 실험에서 얻어진 데이터에서 finite element method 해석에 사용되는 구성방정식의 상수들을 구할 수 있다. 사용되는 구성방정식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + D\sigma^m + A\sigma^n t \quad (1)$$

### 3.2 Finite Element 모델링

균열진전 모델링은 상용 FEM 코드인 ABAQUS version 5.8 을 사용했다. 용접부 시편의 특성상 각 부분이 서로 다른 재질이므로 전체 시편에 대해 모델링을 하였다. 두 가지 모델을 준비하였는데 하나는 base metal 과 weld metal 만을 가지고 모델링했으며(Two material model), 다른 하나는 가운데 HAZ 부를 추가한 모델(Three material model)이다. Two material model 의 위쪽 절반은 base metal 이며 아래쪽 절반은 weld metal 이다. Crack plane 은 두 재료의 경계면에 위치시켰다. Three material model 에서는 1mm 폭의 intercritical HAZ 부를 추가시켰다. 나머지 HAZ 부는 model 에서 제외했는데, 이는 물성이 알려지지 않았고 그림 2.에 나타나 있듯이 경도가 base metal 또는 weld metal 과 비슷하므로 변형 또한 base metal 또는 weld metal 과 비슷하리라 가정하였기 때문이다. 또한 Crack plane 은 실제 조건과 유사하게 base metal 에서 0.25mm 떨어진 intercritical HAZ 부 내부에 위치시켰다. Three material model 은 2755 개의 사변형 element 를 사용하였고 전체 node 의 개수는 2896 개를 사용하였으며, Two material model 도 이와 비슷하다. 계산은 Reduced integral scheme 을 사용하였다. 균열진전은 실험에서 구한 시간에 대한 균열길이 data 를 input data 로 넣어서 시간에 따라 균열선단의 node 가 release 되도록 하였다. 균열부의 mesh 크기는 0.125mm 이며, Plain strain 을 가정하였다. 구성방정식은 식 (1)로 주어진 elastic - plastic - steady state creep 으로 가정했다. 정지또는 성장하는 균열주위의 singular 특성은 해석에서는 무시되었다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 실험결과

인장 실험과 creep 실험의 결과에서 구성방정식들의 상수들을 구했다. 상수들은 표 2.에 정리했다.

그림 4.는 세 가지 하중조건에 대한 균열 진전과 시간의 그래프이다. 전체 균열 진전량은 2-3mm 정도이다. Small scale creep 에서 extensive creep 으로 넘어가는 시간을 천이시간(Transition time)이라 하며 다음과 같은 식으로 정의된다[13].

$$t_T = \frac{K^2(1-\nu)}{E(n+1)C^*} \quad (2)$$

표 2 Constitutive Propertied at 545℃

Material	Base metal	Weld metal	Simulated HAZ
E (Gpa)	131	134	98.053
D(MPa <sup>-m</sup> )	6.33×10 <sup>-33</sup>	6.33×10 <sup>-33</sup>	6.33×10 <sup>-33</sup>
m	13.0	5.87	9.7
A(MPa <sup>-m</sup> hr <sup>-1</sup> )	6.44×10 <sup>-34</sup>	1.91×10 <sup>-57</sup>	5.85×10 <sup>-40</sup>
n	12.30	21.6	14.9

표 3 Creep crack Growth test result

Load (kN)	Total test time (hrs)	Transition time (hrs)
9.1	32	0.13
7.6	394	1.43
6.8	1199	5.47

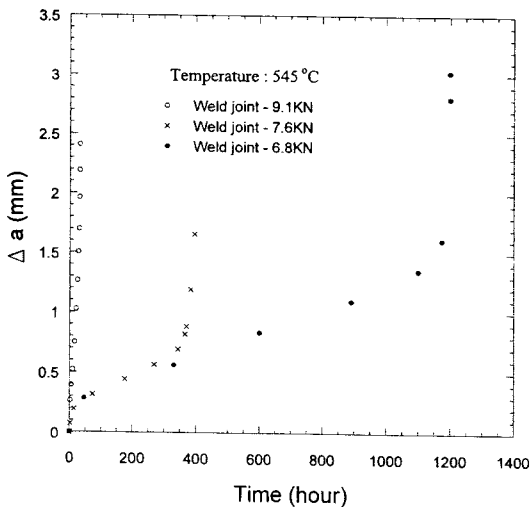


Fig. 4 Crack length vs. time at 545℃

표 3. 에 나오는 천이시간은 실험기간의 0.5%보다 작다. 따라서 대부분의 균열진전은 steady state 크립 조건에서 진행되었으리라 생각된다. 파면을 보면 시편 중간부분부터 약간은 모재부로 파고들어간 손톱모양을 보인다. 이러한 현상은 아마

도 Mixed Mode 의 영향이라 보여지나 확실치는 않다. Crack tip 주변의 영역을 조사해보면 shear stress 는 다소 작게 나온다.

