

용접부의 고온 재료물성에 대한 실험적 연구

백운봉* · 윤기봉** · 서창민*** · 이해무*
(2000년 8월 25일 접수)

An Experimental Study on High Temperature Material Properties of Welded Joint

Un Bong Baek, Kee Bong Yoon, Chang Min Suh and Hae Moo Lee

Key Words: Weld(용접부), Strength(강도), Creep(크리프), HAZ(열영향부), Rupture Life(파단수명), Residual Life Assessment(잔여수명평가), Monkman-Grant Relation(Monkman-Grant 관계식)

Abstract

High temperature material properties of a welded joint were experimentally studied. Tensile and creep properties were measured for each part of weld metal, HAZ(heat affected zone) and parent metal at 538°C. HAZ metal was obtained by a simulated heat treatment. Results showed that the order of tensile strength is weld>HAZ>parent both at 24°C and at 538°C. Creep resistance was also the highest for weld metal and lowest for parent metal. Creep rupture life curves were obtained and converted to Monkman-Grant relation which is useful for life assessment. Use of the data obtained in this study is discussed.

1. 서론

용접으로 시공된 고온 플랜트 요소가 장기적으로 사용될 때 수명을 제한하는 부위는 대개 용접 연결부의 용접재 또는 열영향부(HAZ, Heat Affected Zone) 재료이다. 즉 이 부재에서 크리프 기공 손상이 발생하여 파열되거나 HAZ등의 용접 계면에서 균열이 발생하여 성장하면서 파괴된다. 따라서 이러한 파손들에 대한 안전성 평가 또는 수명해석 등을 수행하려면 모재의 고온 재료물성 외에도 용접재나 HAZ 재료의 고온 재료물성을 알아야 한다. 용접부 파손에 대해 최근 여러 연구가 수행되고 있으나,⁽¹⁻⁷⁾ 아직까지 용접재나

HAZ 재료의 고온 물성에 대한 정보는 제한적이다. 고온 파괴역학에서도 용접 계면 균열의 크리프 균열 성장률을 특성화할 때 사용되는 C^* 나 C_c 매개변수를 계산할 때 경계면 양쪽의 재료인 용접재와 모재 모두의 고온 재료물성이 필요하다. 또한 이러한 계면균열의 유한요소 해석을 수행할 때에도 재료물성 데이터는 필요하다.⁽⁶⁾ 그러나 많은 경우 모재의 물성 데이터만 알려져 있고, 용접재나 HAZ 재료의 물성 데이터를 얻기는 용이하지 않다.

본 연구에서는 고온에서 많이 사용되는 저합금 강인 1Cr-0.5Mo강을 보수 용접시 시공하는 방법으로 용접하여 제작한 용접블록의 모재 및 용접 재료부터 인장 및 크리프 시편을 가공하였다. 또한 용접 열영향부를 모사하기 위한 열처리를 실시하여 얻은 용접 열영향부 재료로부터도 인장 및 크리프 시편을 가공하여 538°C에서 고온 재료물성을 측정하여 그 결과를 제시하고, 측정된 데이터의 응용방법에 대해 논의하였다.

* 회원, 한국표준과학연구원 산업측정표준부
E-mail : ubbaek@kriss.re.kr
TEL : (042)868-5384 FAX : (042)868-5047
** 회원, 중앙대학교 기계공학부
*** 회원, 경북대학교 기계공학부

2. 실험

2.1 실험 재료

본 연구에 사용된 재료는 고온에서 장시간 사용된 1Cr-0.5Mo강 사용재로서 그 화학성분은 Table 1과 같다. 저합금강 사용재의 용접부 각 부위에서의 고온 재료물성 평가를 위해 우선 보수 용접 할 때와 유사한 용접 절차를 사용하여 용접 블록을 제작하였다. 용접은 GTAW와 SMAW로 수동 용접하였으며 용접절차는 Table 2에 보인 바와 같다. 최저 예열온도는 165℃, 최대 패스간 온도는 315℃로 제한하였으며, 670℃까지 가열하여 2시간 유지한후 용접 후열처리를 실시하였다. 이때 가열은 250℃에서부터 110℃/hr로 가열하여 670℃에 도달하였으며 92℃/hr로 냉각하였다. SMAW 용접에 사용된 용착금속의 성분은 Table 3에 나타낸 것과 같다.

