보일러 배관용 P92 파이프강의 기계적 특성 및 미세조직에 관한 연구

김 범 수, 손 태 하, 민 택 기^{†*}

한전전력연구원 그린에너지연구소, *충남대학교 기계·기계설계 나노메카닉스공학부

A Study on the Mechanical Property and Microstructure of SA213 P92 Boiler Pipe Steel

Beom Soo Kim, Tae Ha Son, Taek Ki Min^{†*}

Power Generation Lab, Korea Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

^{*}School of Mechanical and Nano Mechatronics, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received December 7, 2011; revision received October 4, 2012)

ABSTRACT: The hardness and strength test was performed to make the manufacturing process of SA213 P92 boiler pipe steel. And the microstructure change was studied to find out the cause of room temperature property of P92 steel, ie, low hardness and strength property. The room temperature property of P92 steel depends on the improper normalizing and cooling rate. Especially, Ferrite was formed and the steel had low hardness when the temperature was decreased slowly under the cooling rate 1°C/min after normalizing at the temperature around A_{c1} to A_{c3} . The critical heat treatment temperature and cooling rate was over 900°C and over 10°C/min to satisfy the minimum yield and tensile stress which was laid down by ASME Code.

Key words: SA213 P92(9Cr-2W강), Cooling rate(냉각속도), Low hardness(저경도), USC(초초임계압), PFHT(성형 후열처리), PWHT(용접 후열처리), Vilella(에칭액)

1. 서 론

세계적으로 효율이 높고 환경오염물이 적은 초초임계압(USC) 석탄화력 발전설비의 건설이 급증하고 있다. USC 발전소는 효율향상을 위해 증기온도와 압력을 높이고 있으며, 따라서 보일러에 사용되는 재료는 기존재료에 비해 더 높은 고온강도와 내산화성 등 고온물성이 요구된다.

이에 따라 기존 초임계압 석탄화력 보일러의 고온·고압부에 주로 사용되던 2.25Cr-1Mo강, 9Cr-1Mo

강, 12Cr-1Mo강을 대체하기 위한 신재료의 개발이 지속적으로 추진되고 있다. 보일러 수냉벽관에는 2.25Cr-1.6W강(P23), 주증기관과 고온 재열증기관에는 12Cr-2W강(P122)과 9Cr-2W강(P92) 등의 Cr-W계 내열강이 개발되어 상업 운전 중인 600°C급의 초초임계압 화력발전소에 사용되고 있다.

이들 페라이트 계 Cr-W계 신 재료들은 고용강화 효과와 탄화물의 열적 안정성을 향상시키기 위해서 W를 첨가하고, 인성의 향상과 석출강화 효과를 높이기 위해서 B와 Cu등을 첨가해서⁽¹⁾ 고온 크리프 파단강도를 개선하였다. 이러한 신 재료들은 탄화물의 석출이 재료의 주 강화기구이기 때문에 사용 중 탄화물이 석출하여 고온강도 개선에 기여해야 하나, 제작공정 중 열 이력이 부적절하게 행해지면 제작

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-865-5631; fax: +82-42-865-5627

E-mail address: kims@kepri.re.kr

중에 탄화물들이 석출하고 조대화 되어 고온강도 개선효과가 사라지게 된다.^(2, 3) 따라서 신 재료의 제작 과정에 대한 철저한 관리가 요구된다.

본고에서는 Cr-W계 배관용 신 재료인 P92강(9Cr-2W계)의 제작 절차를 확립하기 위하여 현장에서 가장 손쉽게 측정 가능한 경도와 인장강도를 측정하였다. 그리고 이들 각각의 열처리 조건, 즉 냉각속도 변화에 따른 P92강의 상온물성변화(저 경도현상, 저 강도현상)에 영향을 미치는 미세조직의 변화를 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

제작 열이력에 따른 P92강의 경도와 상온 기계적 성질의 변화를 측정하기 위해 독일 V&M사에서 제조한 직경 304 mm, 두께 62 mm의 파이프를 사용하였다.

실험에 사용된 P92강의 화학성분, 열처리 이력 및 기계적 성질은 각각 Table 1, Table 2와 같다.

P92강은 불림 후 뜨임 열처리하여 100% 뜨임한 마르텐사이트 조직으로 변태시켜 사용하는 강종이다. 제작과정 중 불림과 뜨임의 열이력에 해당하는 대표적인 공정을 분류하면 다음과 같다.

