고강도강 다층 용접금속 재가열부의 미세조직 및 기계적 특성

강용준* · 박기태** · 정성훈** · 이창희**,†

*한국기계연구원 부설 재료연구소 접합기술연구실

**한양대학교 신소재공학부

Microstructure and Mechanical Properties of Reheated Zones in the Multi-pass Weld Metal of High-Strength Steel

Yongjoon Kang*, Gitae Park**, Seonghoon Jeong**, and Changhee Lee**,†

*Joining Technology Department, Korea Institute of Materials Science, Changwon, 51508, Korea

**Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

†Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received November 21, 2017 ; Revised December 6, 2017 ; Accepted December 11)

Abstract

A large fraction of reheated weld metal is formed during multi-pass welding, which significantly affects the reliability and stability of the welded structures. In this study, the effect of reheating on the mechanical properties and microstructure of high-strength steel welds during multi-pass welding was investigated. Two kinds of high-strength steel welds with different hardenabilities, i.e., welds L (low hardenability) and H (high hardenability), were produced by single-pass, bead-in-groove welding, and both welds were thermally cycled to various peak temperatures to simulate the reheated welds using a Gleeble simulator. In as-welded weld L, acicular ferrite developed extensively in the grain interior, while grain boundary ferrite and Widmanstätten ferrite formed along the prior austenite grain boundaries. The microstructure of as-welded weld H consisted mainly of bainite, with some acicular ferrite and coalesced bainite. The microstructural changes due to thermal cycling were observed by scanning electron microscopy and correlated with the mechanical properties.

Key Words : Multi-pass welding, Reheated zone, Impact toughness

1. 서 론

최근 파이프라인, 선박, 해양구조물 등 구조물의 대형화와 함께 사용환경이 가혹화됨에 따라 높은 강도와 인성을 갖는 구조용 강재에 대한 수요가 점차 증가하고 있다. 그러나 이러한 강재의 우수한 기계적 특성에도 불구하고, 모재에 비해 낮은 기계적 특성(특히, 인성)을 갖는 용접금속 및 용접 열영향부(heat-affected zone, HAZ)로 인해 구조물의 안정성을 높이는 데 한계가 있으며, 이에 용접금속과 용접 HAZ의 기계적 성질을 향상시키기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다^{1,2)}.

일반적으로 고강도강 용접금속의 인성은 비금속재

물(non-metallic inclusion)에서 핵생성 되어 성장한 침상형 페라이트(acicular ferrite)의 분율이 높을수록 향상된다. 따라서 다수의 연구가 침상형 페라이트 형성에 미치는 용접 공정변수 및 합금성분의 영향에 초점을 두고 수행되었으며³⁻⁷⁾, 최근에는 Ti 첨가를 통해 개재물의 핵생성 능력을 높일 수 있다고 보고되고 있다⁷⁾. 한편 구조물의 건설에 적용되는 용접공정은 대부분 다층(multi-pass) 용접이며, 후속 패스에 의해 재가열된 용접금속의 미세조직은 재가열 되지 않은 영역과 매우 상이하게 나타난다³⁻⁵⁾. 그러나 다층용접에 의한 용접금속 재가열부(reheated zone, RZ)의 기계적 성질에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았을 뿐만 아니라 선행연구들이 상반된 결과를 보여주고 있다. Evans³⁾

와 Surian 등⁴⁾은 RZ의 분율이 높을수록 결정립 미세화 효과로 인해 용접금속의 인성이 향상된다고 하였으나, Chen 등⁸⁾과 Zhou 등⁹⁾은 RZ 재현 시험을 통해 최고온도(peak temperature, T_p)가 1350℃일 때, 즉 coarse-grained RZ (CGRZ)에서 인성이 크게 저하된다고 하였으며 이것은 prior 오스테나이트 결정립계를 따라 생성된 M-A (martensite-austenite) 상에 의해 비롯된다고 하였다. 한편 Ohkita 등¹⁰⁾과 Tezuka 등¹¹⁾은 재가열로 인한 용접금속의 인성 변화는 재가열 전, 즉 용접 그대로 (as-welded) 상태의 미세조직에 좌우된다고 보고하였다.