이상의 용접 절차로 1Cr-0.5Mo강 블록을 Fig. 1에 보인바와 같이 여러 부위에서 용접하여 제작하였으며, 그림에 보인 각각 용접재 부위와 모재 부위에서 인장 및 크리프 시편을 채취 가공 하였

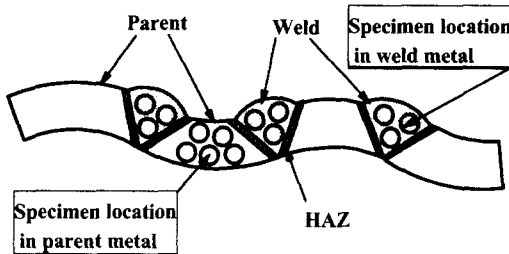


Fig. 1 Specimen sampling location in the welded test block

다. 이때, HAZ는 대략 2~3 mm 정도의 폭을 갖는 띠 형태로 형성되므로 Fig. 1에 보인 용접블록으로부터 열영향부의 인장 및 크리프 시편을 가공하기는 불가능하다. 따라서 시편가공이 용이하도록 충분한 두께를 갖는 부재가 열영향부와 유사한 조직을 가질 수 있게 하기 위하여, HAZ의 금속조직을 모사시킨 모사재를 열처리에 의해 제작하였다. HAZ를 모사하기 위해서는 모재 블록을 시편크기보다 약간 크게 절단한 다음에, 먼저 1,300℃에서 5분간만 유지시킨 후 유냉하여 HAZ 재현 열처리를 실시한 후, 응력 제거 열처리에 해당하는 열처리 공정인 720℃에서 6시간 유지하여 공냉으로 냉각하였다. 이상의 모사 열처리에 의해서는 HAZ부의 대부분을 차지하는 CGHAZ(Coarse Grain HAZ)를 얻을 수 있다.⁽⁸⁾

2.2 기계물성 측정시험

모재, 용접재, 모사 열영향부재의 3종의 재료에 대해 인장시험, 크리프 시험을 실시하고, 용접된 블록의 경도측정 시험을 실시하였다. 인장시험은 직경 6.25 mm인 시편을 가공하여, 상온 인장시험의 경우 ASTM E8 규격에 준하여 시험을 실시하였고,⁽⁹⁾ 고온 인장시험은 ASTM E21규격에 준하여 변위 제어 방식으로 시험하였다.⁽¹⁰⁾ 모재에 대해서는 상온 및 538℃에서 각각 4개씩의 인장 시험편을 사용하였으며, 용접재는 각각 2개와 4개, 그리고 모사 열영향부재에 대해서도 각각 2개와 4개의 시험편을 사용하여 상온에서 8개 및 고온에서 12개의 인장시험을 실시하였다. 인장 시험 결과인 하중-변위 기록으로부터 진응력-진변형률 관계를 구한 후, 소성변형률, ϵ_p 와 응력, σ

Table 1 Chemical composition of the 1Cr-0.5Mo 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 process specification for the tested 1Cr-0.5Mo block

Process	Filler Metal		Current/Polarity		Voltage Range (V)	Travel Speed (cm/min)
	AWS Class	Size(mm)	Type	Amp. Range		
GTAW	ER80S-B2	φ 2.4	DCSP	100-180	12-16	8-15
SMAW	E8016-B2	φ 3.2	DCRP	80-130	22-28	8-15
		φ 4.0		110-180		

Table 3 Chemical composition of filler metal (AWS E8016-B2)

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

Table 4 Tensile properties of the 1Cr-0.5Mo steel at 24°C and 538°C

Material	Test Temp. (°C)	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Young's Modulus (GPa)	D (MPa ^m)	m
Parent	24	291	477	35.6	72.8	187.97	4.481E-12	3.80
	538	214	344	32.9	78.9	127.92	2.797E-17	5.97
HAZ	24	387	573	33.1	73.3	220.36	5.393E-19	6.21
	538	323	461	28.0	75.5	147.27	1.091E-22	7.73
Weld	24	588	661	21.2	71.2	175.29	1.889E-26	8.58
	538	408	461	30.0	81.1	151.92	5.310E-46	16.29

