

# 송전 강관 철탑 용접 열영향부의 인성 거동특성에 관한 연구

민 경 오 박 종 원 이 창 희

한양대학교 금속공학과, 철강공정 및 응용연구소

## Behavior of impact toughness in the HAZ of high strength steel tubes for power transmission steel tower

Kyoung O Min Jong Won Park Chang Hee Lee

Dept. of Metallurgical Engineering, Research Institute of Steel Processing & Applications, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

### Abstract

용접열영향부는 최고 도달온도로부터의 거리에 따른 온도구배 변화와 급격한 열 사이클 때문에 조직 및 물성치의 변화가 예상되는 영역이므로 인성저하등 취성이 잠재적으로 내포된 지역임을 쉽게 예상할 수 있다. 따라서 송전 철탑용 STKT 590 용접열영향부에서의 상변태 거동과 미세조직의 변화에 따른 기계적 특성을 파악하여 용접부의 안전성 확보를 위해 용접열영향부(HAZ)의 상변태거동과 미시파괴기구를 연구하고 개선안을 도출할 필요가 있다.

### 1. 서론

송전 철탑용 STKT 590 강은 안전성, 경제성 및 신뢰성과 관련해서 인성이 매우 중요하기 때문에 항상 우수한 기계적 성질을 가지도록 제조 된다. 그러나 이러한 모재의 우수한 인성도 용접에 따르는 thermal cycle을 경험하게 되면 바뀌게 된다. 많은 연구 결과들이 HAZ에서의 인성 저하를 보여주고 있으며 따라서 건전한 용접부를 얻기 위해서는 HAZ 인성에 미치는 thermal cycle의 영향을 알아야 하고 적정 용접조건을 선정해야 한다.<sup>1,2)</sup> 또한 선정된 용접조건에서 용접부의

모든 region이 똑같은 크기의 인성 저하를 경험하는 것은 아니다.

가장 큰 damage는 fusion line에서 가장 가깝고 최고 도달 온도가 melting point에 가까운 coarse-grained heat affected zone (CGHAZ)에서 발생한다. 이 CGHAZ에 대해서는 많은 연구가 진행 되어 왔고, 모재 보다 낮은 인성을 가지며 저합금강에서는 입열량이 증가하면서 인성이 감소한다고 알려져 왔다.<sup>1)</sup> 또한 조관시 형성된 HAZ와 프렌지-강관 용접부가 중첩되어 새로이 형성된 HAZ와 같은 multi-pass 용접시 앞 pass의 CGHAZ는 최고 도달 온도가  $A_{c1}$ 과  $A_{c3}$  범위를 갖게 되는  $\alpha/\gamma$ 의 two phase 영역 (intercritically reheated region)으로 재가열되는 thermal cycle을 받게 된다. 이 intercritically reheated CGHAZ, 즉 ICCGHAZ는 용접 HAZ에서 또다른 brittle zone으로 보고 되고 있으며, CGHAZ 보다 낮은 인성을 갖고 있다고 알려져 있다. 또한 앞 pass의 weld metal은 후속 pass의 진행에 따르는 thermal cycle을 경험하게 되어 새로운 HAZ로써 나타날 수 있어 기계적 성질과 미세조직의 분포에 대해 매우 다양한 변수를 준다고 할 수 있다.<sup>3,4,5)</sup>

## 2. 본 론

대부분의 저합금강에서 입열량을 증가시킬 경우 CGHAZ의 인성이 감소 된다는 것은 주지의 사실이며 적절한 HAZ 인성을 보장하기 위한 입열 상한치를 결정하기 위해 최대 입열 허용량을 유추해내는 것이 매우 중요하다.

구체적인 thermal simulation은 다음과 같다. weld HAZ를 single / double-pass 조건을 주며 simulation을 하기 위해 thermal/mechanical simulator인 Gleeble 1500 Model을 사용하였다. HAZ 재현열사이클은 single cycle과 double cycle의 두 종류를 사용하였는데 single-pass thermal cycle은 초층용접부(또는 single pass)의 열영향부를 가정한 것으로, 용접조건에 따른 냉각속도를 변화시켰으며, double cycle의 경우는 다층 용접부를 가정한 경우 전(前)패스에 의한 HAZ가 다시 열영향을 받는 조건을 가정한 것으로 재열 영향 온도역은  $Ac_1 \sim Ac_3$ 으로 하였다. 먼저 single 열사이클(Cycle I) HAZ의 최고가열온도( $T_p^I$ )는 fusion boundary에 인접한 CG HAZ를 재현하기 위하여 1350°C로 하였으며,  $T_p$ 까지는 약 100°C/sec의 속도로 급속가열하여,  $T_p$ 에서 5sec간 유지하였다. 입열량의 변화등의 용접조건에 따른 냉각속도의 변화를 재현하기 위하여, 800에서 500°C까지의 냉각시간  $\Delta t_{800-500}^I$ 는 6, 18 및 60sec의 3조건을 사용하였다. 여기서  $\Delta t_{800-500}^I$ ; 6, 18 및 60sec는 각각 20mmt - SMAW - 17kJ/cm - 평판비드 - no preheating, 8mmt - SMAW - 17kJ/cm - 평판비드 - no preheating 및 20mmt - SAW - 45kJ/cm - 평판비드 - 100°C preheating의 용접조건에 상당하는 것이다. Double cycle(Cycle I + Cycle II)의 경우는 상기한 single cycle(Cycle I)과 후속되는 사이클(Cycle II)로서 이루어진 것으로, 후속사이클 Cycle II는 최고가열온도  $T_p-II$ 가 740 및 800°C의 2 종류와  $T_p-II$ 로부터 500°C까지의 냉각시

