

# 초초임계압 석탄화력 보일러 수냉벽 수관의 용접신뢰성 향상방안

안종석, 문승재\*†

한국동서발전(주), \*한양대학교 기계공학부

## Reliability Improvement Method of Weld Zone in Water Wall Tube for an Ultra Supercritical Coal Fired Boiler

Jong-Seok Ahn, Seung-Jae Moon\*†

KOSEP, Seoul 135-791, Korea

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

(Received November 11, 2009; accepted March 22, 2010)

**ABSTRACT** : 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 such as preheating and PWHT(post-weld heat treatment) was not conducted strictly. 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. 서론

2000년도 중반이후 우리나라는 발전설비 효율향상을 목적으로 발전용량 500 MW, 증기온도 596°C, 압력 24.5 MPa급 초초임계압(USC, ultra super critical) 석탄화력 보일러가 건설 및 운영되고 있으며 향후 지속적으로 온도와 압력이 격상된 대용량 USC보일러가 건설될 전망이다.

증기온도 및 압력상승에 따른 보일러 압력부 및 배관에 적용되는 소재는 이전에 사용된 소재보다 더 높은 크리프 고온강도 및 내산화 스케일 특성, 우수한 가공성 및 용접성이 요구되었고 이에 부합되도록 국내외 제품생산 회사에서는 경제성이 높은 신규소재가 많이 개발되었으나 짧은 운전기간에도 불구하고 과거에 경험하지 못한 손상 문제점이 USC보일러 압력부 및 배관에서 나타났으며 향후 발전설비

운영에 많은 어려움을 겪을 것으로 판단된다.

본 논문에서 연구한 대상은 실제로 가동중이던 국내 USC보일러 수냉벽 수관 용접부에서 다수 누설이 발생, 이에 대한 원인분석 및 대책수립을 위해서 과거 아임계압 보일러 수냉벽 수관에 사용된 소재와 USC보일러 수냉벽 수관에서 사용된 소재의 용접부 손상샘플 미세조직 특성과 경도를 비교분석하였고, 그리고 수관용접 구조물 특성에 대한 연구를 통하여 실제 손상이 발생된 세부 원인분석 내용을 저술하였다. 또한 이를 토대로 향후 신규건설 및 설비유지과정에서의 보수 용접시 유사손상 재발 방지를 위한 용접 시공방안 의견을 제시하였으며 발전설비 신뢰도 향상을 그 목적으로 연구를 시행하였다.

### 2. 수관의 용접균열

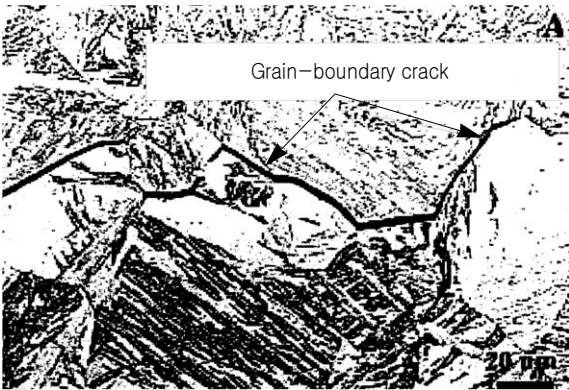
고온 및 고압의 증기를 생산하는 화력발전용 보일러 헤더 및 수관등 압력부 및 증기배관에 사용되는 소재는 높은 크리프 강도와 뛰어난 내산화특성 그리고 양호한 용접성이 요구된다. 1개 발전설비의 보일

† Corresponding author

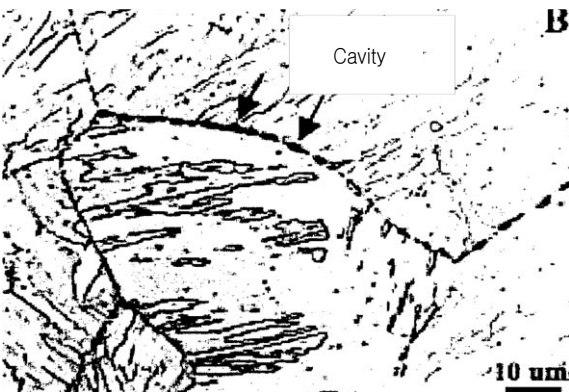
Tel.: +82-2-2220-0450

E-mail address: smoon@hanyang.ac.kr

러 압력부 및 배관 용접부는 총 35,000 여 개소로 구성되어 있으며 주로 공장 용접부는 자동용접을, 현장 용접부는 수동용접으로 시행하게 되는데 특히 수동용접의 경우 용접사 기량에 따라 용접품질이 크게 좌우되고 있으며 현장 용접품질 확보 확인을 위한 비파괴 및 파괴검사를 시행하고 있으나 검사범위의 한계 및 비용, 검사품질 문제 등으로 용접결함을 발견하지 못하고 가동중 손상이 빈발하고 있는 실정이다. 아래에서는 화력발전 보일러 압력부 및 배관에서 발생하는 용접균열의 일반적인 분류방법을 나타내었고 손상방지를 위한 용접관리방안을 제시하였다.