- 불림 공정 :
열간 벤딩 > 열간 프레스 > 형철가공 > 화염곡직 > 용접공정(제작, 보수)
- 뜨임 공정 :
성형 후열처리(PFHT) > 용접 후열처(PWHT)

이들 공정 중 Mod.9Cr1Mo강의 저 경도 현상을 규

Table 1 Chemical composition of SA335 P92 steel(wt%)

Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
ASME Min.	0.07	-	0.30	-	-	-	8.50
P92 Max.	0.13	0.50	0.60	0.020	0.010	0.40	9.50
Specimen	0.10	0.22	0.48	0.017	0.006	0.18	9.11

Elements	Mo	W	B	V	Nb	N	-
ASME Min.	0.30	1.50	0.001	0.15	0.04	0.030	-
P92 Max.	0.60	2.00	0.006	0.25	0.09	0.070	-
Specimen	0.47	1.71	0.003	0.17	0.06	0.041	-

Table 2 Mechanical property of 1

Standard	Mechanical Property				Heat treatment		
	T.S (MPa)	Y.S (MPa)	El. (%)	Hardness (Hv)	Normalizing(℃)	Tempering(℃)	PWHT(℃)
ASME	> 620	> 440	> 20	max. 265	> 1040	> 730	> 705
Specimen	674	506	24	214	1050× 60 min	780× 60 min	-

명한 이전 연구결과에서^(4, 5) 임계구역인 Ac1 온도를 넘지 않는 템퍼링 공정보다는 주로 임계구역인 Ac1과 Ac3 온도범위에서 작업이 이루어지는 불림 공정이 강의 경도저하 등 열화에 기여하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 Mo대신 W과 B이 포함된 P92강 역시 Mod.9Cr1Mo강과 유사한 결과가 예상되기 때문에, 임계온도 구간인 Ac1 직상과 Ac3 직상 및 직하에서 온도와 냉각속도가 P92강의 기계적 성질에 미치는 영향을 관찰하였다.

2.2 열처리 및 시험방법

제작 공정 중의 다양한 열이력에 따른 P92강의 경도, 강도 등 상온 기계적 물성과 미세조직 변화를 관찰하기 위해 실험실적으로 열처리 모사시험을 실시하였다. 열처리 조건은 Table 3과 같다.

ASME Code에 의하면 P92강의 불림 열처리는 최저 1040℃ 이상의 온도에서 실시하도록 규정되어 있으며, 최고온도에 대해서는 규정되어 있지 않다.⁽⁶⁾ 그러나 불림 온도가 1120℃ 이상으로 증가하게 되면 오스테나이트 결정입자가 급격하게 성장하고 델타 페라이트(δ -ferrite)가 생성되기 때문에 최대 불림 온도는 약 1120℃ 이하로 제한되며,⁽⁷⁾ 통상적으로 튜브/파이프 제조업체에서는 경계성 등을 고려하여 1050℃의 온도에서 제품에 대한 불림을 실시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 Ac1 직상온도인 850℃와 Ac3 직하인 900, 920℃, 그리고 직상인 1050℃의 불

Table 3 Heat treatment condition of P92 steel

Normalizing condition		Cooling rate (℃/min)	Tempering condition		Cooling rate (℃/min)
Temp. (℃)	Hold time (hr)		Temp. (℃)	Hold time (hr)	
850		10			
900	1hr	1	760	1hr	Air Cooling
920		0.1			
1050		A.C			

림에서 냉각속도의 변화에 따른 경도와 기계적 성질의 영향을 조사하였다. Mod.9Cr1Mo강의 기존 연구결과에 의하면 뜨임온도와 시간은 경도와 기계적 성질의 저하에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판명되어 시험변수로 고려하지 않았다.

노에서 열이력 모사를 위한 열처리와 제어냉각을 실시하였으며, 상대적으로 냉각속도가 빠른 10°C/min의 냉각속도를 구현하기 위하여 고온변형 시뮬레이터(Hot Deformation Simulator)를 사용하였다. 열처리 후 비커스 경도시험기(하중 5 kg)를 이용하여 튜브 단면에서의 경도를 측정하였고, 각 열처리 조건별로 상온 인장시험을 실시하였다. 미세조직은 Vilella 용액으로 부식시킨 시편에서 광학현미경이나 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열처리 조건에 따른 상온 기계적 특성

Table 4에 P92강의 불림온도와 냉각속도에 따른 경도와 상온 인장강도의 변화를 나타냈다. ASME

Table 4 Room temperature mechanical property of SA-335 P92 steel with heat treatment conditions