본 연구에서는 고강도강 용접금속의 재현 RZ의 기계적 특성을 평가하고 미세조직과의 상관관계를 고찰하였다. Gleeble simulator를 이용하여 열사이클의 T_p 가 오스테나이트 영역, 즉 Ac_3 이상인 CGRZ와 fine-grained RZ (FGRZ), 오스테나이트와 페라이트 이상영역, 즉 Ac_1 과 Ac_3 사이인 intercritical RZ (ICRZ), 페라이트 영역, 즉 Ac_1 이하인 subcritical RZ(SCRZ)를 재현하였으며, 이를 통해 재가열로 인한 용접금속의 미세조직 및 기계적 성질 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1에 나타난 바와 같이 재가열 전, 즉 용접 그대로 상태의 용접금속 시편을 제작하기 위해 AH36 강판에 5mm 깊이 V-그루브를 가공하여 약 20 kJ/cm의 입열량으로 단일 패스 용접을 수행하였다. 가스 메탈 아크 용접 (gas metal arc welding) 공정을 이용하였고, 보호가스는 80% Ar + 20% CO₂ 혼합가스를 사용하였으며, 용접속도는 300 mm/min으로 하였다. 용접금속의 경화능 증가에 따른 재가열 효과의 변화를 확인하기 위해 Ni, Cr, Mo 등 합금원소의 양이 다른 2종의 용접금속 시편, weld L (low hardenability)과 weld H (high hardenability)를 제작하였다. 용접금속의 화학조성은 광학발광분석기 (OES-5500, Shimadzu) 및 N/O 분석기(TC-436, LECO)를 이용하여 분석하였고, 분석 결과를 Table 1에 나타내었다.

용접금속 시편은 Fig. 1에 나타난 위치에서 6mm×11mm×65mm 치수로 채취하였다. 용접 열사이클 재현은 Gleeble(Gleeble-1500, DSI)을 이용하여 수행

Fig. 1 Schematic illustration showing the preparation of as-deposited weld metals

Fig. 2 Thermal cycles used for simulation of the reheated weld metals

하였다. 열사이클은 20kJ/cm의 용접 입열량에 대해 Rosenthal 방정식을 이용하여 계산하였으며¹²⁾, 계산 결과를 Fig. 2에 나타내었다. CGRZ, FGRZ, SCRZ를 재현하기 위한 열사이클의 T_p 는 각각 1350℃, 1050℃, 600℃로 선정하였으며, ICRZ를 재현하기 위한 열사이클의 T_p 는 weld L의 경우 830℃, weld H의 경우 790℃로 선정하였다. ICRZ는 열사이클의 T_p 에서 오스테나이트와 페라이트가 동일한 분율을 갖는 조건으로 결정하였다.

재가열로 인한 용접금속의 기계적 성질 변화를 확인하기 위해 경도와 충격인성을 평가하였다. 경도는 비커스 경도계(HMV-2, Shimadzu)를 이용하여 1.96N의 하중으로 10회, 충격인성은 샤르피 충격시험기(CI-500D, TTM)를 이용하여 -40℃에서 3회 측정 후 평균값을 구

Table 1 Chemical compositions of the weld metals (wt.%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	P	S	Al	Ti	O
Weld L	0.072	0.66	1.6	1.1	0.03	0.20	0.014	0.007	0.010	0.017	0.0327
Weld H	0.080	0.57	2.1	2.6	0.54	1.11	0.012	0.007	0.018	0.009	0.0216