(a) Grain-boundary crack and micro structure



(b) Grain-boundary cavity micro structure

Fig. 1 Stress-relief cracking micro structure in low alloy steel.<sup>[1]</sup>

## 2.1 재열균열

주로 저합금강 소재 용접부의 용접 후열처리 온도 (710 ~ 760℃) 영역에서 조대화된 열영향부 또는 용접금속에서 균열이 발생된다. Fig. 1<sup>[1]</sup>에서는 저합금강에서 재열균열 형상에 대한 미세조직을 나타내었다. 균열은 Fig. 1(a)에서와 같이 주로 조대화된 결정입계를 따라 진행되며 Fig. 1(b)에서와 같이 결정 입계에 최초로 기공결함이 생성되어 이들이 연결되어 균열로 진행된다. 이는 후열처리중 조대화 된 결정입계에서 탄화물 석출이 급격히 일어나고 잔류응력이 경감되는 과정과 운전중 구조적인 응력이 집중되는 과정에서 발생하며 균열의 형태는 거시적이거나 미세적인 균열로 비파괴검사에서 발견되지 못하는 경우가 많다.

재열균열 발생억제를 위한 용접관리 방안으로는 소재, 구조, 시공측면에서 세심한 관리를 필요로 한다. 구조측면 관리방안으로 용접부 및 튜브 표면 거칠기를 완만하게 개선하여 응력집중을 방지하고 수냉벽 튜브는 맞대기 용접구조를 지양하며 불가피할 경우 튜브 벤딩등 유연한 구조로 설계하여 구조적 구속응력 집중을 저감해야 한다. 용접부 비파괴검사는 2종류 이상을 병행하여 검사 신뢰도 향상을 도모하고, 검사시기는 열처리 종료후 48시간 이후에 시행한다. 비파괴검사는 구조응력 및 운전응력이 집중되는 취약개소에 집중하여 수행하고, 주기적인 샘플 검사를 통한 건전성을 확인해야 한다.

## 2.2 응력부식균열

오스테나이트 스테인레스 강재 용접부에서 잔류인장응력이 작용하고 있는 염소등이 포함된 특정한

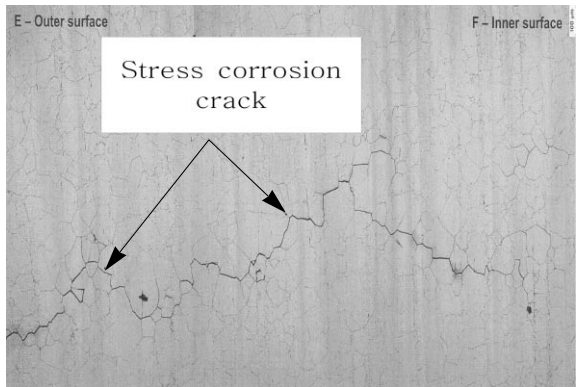


Fig. 2 Stress corrosion crack macro structure.<sup>[2]</sup>

부식환경 중에 발생한다.

Fig. 2<sup>[2]</sup>에는 오스테나이트 스테인레스 강재의 응력부식균열 형상을 나타내었다. 균열은 오스테나이트 입계의 경계를 따라 나뉘어 가지 형태로 균열이 진행되며 틈새, 노치선단 등과 같은 응력 집중부에서 균열이 시작하고 결정 입계를 통하여 진행된다. 오스테나이트 스테인레스 강재는 탄소강과 비교시 응력부식균열에 훨씬 민감하며 비파괴 검사로도 잘 발견되지 않기 때문에 사전예방이 매우 중요하다. 균열은 재료, 인장응력, 내압, 용접 잔류응력, 열응력, 부식환경의 요인이 상호 작용하여 발생되고 입계를 따라 균열이 진행되는 특성을 가지고 있다.

용접부 비파괴검사는 2종류 이상을 병행하여 검사 신뢰도 향상을 도모하고 검사 시기는 열처리 종료후 48시간 이후에 시행한다. 비파괴검사 위치는 구조 응력 및 운전응력이 집중되는 취약개소에 집중 검사하고 주기적인 샘플 검사를 통한 건전성을 확인해야 한다.