Temp. (°C)	Cooling rate (°C/min)	Hardness (Hv)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
As received	-	216.2	524.7	693.5
850	0.1	175.3	350.3	586.2
	1	177.8	372.4	597.0
	10	219.1	378.7	638.5
	A.C	185.4	411.1	613.3
	0.1	150.1	271.9	525.8
900	1	160.9	290.9	554.7
	10	215.1	557.3	687.6
	A.C	219.3	525.3	696.5
	0.1	148.7	267.7	531.2
	1	152.4	284.0	548.5
920	10	213.8	743.3	863.2
	A.C	223.3	541.2	709.8
	0.1	147.2	250.2	497.5
	1	232.5	586.7	744.2
	A.C	244.5	617.9	772.8

code에 규정된 경도는 최대 265 Hv를 규정하고 있지만, 최소기준은 설정되어 있지 않다. 인장강도와 항복강도의 최소값은 각각 620 MPa과 440 MPa이다.

그러나 일반적으로 페라이트강의 경우 경도와 인장강도는 선형적으로 비례관계가 성립되기 때문에 최소 인장강도와 항복강도 값을 경도로 환산하여⁽⁶⁾ 최소 경도 값에 대한 기준으로 사용해도 크게 차이가 없다.

Ac₁ 직상인 850°C의 불림 온도에서 경도는 180 Hv 전후를 나타내고 있지만, 냉각속도의 변화에 따른 강도의 변화는 크게 보이지 않았다. 이에 반해 Ac₃부근의 900°C와 920°C에서는 Ac₁ 직상에서 시험한 결과와 다르게 상온기계적 성질과 냉각속도 간에 상호의존성을 나타내고 있다. 1°C/min 이하의 냉각속도로 서냉시킨 경우 경도는 오히려 감소하여 150 Hv의 저 경도 현상을 보이고 있으며, 항복강도 역시 300 MPa 이하의 낮은 값을 갖는다. 그러나 냉각속도가 10°C/min 이상이 되면 경도는 215 Hv 이상으로 정상 경도와 유사한 값을 가지며, 항복강도와 인장강도 역시 ASME Code에 규정된 최소값을 훨씬 상회하는 530 MPa과 690 MPa 이상의 값으로 신재와 유사한 상온 기계적 특성을 갖는다. 통상적인 P92강의 불림 온도인 1050°C에서 열처리할 경우 1°C/min의 냉각속도로 냉각해도 초기 상태의 상온 기계적 성질을 회복하지만, 0.1°C/min의 냉각속도로 냉각하게 되면 서냉에 의해 냉각도중 페라이트 영역을 지나게 되어 경도 150 Hv 미만, 항복강도와 인장강도 각각 250 MPa과 498 MPa의 가장 낮은 물성치를 갖는다. 결국 P92강의 상온 기계적 특성 중 경도와 인장강도는 Ac₃ 부근 혹은 Ac₃ 이상의 온도로 열처리할 경우 불림 온도의 영향보다는 냉각속도에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 리듀서나 피팅류 제작을 위한 고온 제작 공정 시 210 Hv 정도의 정상경도와 인장강도를 확보하기 위해서는 10°C/min 이상의 빠른 속도로 냉각하는 것이 필요하다.

본 시험에서 모든 열처리와 냉각조건에서 경도는 ASME에 규정된 최대경도 265 Hv를 넘지 않았지만, 900°C 이상의 온도에서 냉각속도가 10°C/min 이상이 되어야만 ASME Code에 규정된 항복강도와 인장강도의 기준을 만족하는 것을 알 수 있다.

3.2 열처리 조건에 따른 미세조직 변화

Fig. 1~Fig. 5는 P92강의 열처리온도와 냉각속

도에 따른 미세조직 변화를 나타낸 것으로, P92강은 제작사에서 불림과 뜨임을 거쳐 공급되며, 이 상태에서는 뜨임한 마르텐사이트 조직을 갖는다. Fig. 1은 제작사에서 공급한 초기 상태의 미세조직을 나타낸 것으로 전형적인 뜨임한 마르텐사이트 조직으로 래스(lath)가 치밀하게 형성되어 있고, 래스 경계를 따라 미세한 탄화물이 석출되어 있다.

