

# 용접열영향부 균열의 고온에서의 성장거동

## High Temperature Crack Growth Behavior at Heat Affected Zone

백운봉\*, 윤기봉\*\*

\* 한국표준과학연구원 산업측정표준부 강도연구그룹 ubbaek@kriss.re.kr

\*\* 중앙대학교 기계공학부 kbyoon@cau.ac.kr

### ABSTRACT :

Creep-fatigue crack growth behavior at the heat affected zone of 1Cr-0.5Mo steel weldment has been experimentally studied. Load hold times of the tests for trapezoidal fatigue wave-shapes were varied among 0, 30, 300 and 3,600 seconds. Time-dependent crack growth rates were characterized by the  $C_t$  estimated with the equation proposed by the previous finite element analysis work. It was concluded that the  $C_t$  values calculated from the properties of parent metal were quite comparable to the accurate  $C_t$  values calculated from both of weld and parent metals.

### 1. 서론

장기간 사용된 고온 플랜트의 두꺼운 강재 용접부에 균열이 발생하여 균열성장에 따른 잔여수명을 평가할 필요가 있는 경우의 대부분은 용접 열영향부에 균열이 발생하여 성장하는 Type IV 균열<sup>(1)</sup>이다. 이러한 균열에 대한 정하중 조건에서의 크리프균열성장(CCG, Creep Crack Growth) 거동에 대한 연구는 CrMo 저합금강의 사용재와 신재에 대한 CCG의 실험적 연구<sup>(2)</sup> 결과와 재료 구성방정식의 차이에 따른 CCG 모델링에 대한 연구<sup>(1)</sup>가 보고되었다. 그러나 최근 많은 고온플랜트들이 잦은 기동/정지에 따른 크리프-피로 하중을 받고 있으므로 열영향부의 균열에 대해서도 정하중이 아닌 피로하중 조건에서의 크리프-피로 균열성장(CFCG, Creep-Fatigue Crack Growth) 거동에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 실험적으로 측정된 용접열영향부 균열의 크리프-피로 균열 성장률을 모재부의 재료물성값만을 사용하여 계산한  $C_t$  변수 값 대신, 수치해석 연구결과 제시된<sup>(3)</sup> 모재 및 용접재 모두의 재료물성 값을 사용한  $C_t$  변수 값으로 특성화하여 얻은 결과에 대해 논하였다.

### 2. 실험

본 연구에 사용된 재료는 1Cr-0.5Mo 강으로서 화학성분은 Table 1과 같다. 용접부 각 부위인 모재 및 용접재의 재료물성 평가를 위한 인장 및 크리프 시편 채취를 위해 일반적인 용접 절차를 사용하여 용접블록을 제작하였다. 용접은 SMAW로 수동 용접하였고, 최저 예열온도는 165°C, 최대 패스간 온도는 315°C로 제한하였으며, 용접 후열처리는 670°C까지 가열하여 2시간 유지하여 실시하였다. 이때 가열은 250°C에서부터 110°C/h로 가열하여 670°C에 도달하였으며 92°C/h로 냉각하였다. 이상의 용접 절차로 제작된 용접 블록의 용접재 부위와 모재 부위에서 인장 및 크리프 시편을 채취 가공하였다. 이때, HAZ는 대략 2~3 mm 정도의 폭을 갖는 띠 형태로 형성되므로 용접블록으로부터 직접 열영향부의 인장 및 크리프 시편을 가공하기는 불가능하다. 따라서 시편가공이 용이하도록 충분한 두께를 갖는 부재가 열영향부와 유사한 조직을 가질 수 있게 하기 위하여, HAZ의 금속조직을 모사 시킨 HAZ조직 모사재를 문헌<sup>(4)</sup>에 따라 열처리에 의해 제작하였다.

