

Ti-Nb첨가 저합금강 용접열영향부에서의 열-응력 이력이 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향에 관한 연구

문 준 오* · 이 창 희**,*†

*한국기계연구원 부설 재료연구소 철강재료연구실

**한양대학교 신소재공학부

Microstructure Evolution and Its Effect on Strength during Thermo-mechanical Cycling in the Weld Coarse-grained Heat-affected Zone of Ti-Nb Added HSLA Steel

Joonoh Moon* and Changhee Lee**,*†

*Ferrous Alloy Department, Advanced Metallic Materials Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon 642-831, Korea

**Division of Material Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

†Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received September 26, 2013 ; Revised December 2, 2013 ; Accepted December 12, 2013)

Abstract

The influence of thermo-mechanical cycling on the microstructure and strength in the weld coarse-grained heat affected zone (CGHAZ) of Ti-Nb added low carbon HSLA steel was explored through Vickers hardness tests, nanoindentation experiments, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) analysis. Undeformed and deformed CGHAZs were simulated using Gleeble simulator with different heat inputs of 30kJ/cm and 300kJ/cm. At high heat input of 300kJ/cm, the CGHAZ consisted of ferrite and pearlite and then their grain sizes were not affected by deformation. At low heat input of 30kJ/cm, the CGHAZ consisted of lath martensite and then the sizes of prior austenite grain, packet and lath width decreased with deformation. In addition, the fraction of particle increased with deformation and this is because the precipitation kinetics was accelerated by deformation. Meanwhile, the Vickers and nanoindentation hardness of deformed CGHAZ with 30kJ/cm heat input were higher than those of undeformed CGHAZ, which are due to the effect of grain refinement and precipitation strengthening.

Key Words : Thermo-mechanical cycling, Coarse Grained Heat-Affected Zone (CGHAZ), Lath marteniste, Deformation, Heat Input

1. 서 론

HSLA (High Strength Low Alloyed)강은 Ti, Nb, V 등의 석출물 형성 원소를 이용하여 일반적인 C-Mn강에 비해 우수한 기계적 성질 (인장강도, 충격 인성)을 가지며 건축구조물, 교량, 라인파이프, 선박, 자동차 등 그 적용범위가 지속적으로 증가하고 있다^{1,2)}. 또한 구조물의 안정성에 대한 소비자들의 지속적인 요

구로 인해 석출강화 외에 결정립 미세화, 복합조직형성 등을 통한 HSLA강의 고강도화가 꾸준히 이루어져 왔다³⁾.

이처럼 우수한 기계적 성질을 갖도록 제조된 HSLA 강이라 할지라도 구조물의 조립 및 건설을 위해서는 필수적으로 용접공정을 거치게 되며 이러한 용접공정 중에 미세조직의 변화가 발생한다^{4,5)}. 특히, 모재와 용접 금속의 용융 및 접합이 일어나는 Fusion zone과 인접한 용접열영향부 (CGHAZ, Coarse Grained Heat-Affected

Zone)의 경우 급격한 고온의 열사이클로 인해 조대한 결정립이 생성되고 냉각 중에 취약한 상들이 생성됨에 따라 모재와 대비해서 취약한 기계적 성질을 갖는다고 보고되고 있다^{6,7)}

한편, 기존의 보고에 따르면 용접 시 피용접재에 걸리는 구속응력 (Restraint stress)에 의해 CGHAZ에서는 앞서 언급한 열사이클 뿐만 아니라 가열 시 압축 응력과 냉각 시 인장응력의 복잡한 응력을 동시에 받게 된다⁸⁻¹⁰⁾. 즉, CGHAZ는 가열, 냉각 시 각각 열팽창 및 수축을 거치며 이는 피용접재에 걸리는 구속응력과 상호작용으로 인해 CGHAZ에 각각 압축, 인장응력을 발생시킨다.

