

# 저합금 C-Mn-Ni-Mo강의 SA 용접부에서 미세조직과 인성에 대한 연구

## Study on the Microstructure and Toughness in the SA Weld metal of the Low Alloy C-Mn-Ni-Mo Steel

김세철\*, 고진현 \*\*, 김남훈\*\*, 강영환\*\*\*, 주기남\*\*\*, 김정태\*\*\*\*

\* 전문건설공제조합 직업전문학교

\*\* 한국기술교육대학교

\*\*\* 한국원자력연구소

\*\*\*\* (주)두산중공업

### 1. 서 론

원자력 발전소의 압력용기 강재로 사용되고 있는 ASME SA508 class(cl.)3 강은 C-Mn-Ni-Mo 등의 주요합금원소를 함유하며 단조하여, 후판으로 제조되는 저합금 페라이트계 강이다. 원자로 압력용기(Reactor Pressure Vessel, RPV)는 이 강을 용접하여 제조되며 사용 수명기간 동안 용기로서 건전성을 유지할 수 있도록 우수한 기계적 성질이 요구된다. 특히 용접부를 포함한 압력용기는 그 수명동안 고속 중성자 조사 때문에 재료열화(material degradation)를 피할 수 없다. 그러므로 용접미세조직에 AF가 다량으로 생성될 경우 용접부는 최적의 강도와 인성을 갖는다고 알려져 있다.<sup>1,2)</sup>

본 연구에서는 원자력 압력용기강인 SA508 cl.3 강을 서브머지드 아크 용접으로 용기제조시 용접시공명세서에 허용하는 범위에서 입열량을 변화시켜, 용접된 상태(as weld)와 용접 후 열처리(PWHT)된 상태를 비교하여 용접미세조직과 인성 및 경도와의 관계를 조사하였다.

AWS PFH55SN을 사용하였다. 플럭스는 사용하기 전 건조로에서 250℃에서 4시간 동안 가열하여 건조하였고 모재는 용접하기 전에 120℃로 가열하였다.

### 2.2 용접방법

서브머지드 아크 용접법을 사용하여 입열량을 용접시공 명세서에서 허용되는 용접조건범위 내에서 Table 1과 같이 2.4kJ/mm와 3.6kJ/mm를 사용하여 다층패스 용접을 하였으며, 용접하기 전 모재는 최저 120℃로 예열 하였고 용접패스의 층간온도는 200℃로 유지하였으며, 용접이 완료된 시편을 600℃에서 40시간동안 용접 후 열처리를 하였다.

Table 1 Welding parameters of SA508 Class. 3 steel used in this study

Heat input (KJ/mm)	Welding Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	pwht	Preheat T(℃)	Interpass T(℃)
2.4	530	30	40	600℃ 40hrs	120	200
3.6	600	30	30			

### 2. 사용재료 및 실험방법

#### 2.1 사용재료

본 실험에 사용된 모재는 두께 50mm의 강을 절반으로 절단하여 두께 24mm 가로 120mm, 세로 400mm로 가공하였고, 용접와이어와 플럭스는 압력용기 제작시 요구되는 용접시공명세서에 따라 와이어는 AWS US40N이었고, 플럭스는 염기성(basic) 저온 소결형 플럭스(bonded flux)로

#### 2.3 용착금속의 조직검사

용접된 시편을 용접 길이방향으로 중앙을 기준으로 좌우 15mm 간격으로 용접부를 횡 방향으로 절단하여 2개의 금속조직 시편을 채취하여 미세하게 연마한 후 2% Nital 용액에 부식하여 용착금속의 미세조직을 광학현미경과 주사전자 현미경으로 조사하였다.

2.4 충격시험

용접된 시편을 Fig. 1과 같이 용접 중앙선을 기준으로 용접길이 방향으로 55mm를 절단하고 모재 표면에서 아래로 용접비드를 2mm 절삭한 후 10×10×55mm 치수의 샤르피 V 노치 충격시편을 준비하였다. 그리고 충격시험으로 파괴된 시편의 파단면의 파괴모드는 주사전자현미경으로 조사하였다.