### 2.3 고온균열

오스테나이트 스테인레스 강재 용접과정에서 고상선 주변 액상과 고상이 혼재한 구역이 존재할 경우 액상이 많을 경우에는 균열이 발생하여도 다시 채워지지만 응고가 거의 진행된 후기 액막 단계에서는 얇은 액막에 의해 용접이 낮은 유황, 붕소, 인, 알루미늄, 납 등 저용점 편석물이 밀집되었을 경우 변형능력이 떨어지기 때문에 용접부 내부, 외부의 작은 잔류응력 하에도 균열이 발생할 수 있어 탄소강 또는 저합금강과 비교시 민감하게 발생된다. Fig. 3<sup>[3]</sup>에는 고온균열 발생에 대한 개념도 및 구조를 나타내었다. 용접금속은 응고후 냉각시 주상조직(columnar crystal)이 형성되고 응고응력(solidification strain)과 응고방향(solidification direction)의 차이점이 있어 주로 입계에서 응고 과정중 불순물이 집적된 조건에서 응고력 또는 외력 작용시 고온균열의 일종인 응고균열(solidification crack)이 발생된다.

고온균열 발생을 억제하기 위한 용접관리 방안으로는 용접전, 용접 개선면에 오일, 먼지 등이 부착되어 있지 않도록 청결을 유지토록 하며 입열량이 적은 시공기법을 적용해야 한다. 잔류응력 저감 및 용접조직의 미세화를 유도, 전류 및 전압 최소화, 패스당 용접두께를 얇게 하고 속도는 빠르게 시공한다. 잔류 응력 저감을 위한 용접방법은 다층으로 시공하

며 운봉 용접지양 및 직선용접을 시행한다. 예열 및 층간온도를 준수하고 용접부 개선면 불일치 발생시 체인 블록 사용엄금 및 튜브 벤딩 방법으로 용접부가 구속되지 않은 상태에서 용접을 시행해야 한다.

용접부 비파괴검사는 2종류 이상을 병행하여 검사 신뢰도를 제고하며 페라이트 검출기(ferrite detector)를 이용하여 페라이트 계수를 측정하고 건전성을 확인해야 한다.

### 2.4 저온균열

수소에 철이 용해되면 취화하여 연성저하, 단면수축률 감소 등으로 기계적 성질이 저하된다. 그러나, 극저온 또는 급속부하의 경우 수소 확산속도가 느려 취성이 나타나지 않는 경우도 있다. 용접금속중의 수소는 응고가 진행됨에 따라 수소의 고용도가 높아져 상대적으로 수소농도가 낮은 쪽으로 확산된다. 이런 특성으로 열영향부에서 가장 경화도가 높고 수소취화로 인해 파단강도가 저하되며 용접부에 가해지는 잔류응력에 따라 어느 정도의 잠복기간을 거쳐 균열이 발생된다.

용접부의 수소 집적은 국부응력과 냉각조건에 따라서 차이가 있다. 즉, 동일한 조건에서 구속시킨 맞대기이음의 용접에서 루트부에 생기는 구속응력은 평균 구속응력과 루트부의 응력 집중률에 의하여 다르게 나타내며 루트부의 응력 집중이 높은 홈형상에서는 그 밖의 조건이 동일하더라도 큰 수소 집적이 발생될 수 있다. 용접금속 강도가 모재보다 낮으면 루트부에 집중하는 국부 응력이 완화되기 때문에 국부수소 집적량이 적게 된다. 예열, 후열처리후에 용접부에 대한 냉각시간을 길게 하면 수소 집적량은 감소된다.

Fig. 4<sup>[4]</sup>에는 용접금속 내부로 수소의 침입경로를 나타내었다. 수소의 침입경로는 수소가 발생되기 쉬운 용접봉 사용 또는 습기가 많은 환경에서 용접시 4,000℃가 넘는 아크열에 의해 공기중의 습분 등이 수소원자로 해리되어 용접금속 내부로 수소가 혼입되며 용착금속 응고시 온도저하에 따른 수소 용해도가 급격히 감소하나 일부는 잔존하게 되며 일부는 오스테나이트로 된 열영향부 내에 확산되어 열영향부 지역의 수소집적은 더욱 증가 한다.

잔류 오스테나이트 조직은 수소로 과포화 되어 있기 때문에 마르텐사이트(martensite)로 변태시 새로이 생긴 조직중에 미세한 균열이 발생할 수 있다.

오스테나이트로 변태된 열영향부 내에서 확산된

수소는 금속조직의 입계 사이에서 용융, 응고 과정 중 공극을 형성하여 노치효과를 유발하며 용접부의 냉각 및 시간경과에 따른 잔류수소의 응축현상과 이때 생성되는 용접응력이 허용응력 이상으로 초과되었을 경우에 균열이 발생 된다.

Fig. 5<sup>[5]</sup>에는 고합금강에서의 수소균열에 대한 거시적 구조를 나타내었다. 실제 수소균열에 의한 용접부 손상유형은 Fig. 5(a)과 같이 주로 열영향부에서 원주방향 균열특성과 Fig. 5(b)에서와 같이 열영향부 표면에서 내면으로 균열이 진행되는 경우가 많이 발생된다.