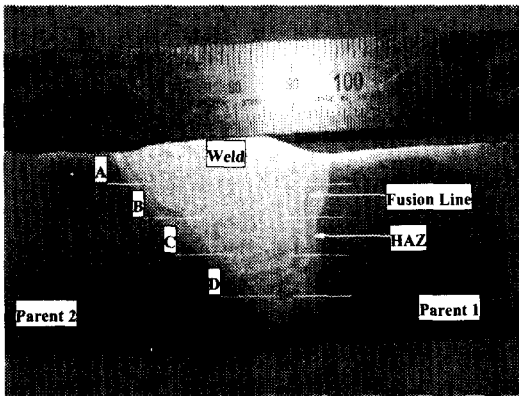


Fig. 2 Location of hardness measurement lines A~D in welded block

사이의 지수 법칙을 $\epsilon_p = D\sigma^m$ 으로 가정하여 최소자승법에 의해 재료의 소성상수 D 와 m 을 결정하고 인장 기계물성을 측정하였다.

크리프 시험은 직경 6.25 mm의 봉상 시편을 사용하여 538°C의 대기중에서 ASTM E139 규격에 따라 실시하였으며, 시간에 따른 크리프 변형율을 측정하여 연결된 컴퓨터에 데이터를 저장하였다. 정확한 시험온도의 조절을 위해 시편 중앙에 열전대를 부착하여 온도편차를 $\pm 2^\circ\text{C}$ 범위 이내로 측정하였다.⁽¹¹⁾ 모재, 용접재, 모사 열영향부재에 대해 각각 6개, 7개, 5개 씩 총 18개의 크리프 시험을 실시하였으며 크리프 시험하중은 항복응력의 45~85% 범위 내에서 결정하였다. 시험하중이 낮은 일부 시험은 파단 전에 종료하였다. 파단된 시편은 크리프 파단면 근처에서 기공 발생여부 관찰을 위해 파단된 시편의 게이지 길이 부분을 응력이 가해진 길이방향으로 절단하여 연마, 부식후 광학현미경으로 관찰하였다.

용접된 블록의 열영향부 부근의 경도측정을 위해 Fig. 2에 보는 바와 같이 용접 블록의 측단면

을 경면 연마하였다. 이 면을 0.2% 나이탈을 이용하여 부식하여 용접부, 열영향부, 모재부의 위치를 확인한 다음 마이크로 비커스 경도시험기로 1kgf 하중 조건에서 경도를 측정하였다. 측정부위는 용접 용융선과 FGAZ(fine grain heat affected zone)띠를 기준으로 좌우 5mm 까지 측정하였다. 이때 용접 깊이 방향을 등간격으로 4등분하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 A-D의 4줄에서 용접부 좌우 두 개의 선을 따라 측정하였으며, 한 측정 위치 당 3번씩 측정하여 그 평균값을 측정 위치에서의 경도값으로 취하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 인장물성 및 경도

인장시험 결과인 소성 변형률과 응력과의 관계를 상온(24°C)과 고온(538°C)의 경우 각각 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었고, 이로부터 구한 인장 물성과 소성상수를 Table 4에 요약하였다. 상온에서 강도를 비교해 보면 Table 4에서 보는 바와 같이 항복강도와 인장강도 모두 용접재 > HAZ > 모재의 순으로 측정되어 용접재의 강도가 가장 높고 모재가 가장 낮다. 또한 Fig. 3에서 같은 응력 수준에서 모재부가 소성 변형률이 가장 크게 발생하고, HAZ, 용접재 순으로 소성 변형률이 줄어들 수 있다. 이와 같이 경향은 고온 인장의 경우도 마찬가지여서 항복강도나 인장강도 모두 용접재 > HAZ > 모재의 순서로 높았다. 즉 본 연구에서 사용한 용접부의 경우 용접부의 강도는 재료강도가 제일 낮은 모재의 강도에 의존하게됨을 알 수 있다. 따라서 용접계면에 균열이 존재하는 경우^(1,12)에도 균열성장이나 최종 파단은 용접재 보다 모재의 강도에 따라 결정되므로 파괴 매개변수 계산 시 모재의 기계물성을 주로 사