크리프-피로 균열 성장시험을 위한 C(T)(compact tension) 시험편은 균열성장 방향이 열영향부를

따라서 성장하도록 가공하였다. 기계가공을 한 시험편은 예비균열을 만든 다음 시험편 측면을 연마하여 부식한 후 균열선단이 열영향부에 놓여 있음을 확인하였다. 예비 피로균열 형성 후 측면 홈을 가공하였으며 균열길이를 연속적으로 측정하기 위해 직류 전위차법을 사용하였다.

Table1. Chemical composition of the 1Cr-0.5Mo steel

Elem.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
wt.%	0.18	0.27	0.68	0.016	0.014	0.095	0.94	0.44	0.12	0.008	bal.

하중유지시간이 없는 삼각파형으로 부터 균열 성장률을 측정하여 주기의존 균열 성장률을 결정하기 위해, [하중증가시간]/[하중감소시간]이 1/1(단위:초)인 삼각파형에서 4개의 시험편을 사용하여 피로시험을 실시하였다. 또한 하중유지시간 동안의 시간의존 균열성장률을 측정하기 위해 30초, 300초, 3,600초의 하중 유지시간을 갖는 사다리꼴 파형 조건에서 피로균열성장시험을 실시하였다.

### 3. 결과 및 토의

크리프 시험으로 얻은 크리프 변형율-시간 관계 데이터를  $\dot{\epsilon}_{sc} = A \sigma^n$ 의 2차 크리프 관계식으로 모델링 했을 때의 재료 상수를 Table 2에 나타내었다. 본 연구 재료의 경우 용접재가 크리프 저항성이 가장 높으며 모재가 크리프 저항성이 가장 낮았으므로, 동일 하중조건에서는 모재가 용접재나 HAZ 재료보다 크리프 변형이 가장 쉽게 발생할 것이다. 즉, 본 연구에서와 같이 C(T)시험에 용접부 계면 균열을 형성하여 CFCG시험을 수행하는 경우 하중점 변위 속도는 용접재 쪽의 크리프 변형 때문에 발생하는 변위 보다는 모재 쪽의 크리프 변형 때문에 발생하는 변위가 훨씬 크게되므로  $C_t$ 를 계산할 때에도 모재 물성의 기여도가 클 것이다. Fig. 1에 초기 응력이 약 180 MPa인 경우의(모재-182 MPa, HAZ 재료-178 MPa, 용접재-184 MPa) 크리프 시험데이터와 2차 크리프 모델 식에 대입하여 계산된 크리프 변형률 데이터를 함께 나타내었다.

Table2. Creep properties of the 1Cr-0.5Mo steel at 538°C.

Material	Creep Constant $A$ ( $MPa^{-n} \cdot hr^{-1}$ )	$n$
Parent	1.235E-24	9.18
CGHAZ	1.787E-17	5.52
Weld	3.358E-30	10.70

$C_t$ 의 평가 시 재료의 크리프 거동을 2차 크리프만 가정하여 이전 연구<sup>(3)</sup>에서 제안된 탄성-2차 크리프 거동 재료에서의  $C_t$  식을 사용하여  $(da/dt)_{avg}$ 와  $(C_t)_{avg}$  관계를 구하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서는  $C_t$  값 계산 시 모재의 크리프 상수만을 사용하였다. 동일한 시험 데이터를 용접재의 크리프 상수를 사용하여  $C_t$ 를 계산하면 Fig. 3에 보인 바와 같은 관계를 갖는다. 용접재의 크리프 상수를 사용하는 경우 크리프 변형이 작게 예측되므로 계산된  $C_t$  값은 모재의 크리프 상수를 사용한 경우보다 작게 된다. 따라서 Fig. 3의  $C_t$  값은 Fig. 2의  $C_t$  값보다 매우 작게 나타나며,  $(da/dt)_{avg}$ 와  $(C_t)_{avg}$  관계의 산포도도 더욱 크게 나타났다.