수소취성에 의한 균열발생 예방대책으로 용접재료 선택과정에서 고장력강, 저온용강 등의 고급강재는 용착금속이 수소에 민감하여 저온균열 발생이 쉬우므로 용접재료 선택에 신중을 기해야 한다.

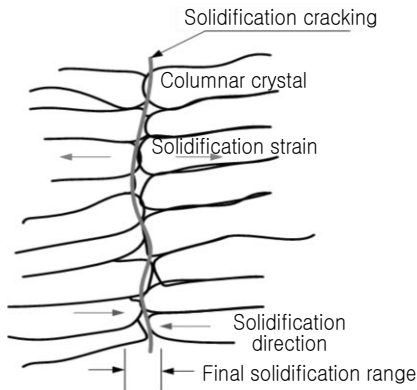


Fig. 3 Hot crack mechanism and macro structure.<sup>[3]</sup>

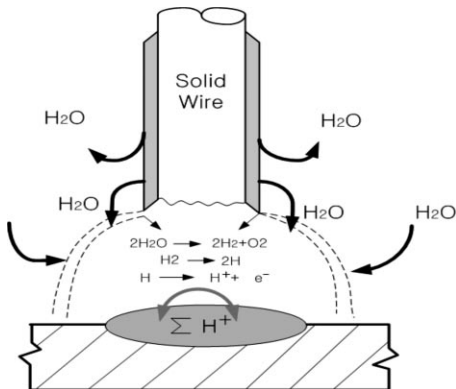


Fig. 4 Hydrogen penetration in the weld metal.<sup>[4]</sup>

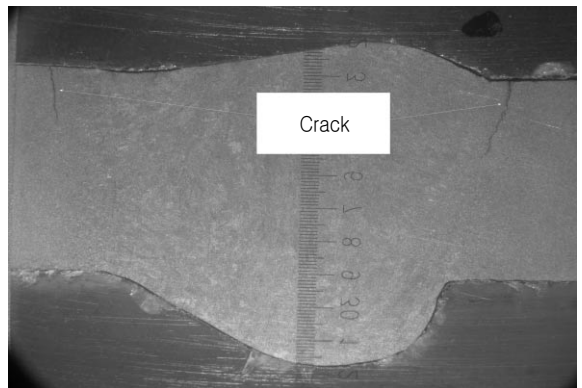
이러한 종류의 강재는 극 저수소계, 비 흡수성 저수소계 피복 용접봉 선택이 바람직하고 강재의 종류, 형상의 구속도 및 작업환경에 따라 적합한 용접봉을 적용하며 물에 젖었던 용접봉은 충분히 건조되어도 절대로 사용할 수 없다. 용착금속 내부의 잔류응력 제거 및 확산성 수소발산 촉진 및 저온균열 예방을 위해 100 ~ 200℃ 정도로 1 ~ 5시간 동안 저온 후열처리를 시행하며 용접부의 수분, 오일, 녹, 페인트 등을 완전히 제거하여 청결을 유지해야 한다.

### 3. 수관손상 현황 및 소재특성

#### 3.1 수관손상 현황



(a) Longitudinal crack and heated affected zone crack Crack



(b) Heated affected zone Crack direction

Fig. 5 Hydrogen cracking macro structure in high alloy steel.<sup>[5]</sup>

수냉벽 수관 용접부의 손상위치를 Fig. 6에 나타내었다. 공장에서 제작된 수관관을 현장에서 연결시공한 용접부에서 손상이 발생되었으며 건설 현장에서 각 수관관을 수평으로 위치한 상태에서 용접사가 각 관넬 상부 및 하부에 위치하여 상부 용접사는 주로 아래보기 용접으로 시공하였고 하부에 위치한 용접사는 위보기(over head) 용접자세로 시공하였다.

시공 후에는 보일러 상부측으로 이동하기 위하여 크레인으로 이송하였는데 관넬의 크기가 약 40 m × 20 m 정도로 커서 인양시 용접부에는 큰 벤딩 모멘트가 작용되었음을 알 수 있었다. 용접시공은 주로 1,2월에 시공된 관계로 추운날씨에서 진행되었고 가동중 손상위치는 USC보일러의 정면, 좌측 및 우측면 전반에 걸쳐 다수 발생되었다.