하였다. 충격시험편은 용접금속 및 재현 RZ 시편을 절삭가공하여 ASTM E23의 sub-size 규격인 5mm×10mm×55mm 치수로 제작하였고, 노치(notch)는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 용접금속의 중앙에 위치하도록 하였다. 또한 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM; SIGMA, Carl Zeiss)을 이용하여 미세조직 변화를 관찰하였으며, 재가열 전 용접금속 시편에 대해서는 전자 후방산란 회절(electron back-scattered diffraction, EBSD)을 이용하여 잔류 오스테나이트 분포를 확인하였다. 미세조직 관찰을 위한 시편은 기계적 연마 후 2% nital 용액으로 에칭(etching)하였으며, EBSD 분석을 위한 시편은 5% perchloric acid + 95% methanol 전해액을 사용하여 전해연마하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

재가열 전 용접금속과 재현 RZ 시편의 기계적 특성 평가 결과를 Fig. 3에 나타내었다. CGRZ와 FGRZ의 충격인성은 용접금속의 경화능에 관계없이 재가열 전 용접 그대로 상태 (as-welded zone, AWZ) 대비 감소하였다. 경도는 CGRZ와 FGRZ가 AWZ에 비해 weld L에서는 감소한 반면, weld H에서는 증가하였다. SCRZ는 weld H의 경우 AWZ 대비 큰 변화가 관찰되지 않은 반면, weld L의 경우 AWZ와 비교해서 충격인성은 증가하고 경도는 감소하는 것으로 확인되었다. ICRZ의 충격인성은 용접금속의 종류에 관계없이 AWZ와 평균 값은 유사하였지만 측정편차가 증가하였다. ICRZ의 경도는 weld L의 경우 AWZ와 유사한 수준인 반면, weld H의 경우 AWZ보다 증가하였다.

Fig. 4는 재가열 전 용접금속 미세조직에 대한 SEM 관찰 결과이다. Weld L의 경우 결정립계를 따라 입계 페라이트(grain boundary ferrite)와 위드만슈테텐 페라이트(Widmanstätten ferrite)가 형성되었으며, 결정립 내부에는 침상형 페라이트가 발달하였다. Weld H는 대부분 베이나이트(bainite)로 구성되었으며, coalesced 베이나이트도 일부 관찰되었다. Coalesced 베이나이트는 낮은 변태 온도로 인해 상변태 구동력이 매우 클 때 방위차가 작은 인접한 래스(lath)들이 성장단계에서 유착(coalescence)됨으로써 형성된다고 보고된 바 있다^{3,14)}. 또한 침상형 페라이트가 베이나이트 기지(matrix) 내에 고립된 형태로 형성된 것을 관찰할 수 있었다. 용접금속의 경화능 증가에 따른 침상형 페라이트의 분포와 형상 변화에 대해서는 최근 연구에서 고찰한 바 있다¹⁵⁾.

(a)

(b)

Fig. 3 Mechanical properties of weld metals: (a) weld L and (b) weld H (As: austenite start temperature during heating, Af: austenite finish temperature during heating)

Fig. 4 SEM micrographs of as-deposited specimens: (a) weld L and (b) weld H (GBF: grain boundary ferrite, WF: Widmanstätten ferrite, AF: acicular ferrite, CB: coalesced bainite)

Fig. 5는 CGRZ와 FGRZ에 대한 SEM 관찰 결과이다. Weld L의 경우 입계 페라이트의 분율이 AWZ에 비해 증가하였으며, 특히 FGRZ에서 가장 높은 것으로 관찰되었다. 일반적으로 prior 오스테나이트 결정립은 AWZ에서 조대한 주상(columnar) 구조이지만, Ac_3 이상의 T_p 로 재가열 되면 상대적으로 작은 등축(equiaxed) 구조를 가지게 되며, T_p 가 상승함에 따라 prior 오스테나이트 결정립 크기는 증가한다^{5,16)}. 입계 페라이트가 핵

Fig. 5 SEM micrographs of reheated specimens: (a, b) CGRZ and FGRZ of weld L and (c, d) CGRZ and FGRZ of weld H (GBF: grain boundary ferrite, AF: acicular ferrite, CB: coalesced bainite)