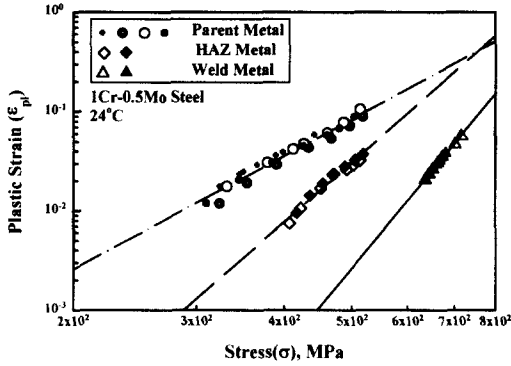


Fig. 3 Tensile test results at 24°C

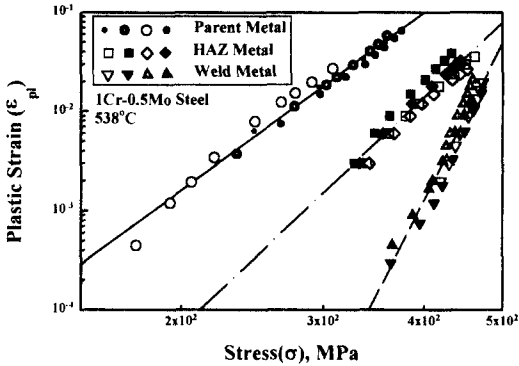


Fig. 4 Tensile test results at 538°C

용하여야 할 것이다. 상온의 경우 용접재의 항복강도는 588 MPa로 매우 높다. 이에 비해 모재부나 HAZ부는 인장강도가 477 MPa, 573 MPa로서 용접재의 항복강도 보다 낮으므로, 모재나 HAZ부가 파단 될 때까지 용접재는 탄성변형만 발생하게 된다. 이는 Fig. 3에서 응력이 550 MPa 일 때 각 부위의 소성변형률을 비교해보도 알 수 있다. 또한 상온 용접재의 파단 변형률은 21 %로 매우 작으므로, 용접부는 항복 발생 후 다른 부위 재료에 비해 가장 작은 소성변형 후 파단이 발생한다.

앞에서 설명한 각 부위 인장 물성의 차이는 경도 측정에도 의해서도 간접적으로 확인 할 수 있다. Fig. 5는 Fig. 2에 보인 A, B, C, D선을 따라 용접부 양쪽의 HAZ부를 가로질러 측정된 경도 측정 결과이다. 용접선이 방향의 위치와 상관없이 A~D선에서 거의 같은 경향의 경도변화를 나타내고 있다. 용접재의 경도는 Hv 230~240 정도로 가장 높고, 모재부의 경우는 Hv 170, HAZ부는 평균 Hv 190~200 정도의 경도를 나타내고 있다.

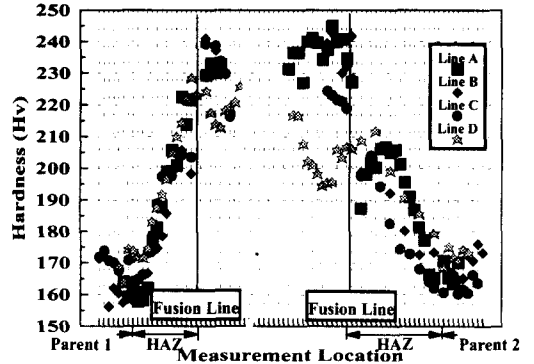


Fig. 5 Hardness measurement data across weld HAZ

따라서 상온 인장강도와 동일한 경향을 보여준다. 따라서 필요한 경우에 용접부 각 부재의 인장물성은 실제 용접부의 경도 측정값을 사용하여 근사적으로 예측 할 수 있을 것이다. 또한 Fig. 5에서 HAZ부와 모재부의 경계면에서 경도측정값이 최소가 되었다가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이 경계면 부위는 FGHAZ부의 위치로, 본 연구에서 모사 열처리해서 얻은 CGHAZ부와는 다른 조직을 갖고 있다. 즉 FGHAZ부의 인장강도는 측정되지 않았지만 경도측정결과를 보면 CGHAZ부 강도보다는 작을 것이라는 추측이 가능하다.