Fig. 2는 850℃에서 불림 후 냉각속도에 따른 미세조직의 변화를 나타냈다. 0.1℃/min의 냉각속도에서는 탄화물의 응집 조대화가 발생하고 래스 경계의 폭이 증대되고, 높이가 소멸되어 점점 등축 페라이트화가 되어가는 경향을 보이지만, 10℃/min과 공랭으로 냉각속도를 증대시키면 서냉했을 경우보다 상대적으로 탄화물의 응집 조대화가 늦게 일어나고 래스의 경계가 유지되고 있다. 그러나 초기 상태의 미세조직과 비교하면 상대적으로 탄화물의 응집 조대화와 래스 폭의 증가로 인해, 초기 상태의 물성치에 비해 경도와 인장강도가 저하되고 있다. 특히 850℃에서 열처리 후 냉각하게 되면 냉각속도를 아무리 빠르게 해도 ASME Code에서 요구하고 있는 최소 항복강도(440 MPa)와 최소 인장강도(620 MPa)를 만족시키지 못하게 된다.

Fig. 3은 AC3 직하인 900℃에서 불림 후 냉각속도에 따른 미세조직의 변화를 나타내었다. 1℃/min 이하로 냉각하게 되면 래스 경계를 따라 미세하게 석출한 탄화물들은 소멸되어 입내에 조대한 탄화물로 석출되며 래스 역시 완전히 소멸되어 뜨임한 마르텐사이트 조직이 아닌 페라이트 조직으로 변태된 것을 보여준다. 뜨임한 마르텐사이트에서 페라이트로 미세조직이 변화됨에 따라 경도 역시 페라이트 경도와 유사한 150 Hv 정도의 저 경도를 나타내게 되며, 인장강도와 항복강도 역시 300 MPa와 550 MPa 이하의 낮은 값을 가지게 된다. 그러나 10℃/min 이상의 냉각속도로 냉각할 경우 미세조직은 뜨임한 마르텐사이트 조직을 유지하며 결정립 자체는 임계구역에서 열처리함으로써 상대적으로 미세화된 것을 알 수 있다. 상온 기계적 성질 역시 인장강도와 경도는 초기상태와 유사한 값을 보이지만, 항복강도는 560 MPa로 초기상태의 항복강도보다 높은 값을 갖는다. 이것은 Hall-Petch식 처럼 결정립 미세화가 강의 항복강도 증가에 기여하였기 때문인 것으로 판단된다. 900℃의 임계영역에서 열처리할 경우 상온물성치가 냉각속도에 가장 민감하게 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 AC3직상인 920℃에서 불림 후 냉각속도에 따른 미세조직의 변화를, Fig. 5는 1050℃에서 불림 후 냉각속도별로 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. 1050℃의 열처리 온도는 P92강에 일반적으로 적용되는 불림 온도이다. 그러나 냉각속도가 0.1℃/min가 되면 냉각 시 완전하게 페라이트 영역을 지남에 따라 미세조직은 100% 페라이트와 탄화물로 구성 된다. 이때 경도는 147 Hv로 가장 낮은 값을 갖고, 항복강도는 250 MPa, 인장강도는 500 MPa 이하의 값을 갖는다. 그러나 속도가 1℃/min 이상이 되면 뜨임된 마르텐사이트 조직으로 변하는 것을 알 수 있으며, 상온기계적 성질 역시 경도는 230 Hv 이상, 항복강도와 인장강도는 각각 587 MPa와 744 MPa의 높은 값을 갖게 된다.

따라서 1050℃에서 불림을 하게 되면 물성치는 완전하게 본래의 값으로 회복되는 것을 알 수 있다. 다만 물성치가 초기상태의 경도와 강도보다 높은 이유는 초기상태의 경우 780℃에서 뜨임을 하지만, 본 실험에서는 불림 후 뜨임온도를 P92강의 성형 후열처리(PFHT) 온도인 760℃에서 실시하였기 때문에 뜨임 공정상에 발생한 20℃의 온도 차이에 기인한 것이다.

Mod.9Cr1Mo강에서는 AC1직상인 830~850℃ 부근의 온도에서 불림한 후 서냉하였을 경우 저경도 현상을 보이는 것에 비해 B과 W이 1.6 중량% 첨가된 P92강에서는 오히려 AC3부근의 900~920℃ 온도범위에서 열처리 후 서냉할 경우 페라이트의 기지경도인 150 Hv 이하의 저경도를 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 두 강종 모두에 생기는 저경도 현상은 역 변태에 의해 생성된 오스테나이트가 임계 냉각속도 이하로 냉각 시 페라이트로의 변태와 과 뜨임

(a) Optical scope

(b) SEM

Fig. 1 Microstructure in P92 pipe steel as received.

(a) Cooling rate = 0.1°C/min

(a) Cooling rate = 0.1°C/min

(b) Cooling rate = 1°C/min

(b) Cooling rate = 1°C/min

(c) Cooling rate = 10°C/min

(c) Cooling rate = 10°C/min

(d) Cooling rate = 10°C/min

(d) Cooling rate = air cooled

Fig. 2 Microstructure in P92 pipe steel at 850°C.

