

9~12Cr-2W 강관 재료의 용접부 기계적성질

A Study on the Mechanical Properties of Welded Joints in 9~12Cr-2W Pipe Steels

* 이경운, 유석현, 지병하, 이연수, 공병욱
두산중공업(주) 기술연구원, 경남, 창원

1. 서론

화력발전소 보일러와 터빈의 고온, 고압부에는 과거 수 십년 동안 2.25Cr-1Mo 계 (ASTM T/P22, DIN 10CrMo9.10), 혹은 12Cr-1Mo 계 (DIN X20CrMo12.1, EM12 등) 구조용 내열강이 사용되어 왔다. 1980년대 후반부터는 기존 재료를 대체하여 Mod.9Cr-1Mo 강 (ASTM T/P91, DIN X10CrMoVNb9.1) 이 파이프, 튜브, 플레이트, 주강품 등의 광범위한 분야에 적용되기 시작하였다. 그러나 고효율, 저공해 차세대 석탄화력발전소로 주목 받고 있는 초초임계압(Ultra Super-Critical) 석탄화력발전소의 고온, 고압부에는 Mod.9Cr-1Mo 강 보다 더 높은 크리프 파단강도를 갖는 재료가 요구됨에 따라, 9Cr-2W (이후부터 P92로 명명함), 12Cr-2W (이후부터 P122로 명명함) 신재료가 개발되었다.

P92, P122 파이프 및 튜브 재료는 기존의 9~12Cr-Mo 계 강의 사용 한계 온도를 초과하는, 600°C 이상의 발전용 보일러 및 터빈에 적용할 수 있으며, 600°C 크리프 파단강도를 높이기 위하여 Cr, W, Mo, V, Nb, Cu, B, N 등의 합금원소가 포함되어 있다. 이 재료의 크리프 파단강도, 피로강도, 고온 장시간 미세조직 안정성 등에 대한 모재 분야 연구는 광범위하게 진행되었지만, 보일러나 터빈 제작에 필수적인 용접부에 대한 연구는 이제 시작단계에 있다. 특히 크리프 파단강도를 높이기 위해 첨가한 강력한 석출물 형성 원소들이 대부분 용접부 인성에 악 영향을 미치기 때문에, 실기 적용을 위해서는 용접금속 조성, 용접후열처리, 용접방법에 따른 용접부 특성 평가가 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 P92, P122 신재료의 용접부에서 나타나는 현상을 이해하고, 초초임계압 화력발전소에 적용할 수 있는 최적용접공정을 확립하기 위하여, 파이프 재료, 용접방법, 용접후열처리 조건에 따른 용접부 기계적성질, 미세조직 등을 조사/분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 보일러 주증기관 혹은 헤더 재료로 사용되는 대구경 후육 파이프 재료의 화학 성분은 Table 1, 시험 소재의 치수 및 모재 특성은 Table 2 와 같다.

용접방법은 P92에서는 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding) + SMAW(Shielded Metal Arc Welding) 와 GTAW+SAW(Submerged Arc Welding) 두 가지가 적용되었으며, P122에서는 GTAW+SMAW 방법이 적용되었다. 용접후열처리는 용접부의 최적 기계적성질을 규명하기 위하여 750°C x 2hrs, 5hrs 및 760°C x 5hrs 의 3 가지 조건으로 실시하였다.

인장시험은 용접금속 및 Cross Weld 에 대해 상온과 600°C 에서 실시하였으며, 샤-피 충격 시험은 Cross Weld 부에서 채취한 시편의 모재, HAZ, 용접금속에 대하여 각 6 회 실시하였다. 용접부에 대한 굽힘(Side Bending) 시험편은 파이프 벽 두께 방향으로 전체 용접단면을 포함하여 Cross Weld 부에서 채취하였다.