생성되는 prior 오스테나이트 결정립계의 면적은 AWZ, CGRZ, FGRZ 순으로 증가하게 되므로 이에 따라 입계 페라이트의 분율이 증가한 것으로 보인다. 입계 페라이트는 침상형 페라이트에 비해 경도가 낮으며¹⁶⁾, 벽개 (cleavage) 균열에 대한 저항성이 낮아서 인성에 취약한 미세조직이다^{10,11)}. 따라서 weld L의 경우 입계 페라이트의 양이 증가함에 따라 AWZ, CGRZ, FGRZ 순으로 충격인성과 경도가 감소한 것으로 판단된다. Weld H의 경우 coalesced 베이나이트의 분율이 AWZ에 비해 크게 증가하였으며, 이것은 베이나이트 기지 (matrix) 내에 분산되어 있는 침상형 페라이트의 양이 감소하였기 때문인 것으로 사료된다. 앞서 언급하였듯이 coalesced 베이나이트는 결정학적 방위가 유사한 래스(lath)들이 성장단계에서 유착됨으로써 형성되기 때문에 래스들이 다른 결정립과 충돌(impingement) 없이 성장해야 한다. 결정립 내부에서 핵생성되어 사방으로 성장한 침상형 페라이트는 래스(lath)들의 성장 및 유착을 방해할 것으로 생각되며, 따라서 침상형 페라이트의 양의 감소로 인해 coalesced 베이나이트가 발달한 것으로 보인다. 한편 침상형 페라이트 양이 감소하는 것은 침상형 페라이트의 핵생성 장소인 비금속 개재물 주변에 형성되어 있던 Mn-결핍층(Mn-depleted zone)이 재가열로 인해 균질화되면서 핵생성을 위한 열역학적 구동력이 감소하기 때문이라고 최근 연구에서 보고한 바 있다¹⁷⁾. Coalesced 베이나이트는 높은 경도를 가지며, 벽개 파괴 시 균열 전파에 대한 저항성이 매우 낮은 미세조직이다^{13,14)}. 따라서 weld H의 경우 coalesced 베이나이트의 발달이 충격 인성의 감소 및 경도의 증가를 유발한 주된 원인으로 판단된다.

Fig. 6 SEM micrographs of reheated specimens: (a, b) ICRZ and SCRZ of weld L and (c, d) ICRZ and SCRZ of weld H

Fig. 6는 ICRZ와 SCRZ에 대한 SEM 관찰 결과이다. Fig. 6b에 나타난 바와 같이 weld L의 SCRZ에서는 템퍼링 (tempering) 효과에 의해 미세한 탄화물이 결정립계에 석출되어 있음을 확인하였다. 충격인성 증가 및 경도 저하는 이러한 템퍼링 연화에 의한 결과로 판단된다. 반면 Fig. 6d에서 확인할 수 있듯이 weld H의 SCRZ는 재가열 전 용접금속의 미세조직과 큰 차이가 없었으며, 이는 합금원소, 특히 Mo의 첨가가 kinetics 측면에서 템퍼링 연화를 지연시켰기 때문인 것으로 생각된다¹⁸⁾. Fig. 6a와 6c에서 보듯이 ICRZ에서는 이상영역에서 형성된 오스테나이트가 냉각 중 변태를 통해 생성된 제2상(second phase)이 관찰되었다. 제2상은 냉각속도 및 탄소함량에 따라 베이나이트, 마르텐사이트(martensite), M-A 상 등으로 존재할 수 있으며, 일반적으로 경도가 높고 취성이 크다. 또한 제2상의 종류, 모양, 분포에 따라 기계적 특성이 크게 달라진다¹⁹⁻²¹⁾. 일반적으로 모재의 intercritical coarse grained HAZ (ICCGHAZ)에서는 prior 오스테나이트 결정립계를 따라 목걸이 형태로 M-A 상이 형성되며, 이로 인해 인성이 매우 취약하다. 본 연구에서 관찰된 제2상은 불연속적으로 분산되어 있는 형태를 보이기 때문에 ICCGHAZ에서와 같이 연결된 형태를 갖는 경우와 비교해서 인성 저하에 미치는 영향은 미미한 것으로 보이며, 높은 경도와 취성으로 인해 측정편차를 크게 한 것으로 생각된다. 제2상이 불연속적으로 분산된 형태를 보이는 것은 재가열 시 이상영역에서 형성되는 오스테나이트가 용접금속에 분산되어 분포하는 잔류 오스테나이트로부터 성장되었기 때문이라고 생각된다. EBSD 분석을 통한 재가열 전 용접금속의 잔류 오스테나이트 분포를 Fig. 7에 나타내었으며, 잔류 오스테나이트 분율은 Weld L에서 1.6%, weld H에서 2.1%

