

극 저탄소강의 Intercritical coarse grained HAZ에서의 M-A상과 인장특성 간의 상관관계

이윤기* · 문준오* · 김상훈* · 이창희*†

*한양대학교 신소재공학부

Correlation Between M-A Constituents and Tensile Properties in the Intercritical Coarse Grained HAZ of an Ultra Low Carbon Steel

Yoonki Lee*, Joonoh Moon*, Sanghoon Kim* and Changhee Lee*†

*Div. of Mater. Sci. and Eng., Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

†Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received February 4, 2010 ; March 25, 2010 ; Accepted March 31, 2010)

Abstract

It is well known that martensite-austenite (M-A) constituents are formed in the intercritically reheated coarse grained heat affected zone (ICCGHAZ) of a multipass weld and they act on the local brittle zone (LBZ) in the welded structures. To investigate the effect of M-A constituents on the tensile properties of ICCGHAZ, specimens with M-A constituents of different volume fraction and size were prepared through the multipass welding cycles simulated by a Gleeble simulator and then tensile test was carried out. The results indicated that finely distributed M-A constituents contributed to decrease the yield ratio, which is mainly due to the increased tensile strength.

Key Words : M-A constituent, Tensile test, Yield ratio, ICCGHAZ, Nanoindentation

1. 서 론

건축 구조물의 건설에 적용되는 구조용강은 높은 강도 및 인성 그리고 우수한 용접성 등이 요구된다. 또한 최근에는, 구조물의 안정성을 고려하여 구조용강이 더 낮은 항복비를 갖도록 설계되고 있다¹⁾. 항복비는 항복 강도를 인장강도로 나눈 값으로, 낮은 항복비는 항복에서 네킹까지의 변형에 대한 저항성이 높다는 것을 의미한다¹⁾. 즉, 더 낮은 항복비를 가지는 강재는 항복 후에 기지 않은 강도의 감소를 막을 수 있다.

일반적으로, 다층 용접은 라인파이프, 건축 구조물과 같은 대부분 산업 구조물의 건설에 필수적인 기술이다²⁾. 그러나, 용접 공정 중, 용접부에는 용접 열 영향부가 형성되며, 용접 열 영향부의 충격인성은 모재에 비해 저해된다. 기존의 많은 연구에서 다층용접 시 intercritical

coarse grained HAZ (ICCGHAZ)가 형성되며, 이는 coarse grained HAZ (CGHAZ)와 함께 국부취화영역(local brittle zone)으로 작용할 수 있음이 알려져 있다. 이러한 ICCGHAZ의 취화 현상은 M-A상(martensite-austenite상)의 형성에 기인한다²⁻⁵⁾. 그러므로 많은 연구를 통해 용접 열 영향부의 기계적 특성에 미치는 M-A상의 영향에 대해 연구가 이루어졌으며, ICCGHAZ에서의 충격인성 저하에 대한 연구가 집중되어져 왔다²⁻⁵⁾. 그러나 강도와 항복비 특성에 대한 M-A상의 역할에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 글리블 장비를 이용하여 다층 용접 조건을 재현함으로써 다른 M-A상의 분율과 크기를 가지는 시편을 준비하고, 나노인덴테이션과 인장 시험을 수행하여 강도 특성에 미치는 M-A상의 영향에 대해 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구를 위해 TMCP(thermo-mechanical controlled process)를 통해 제조된 극 저탄소강이 사용되었으며, 모재의 합금성분과 기계적 성질을 Tabel 1에 나타내었다. 30kJ/cm의 입열량을 가지는 다층 용접 사이클은 글리블 1500 시스템을 이용하여 재현되었다. 본 연구에서는 Rosenthal 식을 이용하여 용접 열 사이클을 계산하였으며, Fig. 1에 계산된 재현 사이클을 나타내었다⁶⁾. ICCGHAZ에서의 M-A상의 분율과 크기를 조절하기 위해서, Fig. 1에 나타낸 두 번째 용접 사이클의 최고온도를 각각 850, 870, 890°C로 선정하였으며, 이러한 두 번째 사이클의 최고온도는 딜라토미터를 이용하여 측정된 결과인 A_{c1} (810°C)과 A_{c3} (920°C) 사이의 온도를 고려하여 선정하였다.

