

석탄화력발전용 초초임계압(USC) 보일러 수냉벽 튜브 용접 신뢰성 향상에 대한 연구

안종석* · 이승현* · 조상기* · 이길재* · 이창희** · 문승재***,†

*한국동서발전(주) 사업운영처

**한양대학교 신소재공학부

***한양대학교 기계공학부

Study on the Improvement of Weld-joint Reliability in Waterwall Tubes of the Ultra Supercritical Coal Fired Boiler

Jong-Seok Ahn*, Seung-Hyun Lee*, Sang-Kie Cho*, Gil-Jae Lee*, Chang-Hee Lee** and Seung-Jae Moon***,†

*Business Operation Dept. Korea East-West Power Co., LTD. Seoul, 135-791, Korea

**School of Materials Science & Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

***School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

†Corresponding author : smoon@hanyang.ac.kr

(Received October 19, 2009 ; Revised January 8, 2010 ; Accepted January 20, 2010)

Abstract

The low alloy-steel material(1.0Cr-0.5Mo, SA213T12), which has widely been used for the waterwall tube in the conventional power plant, do not have enough creep rupture strength for waterwall tubes of the Ultra-supercritical(USC) boilers. According to this reason, the high-strength low alloy-steel(2.25Cr-1.0Mo, SA213T22) has newly been adopted for the waterwall tube in the USC boilers. This paper presents failure analysis on weld-joint of the waterwall tubes in USC boilers. Visual inspections were performed to find out the characteristics of the fracture.

Additionally both microscopic characteristics and hardness test were carried out on failed tube samples. Failures seem to happen mainly because the welding process has not been conducted strictly.(preheating, P.W.H.T and so forth). Thus, this paper has the purpose to describe the main cause of the poor welding process and to explain how to prevent similar failures in those weld-joints.

Key Words : Low alloy-steel, Thermal power plant, Ultra-supercritical coal power boiler, Water wall tube

1. 서 론

2000년도 중반이후 우리나라는 발전설비 효율향상을 목적으로 발전용량 500MW, 증기온도 596℃, 압력 25MPa급 초초임계압(USC) 석탄화력 보일러가 운영되고 있으며 향후 지속적으로 온도와 압력이 격상된 대용량 USC 보일러가 건설될 전망이다. 기존에 화력발전소 수냉벽 튜브에서 널리 사용된 저합금강(1.0Cr-0.5Mo, SA213T12) 소재는 USC 보일러에 적용되기에는 충분한 크리프 파단강도를 가지고 있지 못하여 고

온 및 고압영역의 배관, 헤더 및 튜브소재로 광범위하게 사용된 보다 고강도 저합금강(2.25Cr-1.0Mo, SA213T22)이 USC 보일러 수냉벽 튜브에 신규로 사용되고 있고 향후 건설되는 1,000MW급 USC 보일러에서도 적용될 것으로 예상된다. 그러나 건설 및 운영 과정에서 과거에 경험하지 못한 용접금속 균열이 다수 발생되었고 균열유형은 크레이터 및 횡단균열 형태로 나타났다.

본 논문에서는 균열이 발생된 손상샘플의 소재 및 미세조직, 경도분석과 수냉벽 튜브 용접 구조물특성에 대

한 연구를 통하여 세부 원인분석 내용을 저술하였고 이를 토대로 신규건설 및 설비유지 과정에서의 보수 용접 시 유사손상 재발방지를 목적으로 한다.

2. 소재 특성 고찰

2.1 수냉벽 튜브 규격 및 화학성분

본 연구에서 인용한 SA213T22 소재는 80년도 초반에 국내에서 건설되어진 화력발전소 보일러에서 수냉벽 튜브를 제외한 과열기(superheater) 및 재열기(reheater) 튜브와 배관에서 널리 사용되고 있으며 수소균열(delayed crack)과 재열균열(reheat crack)¹⁾에 의한 손상이 일부 보고되기는 하였으나 석탄화력 보일러에서는 용접손상에 대한 문제는 크게 나타나지 않았다.

손상소재인 SA213T22와 비교대상인 SA213T12의 기계적 성질과 화학성분은 각각 Table 1 및 2에서 나타내었고 시공한 용접봉의 성분은 Table 3에 나타내었으며 시공시 용접변수는 Table 4에서 표시하였다.

