

## 다층용접 열사이클이 원자로압력용기강 IRHAZ 의 미세조직과 인성에 미치는 영향

### Effects of Multi-Pass Weld Thermal Cycles on the Microstructure and Toughness in the Intercritically Reheated HAZ of Nuclear Reactor Vessel Steel

문종걸 김주학\* 홍준화\* 이창희 윤의박

한양대학교 금속공학과, 서울특별시 성동구 행당동 17번지

\*한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

#### 1. 서론

원자로 압력용기는 그 두께가 220 mm 이상으로 Narrow-Gap Submerged Arc Welding 방법에 의해 120 pass 이상 자동용접 된다. 이렇게 용접된 열영향부는 전·후 용접열사이클에 의해 매우 복잡한 미세조직과 인성 분포를 갖게 된다. 일반적으로 철강재의 용접열영향부에 대한 연구는 주로 coarse grained HAZ(CGHAZ) 또는 intercritically reheated coarse grained HAZ(ICCGHAZ) 에 집중되어 왔다. 이는 용접열에 의해 결정립이 조대화된 영역에서 재료가 취약해지기 때문으로, 원자로 압력용기강의 경우도 이 위치에서 감시시험(surveillance test)을 하도록 되어 있다. 그러나 최근 보고된 연구결과에 의하면, 원자로 용접부의 경우, CGHAZ 또는 ICCGHAZ 의 영역(용융선으로부터 1mm 이내)에서는 모재보다도 좋은 인성이 나타나고 intercritically reheated HAZ(IRHAZ) 에서 인성의 저하경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 IRHAZ 영역에 대한 보다 체계적인 평가를 시도하여, 원자로 압력용기강인 SA 508 Cl.3 을 대상으로 부분 변태의 가능성이 있는 IRHAZ 을 세분하여 다층용접 열이력에 따른 미세조직과 인성 및 기계적 특성의 변화를 고찰하였다.

#### 2. 실험 방법

본 실험에 사용된 재료는 SA 508 Cl.3 저합금강으로 화학적 조성은 표 1 에 나타나 있다. 모재는 normalizing/tempering, quenching/tempering 을 받은 것으로 템퍼드 베이나이트 조직이 주를 이룬다. 실제 용접 조건(입열량 : 30 kJ/cm)과 재료 물성을 고려하여 열전도식에 의해 최고온도 및 열사이클을 도출하였다. 이로부터 표 2 와 같이 재현조건을 설정하였고, 여기서 800℃, 750℃, 700℃ 조건은 합금 성분을 고려한 Andrews 의 예측식에 의해 828℃~685.5℃ 사이의 온도를 대표적으로 설정한 것이다. IRHAZ 는 HAZ 의 모재측에 가까운 위치로 최고온도의 영역이 A<sub>1</sub>~A<sub>3</sub> 변태점 사이에 있음을 나타낸다. 이렇게 구분된 영역에 대하여 조직재현실험을 행하고, 특히 두 번째 열사이클에 대하여 PWHT 의 영향을 알아보기 위해 PWHT 를 실시하였다. 재현실험에는 Gleeble 1500 장비를 이용하였다. 조직관찰은, 2% nital + 과포화 picric acid 용액과 Le Pera(1% sodium metabisulfite 수용액 + 4% picral) 용액에 의해 에칭하였고, 광학현미경과 전자현미경을 이용하였다. 또한 인성을 평가하기 위해 샤프충격시험을 실시하였고, 자동압입시험에 의해 경도, 강도를 평가하였다.

#### 3. 실험 결과 및 고찰

IRHAZ 의 세부 영역을 나타내는 최고온도별 미세조직 변화는 그림 1 에 나타내었다. 첫 번째 열사이클에서 최고온도 800℃ 와 750℃ 을 받은 각각 조직을 관찰하여 보면, 초기 모재 조직의 결정립계나 래스 경계에서 새로운 오스테나이트가 형성되며, 이렇게 형성된 오스테나이트는 냉각시 대부분 베이나이트로 변태를 하는데, 국부적으로 경화능이 향상된 지역에서는 마르텐사이트로 변태하는 것으로 알 수 있다. 새로운 오스테나이트로 변태하지 않은 지역에서는 상 변화 없이 계속 열을 받았기 때문에 템퍼드 베이나이트가 관찰되었다. 하지