Fig. 2 및 Fig. 3 모두 계면 균열의 한쪽 재료의 물성만을 사용하므로 계산 방법이 편리하여 실용적이기는 하나 정확한  $C_t$  값 계산을 위해서는 모재와 용접재 모두의 물성을 사용하여야 한다. 모재와 열영향부 균열에 대하여 유한요소 해석으로 얻은  $C_t$  값을 근사적으로 얻기 위한 식으로서 정상상태 크리프 조건(extensive creep condition)에서는 두 재료  $C_t$  값의 대수 평균값이 제안되었으므로<sup>(5)</sup> 이 식을 사용하여  $C_t$  값을 다시 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 실제 실험데이터의 상당 부분은 정상상태 크리프 조건 이전의 소규모 크리프 조건이지만 이 경우에도 두 재료  $C_t$  값의 대수 평균값을 열영향부 균열의  $C_t$  근사 값으로 가정하여 사용하였다. Fig. 4의  $C_t$  값은 Fig. 2와 Fig. 3  $C_t$  값의 평균값이므로 Fig. 2에 비해서  $C_t$  값은 다소 감소하였으나 데이터 산포는 개선된 점을 발견할 수 없었다.

본 연구에서  $C_t$  값의 계산을 위해서 열영향부의 폭을 무시하고 단지 용접재와 모재사이의 경계면에서 균열이 성장한다고 단순화하여 가정하였다. 그러나 실제의 HAZ는 2-3 mm의 폭을 갖고 있으므로 HAZ 내의 균열의 정확한 위치 변동에 따라 균열 성장 속도가 달라질 수도 있을 것이다. HAZ

는 크게 용접재와의 경계인 용융선(fusion line)부근의 CGHAZ와 모재와의 경계부 부근의 FGHAZ로 나눌 수 있다. Fig. 5은 하중유지 시간이 300초인 경우의 균열 성장 경로를 보여주고 있다. 피로 예비균열의 길이는 6.78 mm였으며, 균열선단이 처음에 CGHAZ에 위치하였다. 예비균열 선단으로부터 처음 4.6 mm까지 균열이 성장할 때는 CGHAZ내에서 균열이 성장하다가, 균열 성장 경로가 휘어서 약 5.2 mm부터는 FGHAZ 근처 부위를 따라 균열이 성장하게 된다. Fig. 6에 보인 하중유지 시간이 3,600초인 경우에는 예비균열 선단의 길이가 8.53mm 였으며 시험 초기부터 균열이 CGHAZ 부위에서 FGHAZ 부위로 휘어서 ICHAZ를 따라 성장하므로 시험 중 얻은 거의 모든 균열성장 데이터가 FGHAZ 근처 부위에 균열이 있는 경우의 균열 성장 거동을 나타내고 있다. 이러한 경향은 다른 시험의 경우에도 마찬가지이다. 즉, 크리프 변형이 우세해지면 균열성장 경로는 결국은 FGHAZ 근처 부위를 따라 성장하게 됨을 알 수 있었다. 이는 실기에서 장시간 사용되어 크리프 변형이 누적되었을 때, FGHAZ 근처 부위를 따라 Type IV균열이 형성되는 관찰 결과와 일치하는 것이다.

Fig. 4의 크리프-피로 균열성장 실험데이터를 하중유지 시간과 관계없이 CGHAZ 내에서 성장하는 경우에는 □ 표시로 FGHAZ 근처 부위를 따라 성장한 때에 측정된 데이터를 ● 표시로 나타내어 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 알 수 있는 것과 같이 HAZ 내에서도 균열이 FGHAZ 근처 부위를 따라 성장할 때의 균열 성장률이 CGHAZ 내에서 성장할 때 보다 더 높은 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 실기의 크리프-피로 균열성장 거동을 예측하기 위해서는 FGHAZ 근처 부위를 따라 성장한 경우의 데이터인 ● 표시 데이터를 모델링한 식(1)을 사용하여야 할 것이다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = 7.05 \times 10^{-4} (C_t)_{avg}^{0.519} \quad (1)$$

#### 4. 결론

CrMo강 HAZ에 존재하는 균열이 크리프-피로 하중을 받을 때의 균열 성장률,  $(da/dt)_{avg}$ , 와  $(C_t)_{avg}$ 의 관계를 실험적으로 측정하여 다음의 결론을 얻었다.

