



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2018년 8월  
석사학위 논문

석탄화력 발전소용  
초임계변압(SOVR)보일러 수냉벽  
튜브 용접부의 열처리에 따른  
신뢰성 향상

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

김 선 인

석탄화력 발전소용  
초임계변압(SOVR) 보일러 수냉벽  
튜브 용접부의 열처리에 따른  
신뢰성 향상

Investigate the Influence of Post Weld Heat Treatment  
on Weld Characteristics of Water-Cooled Wall Tube  
Used in Stationary Once-Through Variable Pressure  
Reheat (SOVR) Boiler

2018년 8월 24일

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

김 선 인

석탄화력 발전소용  
초임계변압(SOVR) 보일러 수냉벽  
튜브 용접부의 열처리에 따른  
신뢰성 향상

지도교수 방 희 선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2018년 04월

조선대학교 대학원

용접접합과학공학과

김 선 인

# 김선인의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 특임교수 방한서 (인)

위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)

위 원 조선대학교 조교수 송국현 (인)

2018년 5월

조선대학교 대학원

## CONTENTS

List of Figures .....	III
List of Tables .....	V
Abstract .....	VI
1장. 서 론 .....	1
1 . 1 연구배경 및 목적 .....	1
1.1.1 연구 배경 .....	1
1.1.2 연구 목적 .....	1
1 . 2 연구의 필요성 .....	2
1.2.1 국내외 기술 현황 .....	2
1 . 3 소재의 특성 .....	3
1.3.1 기계적 성질 및 화학적 특성 .....	3
2장. 연구 방법 .....	5
2 . 1 실험 조건 .....	5
2.1.1 사용 재료 .....	5
2.1.2 용접 조건 .....	5
2.1.3 열처리 조건 .....	6
2 . 2 열처리 후 용접부 특성 .....	12
2.2.1 육안 시험 .....	12
2.2.2 경도 시험 .....	13

2.2.3 비파괴 검사 .....	13
2.2.4 미세조직 실험 .....	14
3장. 연구 결과 .....	15
3.1 소재의 손상 특징 .....	15
3.1.1 샘플의 기계적 특성 및 화학성분 .....	15
3.2 손상된 소재의 열처리 특징 .....	16
3.3 용접부 열처리 특성 평가 .....	27
3.3.1 열처리 Chart 검토 .....	27
3.4 용접부 단면 특성 .....	27
3.4.1 용접부 단면 검사 .....	27
3.5 열처리 후 용접부 특성 평가 .....	29
3.5.1 육안 시험 .....	29
3.5.2 경도 시험 .....	31
3.5.3 비파괴 검사 .....	35
3.5.4 미세조직 특성 .....	37
4장. 결 론 .....	44
참고문헌 .....	45

## List of Figures

Fig. 1 General PWHT Design	6
Fig. 2 General PWHT of Actual Furnace Boxes	7
Fig. 3 PWHT arrangement for SA213-T91 steel	8
Fig. 4 Test Sample Specimen	9
Fig. 5 General of PWHT Graph	10
Fig. 6 General PWHT of Tube Condition for 30min	10
Fig. 7 General of PWHT Graph	11
Fig. 8 General PWHT of Tube Condition for 120min	12
Fig. 9 Post Weld Heat Treatment Graph	16
Fig. 10 Weld-Joint Failure Position in Super-Heater Tubes of the UCS Coal Power Boiler	17
Fig. 11 Cracked joint section as received	18
Fig. 12 Close up of inside surface around weld and fracture	19
Fig. 13 SEM Fractography of flat area	21
Fig. 14 General Factography of rough fracture section	22
Fig. 15 Un-control PWHT Condition	26
Fig. 16 17 Actual PWHT Chart	27
Fig. 17 Metallographic Specimen 1 -additional 30 minutes PWHT	28
Fig. 18 Metallographic Specimen 1 -additional 30 minutes PWHT	29
Fig. 19 SA213-T91 & SA213-TP347H Weld Joints After Additional (30min)	30
Fig. 20 SA213-T91 & SA213-TP347H Weld Joints After Additional (120min)	30
Fig. 21 Hardness profile across T91 HAZ, Specimen 1 (30minutes additional PWHT)	32
Fig. 22 Hardness profile across T91 HAZ, Specimen 2 (120minutes additional PWHT)	33
Fig. 23 Radiography Test for 30min Film	36
Fig. 24 Radiography Test for 120min Film	36
Fig. 25 Microstructures of T91HAZ immediately adjacent to fusion	38

Fig. 26 General micro-structures of TP347H Base Metal ..... 39

Fig. 27 Microstructure of TP347H immediately adjacent to fusion  
line ..... 40

Fig. 28 General microstructures of weld metals, additional  
30min ..... 42

Fig. 29 General microstructures of weld metals, additional  
120min ..... 43

## List of Tables

Table.1 chemical composition of the welding rod element(Wt-%) .....	5
Table.2 Welding Parameters_(WPS & PQR) .....	6
Table.3 The tolerance of alignment.(ASME Sec.I PW-39) .....	13
Table.4 Mechanical Properties of the tubes(ASME Sec II) .....	15
Table.5 ASME Sec I Table PW-39 Mandatory Requirments for Post Weld Heat Treatment .....	23
Table.6 Hardness Test Result (SA213-T91) Additional 30min .....	34
Table.7 Hardness Test Result (SA213-T91) Additional 120min .....	34
Table.8 Hardness Test Result (SA213-TP347H) Additional 30min .....	35
Table.9 Hardness Test Result (SA213-TP347H) Additional 120min .....	35

## ABSTRACT

### Investigate the Influence of Post Weld Heat Treatment on Weld Characteristics of Water-Cooled Wall Tube Used in Stationary Once-Through Variable Pressure Reheat (SOVR) Boiler

Kim Sun-In

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

CO-Advisor : Prof. Bang, Han-Sur, Ph.D.

Department of Welding and Joining Science  
Engineering,

Graduate School of Chosun University

In Central and South America, the cheapest coal in Stationary Once-Through Variable Pressure Reheat (SOVR) boiler can generate power around 350 MW, steam of 5000 T/H and pressure of 250 MPa. SOVR boilers are being built and operated, and large-scale SOVR boilers will continue to be built in Central and South America. In particular, Cr-Mo steels are widely used to improve the heat resistance, wear resistance and corrosion resistance of the power plant internal structures such as the re-heater tube which works at high temperature and high-pressure conditions. However, joining of re-Heater tubes with retaining high tensile strength is a crucial issue.

The purpose of this study is to investigate the effect of heat input in gas tungsten arc welding (GTAW) on the appearance of weld cracks due to improper bead shape geometry and post-weld heat treatment. Hardness test, chemical analysis, non-destructive test and post-heat treatment are performed for in detail analysis.

In the present work, Martensitic steel SA213-T91 was welded by GTAW process. No defects were observed in the welded parts, and the condition of back bead weld was also excellent. The heat treatment was performed for both specimens. No external defects or internal defects were found with no evidence of localised high-temperature exposure. Also, inside and outside of the tube confirmed that there was no deformation due to stress

relaxation or exposed to air during long-time heat treatment and that no metal surface was oxidised. The metal biopsy test of both specimens did not show any microscopic cracks in the heat affected zone and the base metal, and both samples were free from hydrogen embrittlement cracks after post weld heat treatment (PWHT). The specimens which passed the visual inspection after the heat treatment was subjected to RT Test based on ASME Sec V.

Pendant Super-Heater for the water-cooled wall of SOVR Boiler was manufactured by 9% Cr-1Mo SA213-T91 Steel by heat treating specimens at 720°C~750°C. The PWHT for an additional 120 minutes was considered to be safe as it eliminated the lamination defect formed due to work hardening in the structure. The PWHT showed the reduction of the hardness of the welds, HAZ, and base metal of SA213-T91 steel. It is therefore considered that the post-weld heat treatment temperature is required to be 730°C ~ 750°C or more to lower the hardness of the weld metal and HAZ.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

### 1.1.1 연구 배경

중남미 국가에서는 경제 개발 목적으로 낙후된 전력사정을 강화하기 위하여 싼 값의 석탄을 이용, 발전소 건설을 하여 값싼 전력 공급 목적으로 발전 용량을 극대화한 발전용량 350MW, 증기량 5000T/H, 압력 250Mpa급, 초 임계변압(SOVR) 석탄화력 보일러가 운영되고 있다. 향후 지속적으로 온도와 압력이 상승된 대용량 SOVR 보일러가 중남미 지역에 많이 건설될 예정이다. 특히 건설되는 화력 발전소의 내부의 구조물의 용접부에 경우 높은 고온 및 고압의 상태로 인하여 중요 성능 요건인 내열성, 내마열성과 내식성을 증가시키기 위해 Cr-Mo 성분을 사용하는 강재가 널리 이용되고 있다. 발전 효율 향상과 이산화탄소 배출량의 저감에 효과적인 PC 보일러의 재료분야 기술개발은 고온강도, 내산화 및 내부식성이 우수한 과열기 재료, 고온강도 및 피로 강도가 우수한 Headers, Pipes 재료, 그리고 우수한 용접성과 높은 고온의 인장강도를 갖는 Re-Heater Tubes 재료 개발이 핵심적인 사항이다. [1]

또한 SA213-T91 재료는 발전소의 Super-Heater Tube 용 즉, 500~600°C 온도에서 사용하기 위하여 9Cr-1Mo 첨가하여 고온 사용중에 Cr-Carbide 석출을 이용하여 본 재료를 사용하는 목적으로 개발되었으나 최근 현장에서 경험하는 일부 엔지니어의 경우 본 자재의 지식 부족으로 인한 부적절한 예열, 빠른 용접속도, 층간 온도, 높은 입열량, 잘못된 용접봉 선정등의 그리고 후열(Post-backing), 열처리 등과 같은 잘못된 열관리로 인하여 수소 취성균열(I.G Crack), Creep 파괴, 기타 파괴가 최근 빈발하고 있다. [1]

### 1.1.2 연구 목적

본 연구에서 목적은 가스-텅스텐 아크용접(GTAW) 용접 중 부적절한 열관리 또한 기하학적인 용접 내부/외부 Bead 관리로 인한 Notch 발생, 부적절한 열처리 후 현장에서 발생된 Crack Sample을 확인하여 파괴된 부분의 외관검사 경도시험, 화학분석, 비파괴시험 및 후열처리 특성을 파악하고, 또한 그 문제점 확인하여 문제

점을 고찰 및 파악하여 발전소 건설 그리고 운영 과정에서 갑자기 경험하지 못한 용접부의 균열 발생을 낮추어 또한 발전소 운영 중에 발전소에 심한 타격을 주지 않기 위하여 본 내용을 저술하였다. 이를 토대로 발전소 운영 기간 중 설비유지 과정에서 보수 시 신뢰성 확보하고자 한다.

## 1.2 연구의 필요성

### 1.2.1 국내외 기술 현황

국내의 화력 발전소의 가동 조건은 미국, 일본, 유럽의 선진국들의 가동 조건에 비하여 온도와 압력이 낮다. 따라서 향상된 에너지 생산 효율을 위해서는 앞으로 계획 중이거나 현재 건설 중인 발전소의 가동 온도와 압력을 선진국 수준으로 증가시켜야 한다. 그러나 국내에서는 최근 외국에서 개발된 초임계압 발전 장비용 신소재 합금에 대한 각종 고온 물성치 데이터가 없음은 물론, 고온에 노출된 재료에 발생하는 산화막의 특성과 이들의 정량적인 평가에 관한 체계적인 연구가 꾸준히 진행되지 못하여 기초적인 수준에 머물러 있는 실정이다. 발전 장비는 고온에서 기동, 사용, 정지를 반복하므로 고온피로, 크리프, 산화에 대한 평가가 매우 중요하다. 가혹한 가동 조건에 의하여 발전장비 구조물의 내·외부에는 여러결함이 발생하여 균열이 성장하며, 파괴의 원인이 된다. 국외에서도 열효율의 향상을 위하여 작동 온도와 압력을 계속 높여 설계, 제작함으로써 산화가 발생하므로 관련 연구를 시작하고 있으므로 국내에서도 산화특성 평가에 관한 종합적인 연구가 활발히 진행되어야 한다. 금속이 산소와 반응하여 금속 표면에 산화막이 생성될 때 크리프 과정을 살펴보면, 응력의 발생 또는 해소 양상이 산화막의 생성 특성, 생성 속도, 산화막 두께 등에 의해 영향을 받게 된다. 또한 고온 산화 분위기에서 하중이 가해졌을 때, 금속 표면에 산화물을 생성하게 되면 산화된 위치는 비산화 영역에 비해 강도가 약해져 균열의 생성 위치가 되고 균열이 성장하게 된다. 보통 쉽게 산화가 발생하는 고온 조건에서 피로 수명은 감소하며, 균열 성장 속도는 증가한다고 알려져 있다. 초기 고 Cr(8~14%Cr) 페라이트계 내열강은 1940년경부터 영국에서 가스터빈용 디스크, 증기 터빈 블레이드, 비행기의 제트 엔진 등에 사용된 후, 많은 발전을 이룩하여 주로 고온, 고압 공정이 요구되는 곳에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 페라이트계 강은 크리프 파단 강도 및 산화, 부식 저항성에 따라 0.5~1%Cr, 2.25~3%Cr, 9~12%Cr계의 3 가지 강종으로 구분되고, 용도에 따라 보일러(파이프 및 튜브용)와 터빈 로터용으로 구분한다. 3%Cr 이하의 강은 산화, 부식 문제 때문에 593℃ 이상에서 사용할 수 없으므로 USC 화력 발전소용 페라이트계 재료에 대한 연구는 주로 9~12%Cr계 강에 집중되고 있다. 고 Cr강은 저합금강에 비해 내산화성, 내부식성이 우수하며, 오스테나이트계 강에 비해 비교적 저렴한 가격,