3. 실험결과

3-1. 미세조직

P92, P122 모재는 템퍼더 마르텐사이트 기지내에 1% 이하의 델타-페라이트 조직이 관찰되며, 구오스테나이트 결정입자 크기는 각각 평균 60µm, 85µm 이다. P92, P122 의 SMAW 용접금속은 모두 100% 템퍼더 마르텐사이트 조직이며, 구오스테나이트 결정입자는 두 재료에서 평균 72µm 정도로서 비슷한 크기를 보인다.

3-2. 인장강도

Fig.1 은 PWHT 조건에 따른 용접금속 및 Cross Weld 부의 인장강도를 보인다. Cross Weld 부 인장 파단 부위는 모두 모재에 위치한다.

PWHT 조건에 상관없이 P92, P122 재료의 용접금속 인장강도는 Cross Weld 부에 비해 높으며, P122 는 P92 에 비해 인장강도가 높다. PWHT 를 거친 후의 Cross Weld 모재 인장강도가 Mill

Maker 의 공급상태 모재 인장강도(Table 2) 보다 높은 것은, 모재보다 경도가 높은 용접금속, HAZ 등의 구속효과에 의해 나타나는 것으로 보인다.

Table 1. Chemical compositions of base metals and welding consumables for P92 and P122 pipe steels.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	W	Cu	V	Nb	B	N	Remark	
P92 ¹⁾	0.10	0.22	0.48	0.017	0.006	0.18	9.11	0.47	1.71	-	0.18	0.056	0.003	0.041	3)	
P122 ²⁾	0.13	0.31	0.59	0.020	-	0.34	10.57	0.33	1.79	0.96	0.21	0.060	0.002	0.060	3)	
P92	GTAW	0.10	0.36	0.44	0.012	0.005	0.72	8.89	0.41	1.75	-	0.23	0.069	-	0.052	
	SMAW	0.09	0.22	0.62	0.011	0.003	0.60	8.80	0.51	1.54	-	0.20	0.035	-	0.037	4)
		0.11	0.22	0.54	0.014	0.005	0.59	8.50	0.50	1.45	0.06	0.20	0.02	0.002	0.041	5)
	SAW	0.10	0.35	0.44	0.012	0.002	0.50	8.56	0.37	1.53	0.05	0.17	0.050	-	0.045	4)
		0.09	0.30	0.52	0.009	0.001	0.48	8.59	0.39	1.61	0.05	0.15	0.038	-	0.046	5)
P122	GTAW	0.07	0.32	0.48	0.006	0.003	1.12	10.54	0.34	1.48	1.48	0.21	0.05	-	0.040	
	SMAW	0.08	0.28	0.89	0.008	0.002	0.94	10.05	0.20	1.39	1.44	0.19	0.04	-	0.050	4)
		0.08	0.33	0.79	0.010	0.004	0.94	10.01	0.19	1.44	1.50	0.16	0.02	0.002	0.039	5)
		0.08	0.25	0.84	0.004	0.001	0.80	10.55	0.21	1.41	1.37	0.18	0.03	-	0.054	6)
	SAW	0.08	0.37	0.93	0.005	0.002	0.93	10.91	0.22	1.93	0.02	0.23	0.033	-	0.055	7)
		0.11	0.19	1.18	0.023	0.004	1.20	10.69	0.11	1.83	0.46	0.21	0.04	0.020	0.025	5)

1) and 2) are supplied by V&M Tubes Co. (Germany) and Sumitomo Metal Industries, Ltd. (Japan), respectively. 3) Ladle Analysis. 4) Mill sheets. 5) Chemical composition of deposited metal at this study. 6) and 7) are quoted from the test reports of Sumikin Welding Industries, Ltd. and Kobe Steel, Ltd. [1] [2].

Table 2. The material properties for base metals of P92 and P122 pipe steels.

Steel	Dimension (mm)	Heat treatment ¹⁾	Mechanical Properties			
			TS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	HRB
P92	OD 395 x WT 50	N : 1050°C x 1hr, AC T : 760°C x 3hr, AC	674	506	23.6	-
P122	OD304 x WT 62	N : 1050°C x 0.5hrs, AC T : 770°C x 6hr, AC	758	591	24	221

1) N : Normalizing, T: Tempering, AC : Air cooling from austenitizing temperature.