3.2 크리프 물성

크리프 시험결과 측정된 크리프변형률 대 시간 곡선을 모재부, HAZ부, 용접재부에 대해 각각 Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8에 대수 좌표로 나타 내었다. 정하중 크리프 시험이므로 각 그래프에 표시한 심볼에 해당하는 응력값은 초기하중 부하시의 공칭응력을 나타내는 것이며, 일정응력 크리프 시험을 나타내는 것은 아니다. Fig. 6 ~ Fig. 8의 각 크리프 곡선으로부터 2차 크리프 변형속도를 측정된 값과 파단시간 등의 크리프 물성을 Table 5~Table 7에 정리하였다. Table 5에서 시편번호 P10-85의 85는 초기응력이 항복응력의 몇 %에 해당하는지를 나타내므로, 모재(parent) P-10번 시편에 항복강도의 85%인 182 MPa의 초기 응력으로 크리프 시험한 결과를 표시하게 된다. 크리프 시험 결과를 보면 단면 감소율은 시험하중이 감소할수록 약간 증가하는 경향을 보였으나 큰 차이는 없었으며, 재질에 따라서도 모재, HAZ, 용

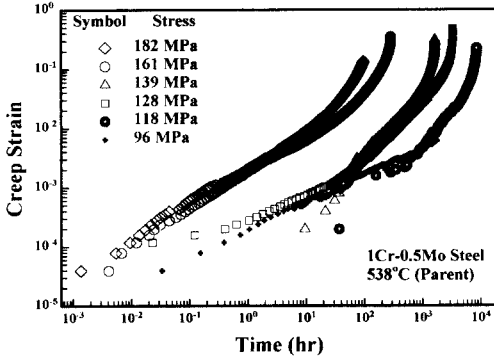


Fig. 6 Creep test results for parent metal

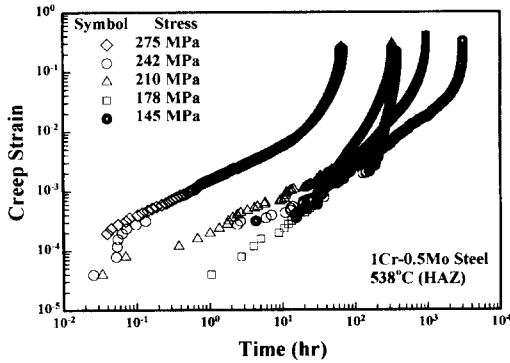


Fig. 7 Creep test results for HAZ metal

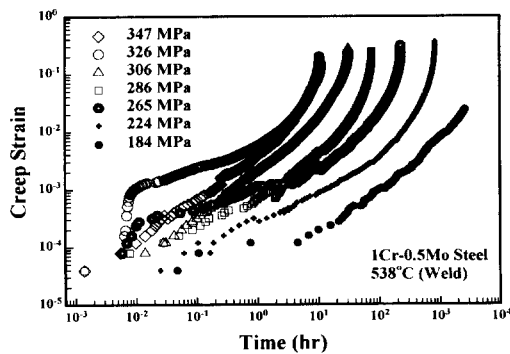


Fig. 8 Creep test results for weld metal

접재의 평균값이 각각 87%, 83%, 82%를 나타내어 큰 변화는 없었다. 최종 파단 시 변형률은 모재, HAZ, 용접재가 43%, 35%, 33%로 감소하는 경향을 보였다. 크리프 물성 중 고온요소 수명평가시 가장 중요한 것은 2차 크리프 변형속도($\dot{\epsilon}_{ss}$)와 파단시간(t_r)이다. Table 5~7의 각 부재의 응력, 2차크리프 변형속도 값을 대수좌표에 도시하여 Fig. 9에 나타내었고, 직선 회귀선을 그려

Table 5 Creep test conditions for parent metal of 1Cr-0.5Mo steel

Spec. No.	Applied Stress (MPa)	Area Reduc. (%)	Final Strain (%)	Secondary creep rate (hr^{-1})	Rupture Time (hr)
P10-85	182	84.7	38.1	6.750E-4	101.0
P 2-75	161	87.5	43.6	3.130E-4	296.6
P 3-65	139	86.9	40.3	3.852E-5	1699.0
P 9-60	128	87.3	53.3	2.498E-5	3472.0
P 4-55	118	N/A	N/A	9.548E-6	N/A
P 8-50	107	88.7	40.2	6.262E-6	5899.0
P 7-45	96	N/A	N/A	2.282E-6	N/A