낮은 열팽창계수, 높은 열전도도, 높은 열 피로 저항성 등의 여러 가지 장점을 가지고 있다. 현재 초초 임계압 발전 장비 재료로 최근에 외국에서 개발되어 국내 발전소 건설에 도입되어 이용될 가능성이 큰 P92, P122 등 내열합금강에 대하여는 고온에서의 산화에 대한 연구가 산발적이며 체계적인 연구가 매우 부족한 상태로서, 새로운 재료의 도입에 따른 재료 특성 데이터는 모두 외국의 데이터를 그대로 사용하여야 할 실정이다. 기존자료는 주로 논문, 기술보고서 등으로서, 기존 연구는 발전설비의 기계적 성질에 주안점을 두고 있으며, 모재조직 (결정립 형상과 크기, 석출물)이 미치는 영향, scale 조직의 물성변화, void 형성기구, scale 성장속도 등의 연구가 부족하다. 고온방식은 소재의 표면에 성장속도가 느린 보호피막을 형성시켜 gas분위기와 모재를 분리시킴으로써 모재가 보호되도록 하여야 하며, 부식피막의 성장은 양이온(M<sup>2+</sup>)의 outward 확산이나 음이온(O<sup>2-</sup>)의 inward 확산에 의해 지배되므로 부식기구에 대한 정확한 조사가 요구되지만, 관련 연구와 고온 부식저감 대책 기술에 관한 연구는 아직까지 초보적 실정이다. 현재, 외국에서 개발된 초초임계압 발전 장비용 신소재 합금인 P92 강이나 P122 강들을 수입하거나, 국산화하여 차세대 발전소 건설에 이용하고 있거나 계획하고 있다. 그러나, 이런 신소재 합금에 대한 각종 고온 물성치 데이터가 양과 질의 면에서 빈약한 실정이다. 따라서, 고온에 노출된 재료에서 발생하는 산화막의 특성과 미세조직의 변화 및 이들 인자들이 재료의 수명에 미치는 정량적인 평가에 관한 체계적인 연구가 필요하다. [3]

## 1.3 소재의 특성

### 1.3.1 기계적 성질 및 화학적 특성

본 연구에서 인용한 9Cr-1Mo(ASTM\_A213-T9)강은 低 Cr-Mo 합금강 중 최고 허용응력 (Allowable Stress)을 갖는 2¼Cr-1Mo강(SA213-T22)을 상회하는 고온강도를 지니고 있으며 내 산화성도 우수하지만, 용접 시 균열이 자주 발생되어 현재는 사용이 중단된 상태이다. [2]

SA213-T91강은 위의 9Cr-1Mo(SA213-T9)강을 기원으로 하고 T9강에 주요 합금원소인 바나듐(V), 니오븀(Nb) 등을 첨가하여 탄화물을 석출시켜 강도를 강화시킨 합금으로 개량형 9%Cr강 또는 Super 9%Cr-Alloy라고 한다. T91 강은 Ferrite-Martensite 계에 속하는 합금강으로 재료의 성분은 Cr량이 8~14%까지의 각종 Ferrite 계 강과 TP-304, 316H 등의 Austenite계 Stainless 강 및 Ni 계 저 합금강 등의 여러 재료의 화학적 성분을 면밀히 연구하여 최적의 조건으로 결정된 강으로써 550 ~ 600°C에서의 고온강도가 종래의 T9 강이나 T22 강의 약 2배로써 TP-

304H와 거의 비슷한 고온강도를 갖추고 또한 용접성도 매우 우수한 것으로 알려져 있다. [2]

따라서 튜브의 두께를 감소시킬 수 있어 기동, 정지 및 부하 변동 시 열팽창이 감소하므로 열 피로에 의한 수명감소를 예방할 수 있다. SA213-T92강 역시 T9(9Cr-1Mo) 강을 기원으로 하고 있으며 합금 원소로서 탄소(C), 바나듐(V), 니오븀(Nb)등 탄화물 생성원소와 몰리브덴(Mo) 및 텅스텐(W)의 고용강화 원소를 적정화하여 고온강도(Creep 강도)를 향상시킨 우수한 특성을 지니고 있다. [2]

이러한 고 크롬 합금강(High Chromium-Alloy Steel) 기계적 특성은T22/23에 비하여 Cr함량 증가로 개선된 특성을 나타내며 특히 높은 인장강도, 크리프 특성 및 부식에 대한 저항성, 흑연화에 대한 저항성이 높다. [2]

## 제 2 장 연구 방법

### 2.1 실험 조건

#### 2.1.1 사용재료

본 연구에서 사용되는 소재는 9Cr-1Mo 조성의 Tempered-Martensite 계를 사용하여 실험 하였고, SA213-T91 강재의 경우 부적절한 열처리로 인하여 HAZ 경계의 경도값이 높고, 잔류 Martensite가 높아 취성파괴의 손상을 예방 할 수 있는 주요 인자인 잔류응력 최소화를 위해 위해서 본 연구에 사용하였다, 이 소재들의 경우 고온 및 고압에서 아주 안정적인 기계적인 성질을 유지하고, 또한 고온의 크리프 강도가 좋은 재질이다. ASME Sec II Part A Tube 규격인 Size OD 50.8 x 두께 7.9mm의 SA213-TP347H와 Size OD 50.8 x 두께 10.6mm의 SA213-T91 소재를 용접에 실험하였다.

#### 2.1.2 용접 조건

(가) 실험 용접에 사용된 용접봉은 화학 성분함량이 72.4 %의 Ni, 20.0 %의 Cr, 3.0 %의 Mn, 2.2 %의 Nb 및 0.3% Ti 을 사용하였고, 화학 성분은 ASME Code Sec II Part C 에 규정된 ERNiCr-3 Welding Rod 용접봉 성분과 일치하는 용접봉을 확인 하였다. (Table.1 참고)

Table.1 chemical composition of the welding rod element (Wt-%)

ERNiCr -3	Mn	P	Si	Cu	Ni	Ti	Cr	Nb+Ta
(ASME Sec II Part C)	3.0	0.004	0.09	0.01	72.4	0.42	20.0	2.46
	2.5~3.5	≤ 0.03	≤ 0.50	≤ 0.50	≤ 67.0	≤0.75	18.0~22.0	2.0~3.0

(나)이음부 형상은 본 용접실험에 알맞은 이음부 형상인 전형적인 V형 개선을 이용한 맞대기 조건으로 실험을 하였다. 용접 방법으로는 GTAW 용접 수행 하였으며, 용접 조건은 용접 절차 사양서 아래에 나와있는 GTAW 방법으로 용접으로 실험하였다. (Table.2 참조)

Table.2 Welding Parameters\_(WPS)

Preheat temp(°C)	Post backing temp(°C)	P.W.H.T	Current (A) Range	Volt Range	Tev.Speed (cm /min)
Min. 205°C (Only15E)	300°C±30°C X Min.2Hr	750°C ±10°C	100~230	12~20	5~18

### 2.1.3 열처리 조건

(가)열처리 박스 설계는 아래의 Fig.1 그림과 같이 고안한 도면으로 Local Post Weld Heat Treatment 실험했고, 열이 외부로 누출 되지 않은 구조로 하였다. 열전대 패드 위치는 최대한 용접부 샘플 근처에 위치 하였다. 열전대, 열전대 모니터링 선의 경우 열관리를 최대한 끌고루 하기 위해 각각 5개 및 4개로 설계 적용되는 조건으로 실험하였다.

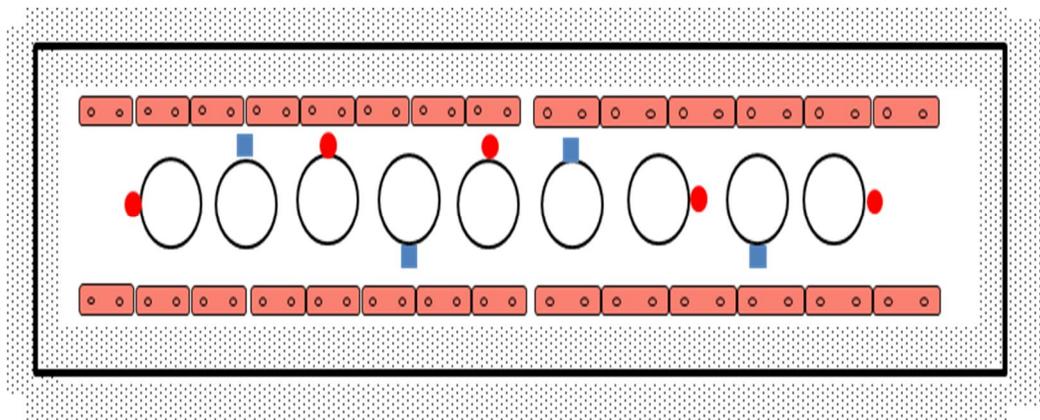
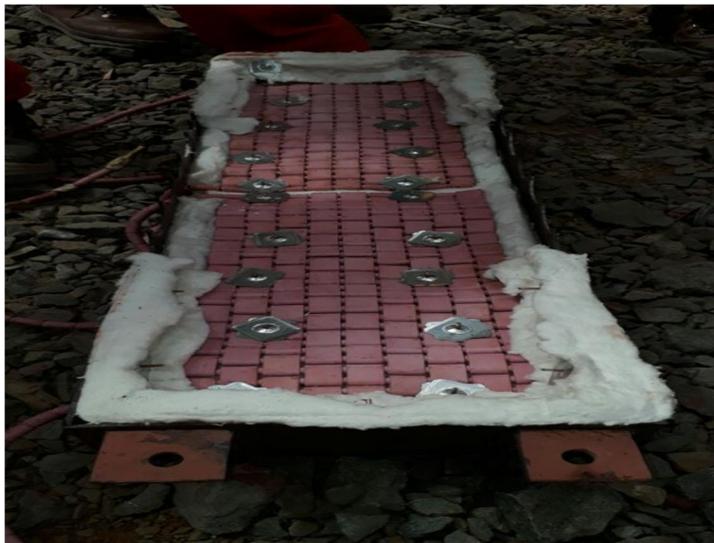


Fig.1 General PWHT Design

(나) 열처리 실험은 아래의 Fig.2 사진과 같이 실제 열처리 박스를 도면과 동일하게 제작 하고, 설계 도면과 같이 열이 외부로 방출되지 않도록 Insulation 시공, 그리고 Heating PAD을 실험하였다. 외부 또한 대기로의 열 방출을 방지하기 위하여 단열재를 외부에 추가로 단열재를 시공하여 열처리 수행을 실험 하였다.



(a) Furnace Boxes of Outside



(b) Furnace Boxes of Inside

Fig.2 General PWHT of Actual Furnace Boxes

(다) 실제 열처리 수행 방법은 아래 Fig.3 표와 같은 PWHT 그래프 형태로 시편을 열처리 박스에 조립 후 Tempering PWHT가 안정하게 실험하였다. 열처리 시 용접 변형은 Martensite 상태에서 "as-designed" 미세 구조이며, 경화된 HAZ에서의 수소 취화 균열의 높은 민감성 때문에, Heating 및 Cooling 시 온도가 제어 관리하였다. 열처리는 아래의 그래프 형태로 용접 전 예열, 용접 후 수소 베이킹, 그리고 용접 완료 후 24Hr 이내에 PWHT 실험 하였다.

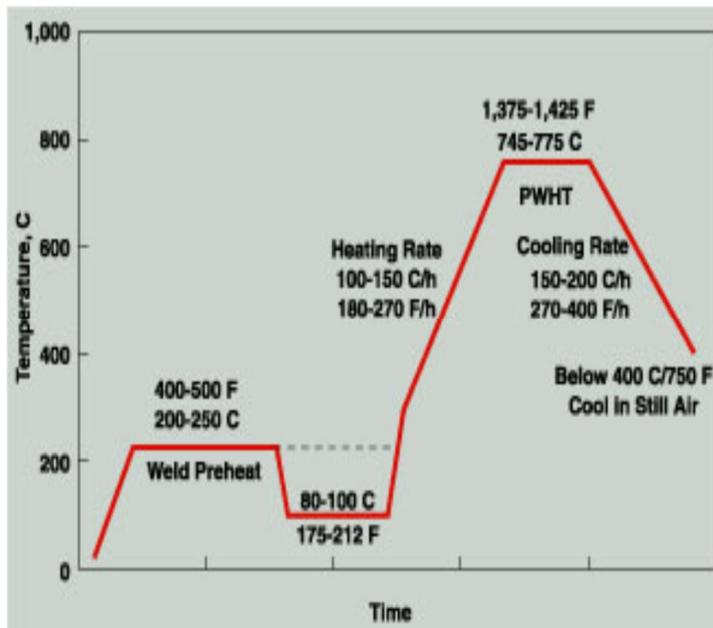


Fig.3 PWHT arrangement for SA213-T91 steel

(라) 아래의 Fig.4 사진과 같이 열처리 수행 전 설계 도면과 일치하게 열전대 센서 및 모니터링 센서를 각각 추가 30분 열처리 및 120분 열처리 수행할 샘플 용접부 및 모재에 직접 부착했고, 열처리 Sample Mock-up Box를 도면과 같이 확인 하였다.



Fig.4 Test Sample Specimen

(마) 열처리 수행 Holding time 시간 조건은 아래와 같이 2가지 방법으로 열처리를 수행하였고, 각각의 열처리 조건은 아래 (바), (사)와 같이 실험하였다.

(바) 첫번째 열처리는 추가 30분 온도 조건으로 아래의 Fig.5 그림 PWHT 그래프와 같이 ASME Sec I PW-39 Table에 규정된 값보다 더 많은 시간을 적용 및 수행하였고, 열처리 조건은 아래와 같이 적용 실험 하였다.

- 1) Holding Temperature : 720~750°C
- 2) Holding Time : 30min
- 3) Cooling Rate : 250 °C
- 4) 아래 Fig.6 사진은 실제 열처리 작업 수행 사진으로 Insulation 시공을 하여 Box 외부에 Heat Loss 발생하지 않도록 하였다.

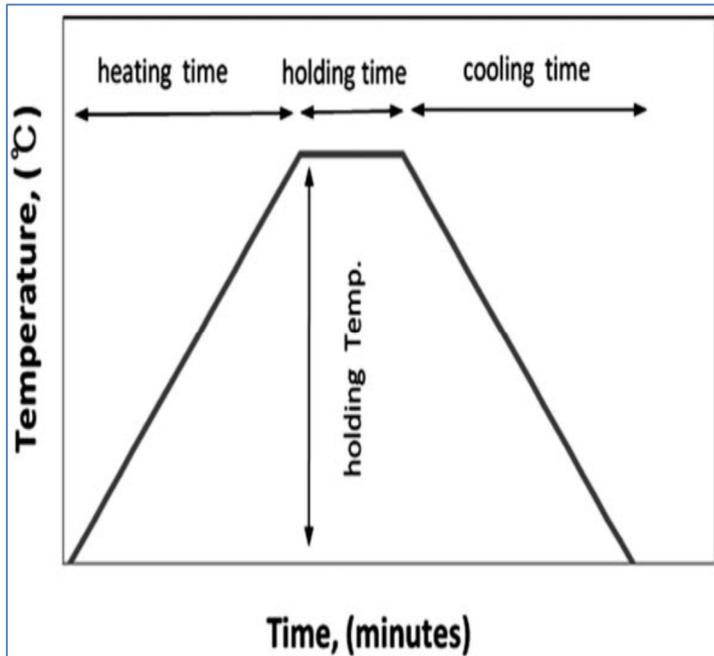


Fig.5 General of PWHT Graph [1]



Fig.6 General PWHT of Tube Condition for 30min

(사)두번째 열처리는 추가 120분 온도 조건으로 아래의 Fig.7 그 PWHT 그래프와 같이 ASME Sec I PW-39 Table에 규정된 값보다 더 많은 시간을 적용 및 실험하였고, 열처리 조건은 아래와 같이 적용 확인 하였다.

