

## 저 합금강재(2.25Cr-1.0Mo) 반복 보수용접 열영향부의 특성

이철구\* · 안종석\*\* · 이남혁\*\* · 이길재\*\*

\*국립 서울산업대학교 기계공학과

\*\*한국동서발전(주) 발전처 기술전문팀

### A Characteristics of the Multiple Repair Welding HAZs in a Low Alloy-Steel(2.25Cr-1.0Mo)

Chul-Ku Lee\*, Jong-Seok Ahn\*\*, Nam-Hyuck Lee\*\* and Gil-Jae Lee\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul 139-743, Korea

\*\*Power Generation Dept. Korea East-West Power Co., Ltd, Seoul 135-791, Korea

#### Abstract

A low alloy-steel(2.25Cr-1.0Mo) has been widely used for boiler piping, header and tubes in high temperature and pressure conditions of the thermal power plant. It is common knowledge that the repair welding is permitted two or three times by customary practice rule, but there is no regulation to limit the number of repair welding base on the study heat-affected zone(HAZ), which is the weakest zone when repair welding is under taken, by experiments about the metallographic degradation and mechanical properties. Therefore, this study aims to verify the reliability of 5 times repair welding through conducting the experimental observation in the mechanical and the metallographic change on HAZ varying repair welding times. In results of the experiments, it is concluded that the reliability was kept in HAZ even up to the fifth repairs.

\*Corresponding author : ahnjs001@ewp.co.kr

(Received August 2, 2007)

Key Words : Thermal power plant, Low alloy-steel, Heat-affected zone, Metallographic degradation

## 1. 서 론

저합금강(2.25Cr-1.0Mo)은 화력발전소 보일러 배관, 헤더 및 튜브류 소재로 광범위하게 사용 되고 있으며 발전설비의 가혹한 운전조건 및 용접성 문제 등으로 손상된 용접부에 대한 반복적인 보수용접을 빈번히 경험하고 있다.

오랜 관행으로 2~3회 정도의 보수용접을 허용하고 있으나 입열량(Heat input) 증가에 의해 발생하는 취약지역인 열영향부(이하 HAZ)의 야금학적 열화 및 기계적 특성저하에 대해 연구를 통한 보수용접 횟수를 제한하는 규정은 없다.

본 연구의 목적은 연속적인 5회 보수용접을 통해

발생한 HAZ의 기계적 특성과 야금학적 변화를 시험과 관찰을 통해 용접부 품질에 대한 신뢰성 여부를 증명하고자 한다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 보일러 튜브는 SA213T22 (2.25Cr-1.0Mo)이며 Ferrite계 기지조직과 Perlite계(Ferrite계 + Cementite계)로 이루어진 대표적 층상조직으로 상용화 후 50년 이상 널리 사용된 소재로 국내 에서는 80년도 초반에 건설 되어진 화력발전소 보일러 최종단 과열기, 재열기 튜브 및 중요 배관에서 널리 사용되고 있다.

실험에 사용된 보일러 튜브 규격은 외경이 38.0mm 이고 두께는 9.5mm이며 용접봉은 GTAW용 ER90S-B3을 사용하였으며 화학조성은 Table 1과 Table 2에 나타냈다.

2.2 실험방법

1회부터 5회까지의 반복 보수 용접한 시험편 제작을 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 30° 각도의 그루브(groove) 및 3mm 루트갭(root-gap)을 두고 상온에서 수평(3G) 용접하였다. 각각의 조건에서 총 5개를 제작하였고 1번 시험편은 1회 용접, 2번 시험편은 1회 용접 후 절단 및 재 용접하는 방법으로 3번(2회 절단 및 3회 용접), 4번(3회 절단 및 4회 용접), 5번(4회 절단 및 5회 용접) 시험편을 각각 제작하였다. 용접변수는 Table 3에 나타냈고 용접부 절단 및 그루브(groove) 재 가공시 기존의 HAZ가 손상되지 않도록 시험편의 절대길이를 유지하였다.

