

# 발전 보일러용 크롬 저합금강의 용접후열처리 특성

위 재훈, 문승재\*, 유호선\*\*†

한국남동발전(주), \*한양대학교 기계공학부, \*\*승실대학교 기계공학과

## 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\*\*†

KOSEP, Seoul 135-791, Korea

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

\*\*Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received July 29, 2010; accepted December 15, 2010)

**ABSTRACT :** This study investigated characteristics of the post-weld heat treatment of SA213-T23, which was developed for water wall of the ultra super critical power boiler. The temperature of post weld heat treatment should be 730°C or higher to reduce hardness of the deposit metal and heat affected zone. Coincidentally, the temperature should remain 760°C or lower to prevent hardness of the base metal from dropping. Hardness decline of deposit metal was trivial according to time when the holding time of heat treatment at 740°C of post-weld heat treatment gradually increased from initial 15 minutes.

**Key words :** post-weld heat treatment, hardness, SA213-T23

### 1. 서론

현대산업의 발전과 함께 많은 분야에서 용접은 그 중요성을 더해가고 있다. 최근에는 용접기술 및 재료의 지속적 개발로 선박, 자동차, 항공기, 압력용기, 화학플랜트 및 발전설비 등의 구조물 이음부가 용접에 의해 접합되고 있다. 이러한 구조물 제작 과정에서 사용되는 각종 재질은 고온 및 고압에 견딜 수 있도록 요구되어지고 있다. 특히 원자력 및 화력발전소의 구조물 접합부에는 중요 성능인자인 내열성과 내식성을 증가시키기 위해 크롬-몰리브덴(chrome-molybdenum, Cr-Mo)강재가 널리 이용되고 있다. 크롬이 함유된 강종은 내산화성이 우수하고 강도 및 내크리프성이 향상되는 경향이 있으며 수소에 대한 저

항성이 우수하나 크롬 증가에 따른 용접성이 저하되어 용접시 예열 및 후열처리를 수행한다. 용접후열처리(post-weld heat treatment, PWHT) 과정은 재료의 안정성 및 신뢰성을 향상시키기 위하여 잔류응력 제거, 용접변형 완화 및 용접부의 균질화 처리 등을 목적으로 많은 용접구조물에 대하여 시행되고 있다.

발전효율 향상과 이상화탄소 배출량 저감에 효과적인 초초임계압(ultra-super critical, USC) 발전소에서 보일러 재료 분야 기술개발은 고온강도 및 내산화 및 부식성이 우수한 과일기 튜브 재료, 고온강도 및 피로강도가 우수한 후육 파이프 재료, 우수한 용접성과 높은 고온강도를 갖는 수냉벽 튜브 재료 개발이 핵심적인 사항이다. SA213-T23(T23)은 Smitomo사와 Mitsubishi 중공업에서 공동 개발한 강재로서 USC 발전소의 수냉벽 튜브용으로 사용하기 위하여 2.25Cr계의 SA213-T22(T22) 재료를 개량하여 개발되었으나 용접후열처리에 따른 재열균열 발생 보고가 최근 빈발하고 있다.

† Corresponding author

Tel.: +82-2-820-0661; Fax +82-2-820-0668

E-mail address: hsyoo@ssu.ac.kr

본 연구에서는 T23을 모재로 사용하여 가스-텅스텐 아크용접 (gas tungsten arc welding, GTAW) 방법으로 용접을 실시한 후 용접상태(as-welded)와 용접후열처리 온도를 변화시킨 시편의 경도변화를 비교 분석하였다. 또한 740°C에서 용접후열처리를 실시하고 유지시간을 변화시킨 시편의 경도 측정을 통해 용접후열처리 유지시간에 따른 경도변화를 비교하였다.