- 1) Holding Temperature : 720~750 °C
- 2) Holding Time : 120min
- 3) Cooling Rate : 250 °C
- 4) 아래 Fig.8 사진은 실제 열처리 작업 수행 사진으로 Insulation 시공을 하여 Box 외부에 Heat Loss 발생하지 않도록 하였다.

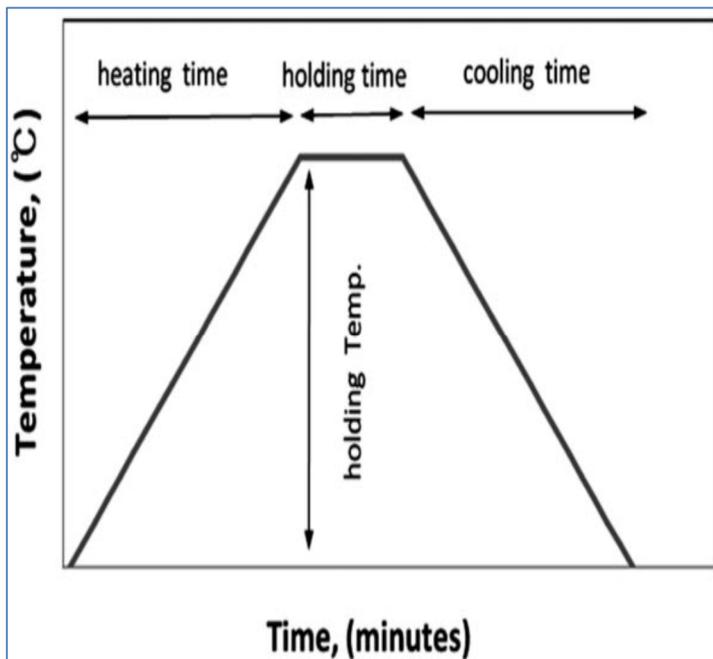


Fig.7 General of PWHT Graph [1]



Fig.8 General PWHT of Tube Condition for 120min

## 2.2 열처리 후 용접부 특성 고찰

### 2.2.1 육안 시험

육안검사의 경우 ASME Sec I PW-33 Visual Inspection 에 따라서 검사를 수행하고, 검사 기준은 아래 및 Table.3 표 및 아래의 1) 조건과 같이 실험에 확인하였다.

- 1) All weld bevels and weld surfaces shall be free from cracks, porosity, slag inclusions and other Weld grooves and adjacent parent metal shall be clean and free from paint, oil, dirt, scale, oxides and other foreign material detrimental to the integrity of the weld.

Table.3 The tolerance of alignment (ASME Sec. I PW-33). [7]

ALIGNMENT TOLERANCE OF SECTION TO BE BUTT WELDED [ SHELLS AND VESSELS (INCLUDING PIPE OR TUBE USED AS A SHELL) ]		
Section	Direction of Joint in Cylindrical Shells	
Nominal Thickness(mm)	Longitudinal (mm)	Circumferential (mm)
Up to 13 incl.	1/4 t	1/4 t
Over 13 to 19 incl.	3	1/4 t
Over 19 to 38 incl.	3	3/16 (5)
Over 38 to 50 incl.	3	1/8t

### 2.2.2 경도 시험

500g 하중을 사용하는 비커스 미세 경도기로 시험편 용접부의 횡단면에서 절단 후 미세 연마를 및 경도 시험을 확인하였다. SA213-T91 튜브의 HAZ부 경도는 2 샘플 시편 모두 Weld Pool로부터 약 1.5mm~2mm 내에서 측정된 결과를 측정하였고. 경도 시험 후 경도 아래의 합격기준으로 경도시험을 고찰하였다.

#### (가) ACCEPTANCE CRITERIA (합격기준)

For tubes;

Max hardness value – Weld metal : 240Hv(P-No : 1, 3 and 4)

Max hardness value – Base metal : 240Hv(P-No : 1, 3 and 4)

Max hardness value – HAZ : 240Hv(P-No : 1, 3 and 4)

For P-No : 5 and 6 Max hardness value for Weld Metal, base metal and HAZ is 280Hv [9]

### 2.2.3 비파괴 시험

열처리 후 방사선 투과시험(RT)은 ASME Sec.V 에 따라서 RT Test 시험하고, RT Room 에서 방사선 투과시험 촬영 및 ASME Sec I 에 따라서 방사선 필름을 판독한 결과는 아래와 같은 합격기준으로 판독 고찰하였다. 용접부에 대한 방사선투과 시험 결과는 다음과 같은 결함의 유형의 지시가 있는 경우 불합격으로 확인하였다. [7]

- (a) Any indication characterized as a crack or zone of incomplete fusion or penetration; (균열, 융합불량, 용입 부족을 나타내는 지시)
- (b) Any other elongated indication on the radiograph which has a length greater than:
  - ①  $\frac{1}{4}$ in.(6mm) for t up to  $\frac{3}{4}$ in.(19mm), inclusive;
  - ②  $\frac{1}{3}t$  for t from  $\frac{3}{4}$ in.(19mm) to  $2\frac{1}{4}$ in.(57mm), inclusive;
  - ③  $\frac{3}{4}$ in.(19mm) for t over  $2\frac{1}{4}$ in.(57mm)

Where t is the thickness of the weld excluding any allowable reinforcement. For a butt weld joining two members having different thicknesses at the weld, t is the thinner of these two thicknesses. If a full penetration weld includes a fillet weld, the thickness of the throat of the fillet shall be included in t.

(다음 길이를 초과하는 가늘고 긴 지시(elongated indication))

- ① 두께(t)가  $\frac{3}{4}$  in.(19mm) 이하 :  $\frac{1}{4}$  in.(6mm)
- ② 두께(t)가  $\frac{3}{4}$  in.(19mm) -  $2\frac{1}{4}$  in.(57mm) : 두께의  $\frac{1}{3}$  길이
- ③ 두께(t)가  $2\frac{1}{4}$  in.(57mm) 초과 :  $\frac{3}{4}$  in.(19mm)

## 2.2.4 미세조직 실험

열처리 실험 후 용접부 특성을 평가하기 위해 시험편을 종 방향으로 절단한 후에 금속 조직 시험편을 용접 Butt Joint부터 시험편 준비하고, SA213-T91 소재의 경우 용접부, 열영향부(HAZ), 모재의 미세조직 구조를 나타내기 위해 화학적 부식 작용을 이용한 10% nital solution 을 실험에 확인하였다.

SA213-TP347H 경우 조직이 오스테나이트 조직구조로서 위의 마르텐사이트 조직구조와 같은 Etching 적용할 경우 화학적 부식이 어려우므로 10% oxalic acid solution을 사용하여 전해식으로 etching 실험하고, SA213-TP 347H Tube 모재, 용접부 그리고 열영향부위의 미세조직 구조를 실험하였다. 용접부의 미세조직을 관찰하기 위해 광학 현미경을 사용하여 용접부의 조직 특성을 고찰하였다.

## 제 3 장 연구 결과

### 3.1 소재의 손상 특징

#### 3.1.1 샘플의 기계적 특성 및 화학 성분

손상된 Final Super-Heater Tube 샘플은 화학 발광분광 분석법을 사용하여 손상된 Final Super-Heater 모재의 화학성분을 실험하였고, 아래와 같이 결과 값을 확인하였다. 결과는 해당 ASME Code Sec II Part A의 SA213-T91 화학 성분과 함께 구성 사양은 Table.4에 결과를 확인하였다. SA213-T91 Tube의 화학적 조성은 ASME Code Sec II Part A의 SA213-T91 일치하는 결과를 확인하였고, 또한 SA213-TP347H Tube 도 ASME Code Sec II의 화학적 조성 Specification과 동일한 결과 값을 아래 표와 같이 확인 하였다.

Table.4 Mechanical Properties of the tubes (ASME Sec II)

Element	T91 Tube	SA213-T91	TP347H	SA213 TP347H
Carbon	0.11	0.07~0.14	0.04	0.04~0.10
Silcon	0.36	0.20~0.50	0.30	1.00 max.
Manganese	0.47	0.30~0.60	1.59	2.00 max.
Phosphorus	0.016	0.020 max.	0.029	0.045 max.
Sulphur	0.003	0.010 max.	0.005	0.030 max.
Chromium	8.29	8.0~9.5	17.56	17.0~19.0
Nickel	0.15	0.40 max.	9.00	9.0~13.0
Molybdenum	0.96	0.85~1.05	0.23	Not specified
Aluminium	<0.0005	0.02 max.	0.009	Not specified
Copper	0.11	Not specified	0.39	Not specified
Cobalt	0.02	Not specified	0.11	Not specified
Titanium	0.003	0.01 max.	0.003	Not specified
Niobium	0.093	0.06~0.10	0.45	0.32~1.10

Vanadium	0.20(approx.)	0.18~0.25	0.005	Not specified
Nitrogen	Not specified	0.030~0.070	Not analyzed	Not specified

### 3.2 손상된 소재의 열처리 특징

(가) 손상 샘플의 규격 및 PWHT 온도 조건

균열이 발생된 이종금속 용접 Sample 열처리 수행 조건으로서 SA213-TP347H 온도 조건이 아닌 SA213-T91 온도 조건으로 열처리를 수행하였고, 아래의 그림 Fig.1 표와 아래의 (1) Data는 열처리 온도임을 확인 하였다.

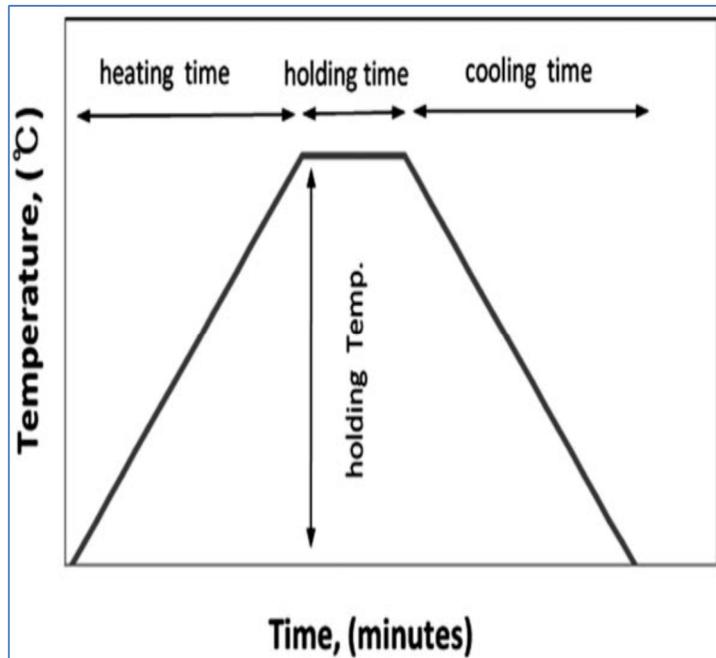


Fig.9 Post Weld Heat Treatment Graph [1]

(1) 위의 열처리 그래프의 Data를 간략하게 정리하였다.

1.1) Heat Rate : 250 °C & Holding Temperature : 720~750°C

1.2) Holding Time : 15min & Cooling Rate : 250 C

(나) Pendent Super-Heater Tube 손상위치

Super-Heater Tube의 균열이 발생된 용접부 위치는 그림 Fig.10 과 같이 공장에서 제작된 Pendent Super-Heater 군을 현장에서 용접 시공한 용접부로서 신규 건설 및 운영중인 SOVR 보일러의 정면, 좌측 및 우측면 전반에 걸쳐 건설 과정에서 다수 손상이 발생됨을 현장에서 확인하였다.