SEM 사진으로 파면을 조사해보면 크랙초반과 steady-state 상태에서는 Intergranular 의 파괴 모드를 보이다가 실험 마지막에 균열 진전이 가속화되면서 파괴 모드는 transgranular 를 나타낸다. 자세한 내용은 [11]을 참조하기 바란다.

#### 4.2 FEM 해석결과

그림 5.에서 보듯이 해석에 의한 loadpoint displacement 값은 P=7.6kN의 경우 실험치와 비교적 비슷한 결과를 나타낸다. 그리고 6.8kN의 경우는 실험시간의 상당부분까지 해석 결과가 실험치보다 약간 낮은 값을 나타내며, 9.1kN의 경우 약간 높은 값을 나타낸다.

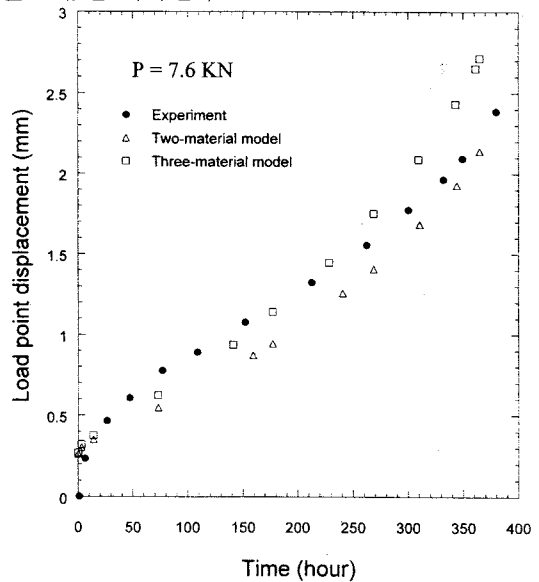


Fig. 5 Load point displacement (Experiment vs. Calculated)

Three material model 에 의해 계산된 load point displacement 값이 two material model 에서 계산된 값보다 다소 큰 값을 나타낸다. 이것은 Three material model 에서 추가된 모의 HAZ 부가 base metal 이나 weld metal 보다 상대적으로 무르기 때문이다.

7.6kN 에 대한 load point velocity 의 계산치가 그림 6.에 나타나있다. 결과를 비교해 보면 해석에 의한 결과가 실험치보다 초반부에는 낮은 값을 나타낸다. 이것은 구성방정식에서 우리가 Primary Creep term 을 고려하지 않았기 때문으로 보여진다. 그리고 중반부에서는 해석결과와 실험치가 일치함

을 보이다가, 종반 균열이 빠르게 진행될 때는 실험치보다 다소 높은 값을 보인다. 이러한 현상은 크립 모델과 재료상수와 관련이 있을 것이다.

Two material model 과 three material model 의 load line velocity 의 비는 균열 길이와 하중에 따라서 다양하게 변화한다. 6.8kN 에 대해서는 대략 평균적으로 1.15 정도, 9.1kN 에 대해서는 대략 1.45 정도이다. 이러한 비율은 상당히 크게 느껴질지 모르지만, 실제 균열진전 실험상에서의 data 의 scattering 를 생각한다면 이러한 차이는 무시할 만 하다.

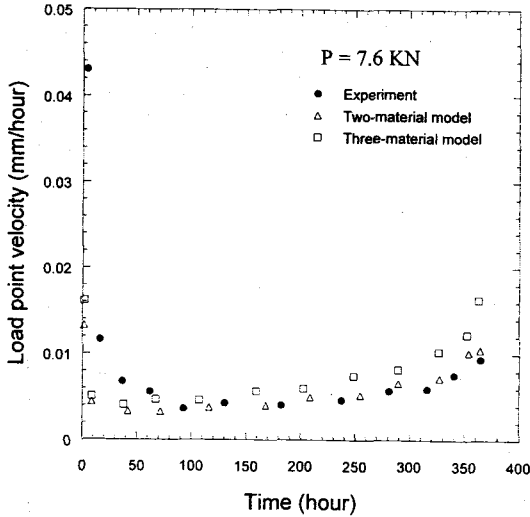


Fig. 6 Load point velocity (Experiment vs. Calculated)