## 2. 발전용 보일러 수관

### 2.1 재질선정

보일러나 배관 등과 같이 고온고압이 작용하는 기 설계시, 재료의 허용 인장응력은 두께 등을 결정하는 주요 요소가 된다. 허용응력 관련 코드인 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Materials에서는 허용응력 선정을 위해 여러 가지 방법들이 사용된다. 상온에서 구한 최소인장강도의 25%를 적용하는 방법, 상온에서 구한 최소 항복강도의 67%를 적용하는 방법, 1000 시간동안에 0.01%의 크리프 변형률을 발생시키는 응력의 100%를 적용하는 방법, 그리고 10만 시간동안 크리프 파단을 발생시키는 응력 최소값의 80% 또는 평균값의 67%를 적용하는 방법 등이 있으나 이 중에서 최소값을 설계 허용응력값으로 규정하고 있다.

보일러 튜브의 관 외면은 설계중기온도 보다 약 20°C 높으며 중유와 석탄 등 연료 중의 불순물인 나트륨, 칼륨, 바나듐, 황 성분 등의 부식성 물질들이 관 표면에 부착되어 부식을 촉진, 두께를 감소시키는 손상을 발생시킨다. 따라서 고온산화성이 고려되어야만 한다. 반면 관 내면은 수증기에 의해 산화로 스케일이 생성된다. 생성된 스케일이 박리되어 굴곡부에 낙하, 퇴적하는 경우에 수증기 유동을 저해하게 되며 파열을 야기하게 된다. 또한, 스케일이 터빈축에 비산하는 경우에는 밸브 또는 터빈 블레이드 등에 침식을 일으킬 수 있으므로 내산화성을 신중하게 검토하여야만 한다. 이러한 스케일이 두껍게 생성되는 경우에는 전열 저해에 의한 파열의 원인이 되기도 한다.

부식성 연소가스 중에 배치된 관에 대해서는 고온 부식이 문제가 되고 파열기나 재열기에 사용된 스테인레스 강관의 내표면에는 수증기 산화에 의한 스케일 생성이 문제가 될 수 있기 때문에 파열기관 및 재열기관에는 내부식성 및 내산화성이 우수한 재료가 적용되어야 한다. 또한 고온에서 장시간 가열을 받으면 금속조직이 변화한다.

파열기관 및 재열기관은 그 구조상 엄격한 조건에서 열간 또는 냉간으로 곡면이 가공되기 때문에 충분한 연성을 가진 재료의 선정이 필요하다. 또한 이들은 같은 재질 및 다른 재질과 접합되기 때문에 용접성도 양호해야 한다.

보일러용 강관에서는 지금까지 고온 크리프 파단특성이 기인하는 장애보다는 고온산화나 수증기 산화에 관련된 장애가 많이 발생되었다. 그러나 앞으로 발전소 수명연장에 있어서는 고온강도나 고온부식에 대한 평가와 대책도 중요하게 다루어져야 할 것이다.

### 2.2 사용재질

화력발전소 보일러에 사용되고 있는 재료는 탄소강, Cr-Mo 저합금강, 9~12Cr 강 및 오스테나이트계 스테인레스강으로 대변된다. 탄소강은 가장 일반적으로 사용하는 재질로서 400~450°C 이하의 온도 영역에서 사용되는 재료로서 고온크리프 파단온도가 낮고 흑연화 등의 조직변화를 일으키므로 고온 영역에서는 사용이 제한된다. 최근 건설되는 발전소 보일러 튜브 재질로 많이 사용되는 Cr-Mo 저합금강은 600°C 이하의 온도영역에서 사용된다. Cr-Mo 저합금강은 Mo의 첨가로 고온강도가 향상되고, Cr의 첨가에 의하여 내산화성 및 흑연화에 대한 저항성이 향상된다. 9~12Cr 강은 625°C 이하의 온도영역에서 사용되는 재료로서 Cr-Mo 저합금강에 비하여 500~600°C 온도영역에서의 허용응력 향상이 두드러진다. 600°C까지의 온도에서는 12Cr강을 기본으로 텅스텐 또는 몰리브덴을 첨가하여 고온강도 향상을 꾀한다. 탄소강, Cr-Mo 저합금강, 9~12Cr강은 공히 페라이트계로서 고온강도는 스테인레스강에 비해 떨어지나 선팅창계수가 작기 때문에 연신율차가 작고 사용하기 쉬운 장점이 있어 초임계압 발전설비용 보일러 재질로 가장 많이 사용된다. 마지막으로 오스테나이트계 스테인레스강이 사용된다. 탄소강의 오스테나이트는 고온에서만 존재하나 니켈이 첨가된 강에서는 실온에서도 오스테나이트화 되고 자성을 가지지는 않는다. 이러한 오스테나이트에 Cr을 첨가하여 고온강도를 향상시킨 것이 오스테나이트계 스테인레스강이며 보일러 고온부 전열관에 적용되고 있다.