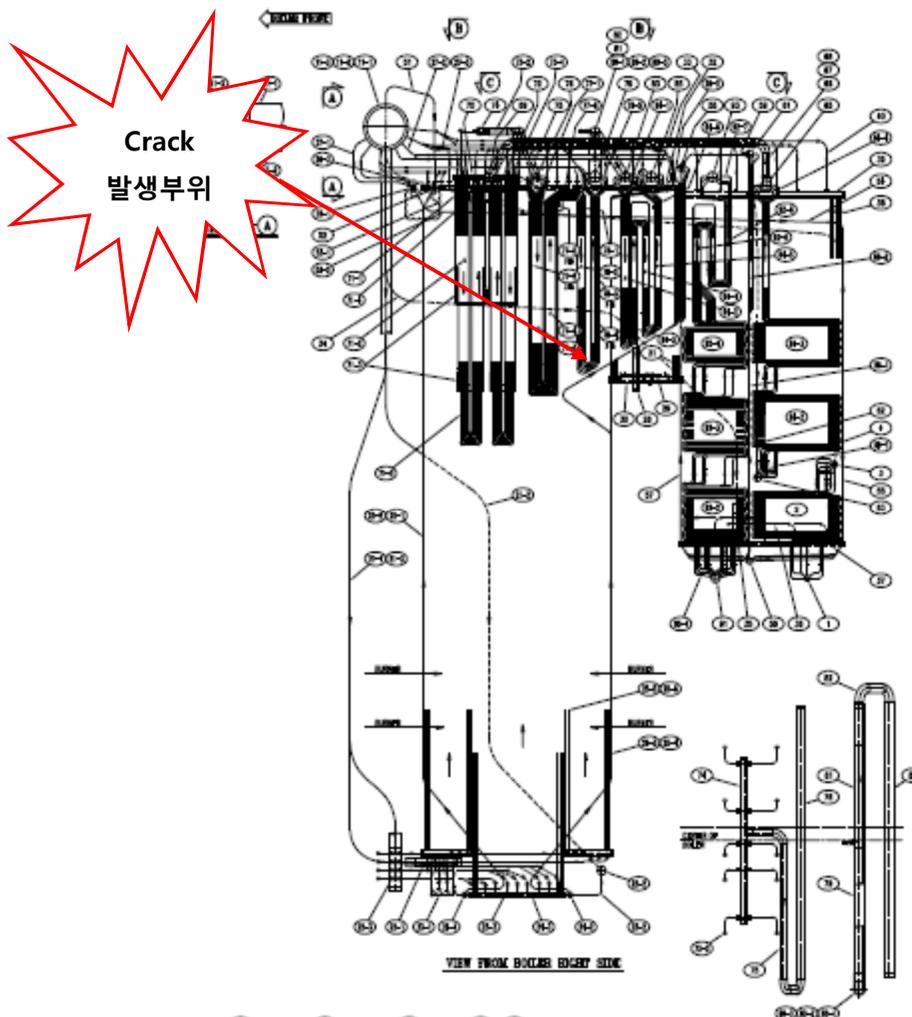


Fig.10 Weld-Joint Failure Position in Super-Heater Tubes of the

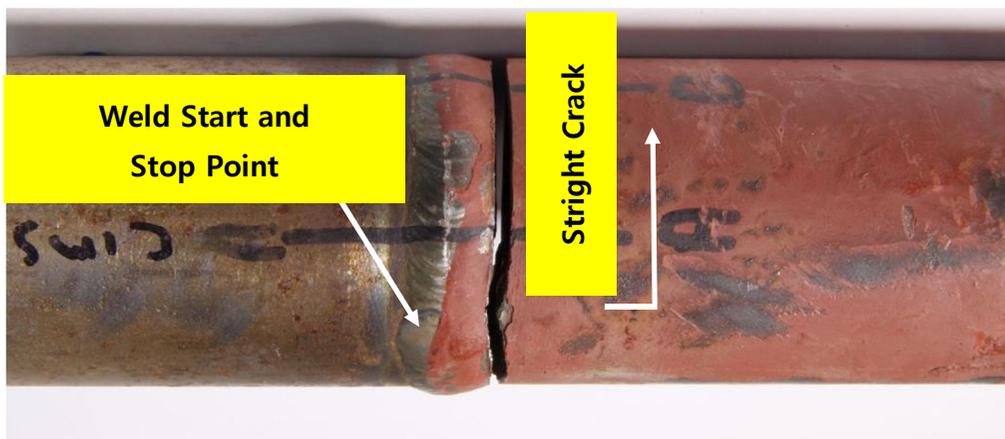
## UCS Coal Power Boiler

### (다) 육안검사 및 파단특징

균열이 발생한 균열 튜브의 경우 SOVR 발전소의 화로 내부에서 사용된 용접 튜브이며, 아래의 사진 Fig.11 에 보는 것과 같이 용접은 양호한 비드 형상을 확인하였다. SA213-T91 튜브의 외부 표면은 대기 부식으로부터 보호하기 위해 방청 페인트 처리한 부분을 확인 하였다. Joint는 SA213-T91 튜브 측면의 용접 열영향부(HAZ) 부를 따라 완전히 분리된 부분을 육안 확인하였다. 균열과 관련된 소성변형의 결여로 입증된 바와 같이 Brittle 하기 쉬운 외관으로 사료된다.



(1) Overall view



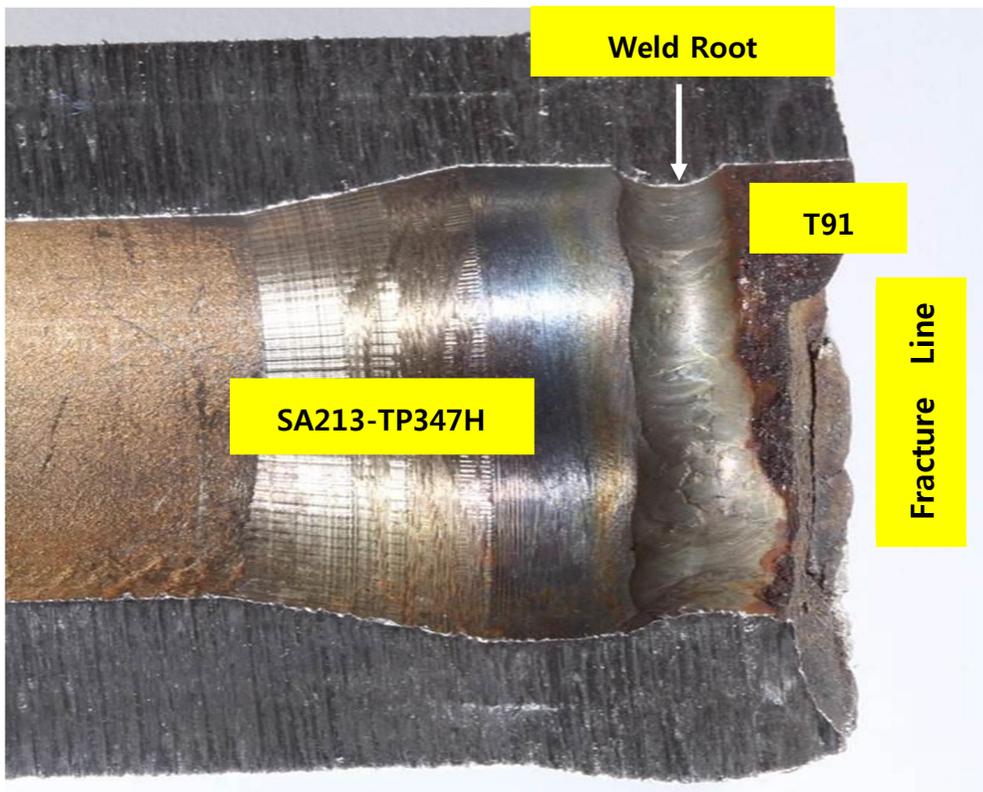
(2) Close up of crack area

**Fig.11 Cracked joint section as received**

아래의 Fig.12 사진을 보면 균열은 튜브 내면의 용접부 루트 부위의 용융선으로부터 약 1~3mm 발견됨을 확인하였다. 균열은 SA213-T91 튜브 소재 내부에 완전히 포함되어 있는 상태임을 확인 할 수 있었다.

SA213-T91 튜브쪽은 반대쪽 SA213-TP347H 모재와 달리 녹 or 산화철의 존재에 의해 확인된 바와 같이 내부 표면에 지속적으로 대기 부식이 발생을 확인 하였다. SA213-TP347H 모재와 용접 금속은 대기 부식은 없는 상태임을 확인 할 수 있었다. (사진 Fig.12 참조)

아래의 사진은 SA213-T91 튜브가 내면에서 시작하는 균열은 점차적으로 균열이 외부로 진행하여 그 과정에서 용접 루트면 옆을 따라서 단편적으로 균열이 전파됨을 나타낸 부분을 확인 할 수 있었다. 균열은 먼저 편평한 균열 부분에서 튜브 벽을 관통 한 다음 거친 균열 부분을 관통하여 내부에서 외부로 진행됨을 확인할 수 있었다.



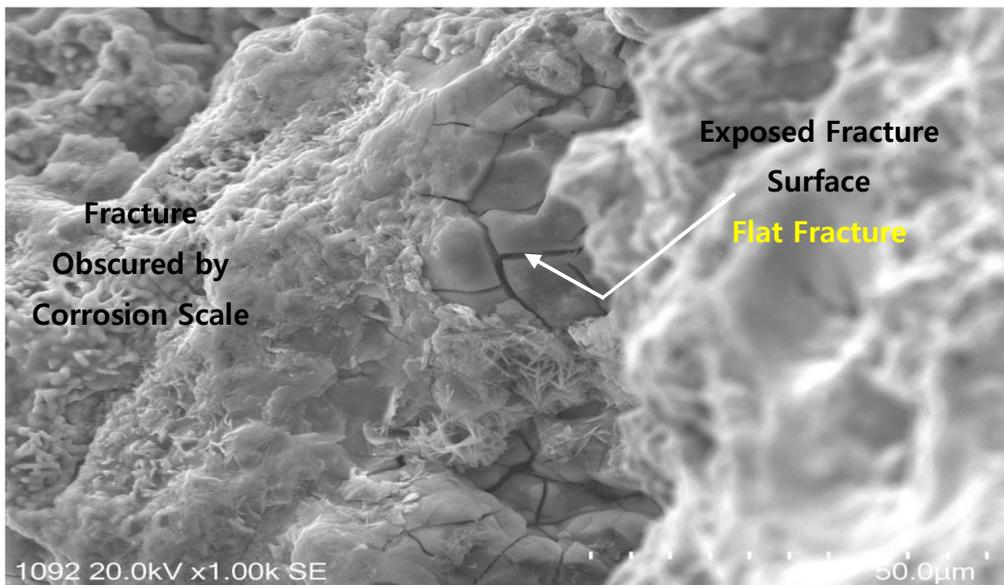
**Fig.12 Close up of inside surface around weld and fracture**

(라) 손상된 샘플 튜브의 용접부 조직검사 결과

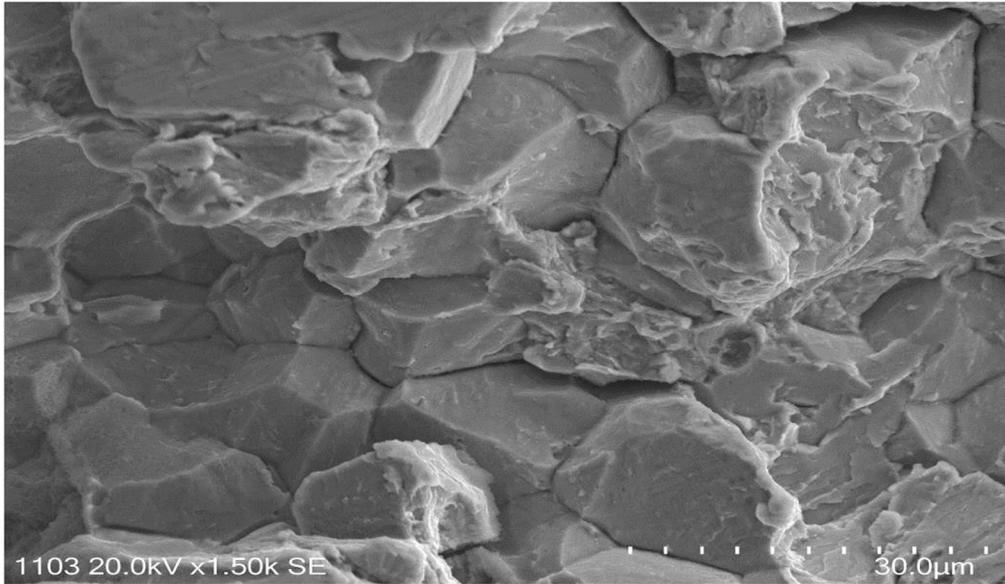
아래의 Fig.13 SEM 사진(a),(b) 의 균열은 스캐닝을 사용하여 균열의 현상을 확인하는 검사를 하였다. 전자 현미경(SEM)을 사용하여 파단면의 조직 구조를 관찰한 결과, 더 어두운 평면 쪽 균열은 튜브 안쪽 표면에서 부식 정도가 가장 큰 것으로 사료된다. 부식 범위 넓이에도 불구하고 스케일이 파열된 영역에서 특징적인 입계 파괴 특징성이 명확하게 관찰 확인 할 수 있었다.

균열의 규모는 점차적으로 내부에서 외부 표면을 향해 더 진행되었고 중간 벽두께에서 외부 표면으로 균열은 열린 경계와 때로는 준 분열형 입자형태 (Fig. 13(b) 사진 참조) 가 있는 명확한 입계 파괴를 나타낸 것으로 사료된다.

이것은 부적절한 예열, 낮은 층간온도, 빠른 용접속도, 부적절한 용접 비드 형상으로 인한 노치 발생, 응력증가, 용접 후열, 또는 용접 후 열처리와 관련이 있는 경화된 Martensite 강에서만 발생하는 수소 취성균열의 특징적인 조직 구조를 확인 할 수 있었다.



(a) [Close to inside surface. Approx. magnification 1,000x]

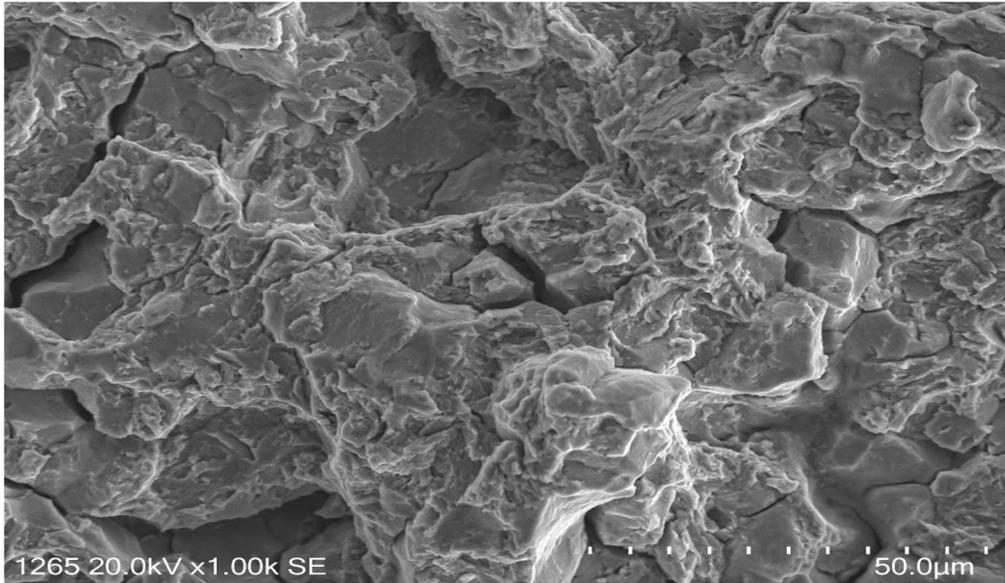


(b) [Close to inside surface. Approx. magnification 1,000x]

**Fig.13 SEM Fractography of flat area**

아래의 (Fig.14 SEM 사진) 조직 구조를 살펴보면 또한 거친 파단 부분은 가장 전형적인 수소 취화를 나타냄을 확인하였다. (Fractography 그림 Fig.14 (b)참조). 또한 좁은 바깥쪽의 가장부분에 새로 발견된 균열 부분은 부서지기 쉬운 균열과 연성 Dimple Fracture 이 혼합된 것으로 과부하로 인한 균열 현상이 나타난 것으로 확인 할 수 있었다.