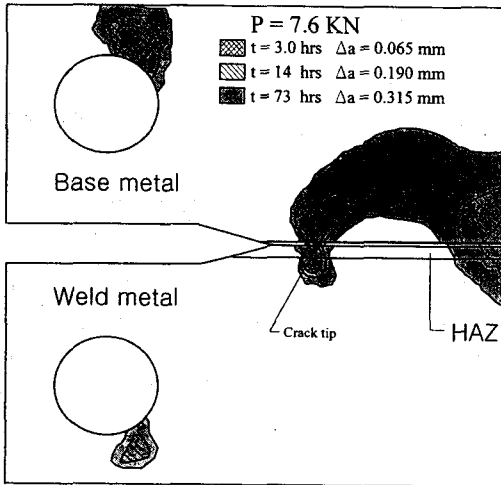


Fig. 7 Development of creep zones in weld joint

$(\epsilon_{ij}^e \epsilon_{ij}^c)^{1/2} = (\epsilon_{ij}^c \epsilon_{ij}^c)^{1/2}$  로 정의되는 creep zone 은 three material model 에 대해서 그림 10.에 나타 내었다. Two material model 의 경우도 거의 비슷한

형상이 나오나 three material model 에 비해서 나타 나는 영역이 다소 작다. 그리고 위와 아래의 재료 의 차이에 의해 나타나는 creep zone 의 비대칭성 도 시간이 지나면서 심화됨을 보인다.

Effective stress 는 그림 8.에 보듯이 크랙에서 멀 리 떨어진 부분의 응력상태는 균열면을 중심으로 어느정도 대칭성을 보이나, 균열 주변에서는 초기 에 weld metal 쪽의 영역이 더 크다. 그리고 시간이 지나면서 base metal 부분의 effective stress 영역이 먼저 사라지고 그 다음에 weld metal 의 영역이 사라지게 된다. 이것은 creep 에 의한 crack tip 주변 의 응력 완화현상이 균열이 진행되면서 생기는 응 력 상승효과보다 더 커지는 현상 때문이다. 그리고 시간이 지남에 따라서 사라졌던 stress 영역이 base metal 과 weld metal 의 순서로 다시 나타나게 되어 시편이 파단이 일어날 때까지 계속 성장한다. 이것은 빠른 균열성장 때문에 creep 에 의한 응력 완화가 일어나기 위한 시간이 확보되지 않으므로 응력 상승효과가 응력완화 효과를 압도하기 때문 이다. 비록 crack tip 주변에는 이러한 현상이 나타 나지만 균열면에서 좀 떨어진 나머지 영역에서는 꾸준히 effective stress 영역이 성장하는 것을 볼 수 있다.

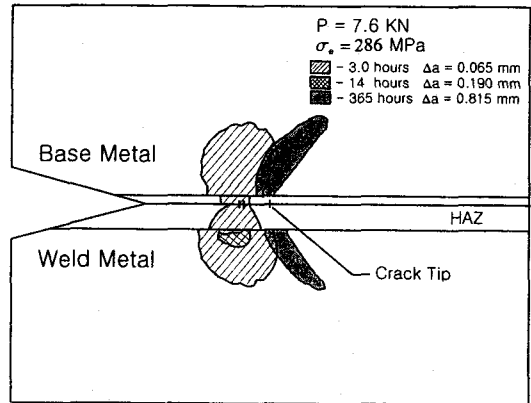


Fig. 8 Change of Effective stress zone

본 연구에서는 균열 성장을 적절하게 연관시키 는 파라미터로  $C^*$  를 사용했다. 계산에 사용된 식 은 다음과 같다[14-17]. 계산에는 실험데이터를 이 용하였다.

$$C^* = \frac{PV_c}{BW} \eta \quad (2)$$

$$\eta = \frac{n}{n+1} \left( \frac{2}{1-a/W} + 0.522 \right) \quad (3)$$

$$\dot{V}_C \approx \dot{V} - \frac{aB}{P} \left[ \frac{2K^2}{E} + (m+1)J_p \right] \quad (4)$$

위 식에 들어가는 물성치는 base metal 과 weld metal 의 평균치를 사용하였으며, HAZ 부의 물성치의 영향은 무시했다. 실제적으로  $C^*$  값의 계산에 사용되는 값은 load line velocity 이므로, 측정된 load point velocity 에 해석에 의해 얻어진 scale factor 를 곱해서 load line velocity 를 구했다.