### 2.3 용접성능

철강에 있어서 탄소를 비롯한 합금 원소는 강의 경화능이나 내식성 및 내열성을 증대시키기 위해 첨가된다. 이들은 임계 냉각속도와 변태온도를 낮추기 때

문에 마르텐사이트로의 변태를 용이하게 하여 경화능을 높이게 된다.

예열은 용접부의 냉각 속도를 지연시킴으로서 열영향부와 용접 금속의 경화를 작게하고 연성을 회복시키며 새로운 용접부의 확산성 수소 방출을 촉진, 용접부의 균열을 억제시키는 역할을 한다. 따라서 강종별로 안정된 용접금속을 얻기 위한 최소 예열 온도의 적용이 필요하다.

용융 용접에서는 먼저 용접부가 용융되어야 하고 응고 과정에서 모재와 충분한 금속간 화합물을 만들 수 있는 시간이 필요하다. 이 과정에서 필요한 전기적 에너지를 용접 입력량으로 정의한다. 이 에너지는 모드가 용접 열원으로 사용되지는 않으며 용접봉 용융에 15%, 용착 금속 생성에 20 ~ 40%, 그리고 모재의 가열 등에 60 ~ 85%의 에너지가 사용된다.

용접 입력량이 클수록 용접부의 냉각 속도가 늦어지고 비드가 두껍게 되며 조직이 커지게 되는 조대화 현상이 발생한다. 용접금속의 강도 저하 특히 항복강도의 저하, 충격강도의 저하등을 방지하기 위해서는 과도한 용접 입력을 피해야 한다. 그러나 용접 입력이 너무 적으면 냉각 속도가 빠르고 열영향부와 용접금속의 경화로 인해 용접 균열이 발생될 수 있다.

### 3. 용접후열처리

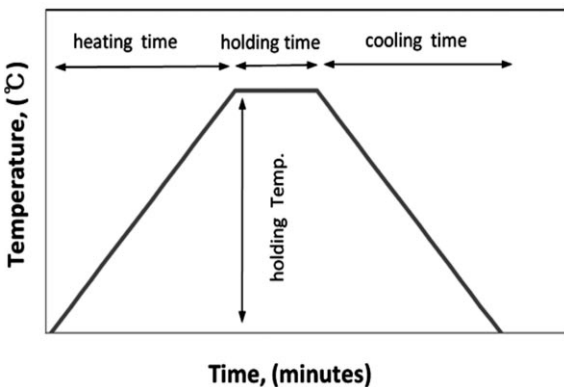


Fig. 1 Heat cycle of post-weld heat treatment.

Table 1 Chemical compositions of T23 material (wt%)

Composiition	C	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Nb	B	N
Min.	0.04	0.1	-	-	1.90	0.05	0.2	1.45	0.02	0.0005	-
Max.	0.10	0.6	0.03	0.01	2.60	0.30	0.3	1.75	0.08	0.006	0.03

### 3.1 목적

용접 과정에서 경화된 조직은 다양한 형태의 취성에 노출되기 쉽고 모재에 비해 상대적으로 불순물이 많아 급냉된 조직의 높은 에너지 영역을 형성, 부식환경에 노출되었을때 우선적으로 부식되어 구조물의 안정적인 사용에 문제를 야기시킨다. 따라서 용접후 열처리는 용접과정에서 발생하는 응고 잔류응력을 제거하고 용접부에 포함된 수소를 배출하는데 그 목적이 있다.