이에 본 연구에서는 이와 같은 CGHAZ에서의 열-응력 사이클 (Thermo-mechanical cycle)이 CGHAZ의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향에 대해 연구하였다. CGHAZ의 열-응력사이클은 Gleeble simulator를 이용하여 재현하였으며, 용접 입열량 (Heat input)을 30kJ/cm와 300kJ/cm로 변화시켜 그 영향을 확인하였다. 응력 및 입열량의 변화에 따른 CGHAZ의 미세조직 변화를 확인하기 위해 주사전자현미경 (SEM, Scanning Electron Microscopy)과 투과전자현미경 (TEM, Transmission Electron Microscopy)을 이용하였으며 비커스 경도 및 나노인덴테이션 경도 측정을 통해 기계적 성질의 변화를 확인하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 강재의 합금성분을 Table 1에 정리하였으며, Ti와 Nb이 각각 160ppm, 200ppm 첨가되어 있는 HSLA강을 사용하였다. CGHAZ 재현을 위한 열처리기는 Gleeble 1500 simulator (Dynamic System Inc., Postenkill, NY)을 이용하였으며 다음의 Fig. 1은 Gleeble을 이용하여 재현한 CGHAZ의 열-응력사이클을 보여주고 있다. Fig. 1의 열사이클의 경우, 30kJ/cm와 300kJ/cm의 용접 입열량에 대해서 Rosenthal에 의해 제안된 열전달 방정식을 이용하여 계산되었다. 또한, 서론에서 언급한 바와 같이 가열 및 냉각 열사이클 중에 CGHAZ에서 걸리는 압축 및 인장 응력을 고려하여 Fig. 1의 응력사이클을 설계하였으며 응력 수준은 Easterling에 의해 제안된 응력사이클을 참고하여 설계하였다^{8,9)}.

Table 1 Chemical composition of experimental steels (in wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ti	Nb	N
0.07	0.17	1.5	0.007	0.002	0.016	0.02	0.0084

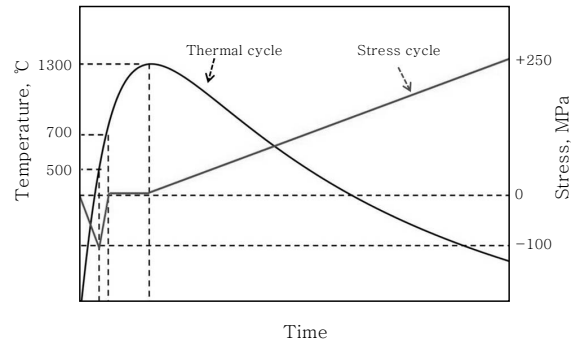


Fig. 1 Schematic diagram of thermo-mechanical cycling in the CGHAZ simulated by Gleeble simulator¹²⁾

Fig. 1의 열-응력 열사이클에 따라 재현된 CGHAZ의 미세조직은 TEM과 SEM을 이용하여 관찰하였다. TEM 미세조직 관찰을 위해서 Thin foil 시편을 제작하고 이를 5% 퍼크롤릭산과 95% 메탄올의 혼합용액에서 Twin jet-polishing을 이용하여 TEM 시편을 제작하였다. 한편, CGHAZ의 석출물 분포를 관찰하기 위하여 시편 표면에 carbon film을 코팅 후 2V의 전압 하에서 carbon film을 추출 후에 Ni grid를 이용하여 Replica 시편을 채취하였다. 이와 같이 준비된 Thin fol 시편과 Replica 시편에 대해 TEM (JEOL Inc., JEOL2000, Japan)을 이용하여 미세조직 및 석출물을 관찰하였다. CGHAZ의 강도는 비커스 경도기 (Shimadzu Inc., HMV-2, Japan)과 나노인덴테이션 시험 (Nanoindenter-XP, Nano Instruments, Oak Ridge, TN)을 이용하여 측정하였다. 한편, CGHAZ의 결정립 크기 및 석출물 크기는 이미지 분석기 (Image analyzer)를 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 열-응력사이클에 따른 미세조직 변화

Fig. 2는 CGHAZ 미세조직에 대한 SEM 관찰 결과이다. 그림에서 보듯이 입열량이 30kJ/cm로 낮은 경우에는 lath martensite가 생성되는 반면에 입열량이 300kJ/cm로 증가하면 ferrite와 pearlite 생성된다. 이러한 결과는 입열량 증가에 따른 냉각속도의 변화와 관련이 있다. 다음의 식 (1)에서 Δt_{8-5} 는 CGHAZ에