M-A상의 관찰을 위해 재현된 시편은 Table 2에 요약한 것과 같이 2단 전해 에칭법에 의하여 에칭한 후

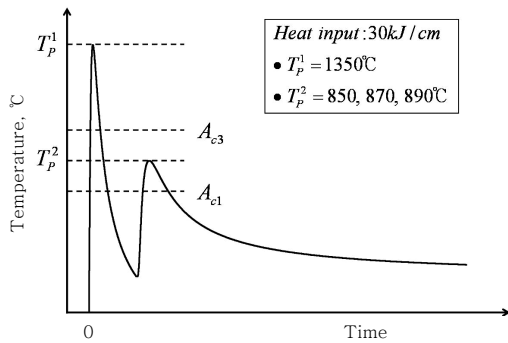


Fig. 1 Schematic illustrations of multiple welding cycles in the ICCGHAZ

Table 2 Etchant of 2step etching for observation of M-A constituents

1st step	Solution A: Na ₂ SO ₄ 1g + distilled water Solution B: Picric acid 4g + 100ml ethanol → 1:1 portion of mixing
2nd step	NaOH 25g + Picric acid 5g + distilled water → 5V, 140sec electrolytic etching

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of base steel (wt%)

C	Si	Mn	S	P	Other elements
0.04	0.15	1.55	0.01	0.005	Ni, Cr, Mo, Ti, B
Mechanical property	Hardness	YS	TS	YR	Toughness (-5°C)
	210 HV	507 MPa	644 MPa	80 %	47 J

SEM을 이용하여 관찰하였다. 관찰된 M-A상의 분율 및 크기는 image analyzer 프로그램을 이용하여 측정하였다. 인장 및 항복 강도로부터 항복비를 계산하기 위해 인장시험이 수행되었다. 이를 위해 ZWICK 사의 UTM을 사용하여 시험을 실시하였으며, 0.2% offset을 통하여 항복강도를 구하였다.

또한 M-A상과 기지 조직의 개별 상에 대한 미세경도의 측정을 위해서 나노 압입 시험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 모재의 광학현미경 관찰 결과를 Fig. 2(a)에 나타내었다. 광학현미경 관찰 결과에서 특징적인 것은 일부 래스 형상의 결정립들과 압연 공정에 의해 길게 늘어진 결정립들이다. 그러나 광학현미경 관찰 만으로는 많은 것을 판단할 수 없어 더 자세한 미세조직 확인을 위하여 TEM을 이용하여 조직을 분석하였으며, 그 결과는 Fig. 2(b)에 나타내었다. TEM 관찰 결과 기본 조직은 베이니틱 페라이트 조직임을 확인할