본 연구조건에서 1Cr-0.5Mo 강 경우 크리프 저항성은 용접재가 가장 높고 모재가 가장 낮았다. 따라서 HAZ를 따라 성장하는 크리프-피로 균열 성장률을 특성화하는  $C_t$  변수의 계산은 용접재와 모재의 크리프 물성 모두를 사용하여 계산하여야 하지만 용접재의 재료물성을 얻기 어려운 경우에는 모재의 크리프 물성만을 사용하여 계산하여도 균열 성장률 예측모델의 오차는 크지 않다.

HAZ에서 크리프 변형이 우세한 조건에서 균열성장이 발생할 때에는 균열은 FGHAZ 근처 부위를 따라 성장하는 경향이 있으며, CGHAZ 부위를 따라 균열이 성장할 때의 균열성장률보다 FGHAZ 근처 부위의 균열성장률이 높다. 따라서 수명평가를 위한 균열 성장률 모델은 FGHAZ 근처 부위의 균열 성장률을 사용하여 정립하여야 한다. FGHAZ 근처 부위는 FGHAZ외에 ICHAZ등을 포함하는 CGHAZ와  $A_1$  변태점 경계선 사이의 영역이다.

#### 참고문헌

- (1) 윤기봉, 김광웅, 백운봉 : 저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링, 대한기계학회 논문집 A권, 제22권 제12호, (1998) pp. 2153-2162
- (2) 윤기봉, 김광웅, 정용근 : 용접 계면균열의 크리프 균열성장 거동에 관한 연구, 대한용접학회지, 제16권 제4호, (1998) pp. 339-347
- (3) 윤기봉, 심현우, 신영의 : 고온 크리프 조건에서 용접계면 균열의  $C_t$  매개변수에 대한 수치해석적 연구, 대한기계학회 논문집 A권, 제22권 제12호, (1998) pp. 2239-2246

- (4) M. S. Shamms : Metallographic Methods for Predicting the Remanent life Eerritic Coarse-Grained Weld Heat Affected Zones Subject to Creep Cavitation, Int. Conf. on Life Assessment and Extension, Hauge, Netherlands, 13-15 June, (1988)
- (5) K. B. Yoon and K. Y. Kim : High Temperature Fracture Parameter  $C_t$  for a Weld Interface Crack, Theoretical and Applied Fracture Mechanics Journal, Vol 32, (1999) pp. 27-35

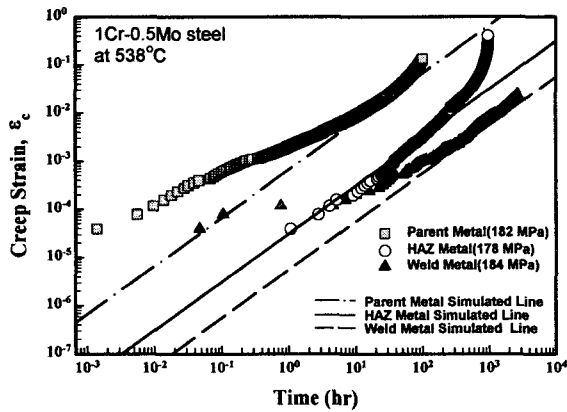


Fig.1 Creep curves of parent, HAZ and weld metals.

