

# 모사 열영향부의 크리프 거동에 대한 연구

## A Study on Creep Behavior of Simulated HAZ material

백운봉\*, 이해무\*, 윤기봉\*\*

\* 한국표준과학연구원 시설계측연구센터 *ubbaek@kriss.re.kr, hmlee@kriss.re.kr*

\*\* 중앙대학교 기계공학부 *kbyoon@cau.ac.kr*

### 1. 서론

수명말기의 고온 압력용 설비의 경우 용접 열영향부에서 균열이 발생하여 그 수명을 소진하게 된다. 이러한 설비에서 수명을 연장하기 위해서는 용접부를 제거하고 재용접함으로써 수명을 연장할 수 있다. 따라서 재용접한 용접부의 경우 크리프 수명을 평가해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 180,000시간 사용한 1Cr0.5Mo강을 재 용접하여 용접부와 모재부 그리고 모사 열영향부를 각각 채취하여 크리프 시험을 수행하고 설계자료로 활용하는 규격과 비교하여 보았으며, 보다 정확한 잔여수명 평가를 위해 Monkman-Grant(M-G) 식을 사용하여 수명평가에 필요한 상수를 구하였다.

### 2. 실험

본 연구에 사용된 재료는 설계온도 515 ℃, 설계압력 10.7 MPa로 180,000시간 운전된 1Cr0.5Mo 보일러 헤더재료로 그 화학성분은 Table 1과 같다. 용접부의 시험편 가공을 위해 Table 2에서와 같이 E8016-B2법으로 용접하여 Fig. 1에서 보는 것과 같이 후열처리 하였다. 용접에 사용된 용착금속의 성분은 Table 3에 나타낸 것과 같다. 그리고 열영향부 시험편은 모재를 채취하여 Shammass에 의해 제안된 열처리를 이용해 모사 하였다. 크리프 시험은 ASTM E139 규격에 따라 실험하였다.

Table 1. Chemical composition of 1Cr0.5Mo steel.

Element	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.

Table 2. Welding condition and processes in the retired materials.

Process	Filler Metal			Current/Polarity		Volt Range	Trv. Speed(cm/min)
	F-No.	AWS Class	Size(mm)	Type	Amp. Range		
GTAW	6	ER80s-B2	φ 2.4	DCSP	100-180	12-16	8-15
SMAW	4	E8016-B2	φ 3.2	DCRP	80-130	22-28	8-15
			φ 4.0		110-180		

Table 3. Chemical composition of filler metal(K8016-B2).

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
wt. %	0.06	0.47	0.65	1.31	0.52	bal.

### 3. 실험결과 및 검토

본 실험에 사용한 사용재는 보일러 과열증기헤더로부터 채취하였으며 재료 채취부의 응력을 계산하면 원주방향의 응력은 약 50 MPa이다. 영국에서는 고온 압력용기의 설계를 위하여 각종 재질별로 가속 크리프 파단 실험을 실시하여 신재에 대한 응력과 Manson-Brown

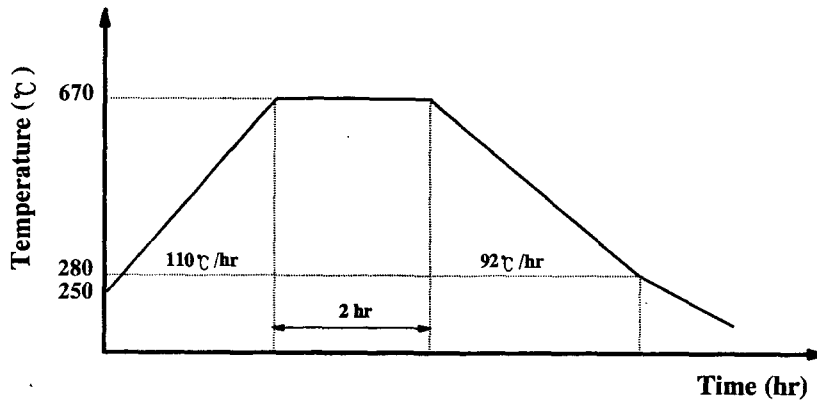


Fig. 1 Post weld heat treatment cycle.

(이하 M-B로 표기),  $P(\sigma)$  사이의 관계를 BSI PD 6525 Part 1에 master 곡선 그래프형태로 나타내었다.

$$P(\sigma) = \frac{\log t_r - \log t_a}{(T - T_a)^r} \quad (1)$$

여기에서  $T$ 는 온도 ( $^{\circ}\text{K}$ )이고  $t_r$ 은 파단 시간이다. 본 실험은 사용재의 모재부와 모사열영향부 그리고 용접부를 각각 실험하였으므로 실험결과를 M-B 관계식으로 계산하여 Fig. 2에서 보는 것과 같이 BSI PD 6525 Part 1의 1Cr0.5Mo (Normalized and Tempered)강의 master 곡선 그래프에 나타내 보았다. 이때 상수는 BSI규격의 1%CrMo 강에 해당하는 값( $\gamma=1$ ,  $T_a=280$ ,  $\log t_a=20.329$ )을 사용하였다.