Table 6 Creep test conditions for HAZ metal of 1Cr-0.5Mo steel

Spec. No.	Applied Stress (MPa)	Area Reduc. (%)	Final Strain (%)	Secondary creep rate (hr^{-1})	Rupture Time (hr)
H1-85	275	79.8	32.5	4.253E-4	66.8
H5-75	242	80.5	28.4	1.295E-4	379.2
H7-75	242	82.6	28.3	2.158E-4	291.4
H3-65	210	84.6	36.6	6.765E-4	329.2
H6-55	178	85.7	46.6	4.172E-5	1024.5
H4-45	145	N/A	N/A	9.990E-6	N/A

Table 7 Creep test conditions for weld metal of 1Cr-0.5Mo steel

Spec. No.	Applied Stress (MPa)	Area Reduc. (%)	Final Strain (%)	Secondary creep rate (hr^{-1})	Rupture Time (hr)
W15-85	347	82.4	29.5	3.248E-3	11.0
W 7-80	326	79.1	29.0	3.460E-3	10.7
W 2-75	306	80.6	37.2	1.485E-3	32.0
W11-70	286	83.9	31.1	4.057E-4	77.5
W 8-65	265	84.5	35.7	1.396E-4	233.7
W 4-55	224	83.9	42.2	2.880E-5	863.2
W 5-45	184	77.7	26.6	7.325E-6	4390.8

식 (1)의 크리프 계수 A 및 크리프 지수 n 을 결정하였다. 결정된 모재, HAZ, 용접재에 대한 A , n 값을 Table 8에 정리하였다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n \quad (1)$$

Fig. 9에서 보면 100~400 MPa 범위에서 특정 크기의 응력이 가해지는 경우에 2차 크리프 변형속도는 모재가 가장 높고 용접재가 가장 낮게 나타났다. 따라서 용접부 각 부위에서의 크리프 변형거동은 모재의 크리프 변형 기여도가 HAZ, 용접재 기여도보다 가장 높다고 볼 수 있다. 만약 HAZ계면에 균열이 존재하는 경우^(1,12)라면 이때

Table 8 Creep properties of the 1Cr- 0.5Mo steel at 538°C

Material	Creep Constant (MPa ⁿ · hr ⁻¹)	n
Parent	1.235E-24	9.18
HAZ	1.787E-17	5.52
Weld	3.358E-30	10.70

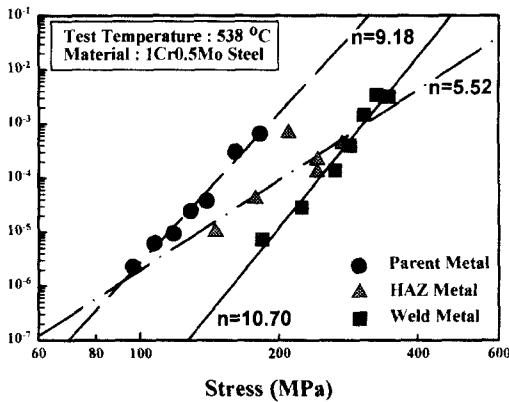


Fig. 9 Determination of secondary creep constants

고온 파괴 매개변수 값에 영향을 주는 크리프 물성은 모재의 크리프 물성이 대표성을 띤다고 볼 수 있다.

Fig. 10은 응력에 따른 파단시간 곡선을 나타낸다. 같은 응력값에 대해서 모재부가 제일 먼저 파단되며, 그 다음 HAZ가 파단되고 용접재가 가장 늦게 파단되어, 용접재의 크리프 수명이 제일 길다. 즉 Fig. 9와 Fig. 10을 종합하면 본 연구에서 고려한 1Cr-0.5Mo 용접부는 모재가 크리프 변형속도가 가장 빠르며, 크리프 파단 수명도 제일 짧다고 볼 수 있다. 용접부 각 부재의 수명예측을 위해 Monkman-Grant 관계식⁽¹³⁾을 크리프 파단 변형율($\dot{\epsilon}_f$)를 반영하여 식 (2)와 같이 수정하여 나타내면 Fig. 11에 보인 바와 같이 모재, HAZ, 용접재 데이터의 산포도가 적은 수명관계식을 얻을 수 있으므로, 이를 사용하여 실기 용접부의 크리프 파단 수명을 예측할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 모든 데이터로부터 측정된 m' 과 C' 은 각각 0.95, -0.713이다.