오히려 새롭고 작은 균열 영역이 있는 곳의 과부하 균열은 균열이 발생된 튜브를 현장에서 제거 하거나 설치하는 동안 발생했을 가능성이 크며, 또한 빠른 용접 속도로 인하여 부적절한 비드 형상으로 인한 국부적인 노치 발생으로 응력 증가에 따른 균열이 발생할 수 있는 요건으로, 요약하면 SA213-T91 튜브의 균열은 내부 표면에서 외부표면으로 시작하는 수소 취성균열 및 노치 응력에 기인 했다고 사료 된다.



(a) Approx. magnification 1,000X



(b) Approx. magnification 1,000X

Fig.14 General Factography of rough fracture section

(마) 부적절한 후열처리 온도 특징

본 발전설비의 Pendant Super-Heater Tube 이종 재질 문제가 발생한 SA213-T91 자재가 WPS / PQR 및 Welding Procedure 기준으로 용접 완료 후 열처리 조건은 ASME Sec I Boiler PW-39 에 따라 아래와 같은 조건으로 후열처리를 실시한 것으로 확인하였다.

그러나 ASME Sec I PW-39 기준으로 열처리 Holding time (15min) 적용의 경우 위의 문제처럼 완벽한 열처리가 되지 못함을 확인하였다. 또한 열처리 중 부적절한 Insulation Covering, Thermo-Couple, Monitoring Couple 위치 불량, 부적절한 용접 Bead 파형으로 인한 노치 발생 및 튜브 소재의 형상에 따라서 Local PWHT Process 아닌 Furnace Type 열처리가 수행되어야 하는데 그렇게 수행되지 못하여 균열이 초래 되었을 것으로 사료된다.

Local Post Weld Heat Treatment 경우 열처리 수행 중 Heat Loss가 지속적으로 발생하여 부적절 온도 관리 미숙으로 인하여 경도가 상승하는 요인 관찰되었고, 또한 Holding Time 또한 충분하지 못하여 Holding time 중에 충분한 카바이드가 파괴되지 않았다는 것으로 사료된다. Table.5 표는 ASME Sec I 열처리 기준을 위의 부 적절한 열처리 조건을 확인 할 수 있었다.

Table.5 ASME Sec I Table PW-39 Mandatory Requirments for Post Weld Heat Treatment

Material	Minimum Holding Temperature (°C)	Minimum Holding Time at Normal Temperature for Weld Thickness (Nominal)		
		Up to 2 in (50mm)	Over 2 in.(50mm) to 5 in.(125mm)	Over 5in.(125m m)
P-No. 1 Group No. 1,2,3	(595)	1 hr/in. (2min/mm), 15min minimum	2 hr plus 15 min for each additional inch over 2 in (50mm)	2hr plus 15min for each additional inch(25m m) over

### (바) 균열 발생 특징

첫번째로 위의 부적절한 열처리 연구 결과를 요약하면, 용접부는 SA213-T91에 건전한 전한 용접 융합을 확인하였다. 그러나 튜브 열 영향부(HAZ)는 미세구조가 Martensite 이고, 경도가 지속적으로 용접부 내부에서 외부로의 경도 결과는 2장 연구실험의 경도 기준보다 높은 450Hv 값이 확인 하였다. 따라서 SA213-T91쪽의 열영향 부위에서 내부에서 균열이 발생 및 전파된 것으로 사료된다.

또한 열영향부와 마주하는 모재에 450Hv 초과하는 경도값과 SA213-T91 tube의 결함있는 Martensite 조직구조의 열영향부(HAZ)에서 500Hv (500gf) 초과하는 경도를 갖는 미세 조직을 형성하고, 따라서 SA213-T91 튜브는 열영향부(HAZ)에서 수소 취성 균열이 발생하는 것으로 추가적으로 확인하였다.

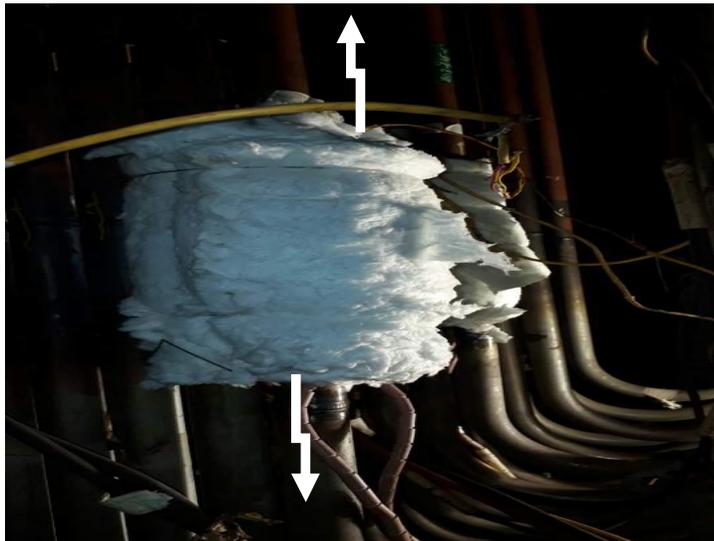
수소 취성 균열은 SA213-T91 & SA213-TP347H 이종금속 용접부의 균열 발생은 아래와 같은 내용으로 요약할 수 있다.

- 1) 구속 맞대기 이음 구조로서 내적 구속에 의한 용접금속에 잔류 인장응력 집중등이 균열발생이 용이한 구조상 문제점.
- 2) 예열 및 후열 그리고 V형 Butt Joint 용접 절차서(WPS) 이해 부족.
- 3) 비파괴 검사의 부정확성등의 요인 복합적으로 작용.
- 4) 용접부 내부 / 외부 비드의 기하학적인 형상으로 인한 노치 발생으로 응력집중에 의한 문제점.
- 5) 후 열처리 시 완벽히 Furnace 열처리가 아닌 국부 열처리로 인한 Heat Loss 발생으로 국부적으로 카바이드 파괴 불가능 (아래 Fig. 15 사진 참조)

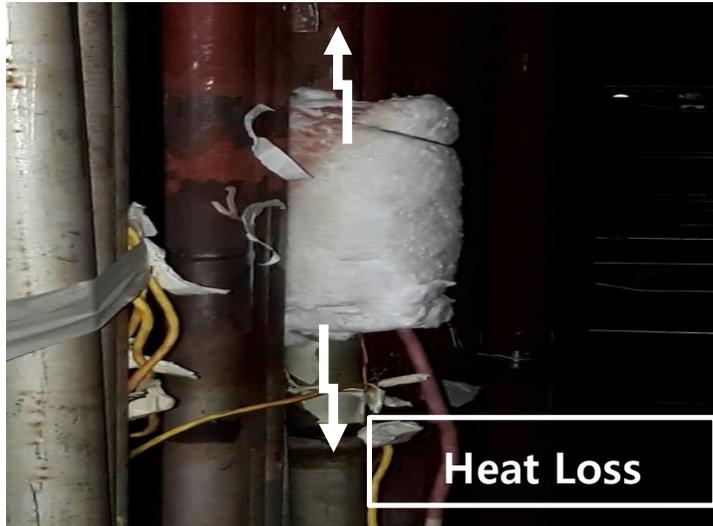
### (사) 부적절한 PWHT 및 용접 수행 특징

두번째로 위의 부적절한 열처리 연구 결과를 요약하면 Martensite 변태가 완료되려면 Material 및 Weld Metal 경우 약 730°C~785°C의 온도에서 열처리 되어 Hard-Martensite 미세 구조가 Ferrite와 분산 탄화물 입자의 경도 값 약 196Hv~265Hv의 혼합물로 변태를 유지해야 하는데 못한 것으로 사료된다.

GTAW 용접 수행 시, 적절한 예열, 층간온도, 용접 속도, 용접 입열량 제어를 용접 시방서에 맞게 용접하지 못하여 균열로 발생되는 초기 단초를 제공하였으며, 또한 거친 용접 형상은 용접 후 육안검사를 통하여 노치 부위는 파워 톨로 매끄럽게 용접비드를 유지하지 못한 부분을 확인하였다. 아래 (Fig. 15 사진참조) PWHT 열처리 상태를 보면 열전대 & 모리터링 열전대를 활용하여 용접부 열영향부 그리고 모재부 열관리가 되지 못한 것으로 확인 하였다.



(a) 부적절한 Local PHWT Condition Photo



(b) 부적절한 Insulation Covering Photo  
 Fig.15 Un-control PWHT Condition

따라서 위의 연구 결과는 손상된 소재의 용접부 열처리 특징 파악하였고, 아래의 본 연구에서는 용접부 열처리 후의 손상된 샘플을 원인 분석을 하여 열처리 후 용접부의 특성을 규명하고, 또한 열처리 후 육안시험, 경도시험, 비파괴 시험 그리고 미세조직의 특성을 비교 평가를 하여 열처리 후 용접부의 신뢰성을 확보하고자 한다.

### 3.3 용접부 열처리 특성 평가

#### 3.3.1 열처리 Chart 검토

아래의 Fig.16 PWHT Chart 확인 결과 열처리는 2가지 시편 모두 정상적으로 수행 확인하였다. PWHT Chart 검토한 결과 Heating, Cooling, Holdng time 그리고 720~750°C 사이의 온도로 열처리되었음을 Chart 에서 확인하였다. 각각 시험편은 해당 조건에 맞게 열처리되어 Chart 상의 문제점은 발견되지 않고, 양호하게 열처리 되었다는 것을 확인할 수 있었다.

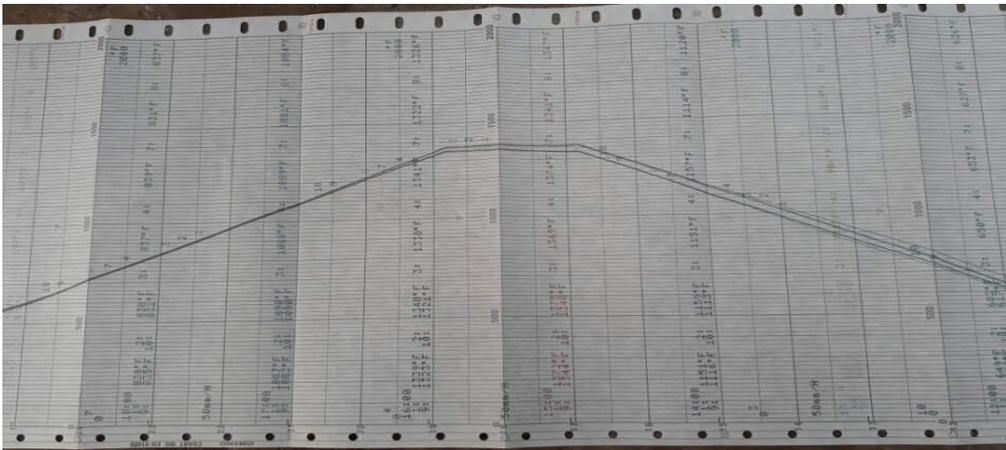


Fig.16 Actual PWHT Chart

### 3.4 용접부 단면 특성

#### 3.4.1 용접부 단면 검사

아래의 Fig.17 & 18 두 시험편 모두 사진과 같이 완전한 용입 상태 그리고 양호한 용접상태의 Profiles을 나타낸 것으로 확인하였다. Specimen. 1 & 2 의 Sample 시험편을 단면을 확인한 결과 어떤 시편도 미세한 균열을 나타내지 않았고, 또한Fusion Line 을 확인한 결과 완벽하게 모재와 융합을 보였으며, 다층 용접 시 용접 융합 불량은 없었다는 것으로 확인하였다. Post Weld Heat Treatment

수행중에서 급격한 가열 또는 급격한 냉각에 의해 유발 될 수 있는 열 응력으로 인한 발생할 수 있는 재열 균열은 발생하지 않은 것으로 확인하였다. 또한 내부의 이면비드의 형태도 좋은 상태로 유지되었고, 이면비드의 노치나 언더컷등 외부 결함도 발생되지 않는 것 확인하였다.

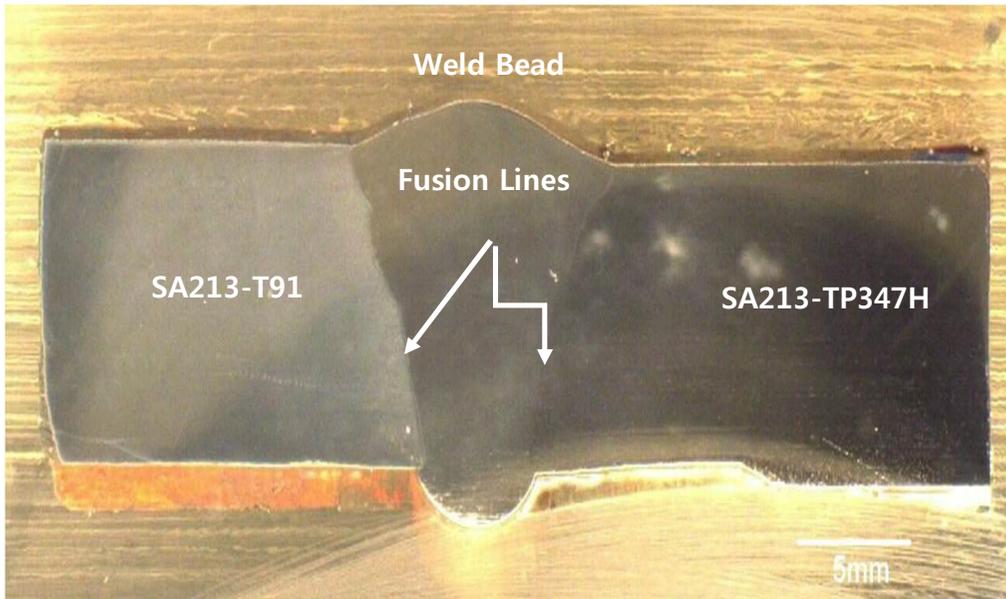


Fig.17 Metallographic Specimen 1 –additional 30 minutes PWHT

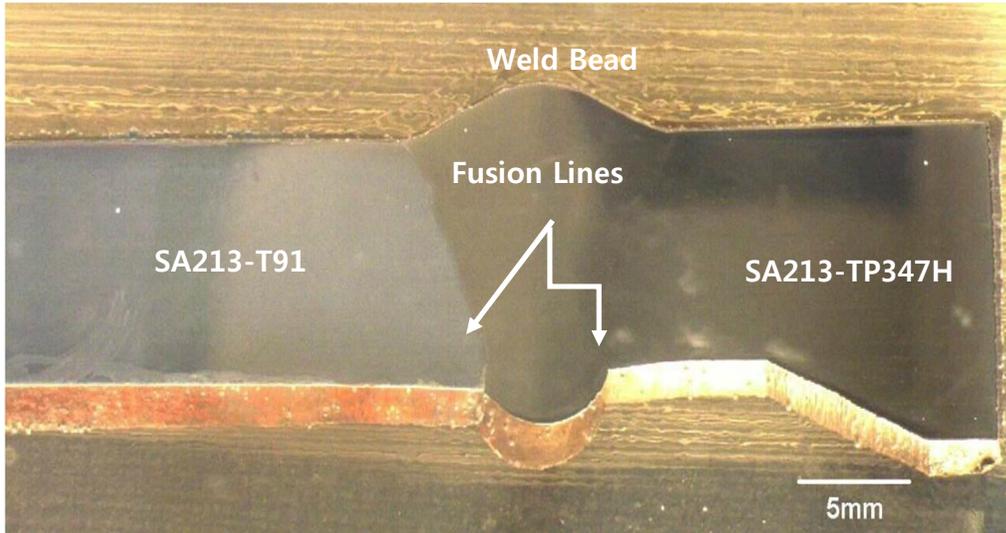


Fig.18 Metallographic Specimen 2 –additional 120 minutes PWHT

### 3.5 열처리 후 용접부 특성 평가

#### 3.5.1 육안 검사

Fig.19 & 20 시험편을 보면 외부 결함이나 튜브 안쪽의 내부 결함은 발견되지 않았으며, 국부적으로 고온에 노출된 흔적도 발견되지 않은 것을 확인하였다. 또한 장 시간 열처리 시에 응력풀림으로 인한 변형 문제나 열처리 중 대기 용접 시편이 노출되어 금속 표면이 산화된 부분도 없는 것으로 확인 하였다. 추가로 Furnace Box 로 2가지 시험편 Pendant Super-Heater 튜브에 대해서 열처리 수행한 결과 아래의 사진과 같이 외관상으로 문제가 없으며, 용접부 외면 그리고 내면의 문제점도 발견되지 않은 것을 확인하였다. 혹시 열처리 중에 발생할 수 있는 재열균열은 사진과 같이 발생하지 않은 것을 확인하였다.