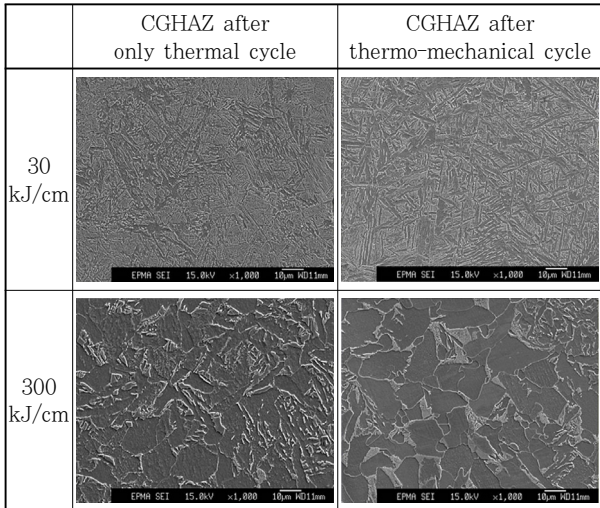


Fig. 2 SEM micrographs showing the microstructures in the CGHAZs

서의 냉각 중 800°C~500°C 사이에서의 냉각시간으로써 이는 대부분의 저탄소강에서 대략적으로 800°C가 A₃ 온도임을 감안할 때, 상변태 구간에서의 냉각속도를 나타내는 것으로써 CGHAZ의 미세조직을 결정하는데 중요한 의미를 가진다¹¹⁾.

$$\Delta t_{8-5} = \frac{q/v}{2\pi\lambda\theta_1}, \quad \frac{1}{\theta_1} = \left(\frac{1}{773 - T_0} - \frac{1}{1073 - T_0} \right) \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 q/v는 용접 입열량, λ는 열전도도, T₀는 용접 전에 초기 시편 온도를 각각 나타낸다. 식 (1)에 따르면 CGHAZ의 냉각 중 상변태 구간에서의 냉각시간은 용접 입열량에 비례하여 증가하며 이는 냉각속도의 감소를 의미한다. 따라서 Fig. 2에서 보듯이 CGHAZ의 미세조직은 입열량이 증가함에 따라 lath martensite에서 ferrite+pearlite로 변화하게 된다.

Fig. 3은 CGHAZ 미세조직에 대한 TEM 관찰 결과를 보여주고 있으며 앞서 SEM관찰을 통해 확인한 바와 같이 30kJ/cm의 낮은 입열량에서는 lath martensite가 300kJ/cm의 높은 입열량에서는 ferrite와 pearlite가 각각 관찰되었다. Fig. 3에서 보듯이 단순히 열 사이클만을 재현한 경우에 비해 열-응력사이클을 재현한 경우에 lath martensite의 lath width가 약 50% 이상 감소하였으며, 반면에 ferrite의 결정립 크기는 미세하게 감소하였으나 큰 변화가 없었다. 따라서 본 연구에서는 외부응력이 CGHAZ의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향에 대해서 연구하기 위해 낮은 30kJ/cm의 입열량 하에서 생성된 lath martensite에 대해서 추가적인 TEM 분석 및 기계적 성질에 대한 평가를 실시하였다.