Table 1 Mechanical Properties of the tube

Material	Tensile Strength (Min, MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
T22	415	30	170 maximum
T12	415	22	163 maximum

Table 2 Chemical composition of the tube element (wt-%)

Material	C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S
T22	0.05-0.15	1.9-2.6	0.87-1.13	0.3-0.6	0.5 max	0.025	0.025
T12	0.05-0.15	0.8-1.25	0.44-0.65	0.3-0.6	0.5 max	0.025	0.025

Table 3 Chemical composition of the electrode element (wt-%)

Electrode	C	Cr	Mo	Mn	Si	Cu
ER90S-B3	0.17-0.12	2.3-2.7	0.5-1.2	0.4-0.7	0.4-0.7	0.35

Table 4 Welding parameters

Electrode dia(mm)	Preheat temp(°C)	P.W.H.T	Current (A)
2.4	Min. 150	None	170~180
Voltage(V)	Welding speed	Bead tech	No. of Pass
10~16	6~15 (cm/min)	Stringer	5

2.1.1 손상샘플 규격 및 화학성분

- (1) 규격 : OD 38.7 × 7.6t / SA213T22
- (2) 용접봉 규격 : ER90S-B3

2.2 미세조직 특성

Fig. 1²⁾ 및 Fig. 2³⁾에서는 SA213T22 소재와 SA213T12 소재의 연속냉각곡선 C.C.T(continuous cooling transformation diagram)을 각각 표시하였고 조직 및 경도 관점에서 SA213T22 소재가 경화능(hardenability)이 높다.

2.2.1 SA213T22 소재 미세조직

모재의 미세조직은 페라이트(ferrite)와 베이나이트(bainite)의 혼합조직이며 Table 5²⁾에 나타낸바와 같이 냉각속도가 빠를수록 베이나이트 점유비가 커지고 경도(hardness)는 높아진다. 용접금속은 기본적으로 베이나이트 조직을 나타낸다.

2.2.2 SA213T12 소재 미세조직

모재의 미세조직은 페라이트(ferrite)와 퍼얼라이트

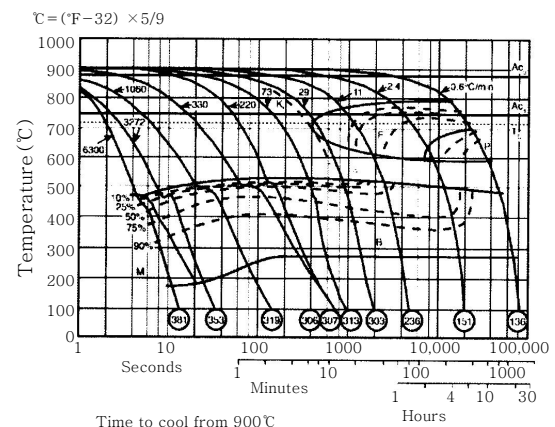


Fig. 1 SA213T22 CCT diagram²⁾

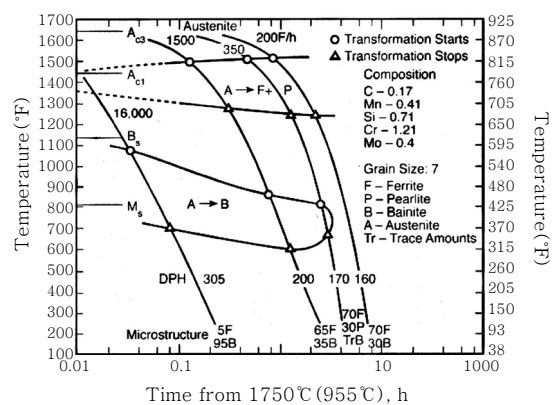


Fig. 2 SA213T12 CCT Diagram³⁾

Table 5 The influence of cooling rate micro-structure and hardness on SA213T22²⁾

Cooling rate °C/hour	Microstructure(%)		Hardness (Hv)
	Bainite	Ferrite	
8,871	99	1	305
816	55	45	215
71	30	70	160
66	20	80	150

Table 6 The influence of cooling rate micro-structure and hardness on SA213T12³⁾

Cooling rate °C/hour	Microstructure(%)			Hardness (Hv)
	Pearlite	Bainite	Ferrite	
8,871	0	95	5	305
816	0	65	35	215
177	~30	Trace	70	170
93	30	0	70	160

(pearlite)의 혼합조직이며 Table 6³⁾에 나타낸바와 같이 냉각속도가 빠르게 되면 퍼얼라이트가 베이나이트 조직으로 변환되며 점유비가 커지고 경도는 높아진다. 용접금속은 기본적으로 베이나이트 조직을 나타낸다.