Table 1 Chemical composition of the tubes (wt-%)

C	Cr	Mo	Mn	Si	P	S
≤0.15	1.9-2.6	0.87-1.13	0.3-0.6	0.25-1.0	≤0.03	≤0.03

Table 2 Chemical composition of the electrode (wt-%)

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

Table 3 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/m)	Stringer	8

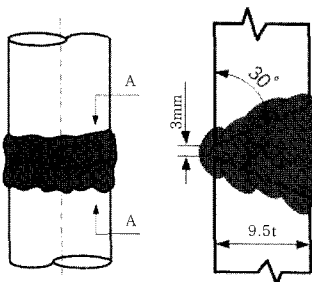


Fig. 1 Weld groove angle and direction(3G)

기계적 특성변화를 고찰하고자 인성 측정을 위해 Fig. 2에 나타낸바와 같이 용접하지 않은 시험편과 반복보수용접 시험편의 단면 HAZ에 노치(notch)를 가공하여 샤르피(charpy v-notch) 시험장비를 이용, 상온(at 22°C)에서 충격에너지(impact energy)를 측정하였다.

인장강도는 압입형 인장강도 측정기를 이용하여 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 시험편 용접 중앙부를 기준으로 하여 3mm 간격으로 8개의 측정 점을 선정, 측정하였다. 경도는 미소경도계(micro vickers)를 이용하여 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 0.1mm 간격으로 시험편 좌측에서 우측으로 이동하면서 측정하였다.

야금학적 특성변화를 고찰하기 위해 반복보수 용접 시험편들을 연마(polishing)후 2% 나이탈 부식액(nital etching)을 이용하여 4분 동안 부식한 조건에서 Fig. 5에서 나타낸 위치에서 금속현미경을 사용, 미세조직(micro)을 관찰하였다. 육안조직(macro) 관찰을 위해 시험편을 연마 후 30% 질산 부식액(nitric-acid etching)을 이용하여 30초간 부식한 조건에서 비디오(video) 현미경을 사용하여 시험하였다.