$$\log\left(\frac{t_r}{\dot{\epsilon}_f}\right) + m' \log \dot{\epsilon}_{ss} = C' \quad (2)$$

Fig. 12(b)는 모사 HAZ부의 금속조직과 크리프

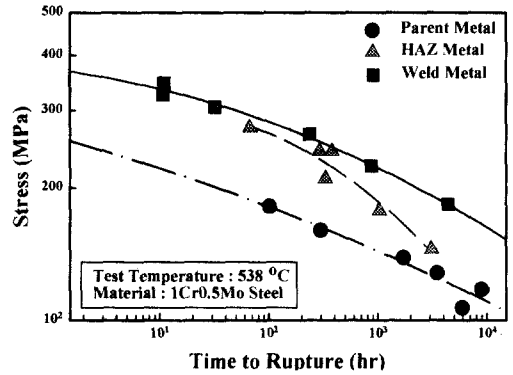


Fig. 10 Stress vs. time to rupture curves

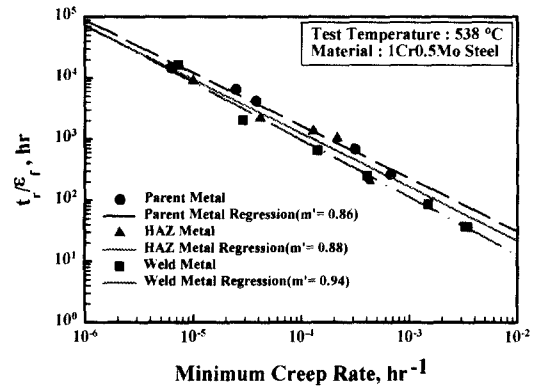


Fig. 11 Modified Monkman-Grant relations

파단면 부근의 조직 및 크리프 기공 손상을 나타낸다. 본 연구에서 채택한 용접 열영향부 모사 열처리에 의해 Fig. 12(b)에 보인 바와 같이 CGHAZ부와 유사한 조직이 얻어졌음을 알 수 있다. 또한 파단면 부근에 많은 크리프 기공이 형성되었음을 관찰할 수 있다. Fig. 12(c)는 용접재의 금속 조직과 파단면을 나타내고 있으나, 크리프 기공은 관찰되지 않아서, 용접재의 크리프 파단수명이 제일 길게 나타난 Fig. 10의 결과와 일치하고 있다. Fig. 12(a)는 모재의 금속 조직과 파단면 부근 손상을 보여주고 있다. 많은 크리프 기공이 관찰되어 파단면 부근에 크리프 손상이 발생되어있음을 볼 수 있으므로, 파단수명이 짧게 관찰된 이전 결과를 뒷받침 해주고 있다.