Mill Maker 에서 실시한 모재의 최종 템퍼링 조건이 본 연구의 PWHT 조건보다 같거나 높기 때문에, Cross Weld 부 인장강도 값이 PWHT 조건에 따라 크게 변하지 않는다. 반면 용접금속은 P92 에서 750°C x 5hrs, P122 의 경우에는 760°C x 5hrs PWHT 후에 상당한 인장강도 저하 현상이 나타났다.

본 연구에서 나타난 All Weld 부의 인장강도와 타 연구결과를 비교하면 다음과 같다. 별표(*)로 표시된 Sumikin 사의 P122 SMAW 인장강도는 740°C x 5hrs (T.P=20,968) PWHT 후에 838 MPa, 842 MPa 로서, 동일한 T.P 에서 본 연구결과 보다 낮은 값을 보인다. 점선으로 표시된 Kobe Steel 사의 P122 SMAW 인장강도는 760°C x 5hrs(T.P=21,382) PWHT 조건에서는 오히려 본 연구결과 보다 높은 값을 보인다. 독일 V&M Tube 사의 P92 에 대한 SMAW 용접금속 인장강도는 760°C x 4hrs (T.P=21,282)의 PWHT 후에 760 MPa 이며 [3], 이 값은 본 연구결과와 유사하다.

3-3. 충격에너지

Fig.2 는 BM, HAZ, WM 에서 측정된 샤-피 충격에너지를 보인다. P92-SMAW 용접금속의 충격에너지는 모든 PWHT 조건에서 P92-SAW 및 P122-SMAW 용접금속의 충격에너지 보다 높고, 750°C x 5hrs PWHT 후에는 평균 57.9 J/cm² 의 비교적 높은 값을 보인다. P122-SMAW 공정에서는 Tempering Parameter 가 증가함에 따라 충격에너지 값이 거의 직선적으로 증가하는 모습을 보인다. SMAW 용접금속 충격에너지는 P122 가 P92 보다 낮다. SAW 공정은 재료 및 PWHT 조건에 상관없이 가장 낮은 충격에너지를 보인다. 이것은 SAW 공정의 용접 입열량이 SMAW 보다 높고, 또한 SAW Flux 를 통해 용접금속에 유입되는 산소효과 등에 의해 기인되는 것으로 알려져 있다. P92-SAW 용접금속의 충격에너지는 750°C x 2hrs 의 PWHT 후 평균 12.3 J/cm² 로 가장 낮은 값을 보이지만, 동일온도에서 5 시간 PWHT 하면 충격에너지는 평균 33.8 J/cm² 로 높아져서 보일러 적용에 문제가 없을 정도로 회복된다.

용접열영향부 충격에너지는 P92-SAW 를 제외하고는 750°C x 2hrs 의 PWHT 에서 모재 수준으로 회복된다. 750°C x 5hrs PWHT 후에는 P92, P122 재료의 용접열영향부 충격에너지는 용접방법에 상관없이 모두 모재 수준으로 회복되었다.

Fig.3 은 기존 연구결과와 비교한 본 연구 용접금속의 충격에너지 결과를 보인다. Sumikin 사의

결과는 740°C x 2hrs 부터 충격에너지가 큰 쪽으로 회복되는 것을 보이며 [1], 본 연구결과와 비교하여 상당히 높은 충격에너지를 보인다. Kobe Steels 사의 결과는[2] 본 연구결과와 거의 일치하며, 높은 T.P 값에서 충격에너지 산포가 심하게 나타난다. 용접금속의 화학성분이 비슷한 상태에서, Sumikin 사의 결과와 본 연구결과가 서로 큰 차이를 보이는 것은 용접공정 상의 차이로 판단된다.