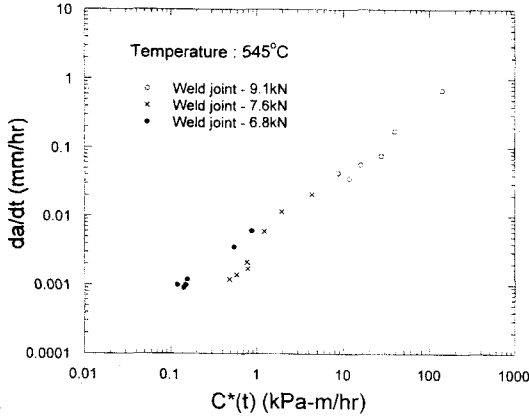


Fig. 9 Creep crack growth rate vs.  $C^*$  at 545°C

그림 9.에는 균열이 아주 작을 때의 값도 들어가 있는데, 6.8kN 의 경우 0.05mm, 7.6kN 과 9.1kN 의 경우는 0.08mm 일 때의 값을 포함하고 있다. 여기서 주목할 것은 이러한 균열길이는 ASTM E1457 에 나타난 initiation size(0.5mm)보다 훨씬 작은 값이다. 따라서 ASTM 에 제시된 1/2T CT 시편에 대한 initiation size 값은 0.5mm 보다 작아야 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 545°C 하에서의 X20CrMoV 12 1 강의 용접부의 크립 균열진전 특성에 대해서 연구하였다. 모의 HAZ 부는 실제적으로 크립에 의한 파괴가 주로 일어나는 intercritical HAZ 부에 대해서 선정하였다. 균열진전 해석은 HAZ 부를 포함한 것과 포함하지 않은 두 개의 모델을 가지고 진행하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 모의 intercritical HAZ 부에 대한 heat cycle 을 얻어낼 수 있었다.
- (2) 용접부에서의 균열 진전율은  $C^*$  와 좋은 상관관계를 가진다.
- (3) 1/2T CT 시편에 대한 crack initiation size 는

creep-ductile 한 1T CT 시편에 대해서 ASTM E1457 에서 제시한 값보다는 줄어들어야 한다.

(4) Intercritical HAZ 부는 base metal 이나 weld metal 보다 낮은 크립에 대한 저항을 보인다. 따라서 해석 수행결과에서도 모의 HAZ 부를 첨가한 모델이 더 큰 load line velocity 를 보인다.

(5) Creep zone 은 base metal 과 weld metal 부가 초기에는 약간 비대칭성을 보이며, 시간이 지나면서 비대칭성은 계속 증가한다. 그리고 모의 HAZ 부를 첨가한 모델의 Creep zone 이 약간 더 크다.

## 참고문헌

- (1) Kalwa, G., Nuclear Eng. and Design, Vol.84, 1985, pp 87-95
- (2) Wu, R and Sandstrom., Vol.11, 1995, pp 579-588.
- (3) Sandstrom, R., Karlsson, S., and Modin, S. High Temp. Technol., Vol.3, No.2, 1985, pp. 71-78.
- (4) Schneider, K., Tolksdorf, E., and Grüling, H. W., Nuclear Eng. and Design, Vol.84, 1985, pp. 109-122.
- (5) Bashu, S. A., Sin호, K., and Rawart, M. S., Materials Science and Engineering, Vol. A127, 1990, pp.7-15.
- (6) Egger, G., Earthman, J. C., Nilsvang, N., and Ilschner, B., Acta Metallurgica., Vol.37, No. 1, 1989, pp.49-60.
- (7) Egger, G., Acta Metallurgica., Vol.37, No. 12, 1989, pp.3225-3234.
- (8) Tian, Z. L., Coussement, C., De Witte, M., and Steen N., Int. J. Pres. Ves & Piping, Vol.46, 1991, pp.339-348.
- (9) Wu, R., Sandstrom, R., and storesund, J., Mater. High Temp., Vol. 10, No.4, 1992, pp. 154-163.
- (10) Wu, R., Sandstrom, R., and storesund, J., Mater. High Temp., Vol. 12, No.4, 1994, pp. 277-283.
- (11) Y. K. Park, K. S. Kim, Y-K Chung, and J-J Park, "Creep Crack Growth in X20CrMoV 12 1 steel and its Weld Joint", ASME J. Pressure Vessle Technology, accepted.
- (12) Joo C-H, Chung Y-K, Park J-J and Kim H-J, "Quantification of Creep Cavitation in Weld Joint and Evaluation of Material Characteristics of Heat-Affected Zone in X20 CrMoV 12 1 Steel." presented in the 2000 Pressure Vessels and Piping Conference, Seattle, Washington, July 23-27, 2000.
- (13) Reidel, R., and Rice, J. R., ASTM STP 700, 1980, pp. 112-130.
- (14) Landes, J. D., and Begley, J. R., ASTM STP590, 1976, pp. 128-148.
- (15) Saxena, A., Eng. Fract. Mech. Vol. 40, No. 4/5, 1991, pp. 721-736.
- (16) Murakami, Y., Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 1, Pergamon Press, 1987.
- (17) Kumar, V., German, M., and Shih, C. F., An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis, EPRI Report NP-1931, EPRI, 1981.