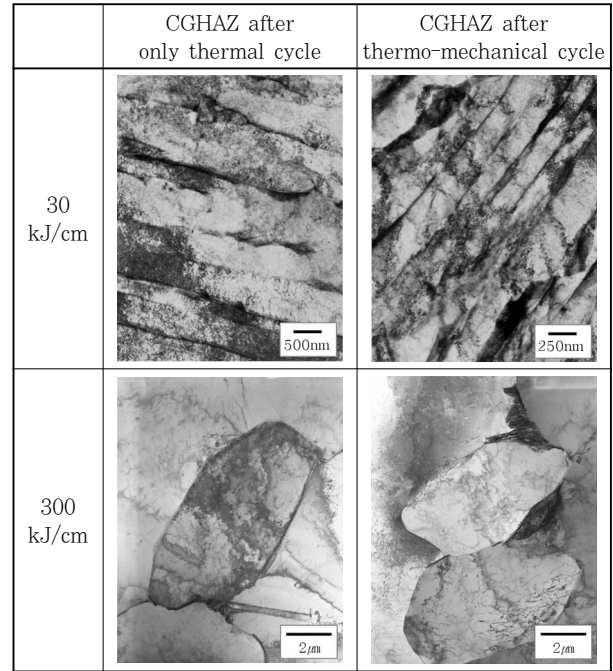


Fig. 3 TEM micrographs showing the microstructures in the CGHAZs¹²⁾

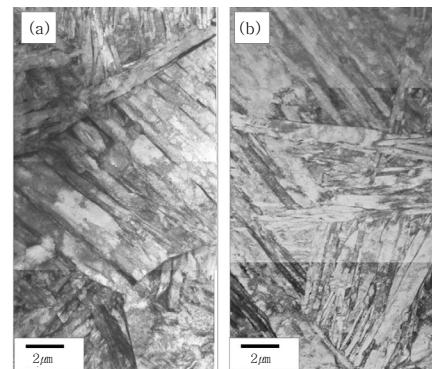


Fig. 4 TEM micrographs showing the microstructures of lath martensite in the CGHAZs: (a) undeformed with 30kJ/cm and (b) deformed with 30kJ/cm¹²⁾

단순한 열 사이클만을 거친 경우와 열-응력사이클을 거친 CGHAZ에서의 lath martensite의 결정립 사이즈 (Prior austenite grain size(PAGS), packet size, lath width)를 Fig. 4와 같이 TEM 관찰 후 이미지 분석기로 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 응력을 가함에 따라 PAGS, packet size, lath width가 각각 감소하였다.

외부응력에 따른 PAGS의 감소는 외부응력이 가해짐에 따라 전위밀도가 증가하게 되고 이러한 전위들이 austenite 결정립 성장을 방해하기 때문으로 판단된다¹⁰⁻¹¹⁾. 다음의 식 (2)는 Taylor의 가공경화 이론으로써

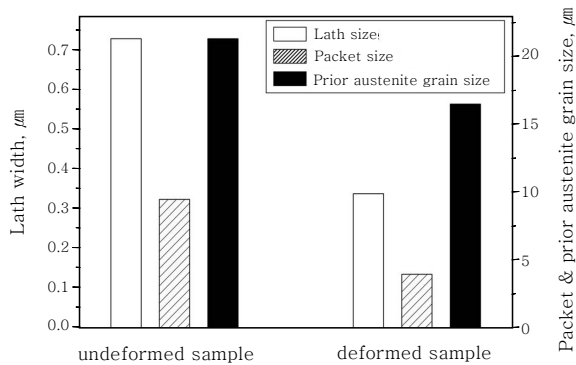


Fig. 5 Measured mean size of lath, packet and prior austenite grain in lath martensite of undeformed and deformed CGHAZ with $30\text{kJ}/\text{cm}^{12}$

외부응력에 따른 전위밀도의 변화를 나타낸다.

$$\rho = \left(\frac{\tau}{\alpha \cdot G \cdot b} \right)^2 \quad (2)$$

위의 식 (2)에서 ρ 는 전위밀도, α 는 상수, b 는 Burgers vector, G 는 전단 탄성률 (shear modulus), τ 는 외부에서 가해진 전단응력 (shear stress)을 각각 나타낸다. 식 (2)에서 확인할 수 있듯이 외부응력이 증가함에 따라 전위밀도는 증가하게 된다.

한편, 외부응력에 따른 lath width의 감소 또한 전위밀도가 증가와 관련이 있다. 즉, 외부응력에 따른 전위밀도의 감소는 martensite 변태 시에 핵생성을 촉진시키는 역할을 하게 되며 따라서 lath width가 감소하게 된다¹²⁻¹⁴.

마지막으로 Fig. 5에서 외부응력을 가해줌에 따라서 packet size 또한 감소하고 있으며 이는 PAGS의 감소에 따른 결과이다. 일반적으로 PAGS의 변화는 martensite 핵생성 및 사이즈 변화에 크게 영향을 미치지 않는다고 알려져 있으나¹⁴, 본 연구결과에 따르면 고경각 입계 (High angle grain boundary)을 갖는 Prior austenite grain의 경우 martensite의 성장을 방해할 수 있으며 따라서 Fig. 4와 5에서 보듯이 외부응력에 따라 packet size가 크게 감소하였다¹².