Fig. 7 Phase maps of the as-welded specimens: (a) weld L and (b) weld H

로 측정되었다. 제2상의 종류, 모양, 분포를 결정하는 인자들에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 한편 높은 경도를 갖는 제2상의 형성으로 인해 용접금속의 경도는 증가할 것으로 여겨지며, 실제로 weld H의 ICRZ에서는 경도가 상승하는 것을 확인하였다. 그러나 weld L은 Fig. 6a에서 알 수 있듯이 제2상 주변 기지조직이 템퍼링으로 인해 연화되어 상쇄 효과가 발생한 것으로 보인다. Weld H에서는 앞서 언급하였듯이 템퍼링 kinetics가 느리기 때문에 템퍼링으로 인한 기지조직의 변화는 관찰되지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 다층 용접 시 후속 패스에 의해 재가열된 용접금속, 즉 RZ의 기계적 특성을 평가하고 미세조직과의 상관관계를 분석하였다. 경화능이 다른 2종의 용접금속 시편 weld L (low hardenability)과 weld H (high hardenability)를 제작한 후 Gleeble simulator를 이용하여 CGRZ, FGRZ, ICRZ, SCRZ를 재현하였으며, 미세조직 및 기계적 특성 변화를 관찰하였다.

1) CGRZ와 FGRZ의 경우, weld L에서는 입계 페라이트, weld H에서는 coalesced 베이나이트의 분율이 증가하였고, 이로 인해 충격인성은 모두 감소하였다. 경도는 weld L에서는 감소, weld H에서는 증가하였다.

2) SCRZ의 경우, weld L은 템퍼링에 의해 충격인성 증가 및 경도 저하를 보였으나, weld H는 느린 템퍼링 kinetics로 인해 기계적 특성의 변화가 미미하였다.

3) ICRZ에서는 높은 경도를 갖는 제2상이 관찰되었으나 불연속적인 분포로 인해 인성 저하에 미치는 영향은 작은 것으로 생각된다. 한편 제2상으로 인해 weld H는 경도 증가를 보였으나, weld L에서는 제2상 주변 기지조직의 연화로 인한 상쇄 효과가 발생하여 재가열 전과 유사한 경도를 보였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20161510200340)

