

석탄화력발전소 보일러 배관용 Cr-W계 강 용접부의 크리프 파단특성

The creep rupture properties on welded joints of Cr-W pipe steels
for boiler in advanced thermal power plant

이 연수, 유 석현, 공병욱, 이경운, 김 정태
두산중공업㈜

1. 서 론

고효율, 대용량의 친환경적이며 경제적인 발전소 건설을 위해 초초임계압(USC: Ultra Super Critical) 석탄화력발전소의 건설이 세계적인 추세이다. 이러한 USC발전소는 효율향상을 위해 증기온도와 압력의 상승, 경제적 운용을 위해 부하 변동운전 적용확대가 필수적이다. 이때 보일러 고온고압부에서는 기존의 재료에 비해 고온강도와 내산화성과 같은 고온물성의 향상이 요구되고, 가혹한 운전조건에 견딜 수 있는 신재료의 적용이 불가피하다.

따라서 기존 초임계압 석탄화력 보일러의 고온 고압부에 주로 사용되던 2.25Cr-1Mo강, Mod.9Cr-1Mo강, 12Cr-1Mo계강(X20CrMoV12.1)을 대체할 신재료로, 수벽관의 경우 2.25Cr-1.6W강(P23), 주증기관과 고온재열증기관은 12Cr-2W강(P122), 9Cr-2W강(P92) 등의 Cr-W계 강이 검토되고 있다.

이들 페라이트계 Cr-W계 신재료들은 기존의 재료에 비해 고용강화효과와 탄화물의 열적안정성 향상을 위해 W이 첨가되었고, 인성향상과 석출강화효과를 높이기 위하여 B과 Cu등을 첨가해 고온크리프 파단강도를 개선하였다. 현재 일본과 유럽의 상용 초초임계압 보일러에 이들 신재료가 사용중에 있으며, 국내에서도 최근 건설중인 화력발전소에 일부 채택되어 사용되고 있다.

하지만 이러한 신재료들은 모재부에 대해서는 Mill Maker를 중심으로 많은 특성 시험과 연구가 진행되었고 물성 DB도 구축되었지만, 보일러의 수명을 결정짓는 용접부의 물성변화에 대해서는 이용 가능한 자료가 많지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서는 초초임계압 보일러의 수벽관, 주증기관 및 재열증기관등 고온고압부의 후육부에 적용되는 Cr-W계 배관용 신재료(P23,P92, P122)의 용접부와 모재부의 크리프 파단강도를 비교하고, 크리프 후 미세조직과 경도의 변화를

관찰하였다.

2. 실험 방법

연구에 사용한 P23,P92,P122 파이프 재료의 모재 및 용가제의 화학성분을 Table1에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of base metal and matching welding consumables

	P23 ¹⁾		P92 ¹⁾		P122 ²⁾	
	Base	Filler	Base	Filler	Base	Filler
C	0.07	0.067	0.10	0.11	0.13	0.08
Si	0.28	0.22	0.22	0.22	0.31	0.33
Mn	0.43	0.44	0.48	0.54	0.59	0.79
P	0.009	0.014	0.017	0.014	0.02	0.010
S	0.003	0.003	0.006	0.005	-	0.004
Cr	2.2	0.15	9.11	8.50	10.6	10.0
Mo	0.2	2.3	0.47	0.50	0.33	0.19
Ni	-	0.11	0.18	0.59	0.34	0.94
W	1.58	1.5	1.71	1.45	1.79	1.44
Cu	-	0.05	-	0.06	0.96	1.50
V	0.28	0.25	0.18	0.20	0.21	0.16
Nb	0.05	0.05	0.06	0.02	0.06	0.02
N³⁾	80	380	410	410	600	390
B³⁾	53	15	30	20	20	20
Size (mm)	OD: 457.2 WT: 50		OD: 304 WT: 62		OD: 395 WT: 50	

1) and 2) are supplied by V & M Tubes (Germany) and Sumitomo Metal Industries, Ltd.(Japan), respectively. 3) ppm

강관에 적용된 용접방법으로 초층(Root Pass)과 2,3층은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), 나머지 층은 SMAW(Shield Metal Arc Welding)용접법을 적용하였다.

용접후열처리를 실시한 P23, P92, P122강의 모재부와 Cross weld에 대해 각각 상온과 600°C에서 인장시험을 실시하였다. 또한 일정하중 크리프시험기를 사용하여 600°C, 650°C의 시험온도와 100~200MPa의 응력범위에서 일정하중방법으로 크리

프 파단시험을 실시하였다. 크리프 파단후 파단재의 미세조직을 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하여 관찰하였고 경도변화를 조사하였다.

3. 실험 결과

3.1 미세 조직

Fig.1 은 각각 P23, P92, P122의 용접부 단면형상을 나타낸 것으로, 용접열영향부는 약 3mm 정도의 폭으로 형성되어 있다.