3.2 열-응력사이클에 따른 석출물 분포 변화

Fig. 6은 상용 열역학 소프트웨어인 Thermo-Calc. (TCFE 7 database)를 이용하여 계산한 평형 상태를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 본 시험에서 사용한 강의 경우 Ti, Nb의 복합 첨가로 인해 (Ti,Nb)(C,N) 복합 석출물이 생성되며 기존에 보고된 바와 같이 TiN의 높은 고온 안정성으로 인해 약 1,350도 이

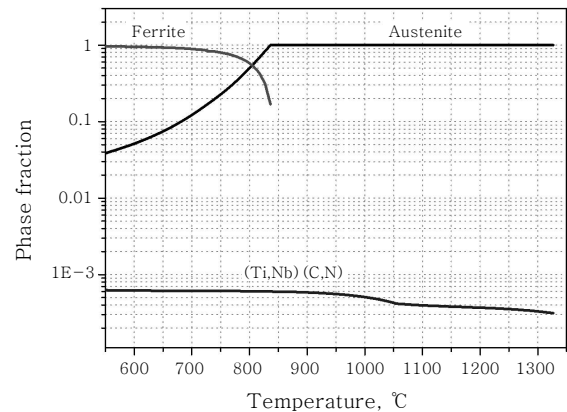


Fig. 6 Equilibrium phase diagram of tested alloy calculated by Thermo-Calc

상의 고온에서도 석출물이 완전 용해되지 않고 안정한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 단순한 열 사이클을 거친 경우와 열-응력 사이클을 거친 CGHAZ에서의 석출물 분포를 관찰한 TEM 사진이며, Fig. 8은 Fig. 7에서 관찰한 석출물의 분율 및 밀도를 이미지 분석기를 이용하여 측정된 결과이다. Fig. 7(a)의 SAD pattern 분석을 통해서 관찰된 석출물이 Fig. 6의 평형 상태에서 예측한 바와 같이 Rock-salt 구조를 갖는 (Ti,Nb)(C,N) 복합 석출물임을 확인할 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 응력을 가한 경우에 그렇지 않은 경우에 비해 석출물 분율이 높으며 평균 석출물 크기는 감소한다. 다음의 식 (3)은 외부응력에 따른 석출물의 핵생성 속도를 보여준다¹³⁻¹⁵.

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{\text{nucleation}} = 0.5 \cdot \rho^{1.5} \cdot Z \cdot \beta' \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right) \exp\left(-\frac{\tau}{t}\right) \quad (3)$$

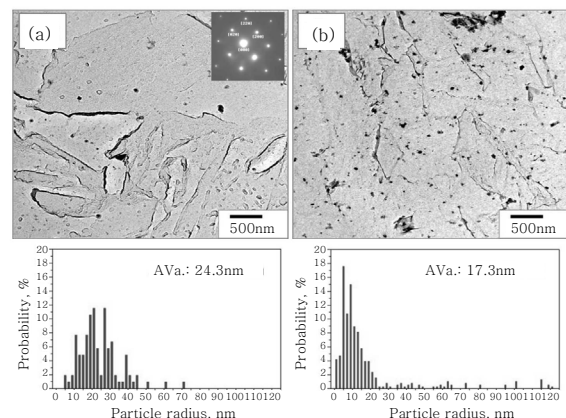


Fig. 7 TEM micrographs showing the particles distributed in the CGHAZs: (a) undeformed with $30\text{kJ}/\text{cm}$, (b) deformed with $30\text{kJ}/\text{cm}$

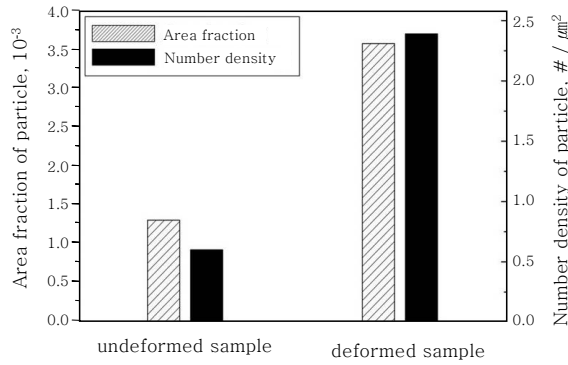


Fig. 8 Measured area fraction and number density of particle in the CGHAZ with 30kJ/cm⁹

위의 식에서 ρ 는 전위밀도, Z 는 Zeldovich factor (약 0.05), β' 은 atomic impingement 속도, ΔG 는 석출물 핵생성을 위한 활성화 에너지를 각각 나타낸다. 앞서 식 (2)에서 보듯이 외부응력이 가해지면 전위밀도가 증가하게 되고 이에 따라 식 (3)에서 확인할 수 있듯이 석출물의 핵생성 속도가 증가하게 된다. 석출물 핵생성 속도가 증가하면 미세한 석출물의 핵생성이 촉진됨에 따라 Fig. 7과 Fig. 8에서 보듯이 석출물의 분율 및 밀도는 증가하고 평균 석출물 크기는 감소하게 된다.