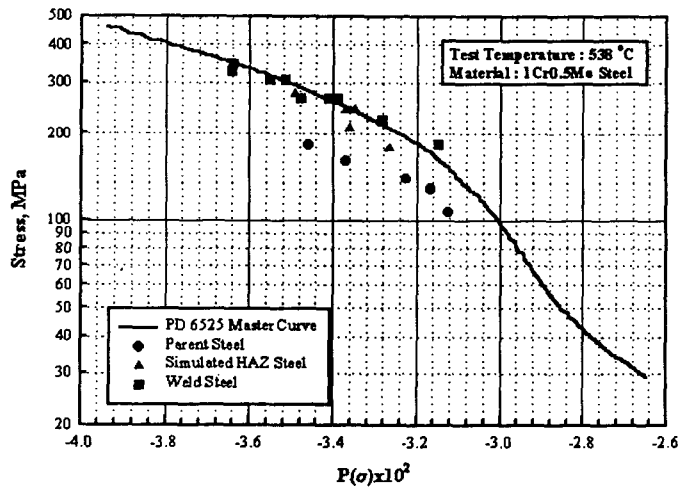


Fig. 2 Creep test result compared with BSI PD 6525.

이 그래프에서 보는 것과 같이 사용재의 파단 시간이 신재의 파단 시간보다 짧으므로 모재부의  $P(\sigma)$ 값이 master 곡선보다 낮음을 알 수 있다. 그러나 용접부의  $P(\sigma)$ 값은 재용접을 했으므로 신재의  $P(\sigma)$ 값과 일치하였다. 모사 열영향부의  $P(\sigma)$ 값은 사용재의 모재부를 채취하여 열처리하였으므로 모재부와 용접부의 사이에 분포하고 있다. 이상의 결과로부터 사용재를 재용접한 경우 크리프 수명은 모재부의 크리프 수명에 의해 결정될 수 있음을 알 수 있다.

M-B 관계식 (1)을 이용하는 BS 규격외에도 ISO 2604 규격에 사용된 식(2)를 이용하여

ISO 규격의 master 곡선 그래프에 도시하여 비교하였다.

$$P(\sigma) = \frac{\log t_r - 13.29}{T - 500} \quad (2)$$

Fig. 3은 ISO 2604의 1Cr0.5Mo강의 master 곡선 그래프에 나타난 것이다. 이 그래프에서도 사용재를 채용접한 경우 크리프 수명은 모재부의 크리프 수명에 의해 결정될 수 있음을 알 수 있다.

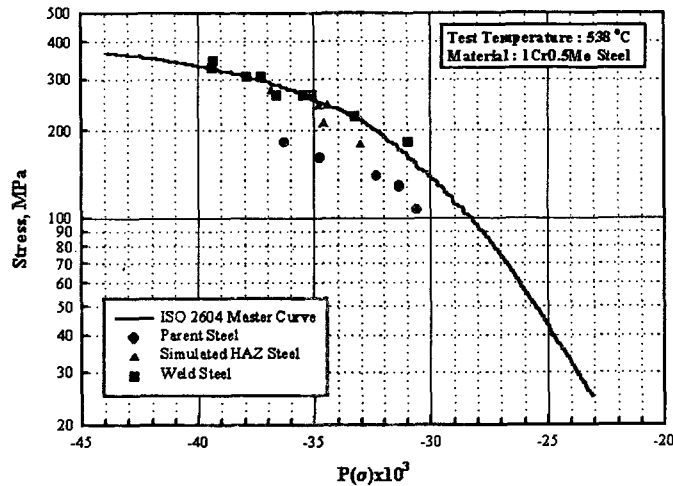


Fig. 3 Creep test result compared with ISO PD 6525.