Failure Position

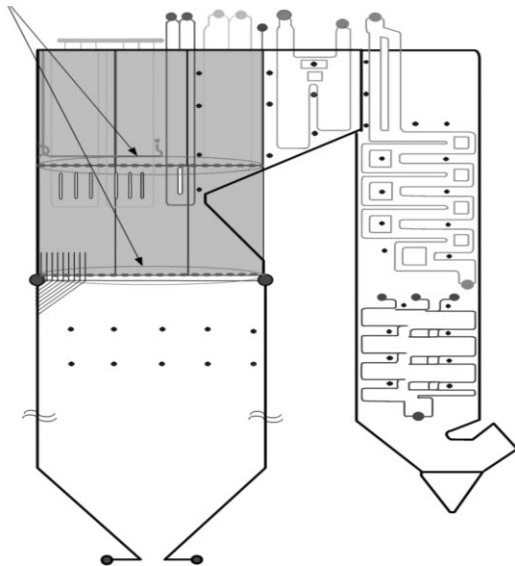


Fig. 6 Weld joint failure position in waterwall tubes of the USC coal power boiler.

Table 1 Risk causes in plant utility project

Material	Tensile strength (Min, MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
SA213 T22	415	30	167(max)
SA213 T12	415	22	167(max)

### 3.2 기계적 성질 및 화학성분

본 연구에서 인용한 SA213T22 소재는 80년도 초반에 국내에서 건설된 화력발전소 보일러에서 수냉벽 수관을 제외한 과열기 및 재열기 튜브와 배관에서 널리 사용되고 있으며 수소균열<sup>(4)</sup>과 재열균열<sup>(1)</sup>에 의한 손상이 일부 보고되기는 하였으나 석탄화력 보일러에서는 용접손상에 대한 문제는 크게 나타나지 않았다.

시험대상의 손상시험편의 규격은 외경이 38.7 mm이며 두께는 7.6 mm이고 수관의 소재인 SA213T22와 비교대상인 SA213T12의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 인장강도와 경도는 415 MPa 및 167 Hv으로 동일하나 상온 연신율은 각각 30% 및 22%로서 SA213 T22 소재의 연신율

Table 2 SA213 T12/22 Chemical compositions of the tube element (wt-%)

Material	C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S
SA213 T22	0.05-0.15	1.9-2.6	0.87-1.13	0.3-0.6	0.5 max	0.025	0.025
	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

Electrode dia(mm)	Preheat temp (°C)	Post weld heat treatment	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

Table 5 Influence of cooling rate on micro-structure and hardness of SA213T22<sup>(6)</sup>

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

이 더 크다는 것을 알 수 있다.

두 소재의 화학성분 비교는 Table 2에 나타내었다. 탄소 및 망간, 실리카, 인, 황 성분의 함유량은 동일하며 크롬과 망간 함유량이 차이가 있어 SA213 T22 소재가 비교적 고온에서 사용하는 소재임을 알 수 있다.

건설당시 수냉벽 수관인 SA213T22 소재를 용접 시 용접봉은 Table 3 에서 나타내었다. 용접규격은 ER90S-B3 을 사용하였으며 적용된 용접변수는 Table 4 에서 나타내었다. 용접봉 외경은 2.4 mm 를 사용하였으며 예열은 150℃ 이상 으로 가열하였고 후열처리는 적용하지 않았다. 용접시 사용전류는 170 ~ 180 A 범위 내에서 전압 10~16 V를 적용 하였고 용접속도는 6 ~ 15 cm/min, 용접 기법은 직선 운봉법을 이용하여 시공하였다.

### 3.3 소재 특성

SA213 T22 소재의 미세조직은 페라이트(ferrite)와 베이나이트(bainite)의 혼합조직이며 Table 5<sup>[6]</sup>에 나타내었다. 용융된 용접금속의 냉각속도가 급속

히 진행될 경우와 겨울철 용접에 의한 예열이 부적절한 경우에 베이나이트 점유비가 커지고 페라이트의 점유비는 적어지며 경도는 높아진다. 상온에서의 용접금속은 기본적으로 베이나이트 조직을 나타낸다.

SA213 T12 소재의 미세조직은 페라이트와 퍼얼라이트(pearlite)의 혼합조직이며 Table 6<sup>[7]</sup>에 나타내었다. 용융된 용접금속의 냉각속도가 급속히 진행될 경우와 겨울철 용접에 의한 예열이 부적절한 경우에 퍼얼라이트가 베이나이트 조직으로 변환되는 비율이 커지고 페라이트 점유비는 적어지며 경도는 높아진다. 상온에서의 용접금속은 기본적으로 베이나이트 조직을 나타낸다.

## 4. 수관손상 원인분석

### 4.1 거시적 검사

손상이 발생한 시험편에 대한 육안 검사결과는 Fig. 7에 나타내었다. 용접부균열은 Fig. 7(a)<sup>[8]</sup>와 같이 표면비드에서 횡단방향 균열이 발생되었고 균열위치는 용접이 종료된 지점에서 크레이터 균열 유형이 다수 관찰되었다. 또한 Fig. 7(b)<sup>[8]</sup>와 같이 이면비드 용접금속에는 횡단균열이 존재하였으며 Fig. 7(c)<sup>[8]</sup>와 같이 용접금속 내면에서 외면으로 관통하였다. 균열 위치는 수관 판넬의 상부 11시 ~ 1시 사이에서 발생되었다.