3. 샘플튜브 검사

3.1 육안조직(macrostructure)

3.1.1 손상튜브 위치

수냉벽 튜브 용접부의 손상위치는 Fig. 3에서 나타낸

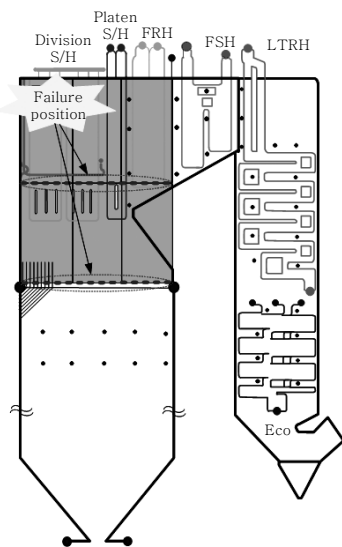


Fig. 3 Weld-joint failure positions in waterwall tubes of the USC coal power boiler

바와 같이 공장에서 제작된 Wall panel군을 현장에서 연결 시공한 용접부로서 신규 건설 및 운영중인 USC 보일러의 정면, 좌측 및 우측면 전반에 걸쳐 건설과정에서 다수손상이 발생되었다.

3.1.2 검사 결과

용접부에서 Fig. 4(a)에서 나타낸 바와 같이 표면비드(surface bead)에서 횡단방향(transverse) 균열이 발생되었고 균열위치는 용접이 종료된 지점에서 크레이터 균열 유형이 다수 관찰되었다.

또한 Fig. 4(b)와 같이 이면비드(back bead) 용접 금속에서도 횡단방향 균열이 존재하였으며 Fig. 4(c)와 같이 용접금속을 관통하였다.

균열위치는 Wall Tube Panel 상부 11시~1시 사이에서 발생되었다.

3.2 미세조직(microstructure)

3.2.1 검사 방법

샘플튜브의 미세조직 관찰을 위해 시험편 연마(polishing) 후 2% 나이탈 부식액(nital etching)을 이용하여 4분 동안 부식하였고 검사장비는 금속현미경을 사용하였다.

3.2.2 검사 결과

샘플튜브의 모재(base metal)는 Fig. 5와 같이 전형적인 페라이트와 베이나이트의 혼합조직을 나타내고 있었으며 균열이 존재하는 지역의 미세조직은 Fig. 6(a)와 같이 마르텐사이트 조직으로 변환되어 있었다.

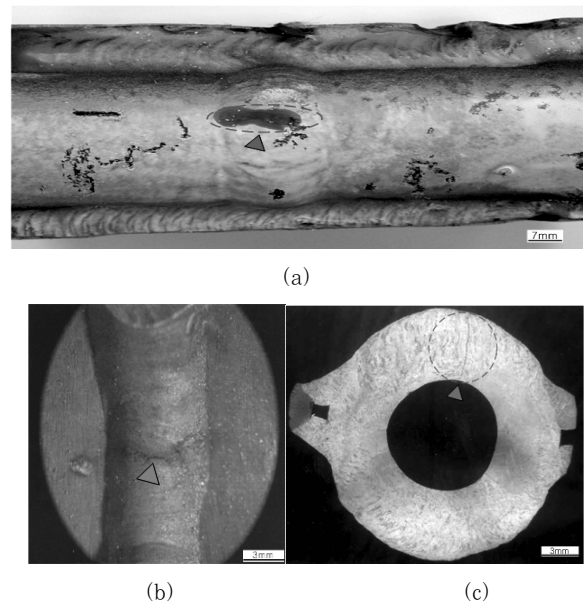


Fig. 4 Macroscopic weld failure metal showing (a) transverse & crater crack, (b) root crack and (c) crack propagation direction

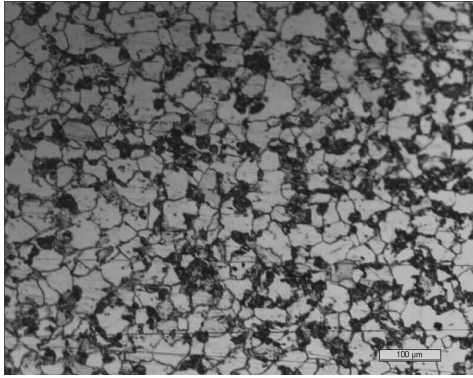


Fig. 5 Optical micrograph of T22 Basemetal

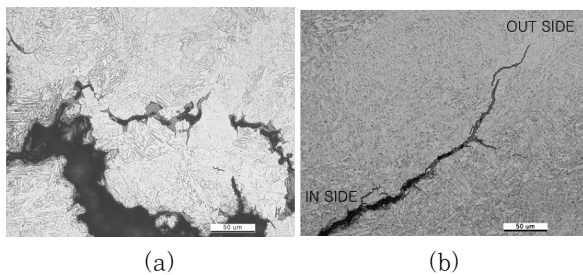


Fig. 6 Microstructure of failed samples showing (a) root crack(martensite structure), (b) crack propagation direction

또한 균열은 Fig. 6 (b)와 같이 튜브내면에서 외면으로 진행하였다. 손상지역은 미세균열(micro crack)이 다수 발생되었으며 균열 유형은 루트 및 크레이터 균열이었다.