일반적으로 크리프 수명을 평가하기 위해서 외삽법을 사용한다. 본 연구에서도 단시간 크리프 파단 시험으로부터 장시간 크리프 파단 수명을 예측하는 방법 중 경험 식으로 많이 사용되는 방법인 크리프 파단 시간( $t_r$ )과 최소 크리프 속도 ( $\dot{\epsilon}_{\min}$  또는 정상상태 크리프 속도) 실험 데이터를 이용한 Monkman-Grant(이하 M-G로 표기) 관계식(3)을 이용하여 적용가능성을 검토해 보았다.

$$\log t_r + m \log \dot{\epsilon}_{\min} = C \quad (3)$$

본 실험에 사용된 1Cr0.5Mo 강에 대하여 크리프 수명 예측식으로 사용하고자하는 M-G 기본식은  $\dot{\epsilon}_{\min}^m \cdot t_r = C$  이다. 여기서 상수  $m=1$ 이면 Fig. 4에서 보는 것과 같이 스트레인 ( $\epsilon^*$ )은  $\epsilon^* = \epsilon_s - \epsilon_0 = t_r \cdot \dot{\epsilon}_{\min}$ 가 된다. 그림에서 알 수 있듯이 크리프 파단 수명은 단지 2차 크리프 영역에서의 크리프 연신량에 의해 계산되는 정상상태 크리프 속도만 고려하고 있다. 이에 비해 Dobe 와 Milicka 가 제안한 수정관계식은  $\epsilon_r/t_r = C \dot{\epsilon}_{\min}^m$ 으로, 이 식은 2차 크리프 속도는 물론 3차 크리프 영역의 크리프 파단 연신율을 포함하고 있는 식임을 알 수 있다. 따라서 수정관계식을 적용하려면 크리프 파단 연신율을 측정하여야 하지만, M-G 기본식 보다 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다.

그리고 크리프 곡선에서 2차 크리프 영역의 정상상태 크리프 속도는 실험값의 신뢰도가 높고 해석이 용이하기 때문에 고온재료의 설계시 기준으로 사용하고 있으며, 재료의 수명을 평가하는 대표적인 인자가 된다. 이러한 정상상태 크리프 속도는 크리프 시험 온도와 응력에 의존하므로 식  $\dot{\epsilon}_{\min} = f(T, \sigma)$ 과 같이 표시되고, 동일한 온도에서 실험하였다면, 크리프 속도는 응력만의 함수로 단순화되며, 크리프에 의한 응력 의존성은 power law 식으로 ( $\dot{\epsilon}_{\min} = A\sigma^n$ ) 표시할 수 있다. 이때  $A$ 는 온도상수이고,  $n$ 은 재료 상수이다.

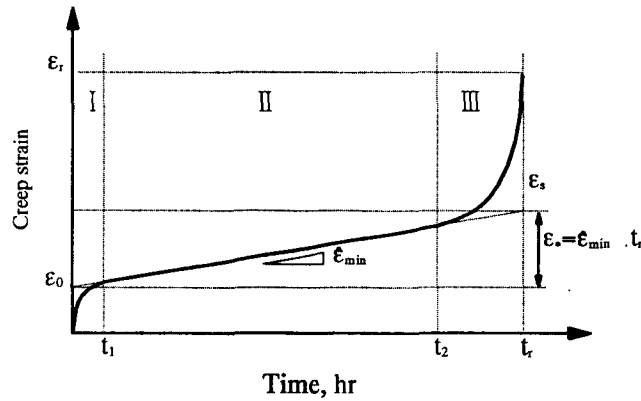


Fig. 4 Schematic presentation accounting for M-G relationship in a creep rupture curve.

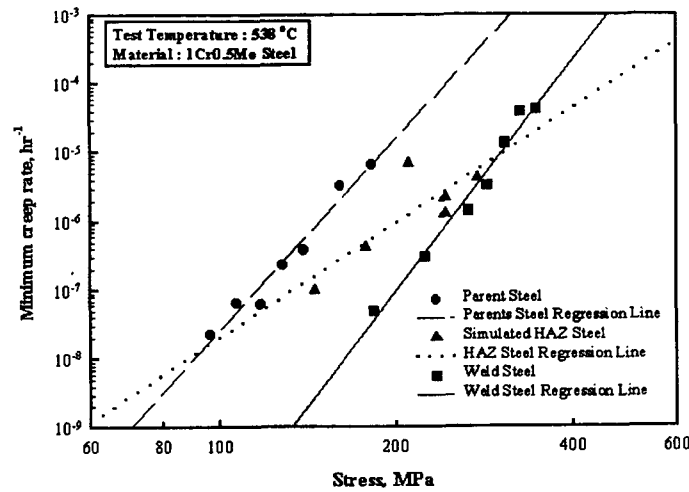


Fig.5 Determination of creep constants and stress vs minimum creep rate relation.