Fig.19 SA213-T91 & SA213-TP347H Weld Joints After Additional PWHT (30min)



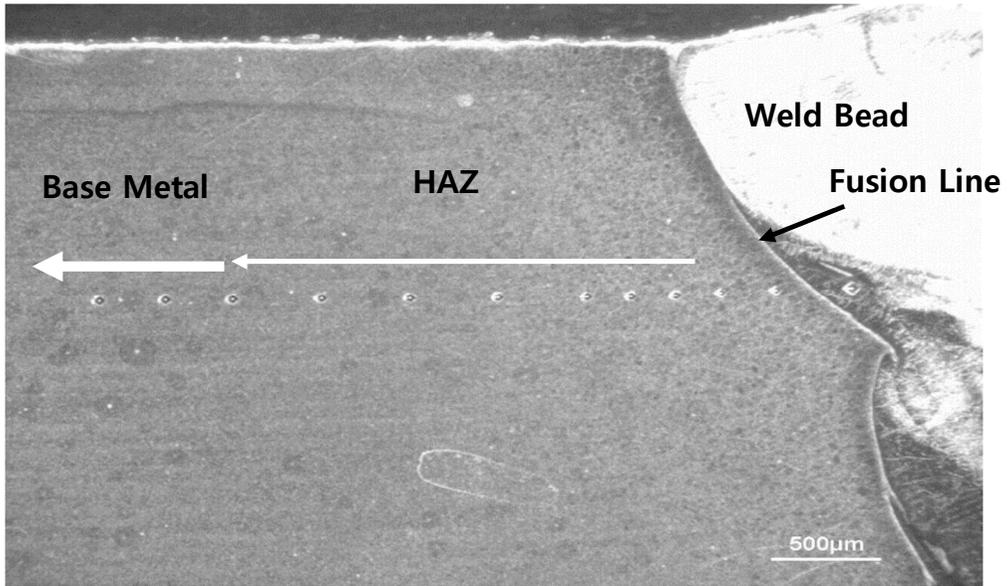
Fig.20 SA213-T91 & SA213-TP347H Weld Joints After Additional PWHT (120min)

### 3.5.2 경도 시험

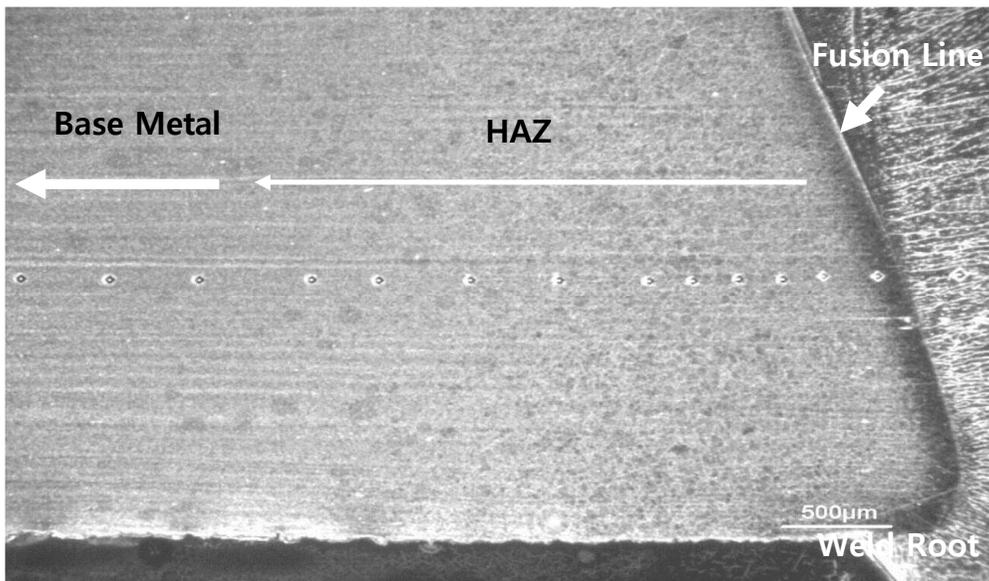
아래의 Fig.22 사진은 경도시험을 표면에 수행한 사진이며, SA213-T91 튜브의 용접부 근처 HAZ부 경도는 120분 추가로 열처리를 수행하였을 경우 HAZ 부위 대부분 280Hv 보다 낮은 결과를 확인하였다. 또한 경도가 280Hv 값이 확인된 외부 표면의 가까운 융합선 부근을 측정된 결과 280Hv 범위의 경도 값은 기존 부적절한 열처리로 인하여 경도 값을 측정된 손상된 용접 소재 시험편의 경도 결과 값 약 420Hv 보다 상당히 낮은 결과를 확인하였다.

또한 추가 열처리 120분을 수행한 시험편에서 용접부 금속의 경도는 약 170 ~ 180Hv 500gf 측정되었고, 이는 120분 추가 열처리가 정상적인 열처리가 되었다는 것으로 결과를 확인하였다. 추가적으로 두 시험편에서 SA213-TP347H 튜브의 모재 및 열영향부 경도는 오스테나이트 조직구조의 경도 값 약 175-220Hv 결과로서, SA213-TP347H 튜브의 모재부위 및 열영향부의 경도는 용접이나 후 열처리로 인한 장기간 열처리에 큰 영향을 받지 않은 것으로 결과를 확인하였다.

다음은 Fig.21 사진의 Post Weld Heat Treatment 추가 30분 적용 시험편의 결과 값을 확인하였다. 열처리를 추가 시험한 120분의 Post Weld Heat Treatment의 최종 허용경도 범위 (280HV 500gf미만)의 결과 값보다 더 높다는 결과를 확인 하였다. 따라서 추가 30분의 열처리는 경도 값이 높은 결과로 인하여 부적절한 열처리라는 것을 확인하였고, 본 실험을 통해서 추가 30분 열처리 특성은 현장에서 사용할 수 없다는 것으로 사료된다.

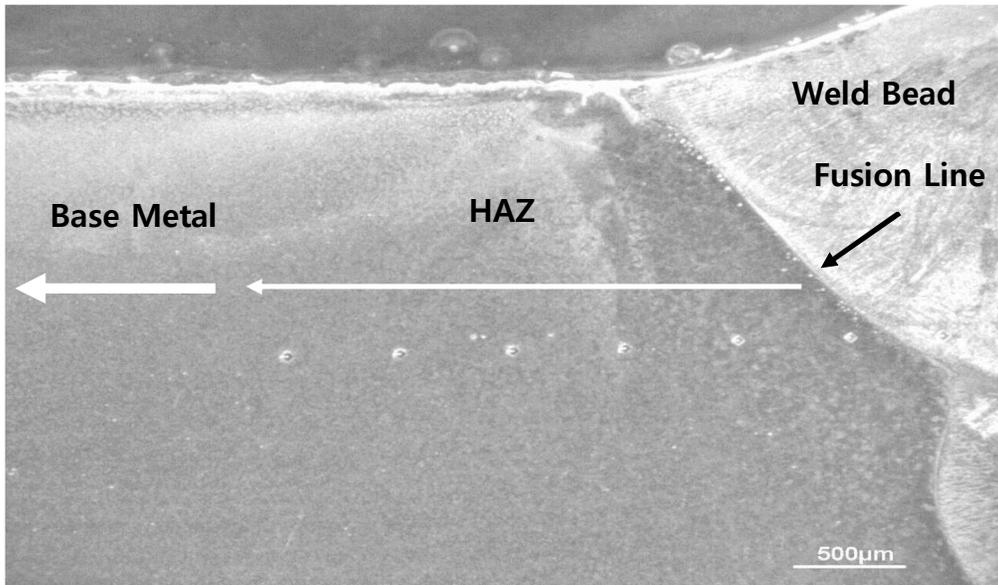


(a) 1.5 mm below OD surface

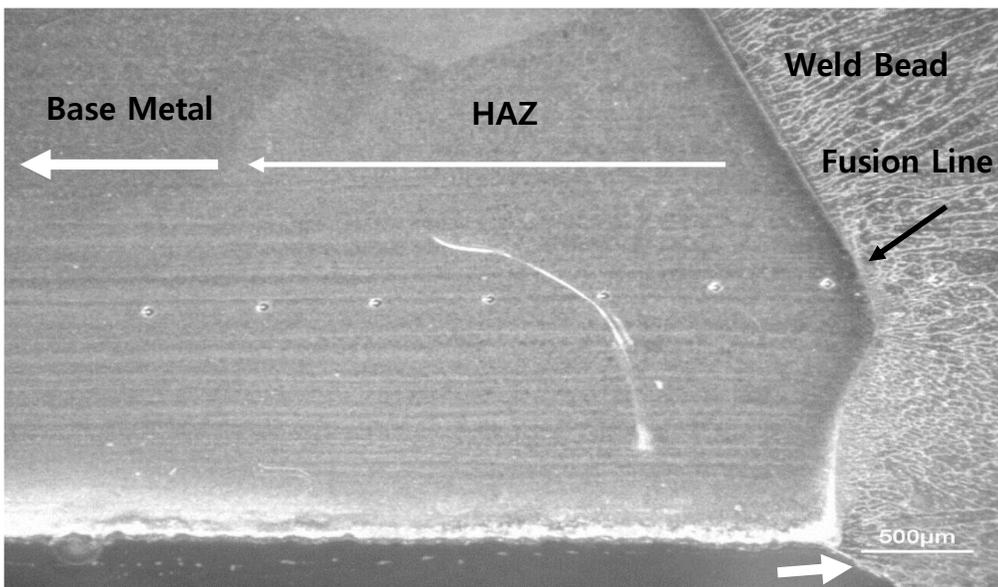


(b) 1.5 mm below ID surface

Fig.21 Hardness profile across T91 HAZ, Specimen 1  
(30 minutes additional PWHT)



(a) 1.5 mm below OD surface



(b) 1.5 mm below ID surface

Fig.22 Hardness profile across T91 HAZ, Specimen 2  
(120 minutes additional PWHT)

(가) T91 경도 결과

아래의 Table.6 표를 보면 용접 시험편 30분 추가 열처리 경우 경도 값이 열영향부(HAZ) 부근에서 Material Spec 기준 280Hv 보다 초과하는 결과를 확인 하였고, 이것은 30분 추가 열처리의 경우 용접부 및 HAZ부 일부의 경도 값은 경도 Spec 에 만족하나 전체적인 열영향부(HAZ) 구간의 경도 값은 280Hv 초과하여 부적절한 열처리로 확인하였다.

용접 후열처리 120분 추가 열처리의 경우 아래의 Table.7 표를 보면 용접부 및 열영향부(HAZ), 모재부 모두 Material Hardness Spec 280Hv 에 만족하여 30분 추가 열처리 보다는 120분 추가 열처리가 용접부, 열영향부(HAZ) 부위의 경도 값을 낮추는데 더욱 효과적이 었다는것을 확인할 수 있었다.

Table.6 Hardness Test Result (SA213-T91) Additional 30min

Base Metal	Base Metal	HAZ (3)	HAZ (4)	HAZ (5)	HAZ (6)	HAZ (7)	HAZ (8)	HAZ (9)	Weld Metal
238	235	250	266	289	291	306	312	315	183

Table.7 Hardness Test Result (SA213-T91) Additional 120min

Base Metal	Base Metal	HAZ (2)	HAZ (3)	HAZ (4)	HAZ (5)	HAZ (6)	HAZ (7)	HAZ (8)	HAZ (9)	Weld Metal
242	253	262	268	274	275	267	240	262	280	175

(나) 347H 경도 결과

아래의 Table.8 & 9 표를 보면 용접 시험편 30분 추가 열처리 그리고 용접 시험편 120분 추가 열처리의 모재 금속조직인 오스테나이트 구조에서는 장시간 열처리에 조직에는 어떠한 변화가 없었고, 경도 값도 만족스러운 결과를 확인하였다. 이는 조직상에 문제가 없어서 이종금속 용접 후 장시간 열처리에 대해서 오스테나이트 조직에는 문제가 없음을 다시 한번 확인을 할 수 있었다.