만 700℃ 열사이클을 받은 조직은 모재와 유사하였다. 그리고 두 번째 열사이클을 받게 되면 첫 번째 열사이클에 의해 결정립계가 미세하게 되었기 때문에 새로운 오스테나이트의 변태(베이나이트 혹은 마르텐사이트)가 약간 증가하고, 또한 변태하지 않은 상은 추가의 템퍼링 효과를 받게된다. 여기에 PWHT 를 행하게 되면 PWHT 효과에 의해 IRHAZ 의 조직은 주로 템퍼드 베이나이트가 되었다. 또한 IRHAZ 에서 관찰되는 석출물 종류는 주로 (Fe,Mn)<sub>3</sub>C 와 Mo<sub>2</sub>C 로 초기 모재에 형성되어 있는 석출물과 유사하였다. 그림 2 를 보면 최고온도가 증가할수록 새로 생긴 오스테나이트 변태(베이나이트, 마르텐사이트)량이 증가함을 알 수 있었다. 또한 첫 번째 열사이클과 두 번째 열사이클 받은 경우 모두에 해당되었다. 그림 3 은 최고온도에 따른 기계적 특성을 나타낸 것이다. 최고온도가 증가하면 강도, 경도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 최고온도가 증가하면 새로 생긴 오스테나이트의 변태량이 증가하여 냉각시 베이나이트(혹은 마르텐사이트)의 양이 증가되었기 때문이라고 사료된다. 하지만 PWHT 를 받으면 템퍼링 효과에 의해 경도가 감소하는 것을 보였다. 특히 700℃ ~700℃ 의 용접 열사이클을 받은 영역에서 모재 보다도 낮은 경도값을 보였다. 인성은 그림 4 에서 보는 바와 같이 전·후 열 사이클중 800℃ 를 받은 영역은 모재보다 높은 인성값을 나타내었고, 나머지 영역은 모재와 비슷한 인성값을 갖는다. 특히 700℃-700℃ 의 용접 열사이클을 받은 영역에서는 모재 보다도 낮은 인성값을 나타내었다. 이 영역에서 용접시 짧은 유지시간 때문에 오스테나이트가 새로 생성되지는 않았지만, 반복된 용접 열사이클과 PWHT 에 의해 행해졌기 때문에 오버템퍼링의 가능성이 있으며, 그림 5 에 나타난 것과 같이 모재보다 700℃-700℃ 에서 조대한 석출물이 많이 존재하는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 결 론

주어진 용접조건에서 용접열영향부내의 위치에 따른 미세조직 및 특성의 변화는 열사이클 최고온도에 의존한다. 상용 원자로 압력용기강의 경우, 용접 용융선측 보다는 모재쪽의 HAZ 에서 인성저하의 경향이 나타났으며, 이는 다층용접시 intercritically reheated HAZ 부분에 해당한다. IRHAZ 내에서의 미세조직 변화는 최고온도의 증가(700℃ → 800℃) 에 따라 변태량의 증가가 나타났고, 인성 및 기계적 특성은 전·후 열사이클에서 최고온도가 800℃ 을 받은 영역에서는 모재보다 높게 변화하였다. 특히, A<sub>1</sub> 온도에 가까운 700℃-700℃ 의 경우 인성 및 기계적 특성이 모재보다도 낮게 변화하였는데, 이는 반복되는 용접 열사이클과 PWHT 에 의한 오버템퍼링의 효과 때문이라고 생각되었다.

#### 5. 참고 문헌

- 1) C. L. Davis et al., Metallurgical and Materials Trans. A, Vol.27A, October 1996, p3019
- 2) J. Janovec et al., Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.33, No. 3, 1994, p227
- 3) R. Parthasarathy et al., International Trends in Welding science and Technology, Gatlinburg, Tennessee, 1-5 Jun 1992, p551
- 4) H. Ohtani et al., Metallurgical Trans. A, Vol.21A, April, 1990, p87

Table 1 Chemical composition of SA508-C1.3 steel

Elements	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	V	Al	Sn	Fe
wt.%	0.19	0.1	1.4	0.007	0.003	0.89	0.51	0.15	0.003	0.01	0.03	Bal.