Fig. 5는 크리프 시험으로 측정한 시간-변위 곡선을 시간-변형률 곡선으로 변환한 후, 각 응력의 크리프 곡선에서 7점 다항식을 이용하여 최소 크리프 변형율을 계산하여 대수 좌표계에 나타낸 것이다. 이 그래프로부터 상수 A와 n을 결정하였으며 그 결과를 Table 4에 정리하였다. 이 그래프에서도 모재부의 최소 크리프 속도가 용접부 보다 높음을 알 수 있다. 그러나 열영향부의 경우 일정한 경향을 보이지 않고, 다만 용접부와 모재부 사이에 존재함을 알 수 있다. Fig. 6은 응력과 파단시간의 관계를 대수 좌표계에 나타낸 것으로 이 관계를 식으로 나타내면  $t_r \cdot \sigma^{-\kappa} = K$  식과 같다. 이때 K,  $\kappa$ 는 재료상수로서 앞의 Table 4에 정리하였다.

Table 4. Creep properties of the test material at 538°C.

Material	Creep Constant ( $\text{MPa}^{-n} \cdot \text{hr}^{-1}$ )	n	K	$\kappa$
Parent	9.99 E-27	9.21	4.91 E21	8.67
HAZ	1.79 E-19	5.52	6.69 E14	5.24
Weldment	2.07 E-33	11.15	3.11 E26	10.05

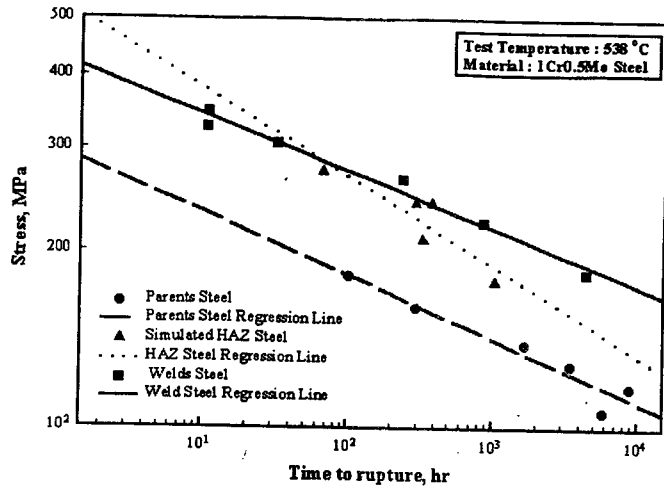


Fig. 6 Determination of creep constant and power at stress vs time to rupture plot.

M-G 관계식으로부터  $m$ 과  $C$ 값을 구함으로 모재부와 용접부 뿐만 아니라 모사 열영향부의 크리프 파단수명을 예측하는 것이 가능하다.  $\epsilon_r$ 가 크리프파단 연신을 일 때 수정된 M-G식,  $\log(t_r/\epsilon_r) + m' \log \dot{\epsilon}_{\min} = c'$  을 적용하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 7의 수정 M-G 관계로 표현된 데이터들을 사용하면 각재료의 수명평가가 가능해 진다.

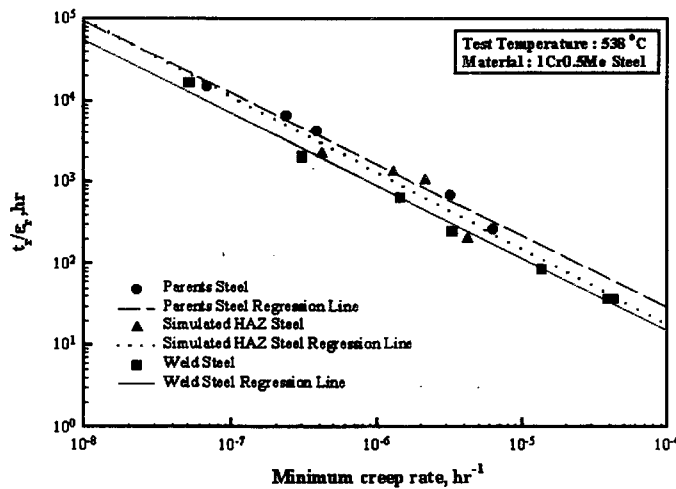


Fig.7 Determination of creep constant and power at minimum creep rate vs  $t_r/\epsilon_r$  plot.

#### 4. 결론 및 요약

180,000시간 사용된 1Cr0.5Mo 보일러 헤더용 강의 재용접부에서 크리프 수명을 예측하고자 크리프 파단시험을 수행한 결과 전체 수명은 모재부의 수명에 의존함을 알 수 있었다. 그리고 또한 실험데이터를 이용하여 수명 예측에 필요한 재료상수를 측정 제시하였다. 수정된 M-G의 수명 관계식을 적용하여  $t_r/\epsilon_r$ 과  $\dot{\epsilon}_{\min}$ 의 관계를 제시하였으며 또한 크리프 연신을 반영하는 수정된 M-G 관계식이 용접부의 수명 예측식으로 지수법칙에 비해 잘 적용될 수 있음을 보였다.