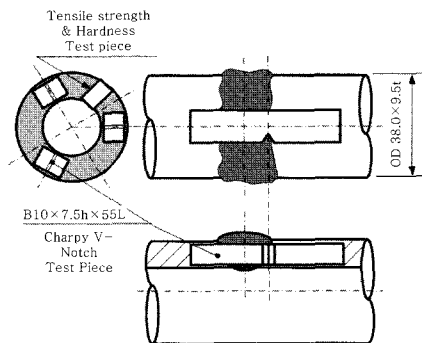


Fig. 2 Sampling position

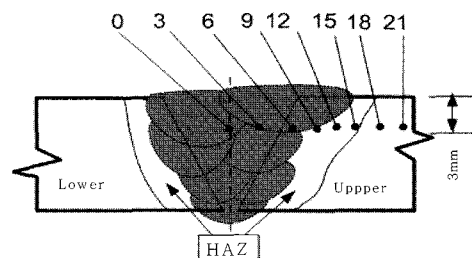


Fig. 3 Test position

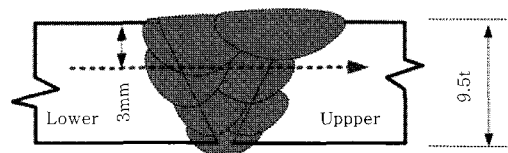


Fig. 4 Test position

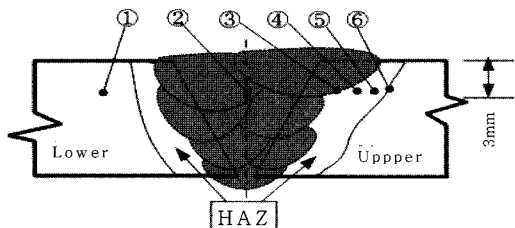


Fig. 5 Test position

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 인장강도 변화

Fig. 6은 1회부터 5회까지 보수 용접한 시험편들의 모재, HAZ 및 용접금속(weld metal) 부위별 인장강도 변화를 나타낸 것이다. 모재의 인장강도는 ASME에서 규정한 415MPa(Min)보다 다소 높은 450~470MPa를 나타내었고 용접금속은 720~900 MPa 정도로 다소 높은 상태를 나타내었다. HAZ의 (Fig.6의 9mm부터 12mm 구간) 인장강도는 900 MPa에서 450MPa로 변화되는 구간이며 고장력 강재에서 나타나는 입상역 구역에서의 연화현상은 나타나지 않았다. HAZ 거리(크기)는 3~5mm 정도로서(Fig.6의 9mm부터 12mm 구간) 입열량 증가에 따른 HAZ 거리(크기) 변화는 없었다. 5회 용접시험편의 강도변화 지역이 1~3회 시험편들과 비교시 넓은 범위에 걸쳐 변화됨을 알 수 있으며(Fig. 6의 3mm부터 15mm 구간) 4회 용접시험편 역시 1~3회 시험편들과 비교하면 비교적 넓은 범위에서 걸쳐 인장강도 값이 변화되었고(Fig. 6의 6mm부터 15mm 구간) 이는 용접 입열량이 증가될 수록 모재에 포함된 크롬 카바이드의 거동변화에 기인한다고 판단된다.

#### 3.2 경도 변화

Fig. 7은 1회부터 5회까지 보수 용접한 시험편들의

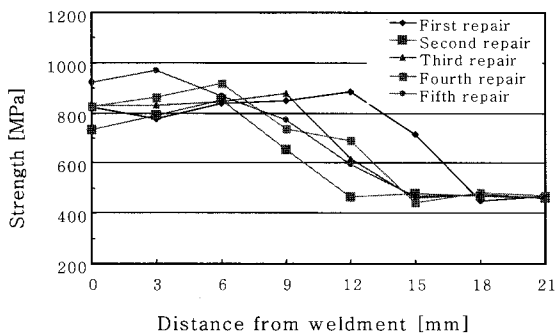


Fig. 6 Indentation tensile strength data

경도 변화를 나타낸 것이다. 모재의 경도는 ASME에서 규정한 163Hv(max) 보다 다소 높은 180~200Hv를 나타내었고 용접금속은 300~350Hv 정도를 나타내었다. HAZ의 경도는 170~180Hv(Max) 정도로서 보수용접 시험편들 간의 경도변화는 큰 차이가 나지 않았다. HAZ 거리(크기)는 3~5mm 정도로서 보수용접시 입열량 증가에 의한 HAZ 변화는 없었으며 입상역 구역에서 경도가 저하 되는 연화현상은 나타나지 않았다.