### 4.2 미시적 검사

#### 4.2.1 관찰방법

샘플튜브의 미세조직 관찰을 위해 시험편 연마

Table 6 Influence of cooling rate on micro-structure and hardness of SA213T12<sup>[7]</sup>

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



(a) Transverse and crater crack

(b) Back bead crack and transverse crack

(c) Crack propagation direction

Fig. 7 Macroscopic weld failure metal showing in water wall tubes.<sup>[8]</sup>

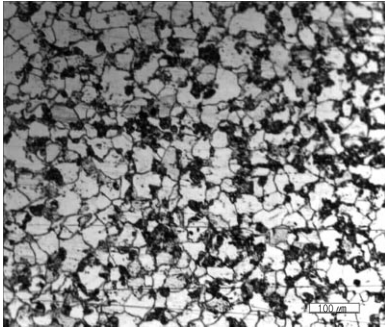
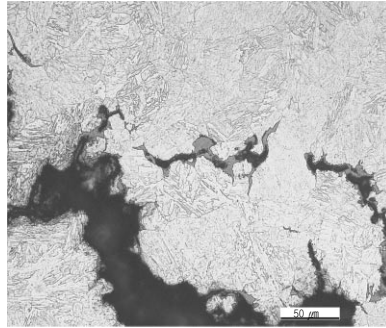
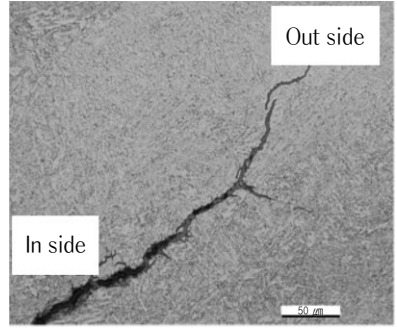


Fig. 8 Optical micrograph of T22 basemetal.<sup>[6]</sup>



(a) Root crack(martensite structure)



(b) Crack propagation direction

Fig. 9 Microstructure of failed samples showing in water wall tubes.<sup>[9]</sup>

(polishing) 후 2% 나이탈 부식액(nital etching)을 이용하여 4분 동안 부식하였고 검사장비는 금속현미경을 사용하였다.

#### 4.2.2 관찰결과

샘플튜브의 모재(base metal)를 Fig. 8<sup>[6]</sup>에 나타내었다. 모재는 전형적인 페라이트와 베이나이트의 혼합조직을 나타내고 있었으며 페라이트 점유비와 비교하여 베이나이트의 점유비가 커질수록 강도가 증가하며 고온에서 장기간 사용할 경우 베이나이트가 분해되는 열화현상이 나타나게 된다.

Fig. 9<sup>[9]</sup>에는 손상이 발생한 수냉벽 수관의 미시적인 조직을 나타내었다. 균열이 존재하는 지역의 미세조직은 Fig. 9(a)와 같이 기존 베이나이트 조직에서 마르텐사이트 조직으로 변환되어 용접 과정에서 급냉 현상이 발생되었음을 알 수 있었고 또한 균열은 Fig. 9(b)와 같이 튜브내면에서 외면으로 진행하였다.

손상지역 이면비드 주변에는 미세균열이 다수 발생되어 있어 손상 문제점이 광범위 하다는 것을 알 수 있었으며 균열 유형은 루트 및 크레이터 균열로 진행되었다. 손상 조직관찰 결과 마르텐사이트가 나타남에 따라 겨울철 용접과정에서 예열 불충분 또는 부적절한 시공이 이루어진 것으로 판단할 수가 있으며 미세한 균열이 다수 존재한 점을 감안하면 누설이 발생되지 않은 현장용접부에서도 동일한 문제점이 발생 할 수 있다고 예상 될 수 있었다.

#### 4.3 경도검사

##### 4.3.1 관찰방법

손상이 발생한 수냉벽 수관의 경도를 측정하기 위해 제작된 시험편을 Fig. 10에 나타내었다. 미소경도계(micro vickers)를 이용하여 3개의 손상 샘플을 튜브 내면에서 외면방향으로 1 mm 간격으로 이동하면서 측정하였다.