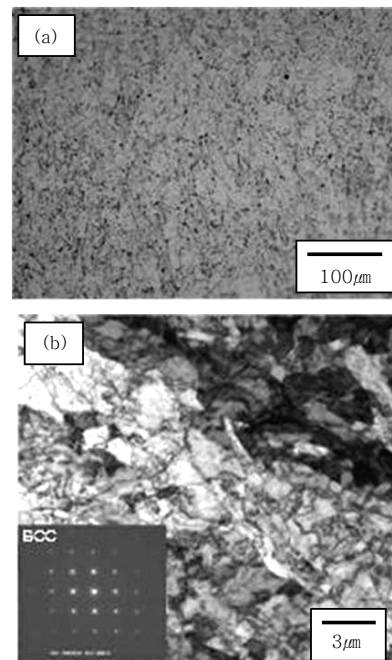


Fig. 2 Microstructure of base metal observed by (a) OM and (b) TEM

수 있었다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 모재에 포함된 탄소함량이 극히 적음에도 불구하고 Cr, Mo, B, Nb의 첨가로 인해 경화능이 향상되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 1350°C의 최고온도를 가지는 단일 사이클로 재현된 CGHAZ의 광학현미경 및 TEM 조직 관찰 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이를 통해 CGHAZ의 경우 래스 마르텐사이트 조직을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 높은 최고온도와 오스테나이트 단상영역에서부터 급속한 냉각에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Fig. 1에 나타낸 다중 열 사이클에 의한 ICCGHAZ의 TEM 조직 관찰 결과를 보여주고 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, ICCGHAZ의 경우 기지조직 내에 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트 조직으로 구성되어 있는 상을 관찰할 수 있다. 즉, 다중 열 사이클 동안 ICCGHAZ에서 M-A상이 형성됨을 확인할 수 있다. 다중 열 사이클 중, 페라이트와 오스테나이트 상이 공존하는 온도 구간에 해당하는 두 번째 열 사이클의 최고온도에서, 기지조직은 최초 페라이트 (또는 템퍼링된 마르텐사이트)와 오스테나이트 미세조직으로 변태된다. 그 후 페라이트 변태 중 배출된 C와 Mn은 오스테나이트의 성장이 일어나는 동안 확산에 의해 오스테나이트에 농축되고, 이러한 부분이 고온에서 페라이트로의 변태가 발생되지 않고 저온 영역까지 불안정한

상태로 잔류하게 되는데, 이는 C과 Mn이 확산할 충분한 시간이 주어지지 않기 때문이다. 그 결과 오스테나이트 조직에서 C 및 Mn이 농축된 지역을 형성시키며, 이러한 불안정한 지역은 냉각 중 불안정한 상태로 저온 영역까지 잔류하다가 불완전 변태를 통해 M-A상을 형성시킨다⁷⁾.

Fig. 5는 높은 최고온도(890°C)와 낮은 최고온도

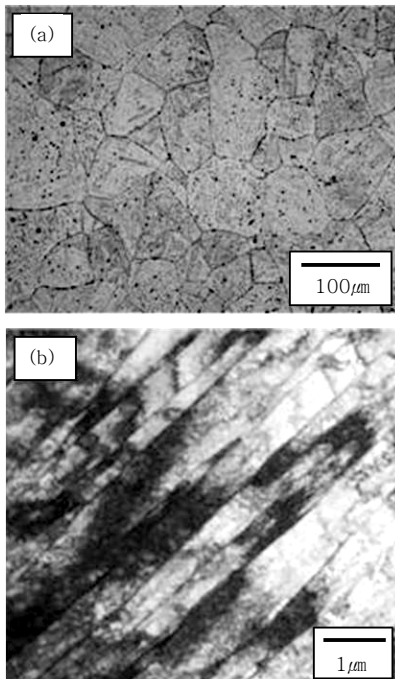


Fig. 3 Microstructure of simulated CGHAZ observed by (a) OM and (b) TEM

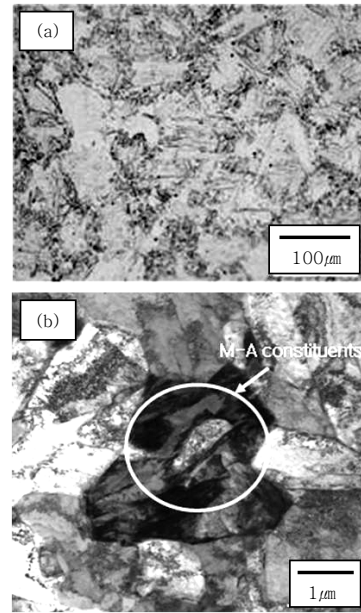


Fig. 4 Microstructure of simulated ICCGHAZ observed by (a) OM and (b) TEM

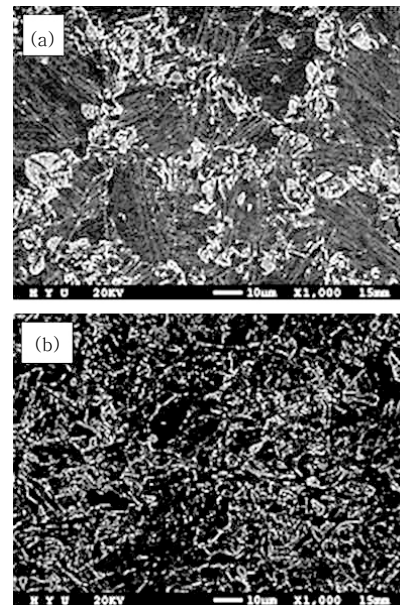


Fig. 5 SEM image of distribution of M-A constituents in the simulated ICCGHAZ with (a) 850°C and (b) 890°C peak temperature of the second cycle