Fig. 3 Microstructure in P92 pipe steel at 900°C.

(a) Cooling rate = 0.1°C/min

(a) Cooling rate = 0.1°C/min

(b) Cooling rate = 1°C/min

(b) Cooling rate = 1°C/min

(c) Cooling rate = 10°C/min

(c) Cooling rate = air cooled

(d) Cooling rate = air cooled

Fig. 4 Microstructure in P92 pipe steel at 920°C.

Fig. 5 Microstructure in P92 pipe steels at 1020°C.

된 기지조직의 혼합에 의해 발생하는 것으로 동일 기구로 판단된다.

이러한 P92강의 저 경도와 저 강도 현상은 Mod. 9Cr1Mo강에서 경험했듯이 상온 기계적 특성 및 고온 크리프강도에도 나쁜 영향을 끼쳐서 재료의 설계수명을 만족하지 못하고 사용 중 조기파손의 원인으로 작용한다.

900°C에서 열처리 후 냉각했을 경우와 유사한 미세조직의 변화를 보이고 있으며, 이에 따른 물성변

화 및 물성 값 자체가 유사한 경향을 보이고 있다.

4. 요약 및 결론

석탄화력발전소에 적용되는 보일러 배관용 신 재료인 P92강의 제작 건전성을 확보하기 위하여 상온 기계적 특성(경도, 항복강도, 인장강도)과 냉각속도에 따른 미세조직의 변화를 관찰하였고, 그 결과는 다음과 같다.

(1) Ac₁직상인 850℃에서 불림 후 냉각하게 되면 냉각속도를 아무리 빠르게 해도 ASME Code에서 요구하고 있는 최소항복강도와 최소인장강도를 만족시킬 수 없었다.

(2) Ac₃부근인 900~920℃에서 불림 후 냉각하게 되면 경도와 인장강도 등 상온 물성치가 냉각속도에 가장 민감한 영향을 받는다. 이 온도에서 ASME Code의 요구 물성치를 만족시키는 임계 냉각속도는 10℃/min 이상이며, 만약 냉각속도가 1℃/min 이하가 될 경우 오히려 150 Hv 정도의 저경도 현상이 발생하게 된다

(3) 성형 후 1050℃에서 불림을 할 때 1℃/min 이상의 냉각속도를 유지하게 되면 물성은 회복된다. 그러나 실 제품의 경우 질량효과를 고려하면, 최소 냉각속도를 5℃/min 이상으로 유지해야 ASME Code의 요구 물성치를 만족시킬 수 있었다.

(4) 열처리 및 제작 공정에 있어서 뜨임보다는 부적절한 불림과 냉각속도가 저 경도와 저 강도의 주요 원인으로 판단되었다. 특히 이상영역인 Ac₁~Ac₃의 온도범위에서 불림 후 1℃/min 이하의 임계 냉각속도 이하로 서냉할 경우 페라이트가 생성되어 150 Hv 가량의 저경도 현상이 발생한다. 최소 항복강도와 인장강도를 기준으로 한 임계열처리 온도와 냉각속도는 900℃ 이상의 온도에서 10℃/min 이상의

냉각속도가 되어야만 ASME Code에 규정된 항복강도와 인장강도의 기준을 만족하였다.

후 기

본 논문은 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술 평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

1. Masuyama, F., 1998, Steam plant material development in Japan, Materials for advanced power engineering, Liege, Belgium, pp. 1807-1824.
2. Allen, D. J. and Brett, S. J., 1999, On Case Histories on Integrity and Failures in Industry, Proceedings of Int. Conf.(CHIFI), Milan Italy, pp. 133-143.
3. Brett, S. J., Allen, D. J., and Pacey, J., 1999, On Case Histories on Integrity and Failures in Industry, Proceedings of Int. Conf.(CHIFI), Milan Italy, pp. 873-881.
4. The America Society of Materials Engineering, 2007, ASME boiler and pressure vessel code, Section II Part A Ferrous material specification, pp. 553-566.
5. Orr, J. and Burton, D., 1994, On Materials for Advanced Power Engineering, Proceedings of a Conf., Liege, Belgium, pp. 263-280.
6. Lee, Y. S. and Ryu, S. H., 2000, The hardness change of the Mod. 9Cr-1Mo steel by the heat treatment during manufacturing process, Proc. of the 14th conf. on mechanical behaviors of materials, pp. 93-102.