3-4. 용접부 경도 및 굽힘특성

용접부 경도는 하중 5kg 하에서 비커스 경도 시험기로 측정하였다. P92, P122 파이프 용접부의 외경 표면 직하 2mm 위치에서 Cross Weld 에 대한 경도 측정결과는 Fig.4 와 같다. 재료, 용접법에 상관없이 PWHT 후 Cross Weld 부 경도는, 용융선 인접부의 HAZ 에서 가장 높은 값을 보이고, 모재와 경계를 이루는 HAZ 쪽에서 모재 경도보다 낮은 경도 값을 보이는 연화역(Softened Zone)이 생성되어 있다.

750°C x 2hrs PWHT 후, P92 의 HAZ 최고 경도는 SAW 는 297 Hv, SMAW 는 279 Hv 로써 SAW 쪽이 더 높고, 용접금속 역시 SAW 쪽 경도 값이 높다. 동일 온도에서 PWHT 시간이 5hrs 로 증가하면 용접금속과 HAZ 경도는 낮아진다. 750°C x 5hrs PWHT 후, P92 의 SAW 용접금속은 272 Hv 에서 213 Hv 로 약 15% 낮아지며, SMAW 용접금속은 257 Hv 에서 229 Hv 로 평균 11% 낮아진다. P92 SMAW 연화역 경도 역시 185 Hv 까지 낮아진다. 연화역에서 지나친 경도 저하는 용접부의 장시간 크리프 파단강도, 저주기 피로강도 등에 영향을 미칠 수 있기 때문에 최저경도에 대한 기준이 필요하다.

P122 재료에서는 HAZ 최고 경도와 용접금속 평균 경도가 P92 재료 보다 높다. 즉, 750°C x 2hrs PWHT 후에 HAZ 최고 경도는 314 Hv, 용접금속은 289 Hv 이다. PWHT 조건이 750°C x 5hrs, 760°C x 5hrs 로 높아지면 용접금속 경도는 각각 257 Hv, 232 Hv 로 낮아져서 P92 재료의 750°C x 5hrs PWHT 조건과 비슷한 경도 값을 보인다.

Fig.5 는 본 연구결과를 기존의 시험결과와 비교한 것으로써, PWHT 조건에 따른 P122 SMAW 용접금속의 경도변화를 보인다. Sumikin 사의 경도 값은[1] 산포 정도가 작는데 비해 본 연구에서는 용접부 경도 산포가 크고, T.P=21,382 (760°C x 5hrs)에서는 경도 값이 전체적으로 낮은 값을 보인다.

본 연구에서 용접부의 건전성을 평가하는 기준의 하나로 굽힘시험을 실시하였다. 굽힘 시험편 (Side Bending)은 시편길이 방향과 파이프 길이 방향이 평행하며, Root Pass 의 내경부터 파이프 외경까지 전체 용접단면이 굽힘변형을 받도록 시험하였다.

굽힘시험 결과, 750°C x 2hrs PWHT 조건에서는 용접금속에서 허용범위를 초과하는 균열이 모두 발생하였으며, 750°C x 5hrs 로 PWHT 조건이 높아지면 P92 재료는 용접방법에 상관없이 굽힘시험을 통과하였다. P122 에서는 PWHT 조건이 760°C x 5hrs 에서 굽힘시험 기준을 만족하였다.

4. 고 찰

4-1. 용접금속 인성에 미치는 용가재 조성의 영향

P92, P122 의 모재는 Cr, W, Mo 등의 강력한 석출물 형성원소가 첨가되어 있기 때문에 2.25Cr-1Mo 계(P22) 저합금강에 비해 인성이 낮다. 따라서 고인성을 필요로 하는 보일러용 대경 후속 파이프에서는 760°C 이상의 고온 템퍼링을 실시하며, 이때 모재의 상온 충격에너지는 약 80~180 J/cm² 정도의 비교적 높은 값에 도달한다. P92, P122 재료의 용접열영향부는 언템퍼더 마르텐사이트 조직에서 PWHT 후 인성이 높은 템퍼더 마르텐사이트 조직으로 바뀌면서 모재에 근접하는 충격에너지 값을 보이기 때문에, 굽힘시험에서 인성부족으로 문제가 되는 부분은 주로 용접부에 한정된다. 특히 P122 재료는 P92 에 비해 Cr 함량이 더 높고, 인성에 유해한 Cu 원소가 약 1% 정도 추가로 포함되어 있기 때문에 용접금속은 P92 보다 취약하게 된다.