간  $\Delta t_{T_p-II-500}^II$ 가 6, 18 및 60sec인 3 종류의 냉각조건을 사용하였다. 여기서  $T_p^II$ 는 열영향부가 새로운 열영향을 받았을 경우  $Ac_1 \sim Ac_3$ 의 영역으로 가열된 것을 상정한 것이며, 냉각속도는 Cycle I에서와 마찬가지로 용접조건에 따른 변화를 동등하게 적용한 것이다. 이들 재현열사이클에 대한 개략도를 그림 1에 나타내었다.

모든 가열속도와 냉각속도는 열방정식에 의해 실제 용접 조건과 유사하게 설정하고,  $T_p$ 에서 유지시간을 주었다. ASTM E23에 따라 Charpy impact test를 시행하며 absorbed energy vE로 toughness를 평가하였고 경도와 강도는 미소경도기 및 인장시험기로 측정하며 광학현미경과 SEM으로 HAZ의 미세구조 변화를 관찰하며, 또한 fracture surface 관찰은 SEM으로 실시 하였다.

### 1) CG HAZ의 CCT diagram

본 실험에서는 Gleeble에 내장되어있는 dilatometer인 C-strain fixture를 사용해서 dilatation을 측정하고 조직을 관찰함으로써 CCT diagram을 작성하였다. 광학현미경을 이용한 금속조직 시험에서는 시험편을 기계적으로 연마한후 3% nital로 부식시켜 조직을 관찰하였다. 모재의 경우 경도는 Hv 180 정도이며 페라이트와 펄라이트로 이루어져 있었다. 이 두 조직은 압연방향으로 나열되어(pancake 모양) 있다. 페라이트는 완전히 polygonal 이었고 펄라이트의 lamellae 간격은 너무 작아서 구분하기가 힘들었다.

마르텐사이트 변태를 위한 임계냉각속도는  $\Delta t_{8/5}$ 가 6sec로 나타났으며 이보다 빠른 냉각속도일때는 무확산변태인 마르텐사이트 변태가 일어났다. 경도값은 측정결과  $\Delta t_{8/5}$ 가 6sec보다 빠른 경우 약 Hv 310 이상을 얻어냈다.  $\Delta t_{8/5}$ 가 10에서 40초 정도로 느려지면서 변태온도는 상승하여 약 670°C에서 변태 개시하였다. 경도값은 Hv 270 정도로 보다 빠른 냉각속도와 비교했을 때 급격히 감소했

으며 이는 마르텐사이트보다는 베이나이트나 베이나이트 펄라이트가 우선적으로 생성되었음을 의미한다.  $\Delta t_{8/5}$ 가 60초보다 느려지게 되면 변태온도는 더욱 상승하며 polygonal 펄라이트가 형성되기 시작한다. 60초일때는 여전히 베이나이트가 약간 존재함을 볼 수가 있으나 더 느린 경우에는 베이나이트는 더 이상 생성되지 않으며 polygonal 펄라이트와 베이나이트 펄라이트가 주된 상이 되며, 경도도 당연히 감소하였다. 300초의  $\Delta t_{8/5}$ 에서는 전형적인 polygonal 펄라이트를 볼 수 있으며 펄라이트가 생성된다. 500초의 경우에는 저배율(200배)로 볼때는 모재와 거의 유사한 모양을 보이나 고배율(500배)로 더 자세히 보면 모재와는 달리 펄라이트가 분해되어 시멘타이트가 구상화되어 있음을 알 수가 있다.