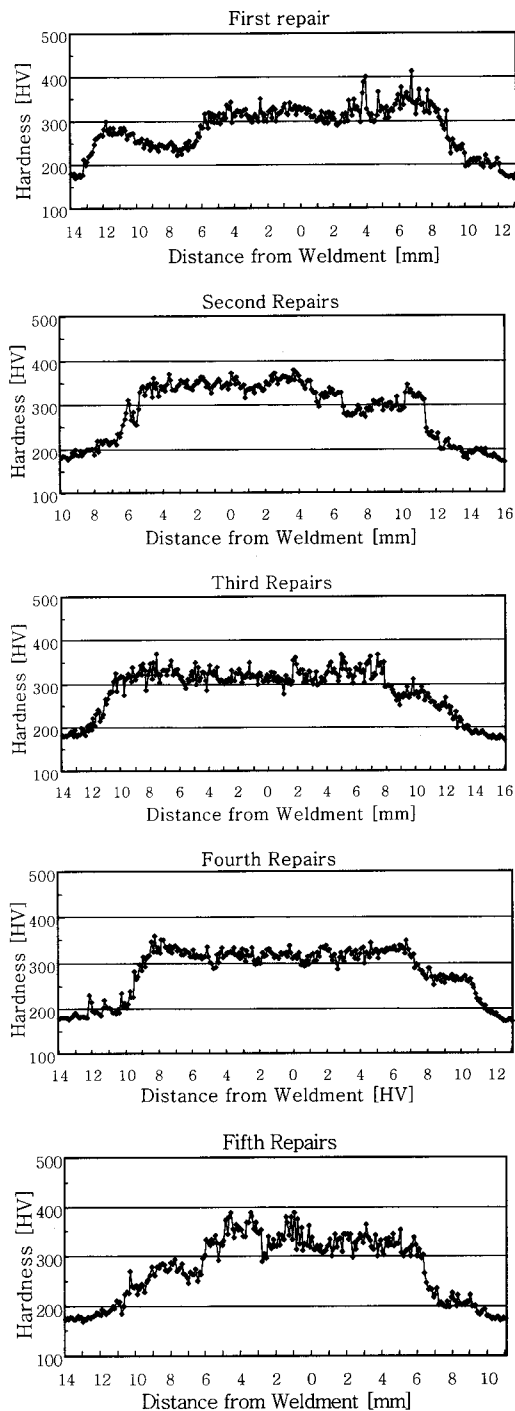


Fig. 7 Hardness distribution

### 3.3 인성 변화

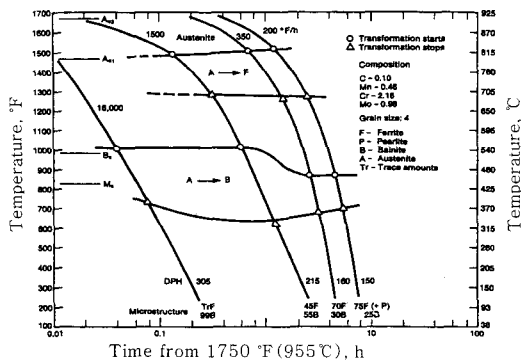
Table 4는 1회부터 5회까지 보수 용접한 시험편들의 인성변화를 나타낸 것이다. 열이 부과 되지 않은 모재와 비교시 최대 46%(최소값 기준)정도의 충격에너지(impact energy)가 감소하였으나 SA213T22와 동급소재인 10CrMo910의 충격에너지가 34J/cm<sup>2</sup>(min)인 점을 감안하면 2.5배의 여유(margin)가 있었고 입열량 증가에 대한 충격 에너지의 증가 또는 감소현상은 미소하였다.

### 3.4 미세조직(micro) 변화

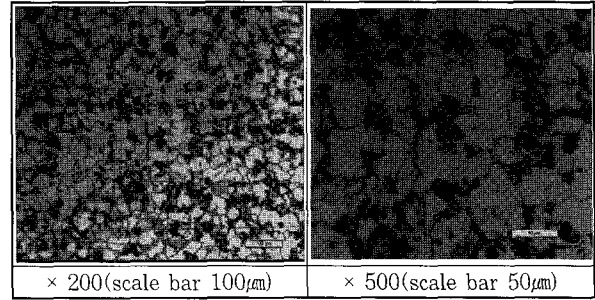
Fig 8에서 나타낸 연속냉각곡선(continuous cooling transformation diagram)에서 확인할 수 있듯이 Fig. 9의 모재 미세조직은 955℃이상 가열 후 일정시간을 유지하면 오스테나이트계(austenite)조직을 형성하다가 상온까지 일정 냉각속도(1.5~7.5sec)로 냉각하는 과정에서 1차로 페라이트계(ferrite) 기지조직(사진 1 흰색 영역)이 형성되었다. 이후 α-Fe + 시멘타이트(cementite)가 조합된 퍼얼라이트계(perlite)조직이 생성되었음을 알 수 있으나 원래의 퍼얼라이트계 조직중 일부가 미량의 베이나이트계(bainite) 조직화(퍼얼라이트계 조직의 입자가 미세하게 변화)됨을 확인할수 있다.