Table.8 Hardness Test Result (SA213-TP347H) Additional 30min

Base Metal	Base Metal	HAZ (3)	HAZ (4)	HAZ (5)	Weld Metal
180	188	179	182	182	170

Table.9 Hardness Test Result (SA213-TP347H) Additional 120min

Base Metal	Base Metal	HAZ (3)	HAZ (4)	HAZ (5)	Weld Metal
172	180	181	175	178	180

### 3.5.3 비파괴 검사

용접부 방사선 투과 검사 (RT) 아래의 Fig.23 방사선투과시험 필름과 같이 시험편 추가 30 분 열처리 수행 이후 육안 검사를 합격한 시험편에 대하여 ASME Sec.V 에 따라서 방사선 투과시험을 수행하였고, ASME Sec I 에 따라서 방사선 투과시험 필름 판독을 수행한 결과 용접부 내부 결함은 없는 것으로 확인하였고, Back Bead Weld Condition 또한 양호한 결과를 확인하였다.

또한 아래 Fig.24 사진 용접 시험편 추가 120 분은 육안검사 및 경도시험을 합격한 시험편에 대하여 아래의 방사선 투과시험 필름 같이 ASME Sec.V 에 따라서 방사선 촬영을 수행하였고, ASME Sec I 에 따라서 RT Film 판독을 수행한 결과 용접부 내부 결함은 없었고, Back Bead Condition 또한 양호한 결과를 확인할 수 있었다.



Fig.23 Radiography Test for 30min Film

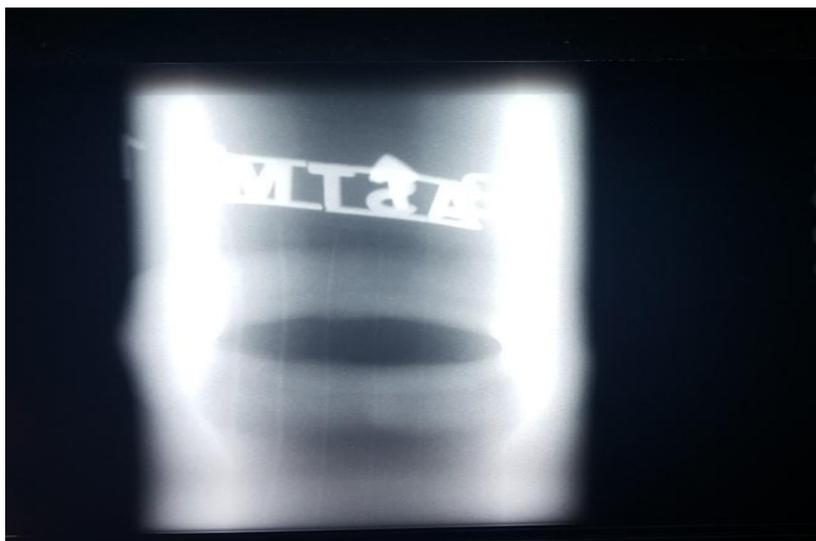
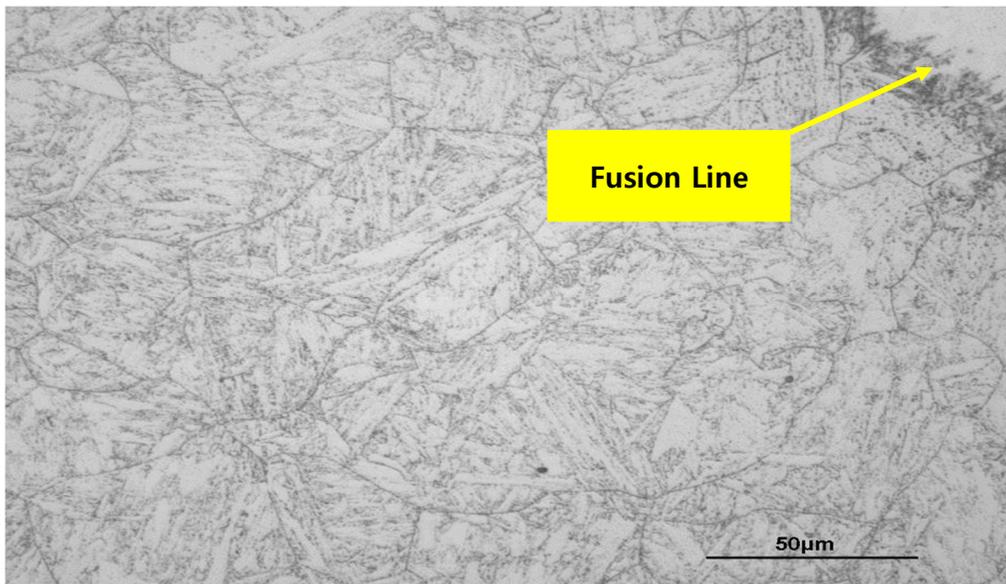


Fig.24 Radiography Test for 120min Film

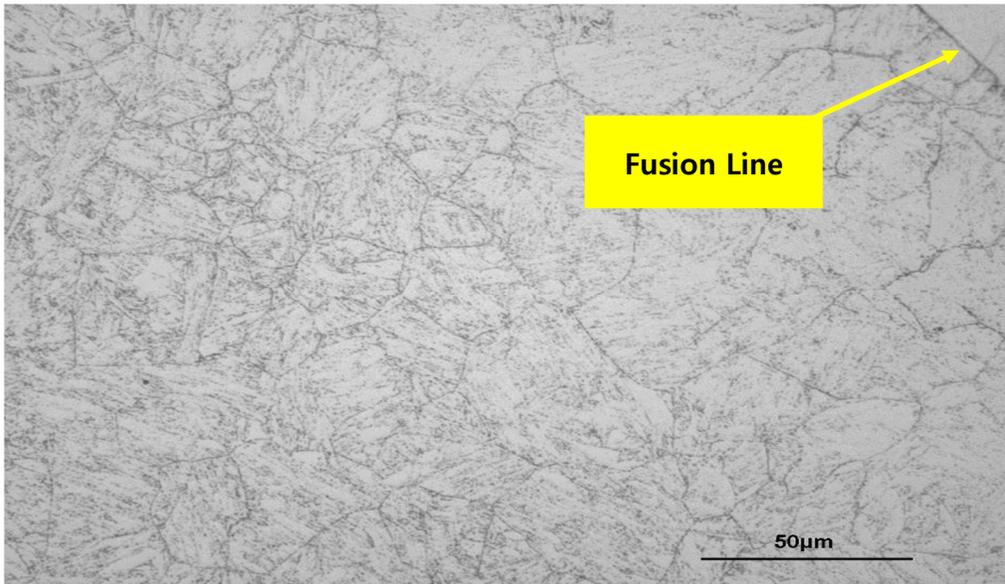
### 3.5.4 미세조직

#### (가) SA213-T91 조직사진

용접부 근처의 금속 조직검사에서 다음과 같은 결과를 확인하였다. 두 시험편 모두 완전 침투, 양호한 융합 양호한 용접 프로피일을 나타냈고, 아래 Fig.25 (a),(b) 시험편에서는 어떠한 미세한 균열이 열영향부 및 모재 부분에서 나타나지 않은것을 확인하였다. 또한 추가적인 PWHT 또는 열처리 이후에 수소 취화 균열로부터 안정된 것으로 사료된다. 두 표본에서 SA213-T91 튜브쪽의 모재 및 용접부는 정상적인 세밀한 Ferrite Matrix 및 분산 탄화물을 형성 확인하였고, 시험편의 SA213-T91 Tube의 HAZ 부위는 Tempering 된 Martensite 구조의 거친 결정립 크기의 시험편의 추가 열처리 30분의 미세 구조가 시험편 추가 120분의 경우보다 마르텐사이트 형태를 유지에 상당히 부 자연스러운것을 확인하였다. 이것은 PWHT 추가 120분이 PWHT 추가 30분보다 더 효과적인것으로 사료된다. 두 표본 모두에서 SA213-T91 튜브의 모재는 정상적인 세밀한 Ferrite Matrix 및 분산 탄화물을 확인 할 수 있었다.



(a) Additional 30min. Approx. magnification 500X



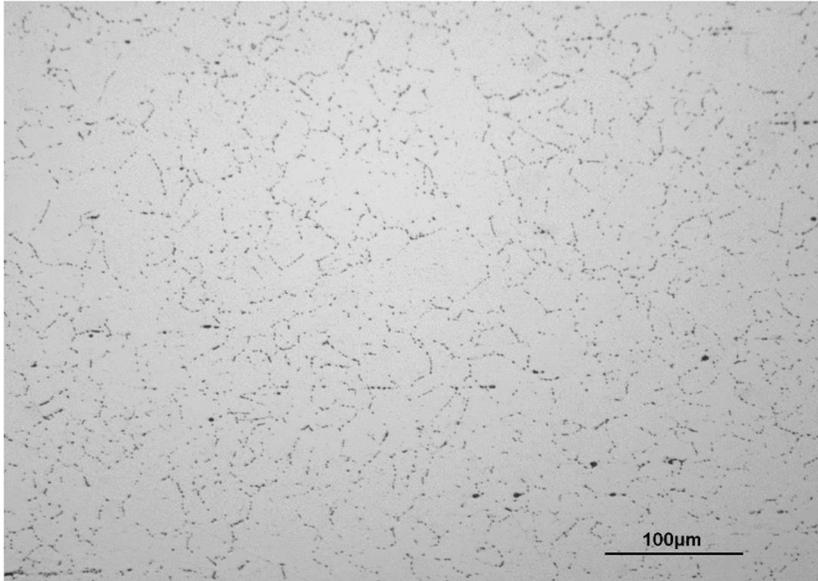
(b) Additional 120min. Approx. magnification 500X

**Fig.25 Microstructures of T91HAZ immediately adjacent to fusion**

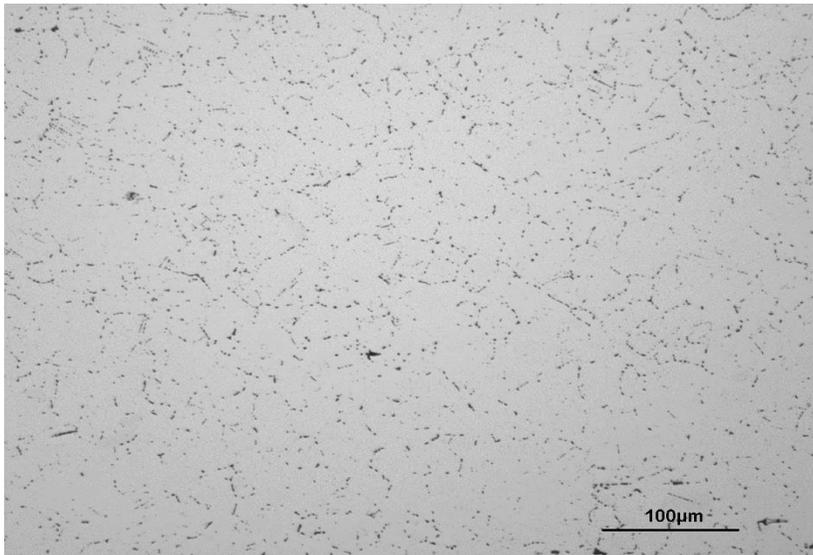
(나) SA213-TP347H 조직사진

아래의 Fig.26 사진을 보면 SA213-TP347H Tube의 모재는 정상적인 미립 오스테나이트 일부(Cr 크롬) 탄화물을 갖는 입자는 결정 입계를 따라 석출을 확인하였다. (V 니오븀) 탄화물의 미세한 양이 두 시험편의 오스테나이트 결정립에서 침전되어 있는 것으로 사료된다.

아래의 Fig.27 사진을 보면 SA213-TP347H Material 경우 두 시험편의 접합부 융착선(Fusion Line) 근처의 조직사진은 모재 금속과 동일한 미세 구조를 확인하였다. 따라서 추가 PWHT 30분 또는 추가 PWHT 120분이 SA213-TP347H 튜브의 미세 구조에 악영향을 미치지 않았다는 것을 확인 할 수 있었다.