##### 4.3.2 측정결과

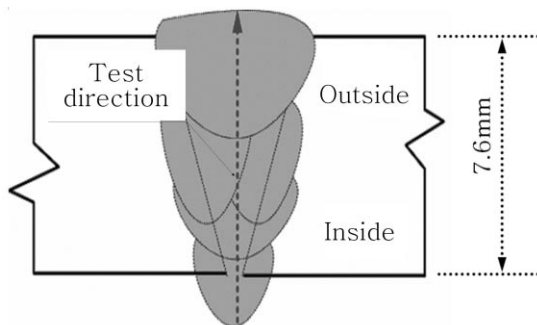


Fig. 10 Hardness test direction of the sample tubes.

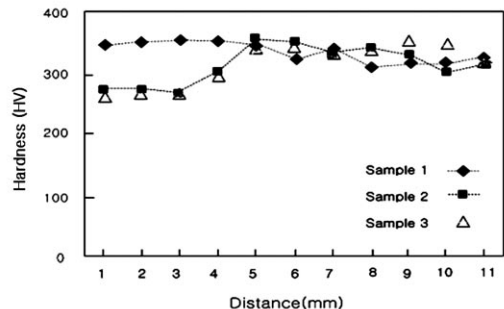


Fig. 11 Hardness test result of the sample tubes.

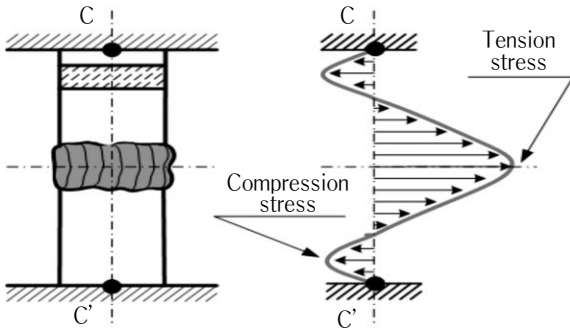


Fig. 12 Residual tension stress in weld metal.<sup>(10)</sup>

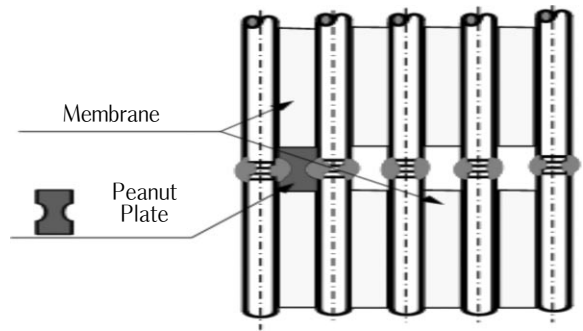


Fig. 13 Welding peanut plates.

용접금속 경도를 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 용접부 각층 별로 차이가 있었으나 280 ~ 350 Hv 정도로 높게 유지하여 Fig. 9(a)의 마르텐사이트 조직형성과 일치하였으며 초층 용접부의 높은 경도는 용접과정에서 예열이 불충분하였음을 시험결과에서 판단할 수 있다.

## 5. 용접신뢰성 향상방안

### 5.1 예열 방법개선

과열기 및 재열기의 코일수관 용접은 수관구조가 벤딩으로 제작되어 있어 구조상 용접 과정중 발생하는 용접부 팽창 및 수축이 자유스럽다. 따라서 용접 후 용접 금속 내부에 존재하는 잔류 인장응력이 비교적 적다고 할 수 있으나 수냉벽 수관용접의 경우 Fig. 12<sup>(10)</sup>에 같이 나타내었다. 상하지점(C-C') 고정 후 용접하는 구속맞대기 이음구조로서 용접 종료 후 냉각시에는 1.8 mm 정도 수축이 진행되어 용접 금속 내부에는 내적수축(internal rest-straint)에 의한 잔류인장 응력(residual tension stress)이 크게 부과되는 구조적인 특성을 가지고 있다.

과열기 및 재열기와 같은 코일 수관은 구조상 유연성으로 튜브정렬(fit-up)시 용접부 불일치가 존재하는 상황에서도 수관이동이 자유스럽기 때문에 용접부에 잔류 인장응력이 적게 작용하나 수냉벽 수관 경우 구조상 경직되어 약간의 불일치가 존재할 경우에도 용접부 정렬 과정에서 과도한 힘에 의해 인장응력이 용접부에 크게 작용하는 구조이다.

또한 수냉벽 수관의 맞대기 용접후에 멤브레인측 공간은 Fig. 13에 나타내었다. 멤브레인 밀봉은 반드시 필요로 하는데 밀봉편(peanut plate) 용접을 시행해야만 하며 보일러 내부에 유동하는 연소가스

의 외부 누출방지를 위해서 일반적으로 보일러 교차 용접(cross welding)을 시행할 수밖에 없는 구조로서 이에 따른 잔류응력이 용접부에 추가 작용 될 수밖에 없는 불리한 용접 구조를 가지고 있다.