**Table 4** Impact energy result (J/cm<sup>2</sup>)

Classification	Base metal	First repair	Second repairs
Minimum	147 J	92 J	125 J
Medium	149 J	97 J	139 J
Third repairs	Fourth repairs	Fifth repairs	DIN code 17175(Ed'79)
68 J	99 J	88 J	Min 34J (10CrMo910)
97 J	110 J	91 J	

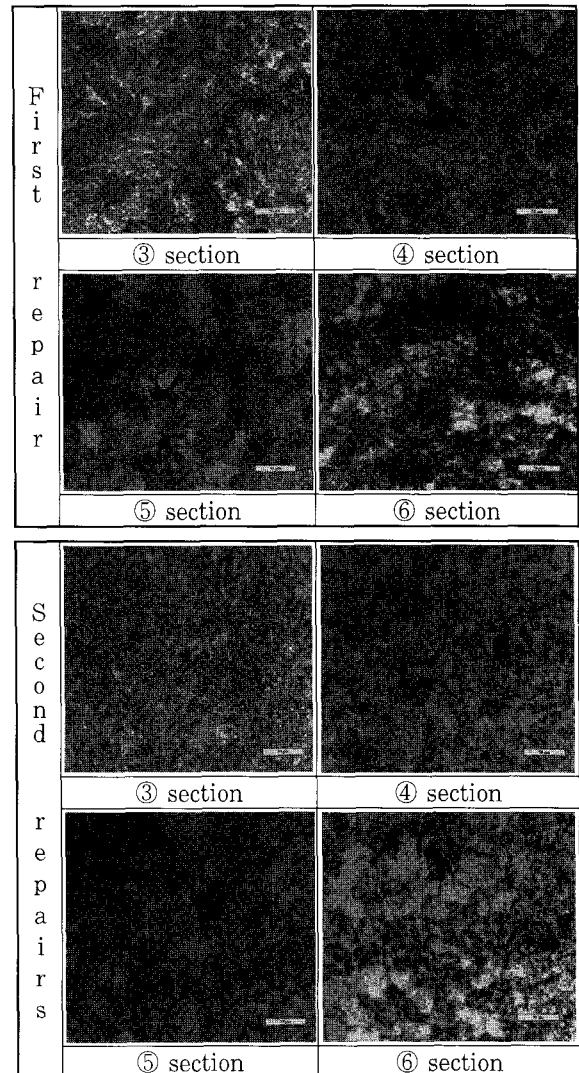


**Fig. 8** SA213T22 CCT Diagram (Vallourec Industries. The T22 Book)



**Fig. 9** Base metal microstructure/① section

Fig 10에서 나타낸 HAZ 조직인 ③구간은 부분 용융역 모재경계선(weld Interface)으로 조직은 수직상정과 입자(grain) 크기가 다소 조대한 베이나이트계 조직의 혼합 형태를 나타내며 ④구간은 조대화 구역으로 용접열에 의해 입자가 성장된 형태를 나타낸다. ⑤구간은 세립역으로 조직이 재구성되어 양호한 조직구조를 가지고 있었으며 ⑥구간은 입상 펄라이트역 조직을 나타내었다.