P23의 모재와 용접금속은 템퍼드 베이나이트 조직이다. P92, P122의 모재는 약 1% 정도의 델타페라이트를 함유한 템퍼드 마르텐사이트조직이고, 용접금속은 100% 템퍼드 마르텐사이트조직이다.

모재부의 구오스테나이트 결정입 크기는 P23, P92, P122 각각 평균 50, 60, 85 μ m이며, 용접금속은 72 μ m 정도이다.

3.2 인장 강도

용접부의 인장강도가 강종에 관계없이 상온과 600°C에서 모재나 Cross Weld부에 비해 높으며, P122의 인장강도가 P92와 P23에 비해 높다. 용접금속의 인장강도는 모재부에 비해 C, W과 Cr의 첨가량은 작지만, 용접후열처리 온도가 모재의 템퍼링온도에 비해 낮기 때문에 더 높은 인장강도를 가지게 된다.

Cross Weld부의 인장강도는 강도가 높은 용접금속의 구속효과로 인해 모재와 거의 동등한 강도를 가진다. 그러나 P122는 600°C에서 모재 대비 약 70%의 인장강도를 보인다. 연신율은 용접금속 때문에 3 강종에서 모두 모재에 비해 낮은 값을 가진다.

3.3 크리프 강도

Fig.2는 크리프 파단강도를 나타낸 것이다.

600°C에서 P23과 P92는 모재부와 Cross Weld부의 인장강도가 비슷하지만, 크리프 파단강도는 강종과 시험온도와 무관하게 모재부가 Cross Weld보다 높다.

강종별 크리프 파단강도를 비교하면 현 시험 범위에서는 모재부와 Cross Weld부 모두 P122가 P92와 P23보다 약 6배 이상 높은 강도를 보인다.

Cross Weld부의 모재 강도 대비 크리프 파단

강도 감소율은 P23이 가장 크다. 1000시간 이내의 단시간측 파단재에서 Cross Weld부의 강도 감소율은 약 30%~35%정도 발생하지만, 1000시간 이상의 경우 15% 이내로 줄어 든다.

P23은 Cr함량이 2.25%만 포함되어 있기 때문에, 9% Cr의 P92나 12% Cr의 P122에 비해 650°C의 시험온도에서 표면 산화가 심하게 발생하였다. 따라서 장시간 시험에서 산화층의 생성과 탈락에 의한 두께 감축으로 실제 Gage의 단면감소가 발생하였다. Gage 단면적 감소에 따른 유효작용 응력의 증가로 P92나 P122에 비해 크리프 파단 강도가 저하되었다.

크리프 파단시험후 파단 형상은, 모재부의 경우 강종과 시험온도(600, 650°C)에 관계없이 Cup & Cone형태의 연성파단형상을 나타낸다.

Cross Weld부에서 P23과 P92는 600°C에서 크리프 파단된 경우 연성파괴형태를 보인다. 그러나 650°C의 시험온도에서는 단면수축이 거의 없는 취성파괴 형태를 보이고 있다. P122는 시험온도와 무관하게 모두 취성파괴 양상을 보인다.

Fig.3에서 Cross Weld부의 파단 위치를 살펴보면, 600°C에서는 모두 모재부에서 파단되었다. 하지만 650°C의 파단 위치는 주로 Type IV 영역인 FGHAZ(Fine Grained HAZ)와 ICHAZ(Intercritical HAZ)에서 일어나지만, 180MPa 시험응력에서 P23의 파단은 CGHAZ(Coarse Grained HAZ)에서 발생하였다.

파면 관찰 결과 600°C 크리프 파단시험한 경우, 모재부와 Cross Weld부 모두 전형적인 dimple형태를 보이는데 반해, 650°C에서 Cross Weld부의 파면은 일부 입계 파괴의 양상이 관찰된다.

Fig.4는 크리프 파단후 파단재gage부의 종단면을 광학현미경으로 관찰한 미세조직사진이다.

P23, P92, P122의 파단면 부근에 Cavity의 생성을 확인할 수 있다.

연성파단된 모재부나 Cross Weld의 파단면에 생성된 Cavity는 결정입의 크리프 변형에 따라 결정입계에서 길이방향으로 변형되어 있다.

취성파괴가 일어난 파단재 역시 Cavity가 생성되었지만, 대부분의 Cavity가 응력축에 수직하는 구오스테나이트 결정입계에 생성된다. 그리고 응력 방향에 수직방향으로 Cavity의 성장과 합체가 일어나 결정입계 Crack으로 진전된 것이 관찰

되며, 이것이 단면수축없이 취성파단을 일으키는 원인으로 보여진다.

Fig.5 는 600°C, 200MPa의 조건으로 크리프 시험 후 Cross Weld부 파단재의 종단면 경도변화를 측정 한 것이다.

P92와 P23은 HAZ에 인접한 모재부, 그리고 P122는 HAZ에서 떨어진 모재부에서 파단이 일어난 것을 알 수 있다.