### 3.2 방법

용접후열처리는 용접 구조물에 열을 가하여 잔류응력을 저감시키기 위해 소성변형 시키는 작업으로서 Fig. 1은 용접후열처리 작업에 대한 개념도이다. 용접후열처리 작업은 Fig. 1과 같이 온도를 일정한 상승률로 상승시킨 후 정해진 유지온도에서 규정된 유지시간 동안 열을 가하고 일정한 냉각률로 온도를 저감시키는 작업으로 열을 가하는 방법에 따라 다음과 같이 구분된다.

노내열처리법은 공장 등에서 제작되는 용접 구조물 전체를 열처리 노에 장입하여 용접부 후열처리를 실시하는 방법이다. 반면 현지전체가열법은 대형 탱크와 같이 노내용접후열처리가 불가능한 구조물을 현장에서 전체적으로 용접후열처리 하는 방법이다. 이 방법은 적절한 가열장치와 외부의 방열에 의하여 노내열처리법에 가까운 효과를 얻을 수 있으나 대상물이 크고 현장에서 행하여지기 때문에 균일 가열, 온도 관리, 열팽창 대책 및 안전대책 등에 대하여 면밀한 계획이 필요하다. 국부가열법은 노내열처리법이 불가능할 경우 적용된다. 배관이나 원통형 용기 등에서 행해지며 원주의 일정 폭을 가열하는 방법이다. 가열 방법으로는 전기저항가열, 전기유도가열, 버너가열, 화학반응에 의한 발열 등 많은 방법이 있어 시공대상이나 시공장소 등의 조건에 따라 결정된다. 국부 가열 시에서는 가열부와 비가열부와의 온도 구배를 완만하게 하고, 용접부 주위에 규정된 가열폭 및 보온폭을 설정하며 적절한 보온을 하는 것이 고려되어야 한다.

### 3.3 효과

용접후열처리는 용접 잔류응력을 완화시킨다. 잔류응력은 가열과정에서 재료의 항복점 저하에 따라 감소하여, 용접후 열처리 온도에 도달하면 그 온도에서 항복점 바로 밑의 수준에 이르게 된다. 또한 유지시간 동안에는 크리프 변형에 의하여 잔류응력의 저하가 진행된다. 또한 용접후열처리 완료후의 형상치수가 시간의 경과에 따라 변화되지 않게 하기 위해서는 최종 잔류응력을 저감할 필요가 있어 냉각속도를 낮추거나 열처리 노로부터의 반출온도를 낮출수록 효과가 있다

일반적으로 강의 열영향부는 용접금속과 모재와의 경계인 본드부에서 멀어짐에 따라 조직의 차이와 기계적 성질의 차이를 나타낸다. 이 본드부에서는 경도의 불연속과 최고경도가 생긴다. 일반적으로 최고경도가 클수록 열영향부가 취약하게 되므로 최고경도가 낮은 것이 좋다.<sup>[2]</sup>

재질의 종류에 따라서 인장강도와 경도는 변화가 한 방향으로만 결정되지 않는 것으로 알려져 있다. Cr-Ni 강의 경우 시간이 증가함에 따라 경도가 증가하고 반대로 Cr-Mo강의 경우는 감소하기 때문이다. Cr-Ni 강의 경도 증가는 조직내에 미세하게 석출되는 2차 탄화물이나 Fe-Cr-Ni 계열 합금 화합물의 석출에 따른 것이다. 반면 Cr-Mo강의 경우 뜨임 구간의 장시간 시효시에는 전위조직의 재배열 및 소멸과 탄화물의 석출 및 조대화에 의한 경도가 감소하기 때문이다. 시효시간이 증가함에 따라 인장강도는 Cr-Ni강의 경우, 증가 후 다소 감소하였고 Cr-Mo강의 경우 경도의 변화 경향과 유사한 경향성을 나타냈다. 인장 강도의 변화는 설계 및 운영기준의 만족여부를 평가하는데 있어서 경도값 보다 유용하게 활용될 수 있지만 강도변화의 경향성은 사용재료에 따라 다를 수 있으므로 강도변화만을 취화의 변수로 확대 적용하기는 한계가 있음을 알 수 있다.<sup>[3]</sup>

## 4. 크롬 저합금강의 용접후열처리 시험

### 4.1 시험조건

본 연구에서는 화력발전 플랜트 보일러에 많이 사용된 2.25Cr-1Mo강 중에서 최근 개발되어 사용량이 증가하고 있는 T23 재질을 사용하여 실험하였다.