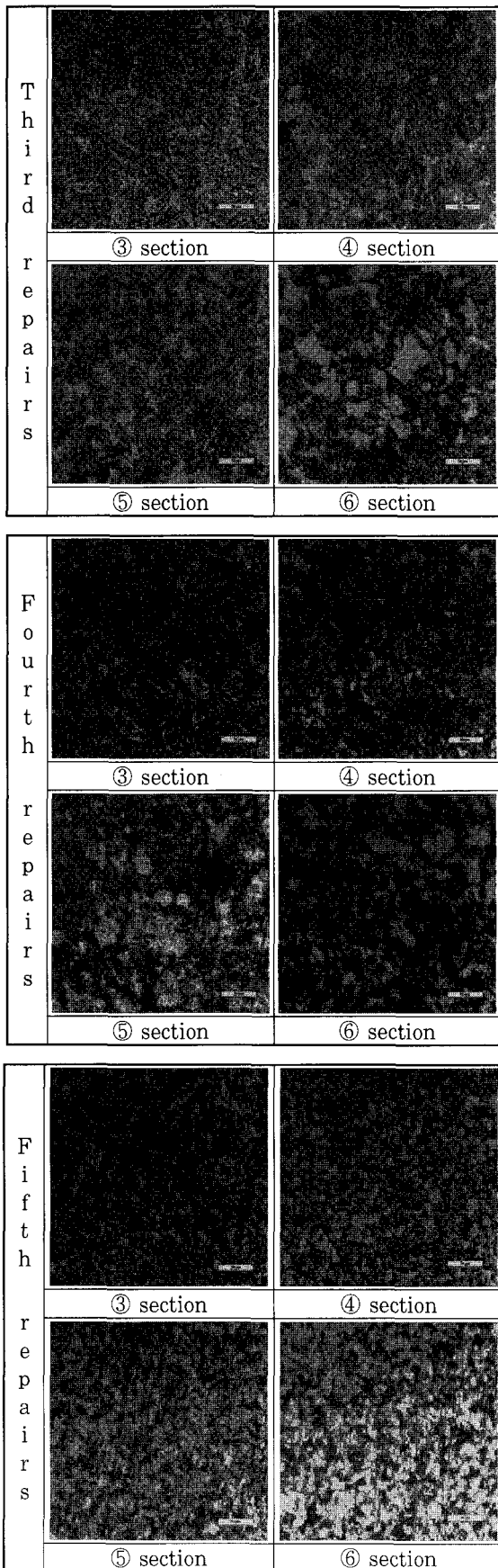


Fig. 10 HAZ microstructure( × 500, scale bar 50 $\mu$ m)

또한 각 시험편의 미세 조직관찰 결과 입열량 차이에 의한 입자크기가 다소 변화하였으나 결함이나 불균등성 등은 나타나지 않았다.

Fig. 11은 용접금속의 미세조직을 나타냈다. 용접금속 조직은 용접면부터 급냉되어 얇은 급냉층이 생성되었고 급랭 중 내부로 갈수록 온도구배가 완만하게 되어 용융금속의 응고는 주로 용접면(벽면)에 수직으로 진행됨으로써 수지상정(dendrite) 모양으로 형성되었다. 또한 길고 엷은 형태로 응고된  $\alpha$ -Fe와 시멘타이트 혼합 조직인 베이나이트계 조직이 형성되었음을 확인할 수 있다.

### 3.5 육안조직(macro) 변화

각 시험편들의 육안조직 관찰 결과를 Fig. 12에 나타내었다. HAZ의 크기는 3~5mm 정도로서 보수용접 횟수 차이에 따른 입열량 증가에 기인한 HAZ 크기(거리) 변화는 미소하였다.

### 3.6 기계적 특성 변화 종합

4회, 5회 보수 용접한 시험편이 1~3회 보수용접 시험편보다 인장강도의 변화지역 즉 HAZ 구간이 넓게 나타냈으나 입열량 증가에 의한 것인지는 증명할 수 없으며 HAZ의 최소요구 강도는 각 시험편 마다 ASME 요구치를 만족하고 있어 문제점은 없는 것으로 판단된다. 각 시험편들의 HAZ 거리(크기)는 3~5mm 정도로서 입열량 차이에 의한 변화는 없었고 입상역에서 경도가 저하하는 연화현상은 나타나지 않았으며 인성의 증가 또는 감소는 미소한 정도로 판단된다.

### 3.7 야금학적 특성 변화 종합

입열량 차이에 의한 미세조직 입자크기 차이는 일부 있었으나 결함이나 불균등성은 나타나지 않았고 각 시험편 HAZ의 크기 및 형태 등 차이점을 조사한 결과 거시적인 변화도 없었다.