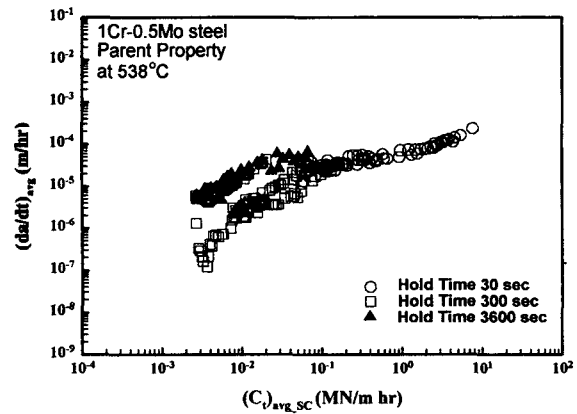


Fig.2 Creep-fatigue crack growth rates related with  $C_t$  estimated from parent metal creep properties.

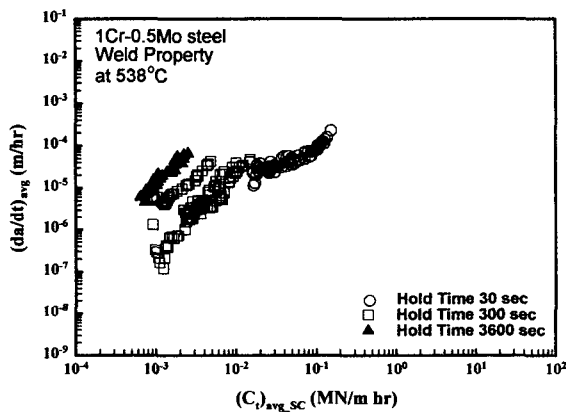


Fig.3 Creep-fatigue crack growth rates related with  $C_t$  estimated from parent metal creep properties.

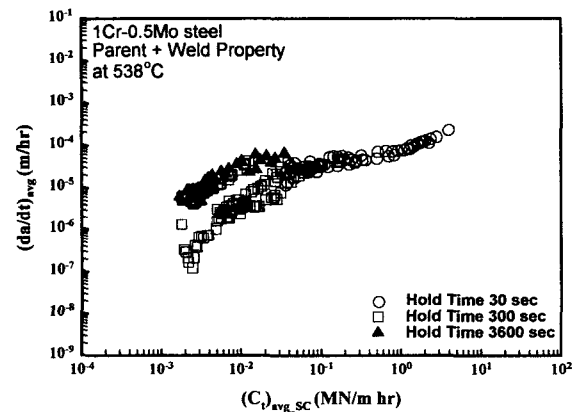


Fig.4 Creep-fatigue crack growth rates related with  $C_t$  estimated from both of parent and weld metal properties.

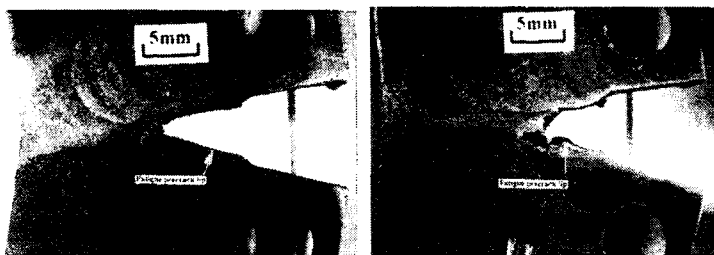


Fig.5 Crack path for test with 300 second.

Fig.6 Crack path for test with 3,600 second.

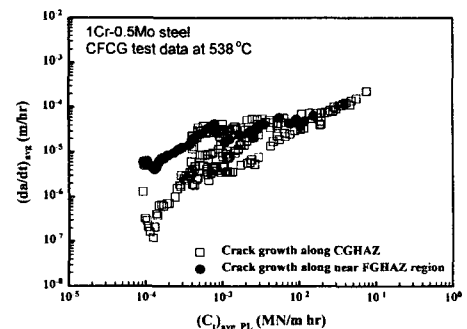


Fig.7 Creep-fatigue crack growth data when crack growth along HAZ