## 2) 기계적 특성

그림 5 a)에 싱글사이클 Cycle I에 의한  $-20^{\circ}\text{C}$ 에서의 샤피 충격시험의 결과를 나타내었다. 실험방법에서 서술한바와같이, Cycle I은  $T_p^I$ ;  $1350^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t^I_{800-500^{\circ}\text{C}}$ ; 6, 18 및 60sec의 조건으로 용접 열영향부를 재현한 것이다. 이 결과에 의하면, 냉각속도가 저하할수록, 즉  $\Delta t^I_{800-500^{\circ}\text{C}}$ 가 증가할수록 충격치가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 용접입열량의 증가 또는 타 용접조건에 의하여 냉각속도가 저하할수록 HAZ의 인성은 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 CG HAZ의 미세조직의 변화와 관련된 것이다.<sup>5,6,7)</sup>

CG HAZ가 재열영향을 받았을 경우를 재현한 더블사이클 Cycle I + Cycle II에 의한 결과를 그림 5 b) 및 c)에 나타내었다. 그림 5 b)는 Cycle I에서  $\Delta t^I_{800-500^{\circ}\text{C}}$ ; 6sec의 조건에 Cycle II의  $T_p^{II}$ ; 740 및  $800^{\circ}\text{C}$ 로 하였을 경우의 냉각속도  $\Delta t^{II}_{T_p^{II}-500^{\circ}\text{C}}$ 의 변화에 따른 충격흡수에너지의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면,  $T_p^{II}$ ;  $740^{\circ}\text{C}$ 의

경우는 Cycle I만을 적용시킨 결과와 대체로 유사한 결과를 나타내었다. 그러나  $T_p^{II}$ ;  $800^{\circ}\text{C}$ 의 경우는 충격흡수에너지가 크게 증가하는 흥미로운 결과를 나타내었다. 이것은 HAZ가  $800^{\circ}\text{C}$ 로 재열영향을 받았을 때의 미세조직의 변화와 관련된 것으로 생각된다.

그림 5 c)는 Cycle I에서  $\Delta t^I_{800-500^{\circ}\text{C}}$ ; 60sec로 상당히 낮은 냉각속도를 가지는 열사이클에 Cycle II를 복합시킨 것으로, 그림 5 a)의 결과와는 다른 경향을 보였다. 즉, Cycle II를 적용시킴으로써  $T_p^{II}$ ; 740 및  $800^{\circ}\text{C}$ 의 전냉각조건에서 충격흡수에너지가 크게 저하하는 결과를 나타내었다. 그러나 이들 결과중  $T_p^{II}$ ;  $800^{\circ}\text{C}$ 의 것이  $T_p^{II}$ ;  $740^{\circ}\text{C}$ 의 것에 비해서는 전체적으로 높은 충격흡수에너지의 값을 나타내었다. 이러한 경향은 그림 5 b)에서 나타난 경향과 동일하지만,  $T_p^{II}$ ; 740 및  $800^{\circ}\text{C}$ 의 어느 경우에도 Cycle I에서  $\Delta t^I_{800-500^{\circ}\text{C}}$ ; 6sec의 조건에 의한 것보다는 낮은 값들을 나타내었다.

## 3. 결론

상기한 결과를 요약하면, 다음과 같다.

완전한 polygonal 펄라이트와 펄라이트로 이루어진 모재에 thermal cycle을 가하여 다음 그림과 같은 CG HAZ의 CCT Diagram을 얻을 수 있었다.

마르텐사이트 형성을 위한 임계 냉각속도는  $\Delta t_{8/5}$ 가 6sec였으며 이보다 느린 냉각속도인  $\Delta t_{8/5}$  10 - 60에서는 베이나이트가 형성되었고 더 느린 냉각속도에서는 펄라이트와 펄라이트가 형성된다.

재현 HAZ의 충격인성은 싱글 사이클만을 적용하였을 경우에는 냉각속도가 저하할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 더블사이클을 적용하였을 경우에는 싱글사이클에서의 냉각조건에 따라서 약간 다른 결과를 나타내었다. 즉, Cycle I에서 냉각속도가 빠른 경우에는 재열 영향에 의해서 충격흡수에너지가 대체로 동등하거나 회복하는 결과를 나타내었다. 그러나 Cycle I에서 냉각속도

가 가장 느린 경우에는 재열 영향에 의해서 충격흡수에너지가 전체적으로 크게 저하함으로써 재열 영향에 의한 취화가 크게 발생하였다.