Table 2. Thermal cycle simulation conditions for IRHAZ

1st thermal cycle			Interpass temp.(°C)	2nd thermal cycle		
Heating rate(°C/sec)	Holding temp.(°C), time(sec)	Cooling rate(°C/sec)		Heating rate(°C/sec)	Holding temp.(°C), time(sec)	Cooling rate(°C/sec)
76	800,10	10	200	76	800,10	10
76	800,10	10	200	66	750,10	9
76	800,10	10	200	56	700,10	8
66	750,10	9	200	76	800,10	10
66	750,10	9	200	66	750,10	9
66	750,10	9	200	56	700,10	8
56	700,10	8	200	76	800,10	10
56	700,10	8	200	66	750,10	9
56	700,10	8	200	56	700,10	8

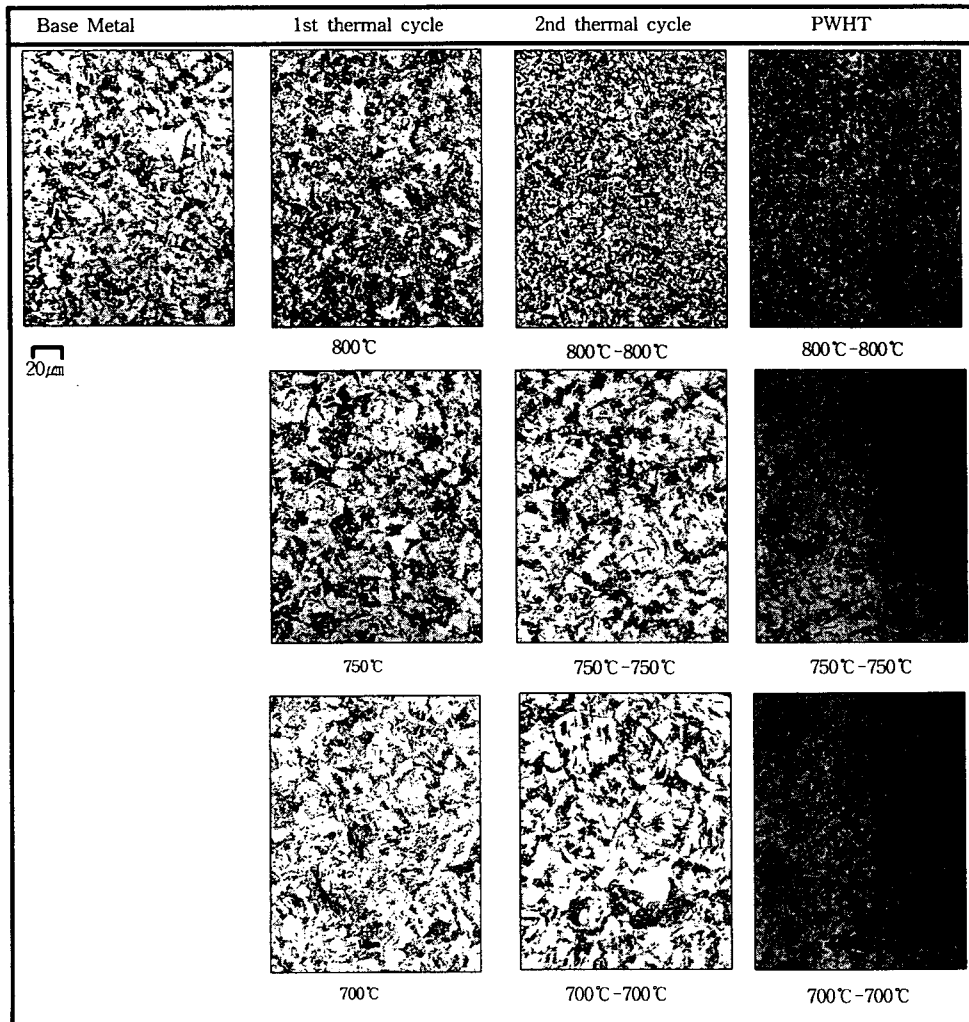


Fig. 1 Microstructural variations with peak temperatures of simulated thermal cycles in the IRHAZ