ORCID: Yongjoon Kang : <http://orcid.org/0000-0001-7088-9384>

ORCID: Gitae Park : <http://orcid.org/0000-0002-6212-5584>

ORCID: Seonghoon Jeong : <http://orcid.org/0000-0001-5527-4584>

ORCID: Changhee Lee : <http://orcid.org/0000-0002-1775-3020>

References

1. D.S. Sarma et al., On the Role of Non-metallic Inclusions in the Nucleation of Acicular Ferrite in Steels, *ISIJ Int.*, 49(7) (2009), 1063-1074
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1063>
2. Joonoh Moon and Changhee Lee, 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, *Journal of KWJS*, 31(6) (2013), 44-49
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.6.44>
3. G.M. Evans, The Effect of Heat Input on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld-Metal Deposits, *Weld. J.*, 61 (1982), 125s-132s
4. E. Surian et al., Influence of Chromium on the Mechanical Properties and Microstructure of Weld Metal from a High-Strength SMA Electrode, *Weld. J.*, 73 (1994), 45s-53s
5. M.H. Avazkonandeh-Gharavol et al., Effect of chromium content on the microstructure and mechanical properties of multipass MMA, low alloy steel weld metal, *J. Mater. Sci.*, 44 (2009), 186-197
<https://doi.org/10.1007/s10853-008-3103-2>
6. Y. Kang et al., Influence of Ni on the Microstructure and Mechanical Properties of HSLA Steel Welds, *Journal of KWJS*, 30(4) (2012), 339-344
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.4.339>
7. Y. Kang et al., Influence of Ti on Non-Metallic Inclusion Formation and Acicular Ferrite Nucleation in High-Strength Low-Alloy Steel Weld Metals, *Met. Mater. Int.*, 20(1) (2014), 119-127
<https://doi.org/10.1007/s12540-014-1013-1>
8. J.H. Chen et al., Study on Impact Toughness of C-Mn Multilayer Weld Metal at -60°C, *Weld. J.*, 72 (1993), 19s-27s
9. Z.L. Zhou and S.H. Liu, Influence of Local Brittle Zone on the Fracture Toughness of High-Strength Low-Alloyed Multipass Weld Metals, *Acta. Metall. Sinica*, 11(2) (1998), 87-92
10. S. Ohkita and Y. Horii, Recent Development in Controlling the Microstructure and Properties of Low Alloy Steel Weld Metals, *ISIJ Int.*, 35(10) (1995), 1170-1182
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1170>
11. N. Tezuka et al., Toughness Degradation Mechanism for Reheated Mo-Ti-B Bearing Weld Metal, *ISIJ Int.*, 35(10)

- (1995), 1232-1238
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1232>
12. K. Easterling, *Introduction to the physical metallurgy of welding*, (1983), 20
 13. E. Keehan et al., Three-dimensional analysis of coalesced bainite using focused ion beam tomography, *Mater. Charact.*, 59 (2008) 877-882
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.07.011>
 14. K. Brunelli et al., Microstructural Evolution of a Continuously Cooled Air Hardening Steel, *Metallogr. Microstruct. Anal.*, 2 (2013), 56-66
<https://doi.org/10.1007/s13632-013-0062-z>
 15. Y. Kang et al., Factors Affecting the Inclusion Potency for Acicular Ferrite Nucleation in High-Strength Steel Welds, *Metall. Mater. Trans. A*, 47A (2016), 2842-2854
<https://doi.org/10.1007/s11661-016-3456-0>
 16. W.W. Bose-Filho et al., Effects of alloying elements on the microstructure and inclusion formation in HSLA multipass welds, *Mater. Charact.*, 58 (2007), 29-39
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.03.004>
 17. Y. Kang et al., Variation in the Chemical Driving Force for Intragranular Nucleation in the Multi-pass Weld Metal of Ti-Containing High-Strength Low-Alloy Steel, *Metall. Mater. Trans. A*, 46A (2015), 3581-3591
<https://doi.org/10.1007/s11661-015-2958-5>
 18. G. Kim and G. Rho, Considerations in Welding for the Cr-Mo Type Steel Pressure Vessels, *Journal of KWJS*, 18(1) (2000), 30-37
 19. K.S. Kweon et al., Effects of M-A Constituents on Toughness in the ICCG HAZ of SA508-cl.3 Pressure Vessel Steel, *Journal of KWJS*, 17(3) (1999), 203-213
 20. H.U. Hong, Technical Review on Improvement of HAZ Toughness through a Control of M-A Constituent, *Journal of KWJS*, 28(3) (2010), 232-236
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2010.28.3.004>
 21. Y. Lee et al., 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), 327-331
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2010.28.3.099>