#### 4.1.1 시료준비

본 연구에 사용된 재료는 T23재질로서 소재의 화

학 조성은 Table 1과 같다. T23 재질은 크롬 함유량이 1.9~2.6% 함유된 2.25Cr-1Mo 계열 강으로서 고온강도를 높이기 위해 텅스텐이 1.45~1.75%나 첨가되었음을 알 수 있다.

#### 4.1.2 용접방법 및 용접조건

본 연구에 사용된 시편은 외경 42.2 mm, 두께 5.7 mm의 튜브를 사용하여 가스-텅스텐 아크용접(gas tungsten arc welding, GTAW)을 시행하였다. 예열 온도는 200℃로 시행하였고 용접 패스간의 층간온도는 예열온도를 유지하기 위하여 타 강재의 층간온도보다 다소 높은 200℃를 유지하였다. 용접봉은 T23 개발에 참여한 Smitomo사의 HCM2S를 사용하였으며 용접중 산화 방지를 위한 밀폐가스과 차단가스로는 아르곤 가스를 사용하여 용접을 실시하였다. 용접중 전압과 전류는 각각 8~20 V와 90~180 A 이었다.

#### 4.1.3 용접후열처리 조건

용접을 실시한 후 현장 조건과 동일하게 전기저항용 세라믹 패드를 사용하여 용접후열처리를 실시하였다. 용접후열처리는 두개의 그룹으로 분리하여 실시하였다. 첫번째 그룹은 유지시간을 60분으로 고정된 상태에서 유지온도 710℃, 720℃, 730℃ 그리고 740℃로 각각 다르게 하여 용접후열처리를 실시하였고, 두 번째 그룹은 유지온도를 740℃로 일정하게 유지한 상태에서 유지시간을 15분, 30분, 그리고 60분으로 각각 다르게 하여 용접후열처리를 실시하였다.

#### 4.1.4 시편가공

용접후열처리를 행한 후 용접 비드면과 수평되게 자르고 크레이터 부위를 기준으로 폭 10 mm, 길이 30 mm로 시편을 가공하였다.

## 4.2 시험방법

### 4.2.1 경도시험

용접부의 경도는 마이크로 비커스 경도계(micro vickers hardness tester)를 이용하여 시험하중과 하중작용시간을 각각 10 kgf/mm<sup>2</sup>, 20초 조건으로 상층, 중층 및 하층부로 나누어 측정하였다. 경도측정은 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 모재부, 열영향부 그리고 용접부로 구분하여 각층마다 3개소에서 경도를 측정하였으며 측정된 각 부위의 경도는 평균값을 취하여 분석하였다.

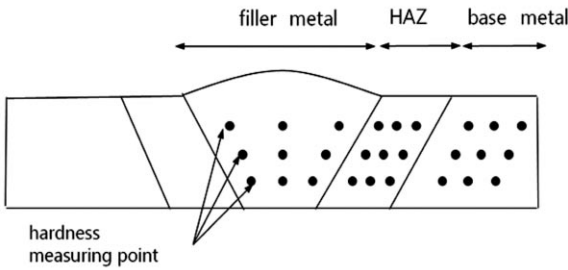


Fig. 2 Schematic diagram of hardness measurement.