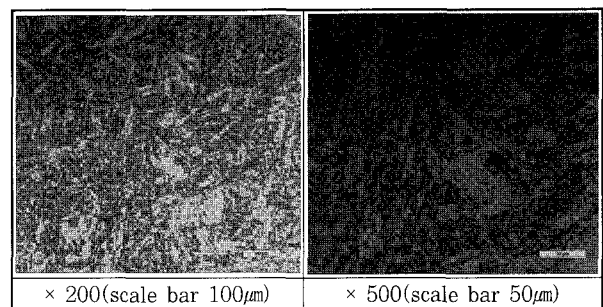


Fig. 11 Weldmetal microstructure / ② section

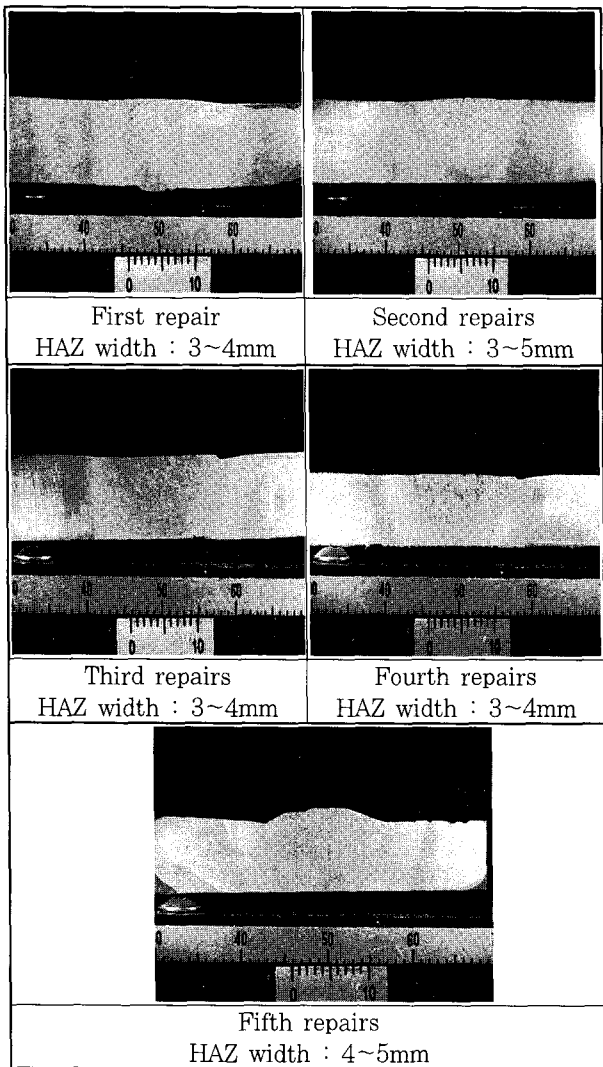


Fig. 12 HAZ macrostructure

#### 4. 결 론

저 합금강재(2.25Cr-1.0Mo)의 반복 보수용접에 따른 HAZ 특성변화에 대해 시험한 결과 그동안 관례적으로 2~3회 정도로 제한하여 보수용접을 시행하고 그 이상의 수정용접이 필요할 경우 소재 교체를 고려하였으나 금번 5회 연속적으로 보수 용접한 용접부의 기계적, 야금학적 시험을 통해 용접부 취약개소인 HAZ의 품질 신뢰성이 유지되고 있음을 확인하였고 따라서 보일러 튜브 두께는 10mm 이내로 얇아 5회 이내의 보수 용접을 시행하여도 HAZ 특성을 저해시킬 정도의 입열량이 소재에 부과되지 않는다는 것이 증명되었다. 이를 감안하면 상기 용접변수를 만족하는 신규소재의 조건하에서 5회 이하로 제한하여 보수용접을 적용하여도 정비 품질에 문제는 없는 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. H. Furuya : A New Proposal of HAZ Toughness Evaluation Method, Welding Journal, (2007.1), 1s~8s
2. C. Sudha : A Microstructure and Microchemistry of Hard Zone in Dissimilar Weldment of Cr-Mo Steel, Welding Journal, (2006.4), 71s~80s
3. Lundin : Advances in Welding Science and Technology, ASM International, 475(in American)
4. Seok-Joo Hong, Sung-Ho Hong : The Status of Repair Welding for Power Plant, Journal of KWS, 23-1(2005), 26~29(in Korean)
5. Vallourec Industries. The T22 Book, 27(in France)