3.3 열-응력사이클에 따른 기계적 성질 변화

다음의 Fig. 9(a)는 30kJ/cm의 입열량 하에서 단순히 열 사이클만 가한 경우와 열-응력사이클을 가한 경우에 생성된 lath martensite의 비커스 경도를 측정 한 결과이다. 일반적으로 martensite의 경도는 강 중에 탄소함량에 의존한다고 알려져 있으나 Fig. 9(a)의 결과에서 보면 동일한 성분에서도 응력을 가함에 따라 발생하는 미세조직의 변화가 martensite의 경도를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 응력을 가하지 않는 경우에 비해 가한 경우에 비커스 경도가 높아지며 이는 결정립 미세화와 석출강화

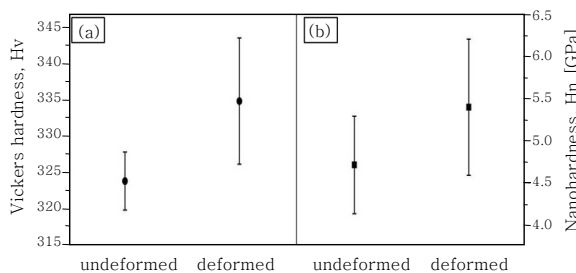


Fig. 9 Measured hardness in the CGHAZ with 30kJ/cm: (a) Vickers hardness and (b) nanoindentation hardness

효과로 설명할 수 있다. 즉, 앞서 설명한 것처럼 응력이 가해짐에 따라 lath martensite 각각의 결정립 크기 (PAGS, packet size, lath width)가 감소하며 이로 인해 비커스 경도는 증가하였다. 또한 앞서 살펴본 것처럼 응력을 가함에 따라 석출물의 분율은 증가하며 평균 석출물 크기는 감소하며 이는 다음의 식 (4)와 같은 Orowan strengthening mechanism에 의해 비커스 경도를 높이는데 기여할 수 있다¹⁶⁾.

$$H_{Oro} = \frac{3\sqrt{3} \cdot G \cdot b}{\lambda'}, \lambda' = \frac{4 \cdot (1-f) \cdot r}{3f} \tag{4}$$

위의 식에서 H_{Oro} 는 Orowan strengthening에 의한 경도 증가량, λ' 은 interparticle spacing, f 는 석출물 분율, r 은 석출물 크기를 각각 나타낸다. 위의 식에서 보듯이 석출물의 분율이 증가할수록 또는 석출물의 크기가 감소할수록 interparticle spacing이 감소하며 이에 따라 경도는 상승한다. 앞서 설명한 바와 같이 응력을 가함에 따라 발생하는 비커스 경도의 증가는 결정립 미세화와 석출강화 효과가 복합적으로 작용한 결과로서 본 연구에서는 석출강화 효과만을 독립적으로 확인하기 위해서 나노인덴테이션 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 1mN의 매우 낮은 하중 하에서 나노인덴테이션 시험을 실시하였으며 이를 통해 inter-lath에서의 경도를 측정할 수 있었다. 즉, 나노인덴테이션 시험을 통해 결정립계의 효과를 배제한 석출강화 효과만을 측정할 수 있었으며 그 결과 Fig. 9(b)에서 보듯이 응력을 가한 경우에 나노인덴테이션 경도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 외부응력에 따른 석출물 분율의 증가와 평균 석출물 크기의 감소에 따른 Orowan strengthening 효과의 증대에 의한 결과로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 CGHAZ에서의 열-응력 사이클이 CGHAZ의 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향을 연구하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 용접 입열량이 증가함에 따라 CGHAZ의 냉각속도는 감소하며 이에 따라 입열량이 30kJ/cm로 낮은 경우에는 lath martensite 조직이 생성되었으며 용접 입열량이 300kJ/cm로 높은 경우에는 ferrite와 pearlite 조직이 생성되었다.