3.3 경도(Hardness)

3.3.1 관찰 방법

미소경도계(micro vickers)를 이용하여 4개의 손상 샘플을 Fig. 7과 같이 튜브 내면에서 외면방향으로 1mm 간격으로 이동하면서 측정하였다.

3.3.2 관찰 결과

용접금속의 경도를 측정된 결과 층(layer) 별로 차이가 있었으나 Fig. 8과 같이 280~350Hv 정도로 높게 나타나 Fig. 6 (a)의 마르텐사이트 조직형성과 일치하였으며 초층(root pass) 용접부의 고 경도는 용접

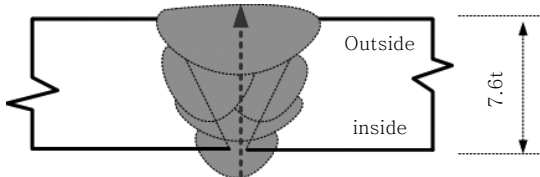


Fig. 7 Test position

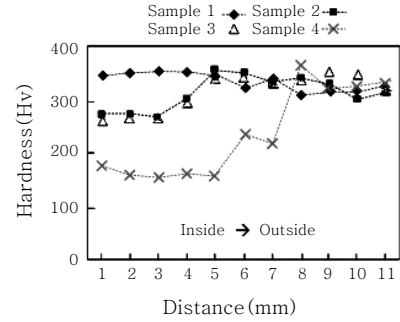


Fig. 8 Hardness test result for failure tubes

과정에서 예열(preheating)이 불충분하였음을 시험결과에서 판단할 수 있다.

4. 수냉벽 튜브 용접특성 고찰

4.1 구조적인 잔류인장응력 집중구조

과열기 및 재열기의 Coil 튜브 용접과는 달리 수냉벽 튜브용접은 Fig. 9⁴⁾와 같이 상하지점(C-C') 고정후 용접하는 구속 맞대기 이음구조로서 용접 종료후 냉각시 1/16" (1.8mm) 정도 수축됨에 따라 용접금속에는 내적구속(internal restraint)에 의한 잔류인장응력(residual tension stress)이 크게 부과된다.

4.2 Fit-up시 인장응력 집중구조

과열기 및 재열기와 같은 코일 튜브는 구조상 유연성(flexibility)이 있어 Fit-up시 불일치(mis-alignment)가 존재하는 상황에서도 용접부에 잔류인장응력이 적게 작용하나 수냉벽 튜브의 경우 구조상 경직되어 약간의 불일치가 존재할 경우에도 Fit-up 과정의 과도한 힘에 의해 인장응력이 용접부에 크게 작용하게 된다.

4.3 교차 용접 구조

튜브 용접후 Membrane측 공간 밀봉을 위해 Fig.

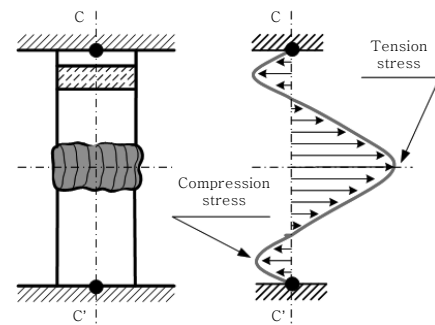


Fig. 9 Residual tension stress in weld metal

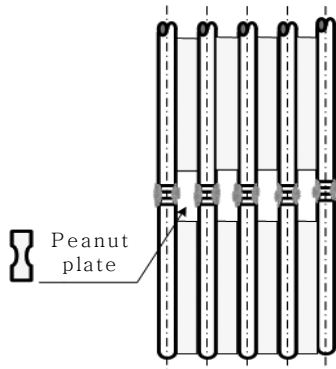


Fig. 10 Welding position of peanut plates

10에서와 같이 Peanut Plate 용접을 시행하여야만 하는 구조로서 교차용접(cross welding)에 의한 잔류응력이 용접부에 추가 작용될 수밖에 없는 불리한 용접 구조를 가지고 있다.