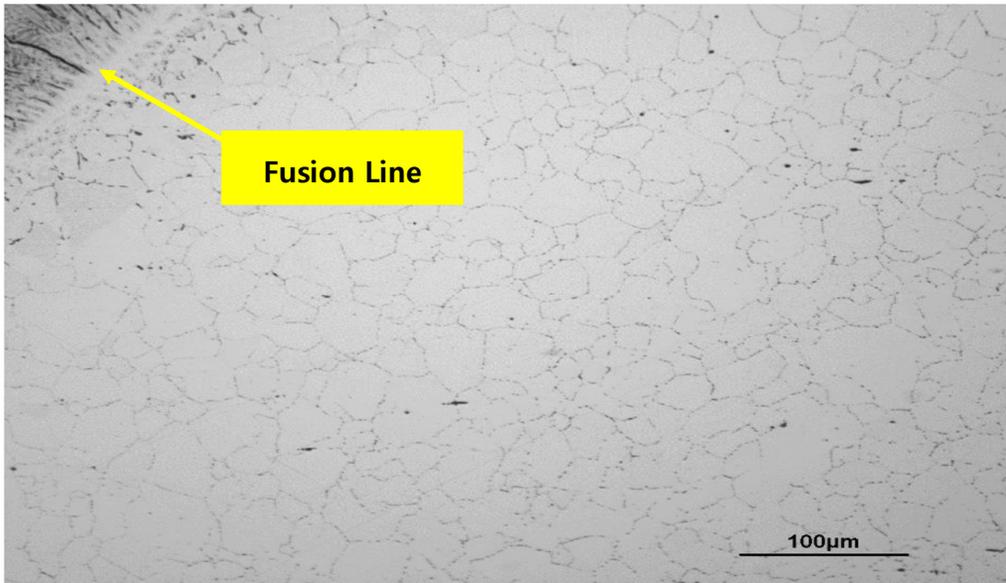


(a) Specimen 1. Approx. magnification 200X

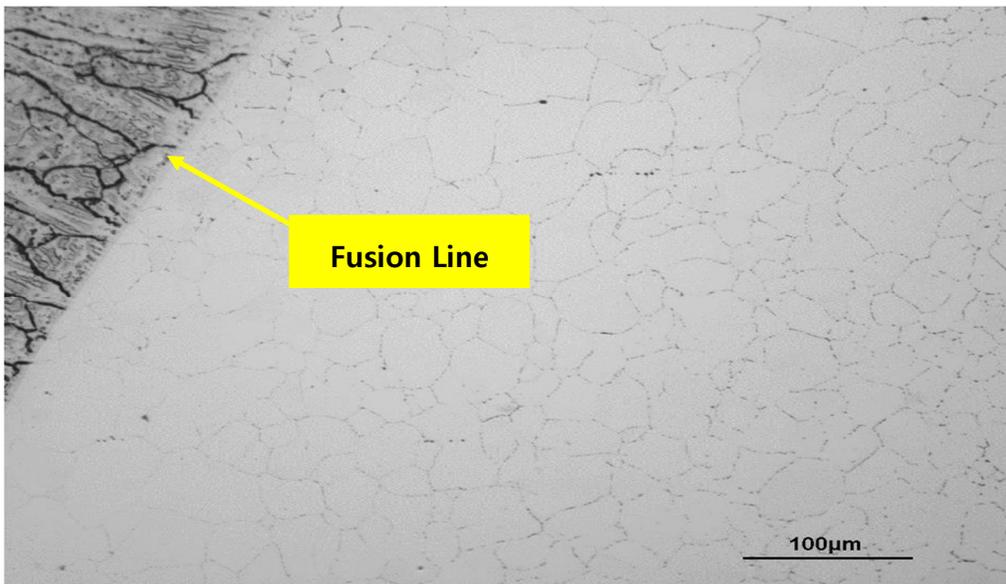


(b) Specimen 2. Approx. magnification 200X

Fig.26 General micro-structures of TP347H Base Metal



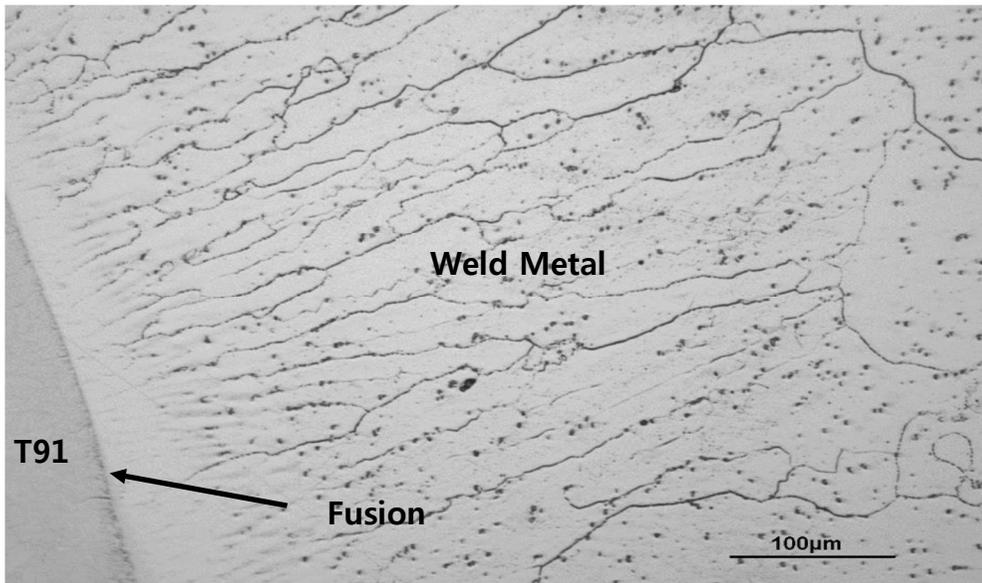
(a) Additional 30 minutes. Approx. magnification 200X



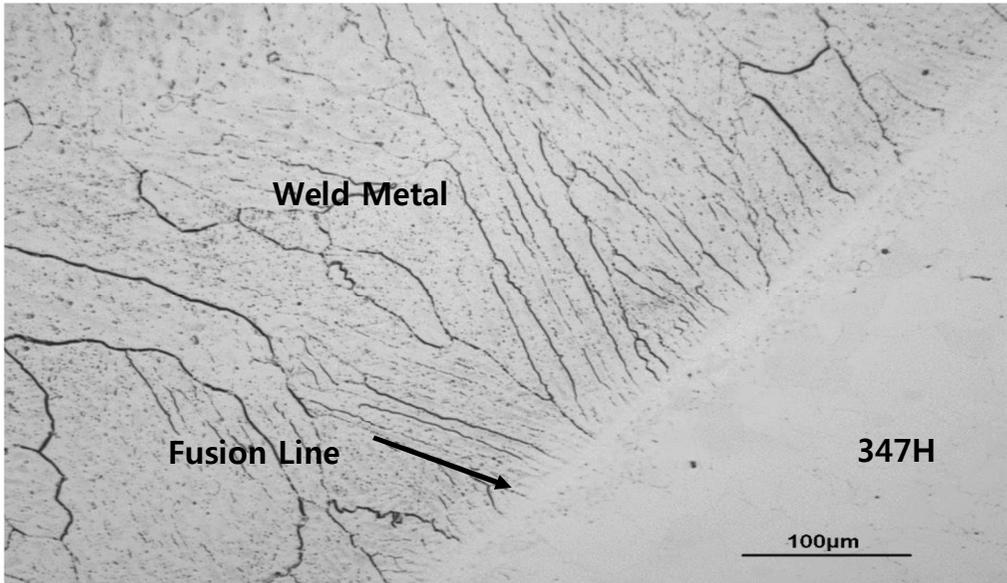
(b) Additional 120 minutes. Approx. magnification 200X  
 Fig.27 Microstructures of TP347H immediately adjacent to fusion line

(다) SA213-T91 & TP347H 용합선 조직사진

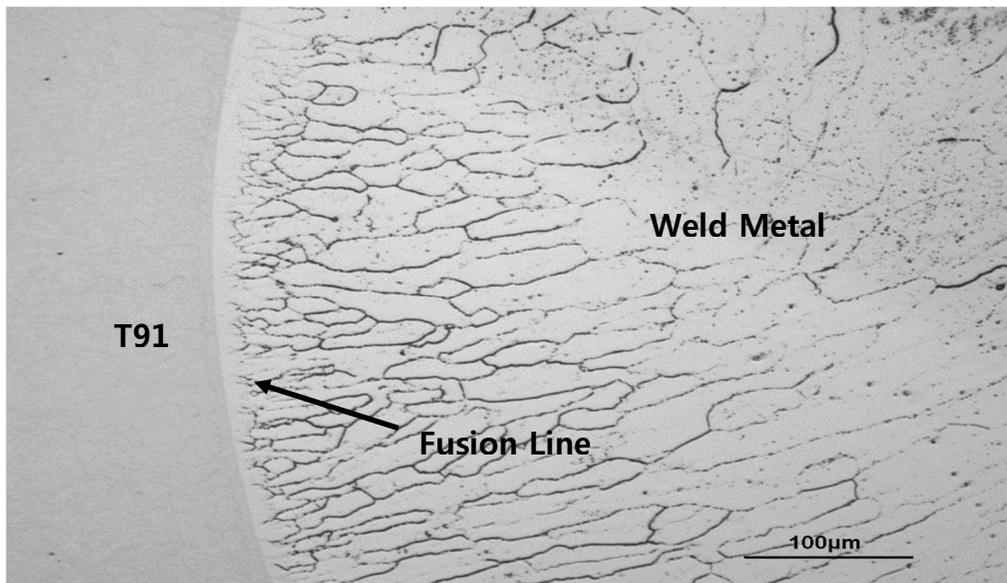
아래의 Fig.28 & 29 조직사진을 보면 두 시험편의 용접부, HAZ 그리고 모재부의 금속은 정상적인 수지상 미세 구조를 확인하였다. 또한 Dendrite 경계를 따라 과도한 추가 석출 없었고 추가적인 Post Weld Heat Treatment는 두 시험편의 용접금속 및 모재부의 미세 조직구조에 악영향을 미치지 않았다고 결과를 확인하였다. 아래의 사진에 표시된 2가지 조직 Sample에서 SA213-T91 Tube의 모재는 정상적인 세밀한 페라이트 매트릭스 및 분산 탄화물을 (Specimen.1.2)에서 확인 할 수 있었다. 각각의 시험편은 미세조직 사진으로 볼 때 열처리가 완벽히 수행된 것으로 확인하였고, 앞서 손상된 용접 Sample 에서 거친 Bead 파형이 관찰된 Notch 부위에 엄청난 응력이 발생 및 복합적으로 균열이 발생에 영향을 끼친것에 관련하여 이번 Sample 시험편 Type 1,2 용접부위는 용접 후 열처리 전 외관이 좋지 못한 부위에 대하여 Smooth Grinding 수행하여 ASME Sec I Code 기준에 나와있는 모재 두께당 Weld reinforcement 기준으로 용접 여성고 높이를 Grinding 하여 열처리 후 외관검사를 수행하였는데 특별한 notch 부위를 발견할 수 없었고 급격히 Weld Bead 형상이 불규칙한 것은 찾아볼 수 없어 양호한 용접 Profile 형성을 보였고 Back bead 또한 외관상으로는 양호한 용접형태로 확인 되었다는 것을 확인할 수 있었다.



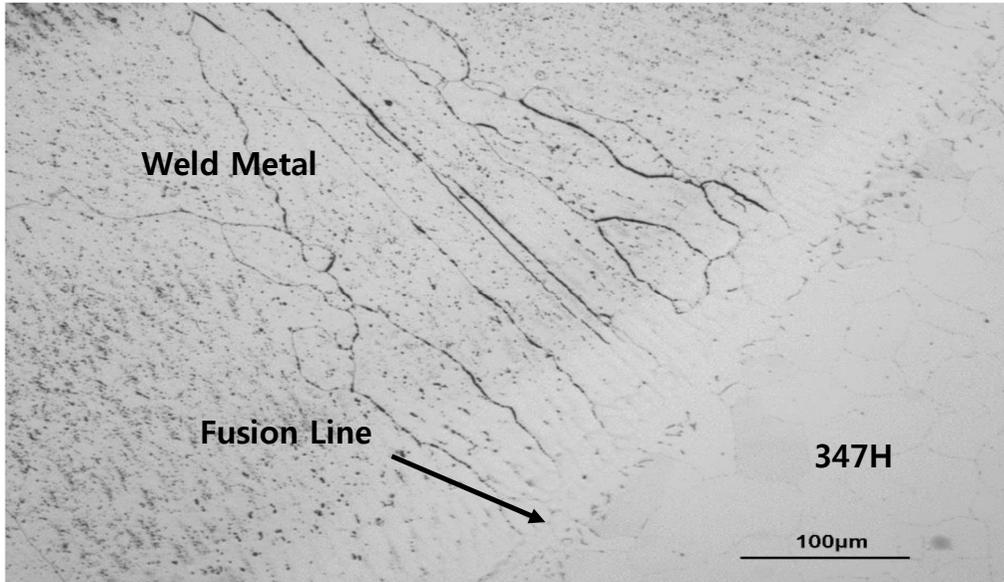
(a) To T91 tube. Approx. magnification 200X



(b) To TP347H tube. Approx. magnification 200X  
Fig.28 General microstructures of weld metals, additional 30 minutes



(a) To T91 tube. Approx. magnification 200X



(b) To TP347H tube. Approx. magnification 200X  
Fig.29 General microstructures of weld metals, additional 120 minutes

## 제 4 장 결 론

9% Cr-1Mo 강종 SOVR 화력 발전소 보일러 Pendene Super-Heater 수냉벽용으로 개발된 SA213-T91재질은 720℃~750℃ 온도로 용접 후 열처리 시험편을 제작하여 육안검사, 비파괴 검사, 경도검사, 조직검사를 관찰 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Post Weld Heat Treatment 를 추가로 120분 동안 사용하면 경도는 수준이 최고 허용경도 수준 주로 280Hv 이하로서 추가적인 PWHT는 튜브 또는 용접금속의 미세 구조를 변화 시키지 않았다고 사료된다.[4]
- 2) 본 결과를 토대로 필요하다면 다른 발전소의 용접 접합부의 SA213-T91 튜브에서 경질 Martensite의 열영향부(HAZ)부에 추가 120분 PWHT를 적용해야 한다. 두 시험편 모두 완전 침투, 양호한 융합 및 양호한 용접 프로파일을 나타냈다. 어떤 시험편도 추가적인 PWHT 이전에 수소 취화 균열이 발생하거나 PWHT에서 가열 또는 냉각에 의해 유발 될 수 있는 열응력으로 인해 발생 할 수 있는 미세 균열을 나타내지 않았다. [4]
- 3) 120분 추가 열처리는 장시간 Holding time 인한 입자 성장이 발생할 수 있고, 조직 내에 가공경화에 의해 형성된 적층결함이 해소되는 효과가 발생했기 때문에 안전상이 되었다고 사료된다.
- 4) 추가적인 120분 PWHT 테스트 공정이 SA213-T91 용접부, 열영향부(HAZ), 모재부의 경도를 크게 감소 시켰음을 확인하였다.
- 5) 용접 후열처리 후 경도는 열영향부의 금속부분이 가장 높으며 상층부, 중층부, 그리고 하층부 순으로 경도가 높은 것으로 결과를 확인하였다.
- 6) 모재부 경도는 용접후열처리 온도 변화와 무관하게 280Hv로 일정하게 측정되었다. 용착 금속부와 열영향부 경도를 저하시키기 위한 용접 후 열처리 온도는 730℃~750℃ 이상이 요구되는 것으로 사료된다.
- 7) 후열처리 온도가 증가함에 따라 용착 금속부와 열영향부 입계에 탄화물 석출이 증가되는 것을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] Characteristics of the Post-Weld Heat Treatment of Chrome Low Alloy Material for a Power Plant Boiler (Jae-Hoon Whe, Seung-Jae Moon\*, Hoseon Yoo\*\*)
- [2] 입문강좌 : 각종 보일러의 특징 (화력원자력발전 2005. 8.)
- [3] 발전설비용 내열 합금강의 모재, 용접부, 열영향부의 미세조직 변화에 따른 수명평가에 관한 기술개발 (성균관대학교)
- [4] Reliability Improvement Method of Weld Zone in Water Wall Tube for an Ultra Supercritical Coal Fired Boiler  
안중석, 문승재\* 한국동서발전(주), \*한양대학교 기계공학부
- [5] Study on the Improvement of Weld-joint Reliability in Waterwall Tubes of the Ultra Supercritical Coal Fired Boiler (한국동서발전(주) 사업운영처 (\*\*한양대학교 신소재공학부, \*\*\*한양대학교 기계공학부)
- [6] Report on the fractographical analysis (파단면 분석 보고서)  
Principal Researcher Won-Jon Yang, Ph.D, Sang-Hoon Lee, Ph.D  
Senior Researcher Se-Jin Park  
한국기계연구원 부설 재료연구소 소재부품손상원인분석센터
- [7] ASME Sec I - Rules For Construction of Power Boilers
- [8] ASME Sec V T-291
- [9] HST-QM-0019\_RB\_Hardness\_Procedure\_for\_HP\_Steam\_Package\_Boiler