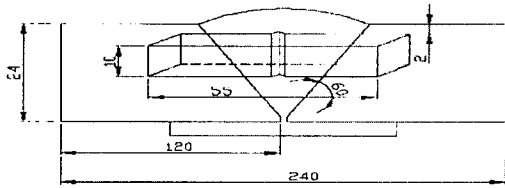


Fig. 1 Schematic diagram of Charpy V notch impact test specimen in the weld joint geometry(unit:mm)

2.5 경도시험

다층패스용접에서 용접부와 재열부의 생성으로 미세조직변화에 따른 경도변화를 조사하기 위하여 미세조직검사에 사용된 시편을 이용하여 용접부의 하부로부터 상부로 1mm 간격으로 1kg의 하중에서 비커스 경도기로 경도시험을 수행하였다.

3. 실험결과

3.1 용접부

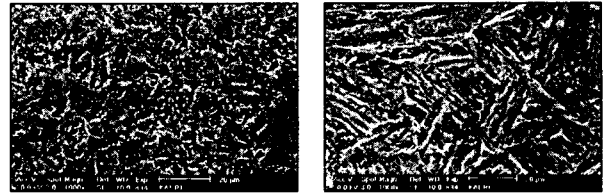
Fig. 2는 압력용기 강제 SA508 cl.3의 용접길이 방향에 대해 수직으로 절단된 용접부의 횡단면의 매크로 조직으로 다층패스 용접부이다. (a)는 입열량 2.4kJ/mm로 9패스가 용착되었고, (b)는 입열량 3.6kJ/mm로 6패스가 용착된 것이다.



(a) 2.4 kJ/mm (b) 3.6 kJ/mm  
Fig. 2 Macrosection of submerged arc welds

3.2 용접된 상태(as-welded)

Fig. 3(a)와 3(b)는 용접된 상태의 미세조직을 주사전자 현미경으로 관찰한 것이다.



(a) 2.4 kJ/mm (b) 3.6 kJ/mm

Fig. 3 SEM micrographs of microstructure of as deposited weld metal

Fig. 3(a)입열량 2.4kJ/mm에서는 페라이트 입자가 작고 이들이 서로 얽혀있는 구조 형상을 하고 있는 전형적인 아시클러 페라이트들이 다량생성되어 있는데 비하여, Fig. 3(b)는 입열량 3.6kJ/mm에서는 용접 미세조직으로 래드의 폭과 길이가 아시클러 페라이트 보다 훨씬 넓고, 길며 방향성을 가지고 있기 때문에 베이나이트(bainite)라고 할 수 있다. 열처리에 의해 용접된 상태는 페라이트들이 보다 더 넓고(broad) 둥근 모양으로 변화되었고 등축정 페라이트 및 둥근 형태의 페라이트가 증가 되었다. 재열부에서는 폭이 넓어지고 길이가 길어지며, 더욱 구형 및 다각형 등으로 나타나고 있다. 이것은 다층패스 용접에서 후행 패스 용착시 사용한 용접 열사이클이 이미 용착된 선행 패스를 노멀라이징하여 결정립을 미세화하였기 때문이다.<sup>3)</sup> 열영향부의 미세조직은 미세한 결정립에서 템퍼드 마르텐사이트를 포함하여 조대한 결정립으로 구성되어 있다.

3.3 용접부 인성

용접된 상태와 용접후 열처리(PWHT)된 충격시편을 시험한 결과 충격 흡수 에너지, 연성파면율, 횡팽창률은 입열량에 의한 인성에 달려있다. Fig. 4 에서 3.6kJ/mm보다, 입열량 2.4kJ/mm가 인성이 좋다는 것이 입증되었다. 이것은 입열량이 증가하면 일반적으로 미세조직이 조대 해지고 AF량은 감소하고 인성에 불리한 GBF, FSP와 ferrite with aligned second phase, 베이나이트의 생성이 증가되었기 때문이다.<sup>4)</sup> 입열량 2.4kJ/mm에서 용착된 용접 미세조직에서는 인성에 이롭지 못한 FSP, PF와 GBF가 적게 생성되었고, 인성에 유리한 미세조직인 AF가 더 많이 생성되었기 때문이나 한편 입열량 3.6kJ/mm에서는 AF 생성이 감소되고 FSP, PF와 GBF 등의 미세조직 생성이 증가되었기 때문이다.