5. 시공 문제점 고찰

5.1 예열(preheating) 준수 곤란구조

수냉벽 튜브는 코일 튜브와 비교하여 열전달 면적이 커서(냉각속도 빠름) 현장 용접시 예열온도(최소 149℃) 유지가 불리한 구조로서 Heating coil Ped 방식을 적용하여 예열해야 하나 기존 SA213T12 소재의 용접시 사용한 화염토치를 이용하여 실제 용접시에는 규정된 예열온도이하에서 용접이 진행, 용접금속에 정상조직인 베이나이트가 형성되지 못하고 취성(embrittle)이 높은 마르텐사이트 조직으로 변태 및 높은 경도를 형성한 점을 감안하면 예열관리가 미흡하였음을 알 수 있다.

5.2 Crater 처리 곤란구조

5.2.1 1~3(3시 방향), 2~4지점(9시 방향) 균열 원인분석

용접중 각 층(layer) 별로 크레이터 균열예방을 위해 캐스캐이드 용접형식으로 시공되어야 하나 Fig. 11과

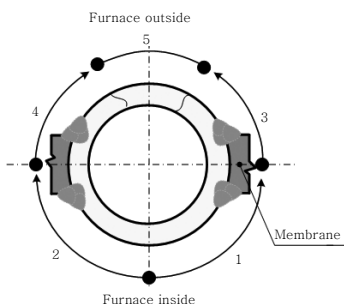


Fig. 11 Weld metal failure position

같이 Membrane이 설치된 관계로 3시 및 9시 방향에서 아크를 정지해야 하는 구조로서 크레이터 중복이 용이하여 Membrane 용접지역에서 균열이 다수 발생되었다.

5.2.2 5 지점(11~12시 방향) 균열원인 분석

손상 위치중 가장 많은 균열이 발생된 지역으로 5G 자세로 용접 시공시 크레이터 발생을 최소화 하여 연속시공을 해야 하나 용접사가 관례적으로 용접 과정중 5번 지역에서 기 시공된 1~4 지역 이면비드의 적정성 확인을 위해 아크를 정지하였고 이후의 용접 과정에서 크레이터 처리미숙으로 인한 균열이 다수 발생하였다.

5.3 비파괴검사

SA213T22 소재는 인장강도 90ksi급 고장력강 이며 수냉벽 튜브 용접은 상기 언급한 응력집중 구조로서 수소균열과 재열균열에 의한 미세균열 발생이 용이한 점을 감안하면 비파괴검사 수량 및 시기, 종류 선택이 매우 중요하다. 이번 손상은 방사선투과 검사를 용접부 2개소당 필름 1매를 촬영하였는데 결함을 검출 하지 못하였다. 따라서 최소한의 선명도(sharpness) 확보를 위해서는 용접부 1개소에 필름 1매 촬영이 요구되며 검사시기는 Peanut plate 용접 종료후 최소 48hr 이상 경과후 시행하는 것이 필요하다. 또한 결함의 종류가 미세균열인 점을 감안하면 비파괴검사 결과 신뢰도 향상을 위해 초음파 검사를 부분적으로 병행하여 건전성 여부를 확인하는 것이 바람직하다.

6. 결 론

석탄화력 발전용 USC 보일러 수냉벽 튜브에 신규로 적용된 SA213T22 소재 용접부의 손상 원인에 대한 연구결과

- 1) 용접 경화능(hardenability)이 크고 수소균열과 재열균열에 민감한 소재특성
- 2) 구속 맞대기 이음구조로서 내적 구속에 의한 용접금속에 잔류인장응력 집중등 균열발생이 용이한 구조상 문제점
- 3) 예열 및 겹침 용접시 절차 부적절
- 4) 비파괴검사 부정확성등의 요인이 복합적으로 작용하여 발생되었으며, 향후 동일소재의 수냉벽튜브 용접시 유사문제점 재발방지를 위해 예열 및 겹침 용접시 절차준수와 비파괴검사의 강화시행이 필요로 한다.

참 고 문 헌

1. J.G. Nawrocki : The Stress-Relief Cracking Susceptibility of a New Ferritic Steel, Welding Journal, 2001.1, 18s~24
2. EPRI : The Grade 22 Low Alloy Steel Hand book, 2006.11, 12~14
3. EPRI : The Grade 12 Low Alloy Steel Hand book, 2006.11, 8~9
4. 용접·접합편람 II: 대한용접·접합학회, 2008 14~16(in Korean)