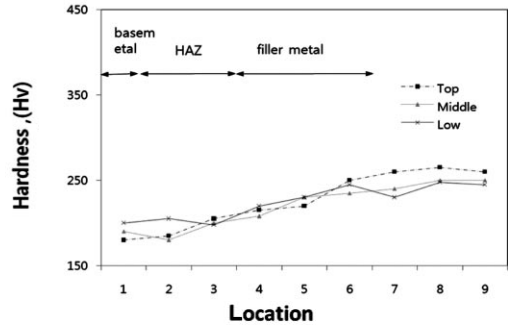


Fig. 3 Hardness of each welding parts with post-weld heat treatment.

#### 4.2.2 조직관찰

시편을 폴리싱, 에칭 그리고 코팅 단계를 거쳐 가공한 후 최종 용접층을 5000배 전자현미경을 이용하여 용접부와 열영향부의 조직을 관찰하였다.

#### 4.3 경도고찰

##### 4.3.1 부위별 경도변화

유지온도 740℃에서 60분간 용접후열처리한 후 측정된 각 부위별 경도를 Fig. 3에 나타내었다. 최고 경도값은 용착금속부에서 발생하였다. 일반적으로 용접후열처리 전에는 최고 경도가 열영향부에서 나타나는 것으로 알려져 있으나, 본 실험에서는 용접후열처리 후에는 용착금속의 중앙부가 최고 경도부위로 확인되었다. 상층, 중층, 하층으로 구분하여 관찰해보면 용착금속의 상층, 중층, 하층부 순으로 경도가 높게 측정되었다. 다층용접시 하부 용접 비드는 상층

의 용접열에 의해 가열 및 냉각과정을 거쳐, 반복적인 인장 및 압축하중을 받게 되어 반복 하중을 받는 구조물에서 일반적으로 발생하는 바우싱거 효과 (Bauchinger effect)로 인해 경도가 저하된 것으로 추정된다.

##### 4.3.2 용접후열처리 유지온도에 따른 경도변화

용접후열처리 유지시간을 60분으로 고정하고 유지온도를 변화시켜 모재부, 열영향부 그리고 용접부의 경도를 측정된 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 모재부의 경도는 용접후열처리 온도 변화와 무관하다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 모재의 생산과정 중 1100℃ 이상에서 노말라이징을 수행하고 760℃ 이상에서 템퍼링을 시행한 관계로 760℃ 이하의 온도에서는 경도 저하가 발생하지 않는 것으로 판단된다. ASME 2199-3에서는 P No 5A에 준하여 720~800℃를 용접후열처리 온도로 추천하고 있으나 용접후열처리 온도를 760℃ 이상으로 가열을 되풀이 할 경우 모재

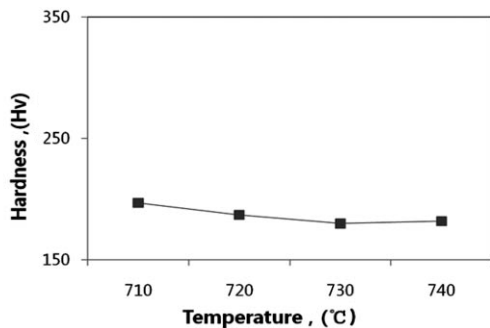


Fig. 4 Hardness of base material in different post weld heat treatment temperatures.

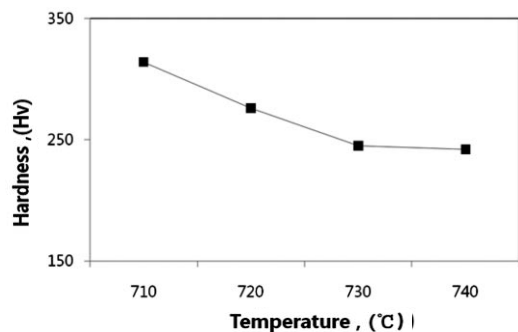


Fig. 5 Hardness of heat affected zone in different post weld heat treatment temperature.