P92, P122 재료의 용접금속의 인성을 높이기 위해, 용가재 조성은 모재에 비해 Ni, Mn 함량은 높이고, W, Nb, B 함량은 낮춘다. 그러나 Ni, Mn 함량 증가에 따라 내열강에서 가장 중요한 크리프 파단강도 값이 낮아지기 때문에[4] Ni, Mn 첨가량을 대폭 높이기 어렵다. 또한 Ni, Mn 원소가 약 1% 첨가될 때마다 Ac1 변태온도(P92, P122 모재의 Ac1 온도는 각각 845°C, 805°C 임[3][5])가 각각 30°C, 25°C 씩 낮아지기[6] 때문에 Ni, Mn 함량 증가로 PWHT 온도를 높이기 어려운 문제가 발생한다. 따라서 용접금속의 충격에너지, 크리프 파단강도, 고온 PWHT 온도 확보를 위하여 Ni, Mn 최대 첨가량은 각각 1% 정도, Ni+Mn 은 1.5% 정도가 유리한 것으로 보인다 [7].

P92, P122 재료의 용가재 조성(Table 1)을 보면, Ni, Mn 함량이 모재 조성 보다 최대 2 배 정도 높고, W, Nb 함량은 모재보다 낮다. P122 는 Cr, Cu 함량 때문에 P92 재료의 용가재 보다 Ni, Mn

함량이 높으며, 특히 용접금속의 인성이 더욱 낮은 P122-SAW 용가재에서는 Ni+Mn 함량이 2.38%까지 높아진다. P122 재료에서 Cr, Cu 함금원소에 대한 보상으로 Ni, Mn 함량이 P92 보다 높지만, 동일한 PWHT 조건에서 P122의 용접금속 충격에너지가 P92 보다 낮은 것으로 보아, Ni, Mn 원소의 첨가만으로는 용접금속 인성 증가에 한계가 있는 것으로 보인다.

4-2. 용접금속 인성에 미치는 PWHT 조건의 영향

P92, P122 재료의 용접금속 인성회복에 필요한 PWHT 조건은 용가재 조성 및 용접방법에 따라 달라진다. 본 연구에서 P92는 750°C x 5hrs PWHT 조건으로 용접부 굽힘시험을 통과하였지만, P122 재료에서는 760°C x 5hrs 까지 PWHT 조건을 높여야 한다. P122 재료의 SMAW 용접금속은 오스테나이트 안정화원소인 Cu 원소 첨가에 더하여 Ni, Mn 함량까지 높기 때문에 용접금속의 Ac1 변태점은 모재의 805°C 보다 낮은 760°C (체적팽창법) 혹은 770~780°C (시차열분석법) [8] 이다. PWHT 온도 760°C는 P122 용접금속에서 상당히 높은 온도이며, Ac1 변태점과 온도차가 적기 때문에 현장 열처리 시 Ac1 이상으로 가열될 가능성도 존재한다. P122-SMAW 용접금속의 인성 확보를 위하여 Ni, Mn 함량을 P92 수준으로 낮추는 것도 어렵고, P122-SAW 용접금속에서는 Ni, Mn 함량이 더욱 높아지므로, P122 재료의 SMAW, SAW 용접부의 고온 PWHT 작업에는 주의가 필요하다. 따라서 고온 PWHT 작업 위험성을 회피하기 위한 저온 장시간 PWHT 방법에 대한 연구도 필요하다.

