오스테나이트계 Fe-Mn-Al-C 경량철강의 용접열영향부 고온연성 거동 및 첨가 원소의 영향

문 준 오^{*,†}

^{*}창원대학교 신소재공학부

Hot Ductility Behavior in the Weld Heat-Affected Zone of Austenitic Fe-Mn-Al-C Lightweight Steels and the Effects of Alloying Elements

Joonoh Moon^{*,†}

^{*}Department of Material Science and Engineering, Changwon National University, Changwon, 51140, Korea

[†]Corresponding author: mjo99@changwon.ac.kr

(Received December 6, 2021; Revised December 13, 2021; Accepted December 22, 2021)

Abstract

Three austenitic Fe-Mn-Al-C alloys containing different Mo, Cr, and Si contents were prepared to evaluate the effects of alloying elements on the hot ductility behavior of the weld heat-affected zone (HAZ) of austenitic lightweight steels. HAZ simulations and hot tension tests were performed using a Gleeble simulator. The hot tension tests were conducted at 500 - 1220 °C during on-heating and on-cooling cycles. The results showed that the hot ductility significantly varied according to the behavior of κ -carbide precipitation with a decrease in temperature. The tensile ductility values of all the alloys were high at elevated temperatures above 1000 °C because of dynamic recrystallization. At intermediate temperatures of 700 - 900 °C, significant ductility drops occurred in all alloys because κ -carbide precipitation, and the addition of Si resulted in more significant of ductility loss than in Cr or Mo added alloys. These different effects occurred because Mo and Cr suppressed κ -carbide precipitation, whersase Si promoted it. Ductility was recovered at low temperatures of approximately 500 °C.

Key Words: Lightweight steel, Heat-Affected Zone (HAZ), Hot ductility, κ -carbide, Atom Probe Tomography (APT)

1. 서 론

온실가스 배출 증가에 따른 지구온난화 및 생태계 파괴와 같은 전 세계적인 환경 문제를 해결하기 위해 온실가스 배출 저감을 위한 다양한 노력들이 진행되어 왔다. 최근에는 세계 각국에서 '순 탄소배출 제로'를 목표로 하는 탄소중립 실현을 위한 다양한 정책들을 발표하고 있다. 자동차, 철강, 기계부품 등으로 대표되는 제조산업에서도 온실가스 배출 저감을 위한 많은 노력들이 진행되고 있다. 이 중, 자동차, 발전기 부품, 등에

적용되는 소재의 경량화는 연비 및 에너지 효율 향상 등을 통해 온실가스 배출 저감에 기여할 수 있다.

경량철강은 철강에 경량원소인 Al을 다량 첨가함으로써 강의 밀도를 낮춘 소재로서 Fe-Mn-Al-C계 합금이 대표적이다^{1,2)}. Al 원자는 Fe 원자 대비 원자 반경이 크면서도 질량이 낮아, 보고에 따르면 강 중에 1wt%의 Al 첨가 시 Fe 원자 치환 및 격자 팽창 효과에 의해 강의 밀도가 약 1.5% 낮아지는 효과가 있다¹⁾. 경량철강은 주요 구성 원소인 Al, Mn, C의 함량에 따라 오스테나이트계, 페라이트계, 듀플렉스계로 구분되며, 오스테나이트와 페라이트의 기지상 외에도 Al과 C의 함량

및 열처리 등에 따라 규칙상인 κ -carbide (Fe_3AlC)가 생성될 수 있다¹⁾. 특히, 입내에 생성되는 미세한 κ -carbide는 상온에서 연신율을 크게 저하시키기 않으면서도 강도를 크게 증가시키는 효과가 있어서 경량철강 합금 및 공정 설계 시에 중요하게 활용되는 석출상이다.

Frommeyer 등은 Fe-(18-20)Mn-(9-12)Al-(0.7-1.2)C의 성분을 가지는 경량철강을 개발하여 TRIPLEX steel이라고 명명하였다. TRIPLEX steel은 오스테나이트 기지에 페라이트와 미세한 κ -carbide가 분포함으로써 높은 강도(700-1100 MPa)와 연신율 ($\geq 60\%$)을 동시에 갖는다³⁾. 최근 Hwang 등은 Fe-21Mn-10Al-1C-5Ni 경량철강을 개발하였으며, 이러한 합금은 κ -carbide 외에도 Ni 첨가에 의해 미세한 B2상 (NiAl)이 석출됨으로서 매우 높은 항복강도 (1.6GPa)와 20% 이상의 연신율을 확보하였다⁴⁾. 이와 같은 상온에서의 우수한 물성에도 불구하고 경량철강의 연성은 고온에서 급격하게 하락하며 이는 입계와 입내에서 다량의 κ -carbide 석출에 의한 입계 취화 현상과 관련이 있다^{5,6)}. 이러한 낮은 고온연성은 용접 시, 열영향부에서의 연성저하균열 (Ductility Dip Cracking) 발생 위험을 증가시킬 수 있다⁷⁾.