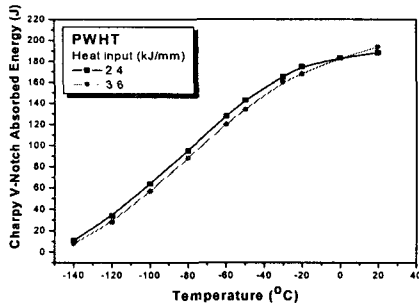
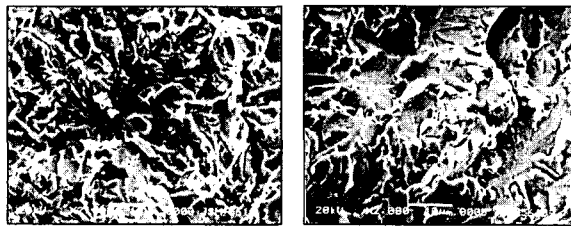


Fig. 4 Absorbed energy vs. test temperature of PWHT specimens with different heat inputs.

### 3.4 파단면

Fig. 5는 입열량이 각각 2.4kJ/mm와 3.6kJ/mm로 용착된 용접시편을 용접후 열처리된 CVN 충격시편을 -140°C에서 시험한 시편의 파단면 사진이다.



(a) 2.4 kJ/mm (b) 3.6 kJ/mm

Fig.5 Fractographs of CVN specimens at a heat input of(PWHT) tested

2.4 kJ/mm의 파단면 사진을 자세히 살펴보면 강 내부에 존재하는 산화개재물(oxide inclusion)이 침상형 페라이트의 핵생성 발생 장소임을 나타내고 있으며, 3.6 kJ/mm에서는 베이나이트나 위드 맨스테인 페라이트로 취성파괴에 대한 저항성이 작으며 용착금속의 인성 및 강도도 작게 된다.

### 3.5 경도시험

입열량이 2.4kJ/mm와 3.6kJ/mm에서 용접된 상태의 as-welded와 PWHT 사이의 경도시험 결과 용접된 상태와 PWHT상태의 두 가지 조건 모두에서 입열량 3.6kJ/mm의 용접부가 입열량 2.4kJ/mm의 용접부의 경도보다 높다. 이것은 입열량 3.6kJ/mm에서의 용접부의 미세조직이 FSP와 베이나이트 조직이 더 많이 생성되었기 때문으로 생각되며 이것은 이미 용접부의 미세조직에서 고찰되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 SA508 cl. 3 강을 압력용기 제작시 사용하는 용접시공명세서에 따라 용접조건 범위내에서 두 가지 입열량 2.4kJ/mm와 3.6kJ/mm로 다층패스 용접한 후 용접 후 열처리를 실시하여 입열량이 용접인성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 용접 후 열처리에 의해 용접금속의 인성은 증가하였지만 경도는 감소하였다.
2. 입열량 2.4kJ/mm의 용접금속이 3.6kJ/mm에서의 용접금속보다 충격흡수에너지(인성)가 약간 컸으나 두 입열량의 차이는 작았다.
3. 압력용기강재 시공명세서 범위에서 인성의 차이가 적었던 것은 용접금속이 인성에 영향을 미치는 아시클러 페라이트 생성량의 차이가 적었기 때문으로 사료된다.
4. 용접된 상태의 용접부, 열영향부 및 재열부의 미세조직은 용접후 열처리에 의해 용접부에서는 페라이트 입자 또는 래드 형상이 조대화 및 넓어졌고, 열영향부에서는 후열에 의한 재가열로 노멀라이징이 되어 구형화되었다.
5. 압력용기강 SA508 cl3 강은 C, Mn, Ni, Mo, 등을 주요합금원소를 함유하며, 사용 입열량이 2~4kJ/mm의 조건과 염기성 플럭스 사용은 AF생성에 유리한 조건이었기 때문에 본 실험에서 사용한 두 입열량에서 AF생성량에 큰 차이가 없었다.

### 참고문헌

1. R.E.Dolby, Advances in Welding Metallurgy of Steel, Vol.10, 1983, pp.349-361
2. P.R.Kirkwood, "New Observation on Microstructural and Toughness Control in Low Carbon Weld Metals", Metal Construction, May 1978, pp.260
3. K.Eastering, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, 1983, R.E.Dolby, "Factors Controlling Weld
4. Toughness The Present Position Part 2 Weld Metal, The Welding Institute Research Report, May 1976