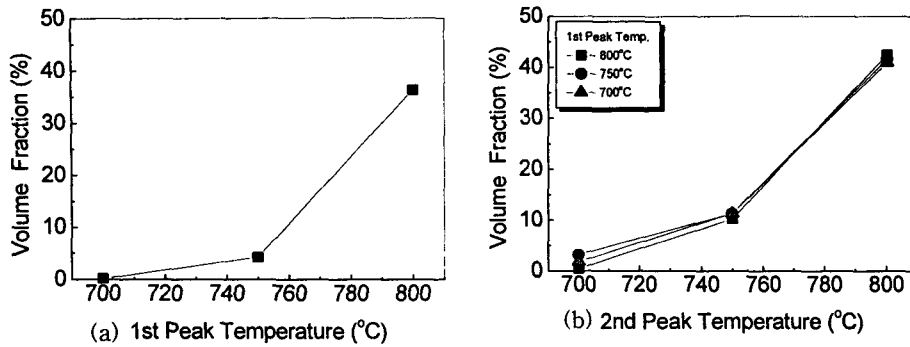


Fig. 2 Variation of prior-austenite volume fraction with peak temperatures of simulated thermal cycles: (a) 1st pass and (b) 2nd pass

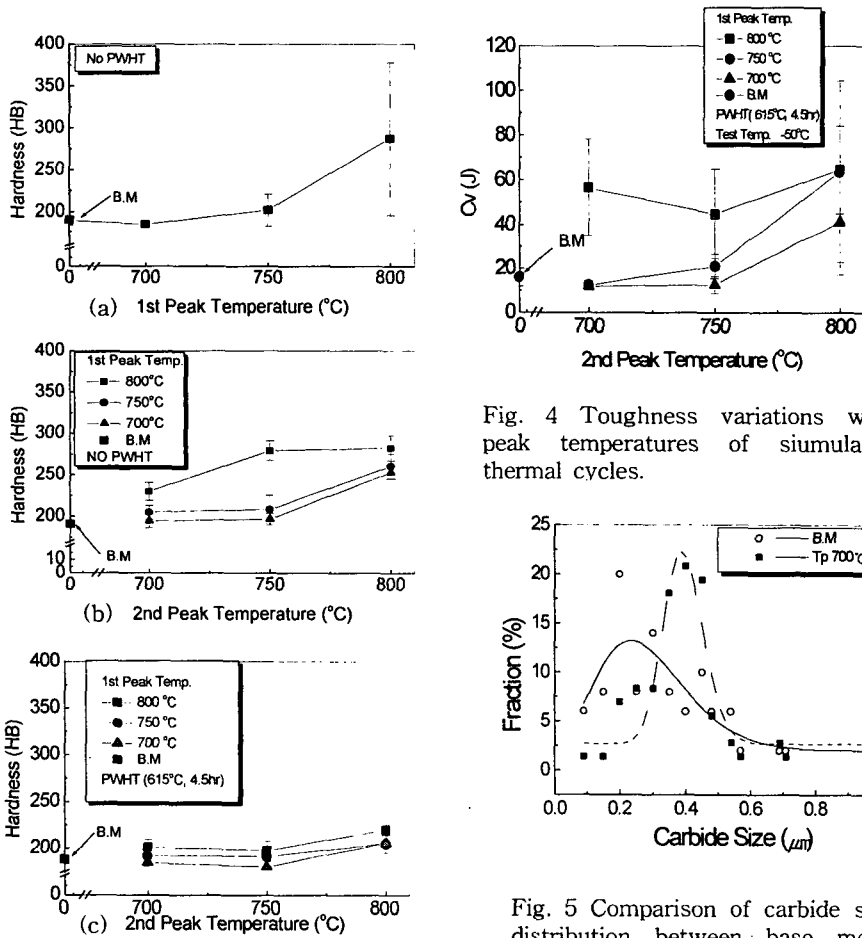


Fig. 3 Hardness variations with the peak temperatures of simulated thermal cycles: (a) 1st thermal cycle, (b) 2nd thermal cycle, and (c) after PWHT

Fig. 4 Toughness variations with peak temperatures of simulated thermal cycles.

Fig. 5 Comparison of carbide size distribution between base metal and reheated region