2) 단순히 열 사이클만을 거친 CGHAZ에 비해 열-응력 사이클을 거친 경우에 lath martensite의 결정

립 크기 (PAGS, packet size, lath width)는 감소하였으며, 이는 외부응력에 따른 전위밀도의 증가에 따른 영향으로 확인되었다. 반면에 상대적으로 높은 입열량에서 생성되었던 ferrite와 pearlite의 경우 외부응력에 따른 결정립 크기 변화가 크게 관찰되지 않았다.

3) TEM 분석결과 시험에 사용된 강역의 경우 Ti, Nb의 복합 첨가로 인해 CGHAZ에서 (Ti,Nb)(C,N) 복합 석출물이 생성되었으며 단순히 열 사이클만 거친 경우에 비해 열-응력 사이클을 거친 CGHAZ에서 미세한 석출물의 분율이 증가하였다. 이는 외부응력을 가해줌에 따라 전위밀도가 증가하며 이러한 전위들이 석출물의 핵생성을 위한 사이트로 작용한 결과이다.

4) 외부응력에 따른 CGHAZ의 기계적 성질 변화를 확인하기 위해서 lath martensite의 비커스 경도 및 나노인덴테이션 경도를 측정하였으며 두 값 모두 응력을 가한 경우에 증가하였다. 이는 결정립 미세화와 미세한 석출물 분율 증가에 따른 결과로 판단된다.

Reference

- Rodrigues PCM, Pereloma EV, Santos DB: Mechanical properties of an HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling. *Mater. Sci. & Eng. A*, **283** (2000), 136-143
- Kong J, Xie C: Effect of molybdenum on continuous cooling bainite transformation of low-carbon microalloyed steel. *Mater. Des.*, **27** (2006), 1169-1173
- Show BK, Veerababu R, Balamuralikrishnan R, Malakondaiah G: Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and mechanical properties of a microalloyed HSLA steel. *Mater. Sci. & Eng. A*, **527** (2010), 1595-1604
- Kim S, Moon J, Lee Y, Jeong H, Lee C: Prediction model for the microstructure and properties in weld heat affected zone: V. Prediction model for the phase transformation considering the influence of prior austenite grain size and cooling rate in weld HAZ of low alloyed steel. *Journal of KWJS*, **28-3** (2010), 104-113 (in Korean)
- Lee Y, Moon J, Kim S, Lee C: Correlation between M-A constituents and tensile properties in the intercritical coarse grained HAZ of an ultra low carbon steel. *Journal of KWJS*, **28-3** (2010), 9-103 (in Korean)
- Mohandas T, Madhusudan Reddy G, Satish Kumar B: Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels. *J. Mater. Process. Technol.*, **88** (1999), 284-294
- Li Y, Crowther DN, Green MJW, Mitchell PS, Baker TN: The effect of vanadium and niobium on the properties and microstructure of the intercritically reheated coarse grained heat affected zone in low carbon microalloyed steels. *ISIJ Int.*, **41** (2001), 46-55
- Easterling K: Introduction to the physical metallurgy of welding (1st Edition), 1983: 33-35
- Moon J, Lee C: Behavior of (Ti,Nb)(C,N) complex particle during Thermo-mechanical cycling in the weld CGHAZ of a microalloyed steel. *Acta Mater.*, **57** (2009), 2311-2320
- Denis S, Archambault P, Gautier E, Simon A, Beck G: Prediction of residual stress and distortion of ferrous and non-ferrous metals: Current status and future developments. *J. Mater. Eng. Performance*, **11** (2002), 92-102
- Easterling K: Introduction to the physical metallurgy of welding (1st Edition), 1983: 23-24
- Moon J, Kim S, Lee C: Effect of thermo-mechanical cycling on the microstructure and strength of lath martensite in the weld CGHAZ of HSLA steel. *Mater. Sci. & Eng. A*, **528** (2011), 7658-7662
- Dutta B, Palmiere EJ, Sellars CM: Modelling the kinetics of strain induced precipitation in Nb microalloyed steels. *Acta Mater.*, **49** (2001), 785-794
- Porter DA, Easterling KE: Phase transformation in metals and alloys (2nd Edition), 2001: 406, 415- 416
- Russell KC: Nucleation in solids: the induction and steady state effects. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **13** (1980), 205-318
- Moon J, Kim S, Jang J-I, Lee J, Lee C: Orowan strengthening effect on the nanohardness of the ferrite matrix in microalloyed steels. *Mater. Sci. & Eng. A*, **487** (2008), 552-557