P92, P122 재료의 PWHT 온도에서 가열시간은, 1 인치 당 1 시간 등과 같이 재료의 균일가열에 필요한 시간 보다 더 많은 시간을 필요로 한다. P92, P122 와 같이 강력한 석출물 형성원소가 포함된 구조용 내열강은 전위밀도가 높고 M₂₃C₆, MC 형 등의 미세한 석출물이 기지조직에 균일하게 분포되어 있기 때문에, 용접금속의 인성회복은 1 차적으로 래쓰(Lath) 조직 경계의 미세 석출물에 고착된 전위조직 회복과 밀접한 관련이 있다. 따라서 PWHT 시간은 최적 PWHT 온도에서도 용접부 균일가열 시간에 3~5 hrs 이상의 추가적인 가열시간이 필요하며, PWHT 온도가 낮아지면 가열시간은 대폭 증가한다.

5. 결론

초초임계압 화력발전소에 적용할 수 있는 용접공정을 확립하기 위하여 실시한 P92 (9Cr-2W), P122 (12Cr-2W) 신재료 용접부 특성평가에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) P122는 동일한 PWHT 조건에서 모재, HAZ, 용접금속의 인장강도와 경도 값이 P92 보다 높은 반면, 용접금속의 충격에너지는 P92 보다 낮았다.
- 2) HAZ 부 최고 경도가 약 250Hv 이하로 되기 위한 PWHT 온도는, P92, P122 재료에서 각각 750°C x 5hrs, 760°C x 5hrs 이며, PWHT 조건에 상관없이 HAZ의 모재측 경계에는 모재보다 경도 값이 낮은 연화역이 형성되었다.
- 3) P92 재료에서 SAW 용접금속의 충격에너지는 750°C x 2hrs 의 PWHT 후 평균 12.3 J/cm² 로 SMAW 용접금속의 충격에너지(36.3 J/cm²)에 비해 크게 낮지만, 동일온도에서 5 시간 PWHT 하면 충격에너지는 평균 33.8 J/cm²로 높아져서 보일러 적용에 문제가 없을 정도의 값을 보였다.
- 4) 굽힘시험 기준으로 평가한 P92, P122 SMAW 용접부의 적정 PWHT 온도는 각각 750°C x 5hrs, 760°C x 5hrs 이상이다.
- 5) P122 재료는 PWHT 온도와 Ac1 변태점 간의 온도차가 적기 때문에 PWHT 작업 시 주의가 필요한 반면, P92 재료의 PWHT 온도는 Ac1 변태점과 비교하여 충분한 온도차를 가진다.

참고문헌

- [1] Doc. No. 96130, Sumitomo Metal Ind., Ltd. and Sumikin Welding Ind., Ltd.
- [2] Welding Report No. 041999-T008, Kobe Steel, Ltd., May 1999.
- [3] D.Richardot, et al., The T92/P92 Book, Vallourec & Mannesmann Tubes, p.43, 2000.
- [4] S.H.Ryu, Effects of Alloying Elements on the Creep Rupture Strength of Advanced 9-12% Cr Steels, Ph.D Thesis, KAIST, 1998.
- [5] Report No. 907 F-No.3255, Sumitomo Metal Ind., Ltd., February 1997.
- [6] W. Betteridge, Cobalt and Its Alloys, Ellis Horwood Limited, Market Cross House, Cooper Street, Chichester West Sussex, PO19 1EB, England, 1982.
- [7] D.Richardot, et al., The T92/P92 Book, Vallourec & Mannesmann Tubes, p.40, 2000.
- [8] S. Matsumoto, Private Communication, Sumikin Welding Industries, Ltd., August 2000.

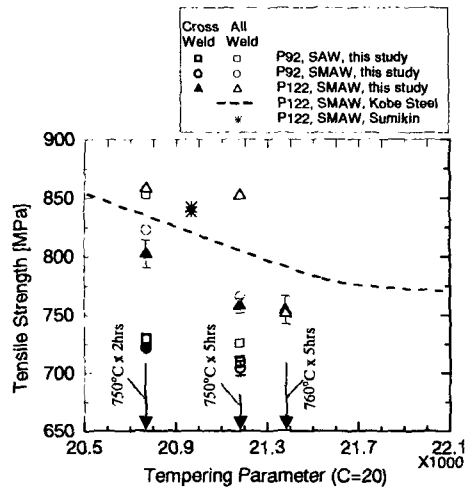


Fig.1 The variation of tensile strength with PWHT condition on SAW and SMAW weldments of P92 and P122 pipe steels.