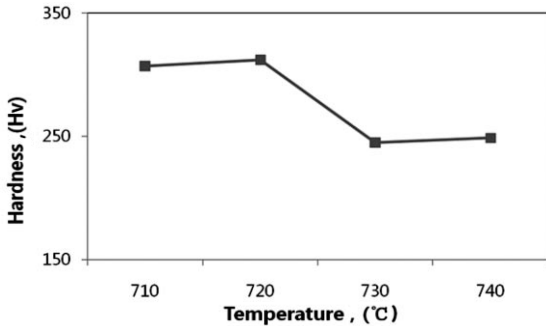


Fig. 6 Hardness of welding material in different post-weld heat treatment temperatures.

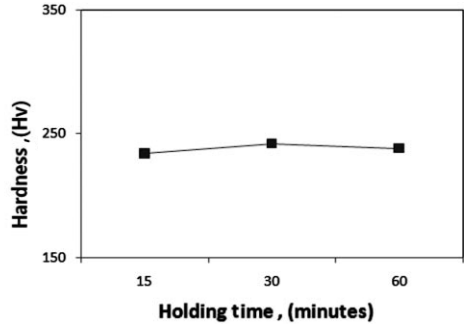


Fig. 7 Hardness of heat affected zone in different holding time.

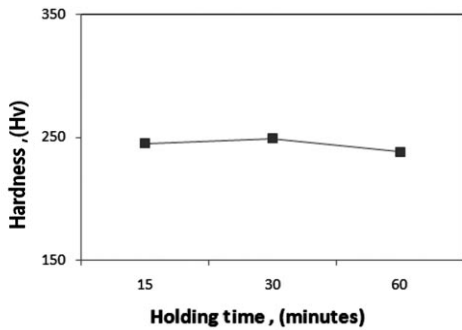


Fig. 8 Hardness of welding material in different holding time.

부 경도가 175 Hv 이하로 낮아질 수가 있다.

용접후열처리 온도변화에 따른 열영향부의 경도변화를 Fig. 5에 나타내었다. 열영향부의 경도는 용접후열처리 온도 변화에 따라 점진적으로 저하됨을 알 수 있다. 이는 용접후열처리 과정에서 잔류응력의 감소에 따른 것으로 해석된다. 따라서, 열영향부에서 용접으로 발생하는 잔류응력을 감소시킬 수 있는 최소 용접후열처리 온도는 720 ~ 730°C로 나타났다.

용접후열처리 온도변화에 따른 용접부의 경도변화를 Fig. 7에 나타내었다. 용접부 경도는 용접후열처리 온도 변화에 따라 730°C 부근에서 급격하게 용접 잔류응력이 감소되었다.

#### 4.3.2 용접후열처리 유지시간에 따른 경도변화

용접후열처리 온도를 740°C로 일정하게 유지한 후 열처리 유지시간을 15분에서 60분까지 점증시키는 경우 모재, 열영향부 그리고 용접부의 경도변화는 Fig. 6~8과 같다. Fig. 6~8에서 알 수 있는 것은 후열처리 유지온도를 740°C로 일정하게 유지하는 경우

용접부 경도는 용접후열처리 유지시간 변화에 무관하게 일정하다는 것이다. 따라서 740°C 용접후열처리 온도에서 용접으로 발생하는 잔류응력을 감소할 수 있는 최소 유지시간은 최소 15분이면 충분한 것으로 판단된다.

#### 4.4 조직고찰

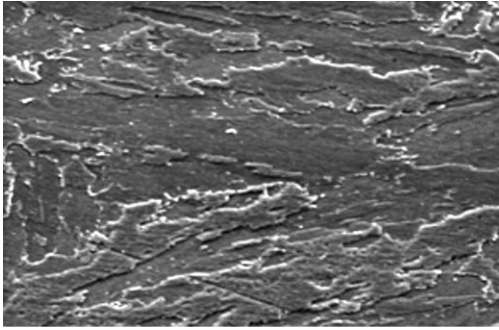
용접후열처리 전과 후의 전자현미경 사진을 Fig. 9에 나타내었다. 모재부와 용착금속부는 베이나이트와 마르텐사이트 혼합조직으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 한편 용접후열처리 전의 용착금속부와 열영향부에서는 입계와 입내에 탄화물이 균일하게 분포되어 있는 것으로 알 수 있으나 후열처리 온도가 증가함에 따라 입계에 탄화물 석출이 증가함을 알 수 있다. 이는 T23 조성에서 몰리브덴 함량을 낮추고 텅스텐을 첨가하였으며, 바나튬, 나이오븀, 붕소 등의 미세 석출물 형성원소를 추가한 결과로 판단된다.