(850°C)를 가지는 ICCGHAZ에서의 M-A상의 분포를 보여주는 SEM 관찰 결과이다. 이 그림에서 M-A상은 'white island' 형태로 관찰되며, 두 번째 열 사이클에서 더 높은 최고온도를 가지는 ICCGHAZ의 경우 더 미세한 M-A상이 분포함을 관찰할 수 있었다. M-A상의 평균 크기와 분율은 Table 3에 나타내었다. 페라이트와 오스테나이트 2상영역에서의 최고온도가 증가함에 따라 M-A상의 크기는 감소하였으나, 분율은 크게 변화하지 않았다. 또한 최고 온도가 증가함에 따라 M-A상의 분포가 결정립계 뿐 아니라 결정립 내에도 분포함을 관찰하였다.

이러한 결과는 Fig. 6을 통해서 확인할 수 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 이상영역에서 변태되는 오스테나이트의 분율은 최고온도가 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 table 3의 결과와는 다르게 M-A상의 형성 가능성의 증가를 의미한다. 즉, M-A상의 분포가 결정립계 뿐 아니라 전체로 고르게 나타날 수 있음을 의미한다. 그러나 C과 Mn의 확산이 높은 온도에서 더 빠르게 일어나기 때문에, 오스테나이트 내에 C과 Mn이 농축되는 지역이 형성될 가능성은 감소한다. 따라서, 더 낮은 최고온도를 가지는 ICCGHAZ (850°C)는 냉각 전에 C과 Mn이 농축된 오스테나이트를 가지지만, 반면에 더 높은 최고온도 (890°C)에서 형성된 오스테나이트는 상대적으로 C과 Mn이 고르게 분포한 오스테나이트와 C과 Mn이 약간 농축된 오스테나이트로 이루어진다. 즉, 두 번째 열 사이클에서 더

Table 3 Mean size and volume fraction of M-A constituents measured in the simulated ICCGHAZ

Peak temp.(°C) of second cycle	Mean size (μm)	Volume fraction (%)
850	2.4	11.1
870	1.8	11.0
890	1.4	9.9

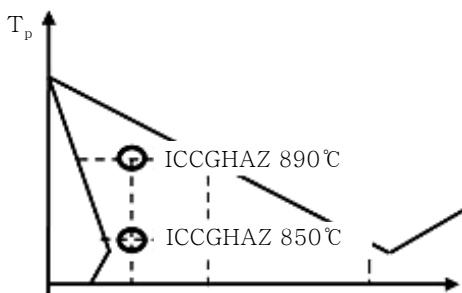


Fig. 6 Schematic phase diagram showing the dual phase region of $\alpha + \gamma$

높은 최고온도를 가지는 ICCGHAZ는 Table 3에서 볼 수 있듯이 더 미세한 M-A상을 가지게 된다.

한편, M-A상의 분율은 두 번째 열 사이클에서의 최고온도와 관계없이 비슷한 값을 가졌는데, 이는 두 번째 열사이클의 최고온도가 증가함에 따라 오스테나이트의 분율은 증가하지만 C과 Mn이 농축된 오스테나이트의 분율은 감소하기 때문이다.

Fig. 7은 인장시험을 통해 측정된 모재와 각 ICCGHAZ의 기계적 특성 결과를 보여주고 있다. 모든 ICCGHAZ는 모재에 비해 높은 항복비를 가지는 것을 알 수 있으며, 이는 ICCGHAZ에서 마르텐사이트와 같은 경한 상이 형성됨에 의해 인장강도 및 항복강도가 증가함에 기인한다. 높은 최고온도를 가지는 ICCGHAZ의 항복비는 가장 낮은 값을 가지는데, 이러한 결과는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 주로 인장강도 값의 증가에 기인한다. 일부 연구에서는 M-A상이 경한 2차상으로 작용한다고 보고되고 있다²⁾.