P92와 P122의 파단재의 경도는 신재 대비 약 10%정도 경도감소가 발생하였다.

4. 결 론

화력발전소 보일러 고온고압부 배관용으로 사용하는 페라이트계 Cr-W강 용접부의 크리프 파단특성에 대한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 인장강도는 용접금속이 가장 높고, Cross Weld부와 모재부는 거의 동등하다.
- 2) 단시간측 시험범위의 크리프 파단강도는 12% Cr을 함유한 P122강이 P92나 P23에 비해 시험범위에서 6배정도 높다.
- 3) Cross Weld부의 크리프 파단강도는 현 시험 범위에서 모재 크리프 파단강도의 약 85% 수준이다.
- 4) Cross Weld부에서 파괴양상은 600°C까지는 연성파괴에서, 650°C에서는 단면수축이 없는 취성파괴의 양상으로 변한다.
- 5) 650°C, Cross Weld 파단 부위는 주로 Type IV 영역인 FGHZ와 ICHAZ에 위치한다.
- 6) 취성파괴가 일어난 파단면에서 생성된 Cavity는 응력축에 수직하는 구오스테나이트 결정입계에서 생성되며, 응력축에 수직방향으로 성장, 합체 되어 Crack으로 진전된다.

참고문헌

1. B. F. Dyson and M. McLean : Microstructural stability of creep resistant alloys for high temperature plant application, The Institute of Material, (1998), 371-393.
2. C. J. Middleton and J. M. Brear and R. Viswanathan : Advanced in materials technology for fossil power plants, Proceedings of 3rd conf, Advanced in materials technology for fossile power plants, Univ of Wales Swansea, (2001), 69-78

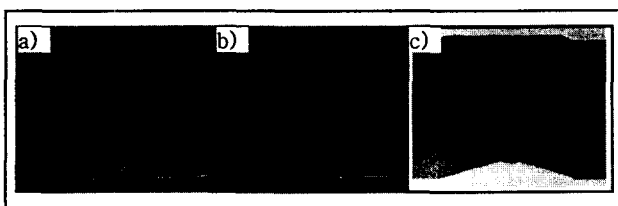


Fig.1 Macrostructure of SMAW welded joint in a) P92, b) P122 and c) P23 pipe steels

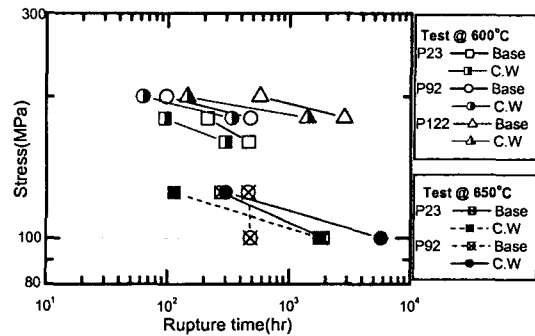


Fig.2 The comparison of creep rupture strength between P23, P92 and P122 pipe steels

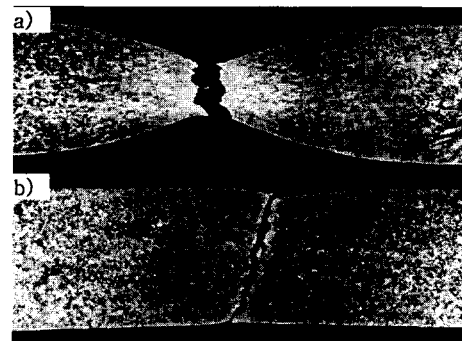


Fig.3 The fracture appearance of welded joint after creep rupture in P92 pipe steels. a) at 600°C, 200MPa, b) at 650°C, 125MPa

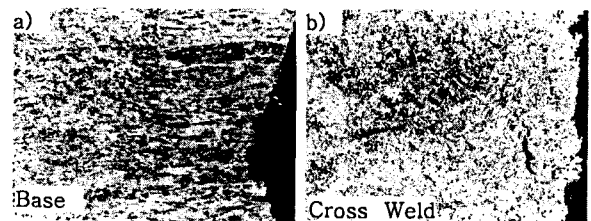


Fig.4 Change in microstructure after crept in P92 a) at 600°C, 200MPa, b) at 650°C, 125MPa

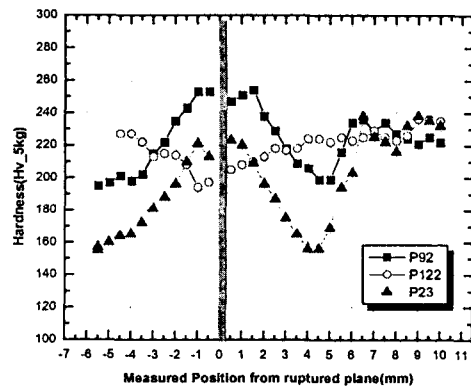


Fig.5 The hardness profile after creep Rupture test at 600°C and 200MPa.