4. 결론

1Cr-0.5Mo강으로 제작한 용접블록의 모재와 용

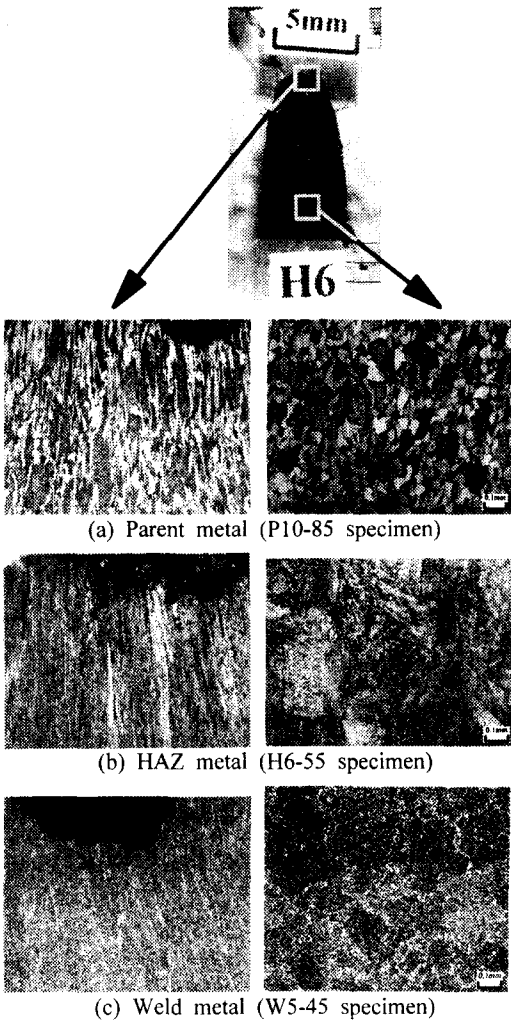


Fig. 12 Microstructure and creep damage of creep test specimens

접재 및 모사열처리로 얻은 용접 열영향부 재료로부터 인장 및 크리프 시편을 채취하여 538°C에서 시험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장강도는 상온과 고온에서 모두 용접재 >HAZ>모재의 순서로 높았으므로 용접부의 파손강도는 모재의 강도에 의존한다. 용접부 각 부위의 경도측정결과도 동일하다.

(2) 고온 크리프변형에 대한 저항성은 용접재 >HAZ>모재의 순서로 높았다. 따라서, 용접부의 크리프 강도는 모재의 크리프 강도에 따라 결정된다.

(3) 동일 응력 조건에서의 크리프 파단수명은 용접재 >HAZ>모재의 순서대로 길다. 따라서 용접부의 크리프 파단수명도 모재 특성에 따라 결정된다. 금속조직 관찰에 의한 기공발생 결과도 이를 뒷받침한다.

(4) 용접 열영향부 계면에 균열이 존재하는 경우 파괴 매개변수 계산에 사용되는 인장 또는 크리프 상수는 가장 약한 인장강도 또는 크리프 강도를 갖는 모재의 상수를 주로 사용하여야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 2000년도 출연 연구과제, 2000년도 두뇌한국 21사업 및 한국과학기술단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 윤기봉, 김광용, 백운봉, 1998, "저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2153~2162.
- (2) 윤기봉, 심현우, 신영의, 1998, "고온크리프 조건에서 용접계면 균열의 C, 매개변수에 대한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2239~2246.
- (3) Saxena, A., Cretegnny, L., Grover, P.S. and Norris, R.H., 1998, "Modeling of Fracture and Crack Growth in Weld Operating at High Temperature," *Proceedings of Int. HIDA Conference, Paris, France 15-17 April.*
- (4) Norris, R. H., 1994, "Creep Crack Growth Behavior in weld Metal/Base Metal/Fusion Zone Regions in Chromium Molybdenum Steels," Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology.
- (5) Grover, P. S., 1996, "Creep-Fatigue Crack Growth in Cr-Mo-V Base Metal and Weldment," Ph. D Thesis, Georgia Institute of Technology.
- (6) Kim, Y. J. and Lee, H., 2000, "Decomposition of Interfacial Crack Driving Forces in Dissimilar Joints," *KSME International Journal* Vol. 14, No. 1, pp. 30~38.

- (7) 이형일, 한태수, 정재현, 2000, "결합 해석에 기초한 배관 용접부 수명평가", 대한기계학회논문집 A권 제24권 제5호, pp. 1331~1342.
- (8) Shamms M. S., 1998, Metallographic Methods for Predicting the Remanent Life of Ferritic Coarse-Grained Weld Heat Affected Zones Subject to Creep Cavitation," *Int. Conf. on Life Assessment and Extension*, Hauge, Netherlands.
- (9) ASTM, 1998, Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials., ASTM E8-98.
- (10) ASTM, 1998, Standard Test Method for Elevated Temperature Tension Testing of Metallic Materials., ASTM E21-92.
- (11) ASTM, 1998, Standard Test Method for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Test of Metallic Materials., ASTM E139-96.
- (12) 백운봉, 윤기봉, 이해무, 서창민, 2000, "CrMo강 용접계면균열의 크리프-피로 균열성장 거동," 대한기계학회 논문집 A권 제24권, 12호, pp. 3088~3095.
- (13) Dobe, F. and Milicka, K., 1976, "The Relation Between Minimum Creep Rate and Time to Fracture," *Metal Science*, Vol. 10, pp. 382~384.
- (14) 김우곤, 김대환, 류우석, 2000, "316L(N) 스테인리스강의 Monkman-Grant 크리프 수명식의 적용성, 대한기계학회논문집 A권 제24권 제9호, pp. 2326~2333.