압입 시험에 의한 M-A상의 압입 깊이는 Fig. 8에 나타나있듯이, 모재와 비교할 때 더 작으며, 이는 M-A상이 모재에 비해 더 경한 상임을 의미한다 (M-A상:

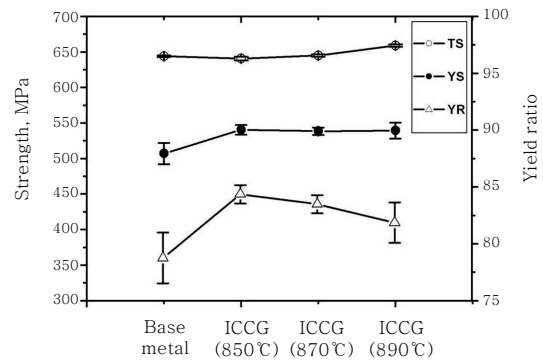


Fig. 7 Mechanical properties of base metal and the simulated ICCGHAZ

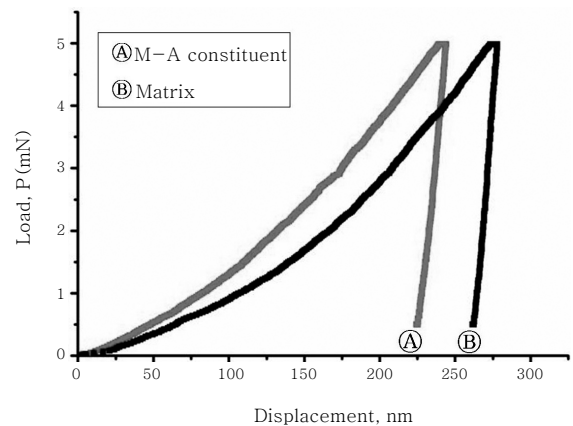


Fig. 8 P-h curves of M-A constituent and the matrix measured by nanoindentation

3.8GPa, 모재: 3.2GPa). 또한 모재 내에 분산된 M-A상은 강도의 증가에 기여하는 것으로 잘 알려져 있으며⁸⁾, 그 효과는 M-A상의 크기에 의존하는 것으로 알려져 있다. 즉, 작은 크기의 M-A상이 강도 증가에 더 효과적이다. 따라서, Fig. 7과 같이 더 높은 두 번째 최고온도를 가지는 ICCGHAZ는 더 작은 M-A상의 분포에 의해 강도는 증가하고 항복비는 감소한다.

4. 결 론

본 연구에서는 극 저탄소강의 Intercritical coarse grained HAZ에서의 M-A상과 인장특성 간의 상관관계에 대해 연구하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) M-A상은 더 높은 두 번째 사이클의 최고온도를 가지는 ICCGHAZ에서 더 작은 크기를 가졌으며, 분율의 경우에는 두 번째 사이클의 최고온도와 관계없이 비슷한 값을 가졌다.

2) ICCGHAZ의 항복비의 경우 두 번째 사이클의 최고온도가 고온일 때 더 낮음을 확인하였으며, 이는 M-A상의 분율 대비 크기가 작고 분포가 고르게 잘 되어 있어 인장강도가 증가하기 때문으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업 자원부 “중기거점 기술개발사업”의 지원 하에 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Y. M. Kim, S. K. Kim, Y. J. Lim and N. J. Kim : *ISIJ Int.*, **42** (2002) 1571
2. Emin Bayraktar and Dominique Kaplan : *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004) 87
3. O. M. Akselsen, Q. Grong and J. K. Solberg : *Scand. J. Metall.*, **17** (1988) 194
4. C. L. Davis and J. E. King : *Metall. Mater. Trans. A* **27** (1996) 3019
5. B. C. Kim, S. Lee, N. J. Kim and D. Y. Lee : *Metall. Mater. Trans. A* **22** (1991) 139
6. K. Easterling : *Introduction to the physical metallurgy of Welding*, Butterworths, 1983, 17
7. P. C. M. Rodrigues, E. V. Pereloma and D. B. Santos : *Mat Sci & Eng* **A283** (2000) 136
8. Z. Li and D. Wu : *Mat Sci & Eng* **A452-453** (2007) 142-148