#### 4. 참고문헌

1. Stout. R. D and McGeady. L. J., 'Metallurgical Factors in the Embrittlement of Welded Plate', Weld. J., Res. Suppl. 26(11), 1981, 683~692
2. K. Amano, J. Kudo, N. Itakura and Y. Nakano, 'Metallurgical and welding factors controlling Local Brittle Zone in weld HAZ', The 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Mar., 19~23, 1989
3. Stout. R. D. and Doty, W. D., 'Weldability of Steels', Epstein, S. and Somers, R., Eds., Welding Research Council. New York, NY, 1978
4. Welding handbook Vol. 1, Fundamentals of Welding. 2nd Ed., Charlotte Weisman. Ed., American Welding Society, Miami. Fl., 1976
5. Koso. M., Miura. M. and Ohmori, Y., 'Microstructure and Toughness of Weld Heat Affected Zone in 785 MNm<sup>-2</sup> HSLA Steels', Met. Technol., 8(12), 1981, 482~487
6. Savage, W. F. and Owczarski, W. A., 'The Microstructure and Notch Impact Behavior of a Welded Structural Steel', Weld. J., Res. Suppl., 48, 1966, 55s~ 65s
7. J. A. Davidson, P. J. Konkol & J. F. Sovak, 'Assessing fracture toughness & Cracking susceptibility of steel weldments -Review', WRC 345

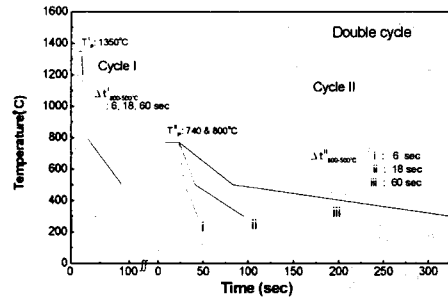


그림 1 Thermal Cycle

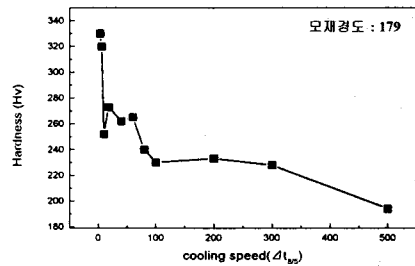


그림 2 Hardness distributions

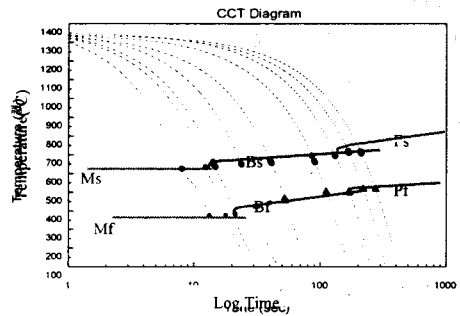
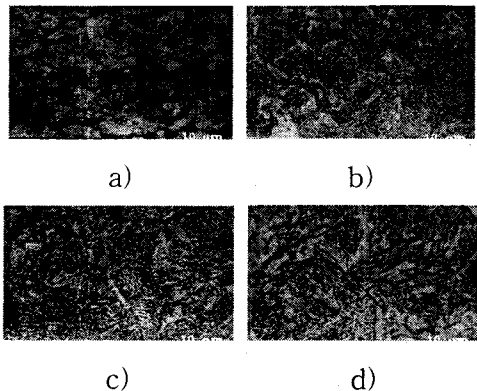
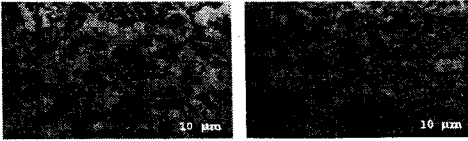


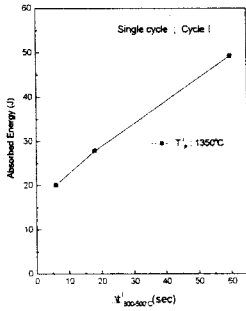
그림 3 CCT Diagram of CG HAZ



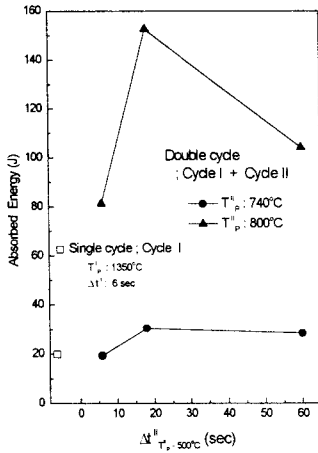


e) f)

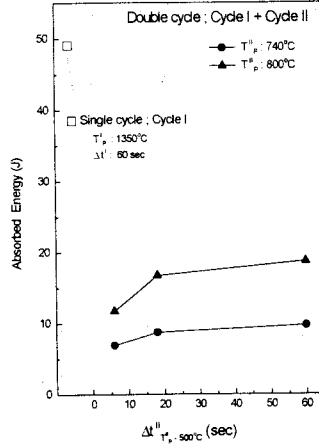
그림 4 Microstructure of CG HAZ(by OM)  
 (  $\Delta t_{8/5}$  a: base metal b: 6 c: 18 d: 60  
 e: 300 f: 500 sec)



a)



b)



c)

그림 5 Influence of cooling rate on impact absorbed energy in weld HAZ