용접금속에는 용접후 급냉이 발생하는 일반적인 문제점이 있어 기존 공장 제작시에 얻을 수 있는 표준조직을 얻기가 곤란한 상황이 존재한다. 따라서 용접전 예열시행이 필요로 하는 소재의 경우 반드시 예열 절차를 준수해야 한다. 수냉벽 수관은 일반 코일튜브와 비교하여 열전달 면적이 커서 냉각속도가 빠르고 현장 용접시 예열온도인 최소 149℃ 이상 유지하는데 불리한 구조이다. 이에 따라 전용 예열 장치를 사용하여 예열을 시행해야 하나 손상이 발생된 시험편인 SA213T22 소재 용접시에는 화염토치를 이용하였고 실제 용접시에는 규정된 예열온도 이하에서 용접이 진행되어 용접 시행후 용접금속이 정상조직인 베이나이트가 형성되지 못하고 취성이 높은 마르텐사이트 조직으로 변태하여 높은 경도가 유지된 점을 감안하면 예열관리가 미흡하였음을 알 수 있다.

따라서, 수냉벽 수관 용접시에는 규정온도 준수가 반드시 필요로 하며 기존 토치예열 방식 사용시 용접부에만 국부적으로 예열하는 방식에서 용접부 주변 수관에 넓은 면적에 걸쳐 예열하는 방법을 추천한다. 이러한 방식은 국부 예열 보다는 광범위한 면적에서 온도가 유지되기 때문에 급랭에 의한 조직 변태 문제가 적고 상기 용접후 냉각과정에서 발생하는 잔류 인장응력의 집중도 완화되기 때문에 상대적으로 신뢰성 있는 용접이 가능하다.

### 5.2 비파괴검사 강화

SA213T22 소재는 인장강도 90 ksi급 고장력강



이며 수냉벽 튜브용접에 적용시 응력이 집중되는 구조로서 수소균열과 재열균열에 의한 미세균열 발생이 용이한 점을 감안하면 비파괴검사 수량 및 시기, 종류 선택이 매우 중요하다.

이번 손상은 용접이 완료된 직후에 방사선투과 검사를 용접부 2개소당 필름 1매를 촬영하였는데 결함을 검출하지 못하였다. 따라서 최소한의 필름 선명도(sharpness) 확보를 위해서는 용접부 1개소에 필름 1매 촬영이 요구되며 검사시기는 용접 종료후 최소 48 시간 이상 경과 후에 시행하는 것이 필요하나 이를 준수하지 못하였다. 또한 결함의 종류가 미세균열인 점을 감안하면 비파괴 검사 결과 신뢰도 향상을 위해 초음파 검사를 부분적으로 병행하여 건전성 여부를 확인하는 것이 바람직하다.

## 6. 결론

손상이 발생하는 주요한 원인은 용접 경화능이 크고 수소균열과 재열균열에 민감한 소재특성과 구속 맞대기 이음구조로서 내적구속에 의한 용접금속 내부에 잔류인장 응력이 집중되는 구조적 문제점을 가지고 있으며 예열 및 겹침용접 그리고 부적절한 비파괴검사 시행으로 발생되었다.

수냉벽 수관 용접시 유사손상 재발방지를 위해서는 용접 시행전 예열준수가 반드시 필요로 하며 겹침용접 절차를 준수하기 위해 용접특성에 대한 용접사 사전교육 강화시행이 요구된다. 또한 용접부 건전성에 대한 정밀진단을 위해 비파괴 검사인 방사능투과검사를 기존에 용접부 2개소당 1매를 촬영하

는 방법에서 최소한 용접부 1개소당 1매로 강화하여 시행하는 것이 필요로 한다.

## 참고문헌

1. Nawrocki. J. G. 2001, The Stress-Relief Cracking Susceptibility of a New Ferritic Steel, Welding Journal, pp. 18~24.
2. Lee. H.S. 2008, Yonghung 1 Unit Boiler Tube Failure Report, Doosan Heavy Industries & Construction.
3. Yun. K.G. 2005, Welding, pp. 408~410, Il Jin Co., LTD.
4. Yun. K.G. 2005, Welding, pp. 201~205, Il Jin Co., LTD.
5. Ahn. J.S. 2007, Dangjin 1 Unit Boiler Tube Failure Report, Korea East-West Power Co., LTD.
6. EPRI . 2006, The Grade 22 Low Alloy Steel Hand book, pp. 12~14.
7. EPRI . 2006, The Grade 12 Low Alloy Steel Hand book, pp. 8~9.
8. Lee. H.S. 2004, Yonghung 2 Unit Boiler Tube Failure Report, Doosan Heavy Industries & Construction.
9. Kim. B.S. 2004, Yonghung 2 Unit Boiler Tube Failure Report, KEPRI.
10. Welding and Joint II, 2008, KWJS, pp. 14~16.