#### 5. 결론

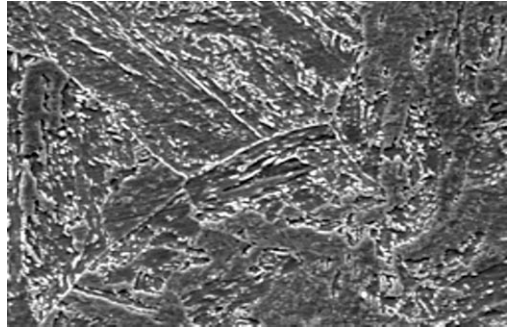
2.25 Cr-1 Mo강 중 화력발전소 보일러 수냉벽 용으로 개발된 SA213-T23 재질을 710°C, 720°C, 730°C 그리고 740°C로 용접후열처리한 시편을 제작하여 경도와 조직을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접후열처리 후 경도는 용착금속 부분이 가장 높으며 상층부, 중층부 그리고 하층부 순으로 경도가 높은 것으로 나타났다.
- (2) 모재부 경도는 용접후열처리 온도 변화와 무관하게 175 Hv로 일정하게 측정되었다. 용착금속부와 열영향부 경도를 저하시키기 위한 용접후열처리 온도는 730°C 이상이 요구되는 것으로 판단된다.

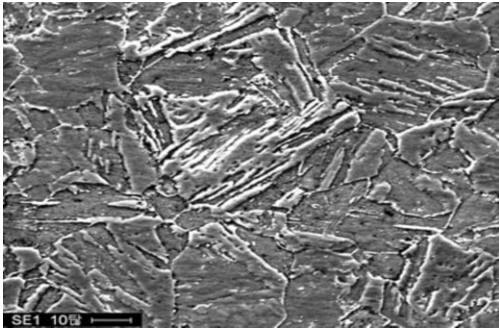
## 발전 보일러용 크롬 저합금강의 용접후열처리 특성



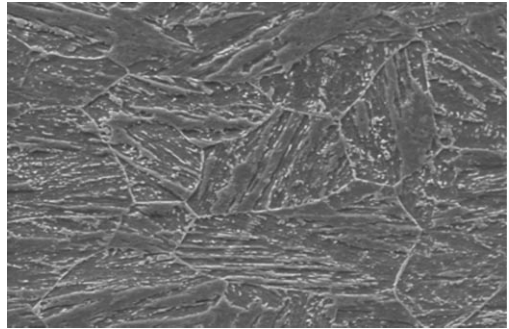
(a) Filler metal with 740°C PWHT



(b) HAZ with 740°C PWHT



(c) Filler metal without PWHT



(d) HAZ without PWHT

Fig. 9 SEM pictures of welding material and heat affected zone in different post-weld heat treatment temperature.

- (3) 용접후열처리 유지온도 740°C에서 최소 15분의 유지시간으로도 용착금속부의 만족할 정도 저하를 얻을 수 있음을 알았다.
- (4) 후열처리 온도가 증가함에 따라 용착금속부와 열영향부 입계에 탄화물 석출이 증가되는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. 황선일, 2006, Cr-Mo 합금강의 용접후열처리
- 에 다른 균열감수성 평가에 관한 연구, 석사학위논문, 충남대.
2. 우승완, 2005, 원전 냉각계통 CF8M과 SA508 용접부의 열화에 따른 강도평가, 석사학위논문, 영남대.
3. 김두송, 2003, “연속압입시험법을 이용한 후판강 용접부의 신뢰성 평가에 관한 연구”, 석사학위논문, 충남대.
4. 김미령, 2000, TOFD법을 이용한 스테인리스강 용접부의 결함평가, 석사학위논문, 한양대.