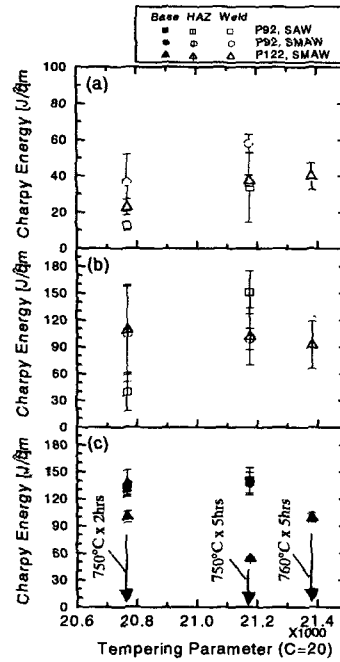


Fig.2 The variation of charpy impact energy with PWHT condition on SAW and SMAW weldments of P92 and P122 pipe steels. (a) Weld Metal (b) HAZ (c) Base Metal

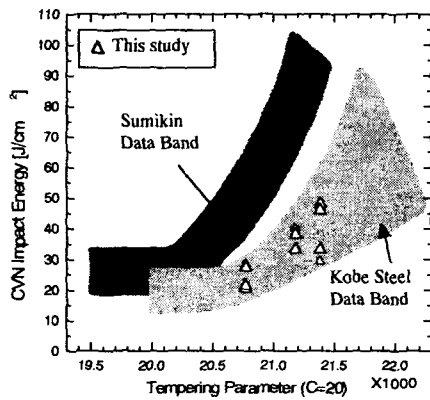


Fig.3 Comparison of charpy impact energy of this study with Sumikin and Kobe Steel data for weld deposits in a P122 pipe steel.

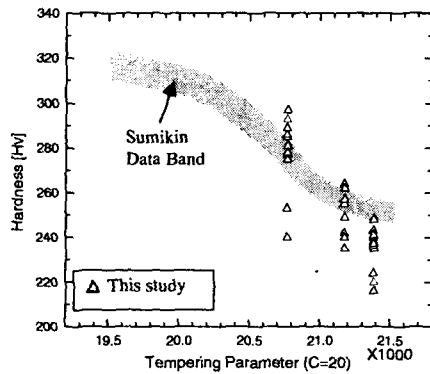


Fig.5 Comparison of hardness value of this study with Sumikin data for weld deposits in a P122 pipe steel.

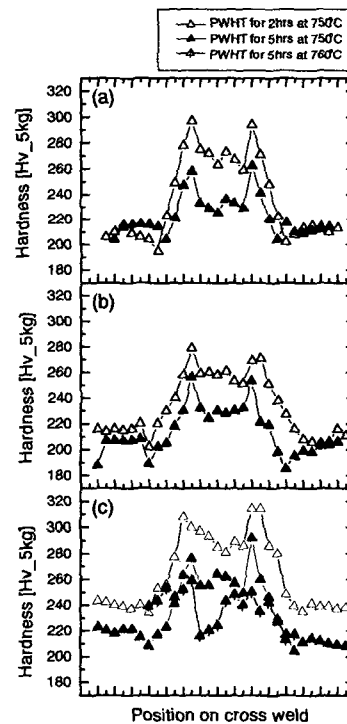


Fig.4 The hardness profile of 2mm away underneath OD surface with PWHT condition on SAW and SMAW welded joints of P92 and P122 pipe steels. (a) SAW welded joints of a P92 steel. (b) SMAW welded joints of a P92 steel. (c) SMAW welded joints of a P122 steel.