이에 본 연구에서는 경량철강 용접열영향부(Heat-Affected Zone, HAZ)에서의 고온연성 거동에 대한 첨가원소의 영향을 평가하였으며, 이를 위하여 Mo, Cr, Si 함량을 달리한 3종의 오스테나이트계 Fe-30Mn-9Al-0.9C 경량철강을 제작하였다. HAZ 재현 및 고온 변형 시험은 Gleeble simulator를 이용하여 실시하였다. 고온 변형 시험 후 미세조직 및 석출물은 광학현미경(Optical Microscopy, OM), 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, TEM), 원자탐침 단층분석(Atom Probe Tomography, APT)을 이용하여 분석하였다.

2. 실험 방법

Table 1은 본 연구에서 사용한 오스테나이트계 경량철강 합금성분을 보여주고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 Fe-30Mn-9Al-0.9C를 기본 성분으로 하며 Mo, Cr, Si을 각각 첨가한 3종의 경량철강

Table 1 Chemical compositions (in wt%) of the lightweight steels examined in this study

Alloys	Mn	Al	C	Mo	Si	Cr	Fe
A steel	30	9	0.9	2			Bal.
B steel	30	9	0.9			2	Bal.
C steel	30	9	0.9		1		Bal.

합금을 제작하였다. 모재 합금 제작을 위해서 먼저 진공용해로(Vacuum Induction Melting furnace)를 이용하여 1kg급 잉곳을 제조하였으며, 이후 열간압연을 통해 최종 두께 12mm의 판재 샘플을 제작하였다. 이후 오스테나이트 기지를 갖는 모재를 제작하기 위해 압연재에 대해 1050℃에서 2시간 동안 균질화 열처리를 실시하였다.

다음의 Fig. 1은 Gleeble simulator를 이용하여 실시한 Hot ductility test 스케줄을 보여주고 있다. HAZ 열사이클은 100 kJ/cm의 입열량 조건에 대해서 Rosenthal이 구한 열유동 방정식의 해를 이용하여 계산하였다⁸⁾. HAZ 열사이클을 따라 가열 및 냉각 중에 500-1220℃에서 5cm/sec의 빠른 속도로 인장 변형을 실시하였다. 이 때, 그림에 표기되어 있는 최고온도(peak temperature)는 각 합금에서 측정된 ZDT (Zero Ductility Temperature)와 ZST (Zero Strength Temperature)의 중간 온도 값으로 결정하였다. 고온 변형시험 후 파단된 샘플들의 단면적 수축률(Reduction of Area, R.A)을 측정하여 각 샘플의 고온연성을 평가하였다.

모재 및 Hot ductility test 후 미세조직은 OM과

Fig. 1 Schematic illustrations for gleeble hot tension tests: (a) On-heating and (b) On-cooling

TEM을 이용하여 관찰하였다. TEM 관찰을 위한 샘플의 경우, 먼저 Thin foil 시편을 제작한 후 이를 10% Perchloric acid 와 90% Methanol의 혼합용액에서 Twin jet-polishing을 실시하여 제작하였다. 한편, Hot ductility test 시 석출된 κ -carbide의 크기를 정량분석하기 위해 APT 분석을 실시하였다. APT 분석을 위한 Tip 샘플의 경우, 집속이온빔(focused Ion Beam, FIB) 밀링을 통하여 제작되었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접열영향부 Hot ductility test 결과

다음의 Fig. 2는 용체화 열처리 후 관찰한 각 샘플의 미세조직을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 모재는 100% 오스테나이트 조직으로 이루어진 것을 확인할 수 있다.

다음의 Fig. 3은 Fig. 1의 스케줄을 따라 실시한 Hot ductility test의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 모든 합금에서 On-heating 시에는 50% 이상의

Fig. 3 Results of hot ductility tests

단면적 수축률을 가지지만, On-cooling 시에는 700-900°C 부근에서 급격한 연성의 하락이 관찰되며, 특히 Si를 첨가한 C steel에서 가장 큰 고온 연성의 하락이 발생하였다.

다음의 Fig. 4와 5는 각각 On-heating, On-cooling 중의 Hot ductility test 후 파단된 샘플의 단면 미

Fig. 2 Optical micrographs of the base steels: (a) A steel, (b) B steel, and (c) C steel

Fig. 4 Cross-sectional microstructures after the hot ductility tests during the on-heating cycle

Fig. 5 Cross-sectional microstructures after the hot ductility tests during the on-cooling cycle

세조직을 보여주고 있다. Fig. 4에서 500°C의 경우, 고온 변형 시 발생한 Slip traces들이 쉽게 관찰되며 이러한 Slip의 흔적들은 Fig. 3에서 보듯이 500°C에서의 우수한 소성 변형능(Plasticity)을 의미한다. 온도가 증가함에 따라 800°C에서는 입계를 따라 발생한 균열이 관찰되며, 1100°C에서는 고온 변형 중에 발생한 동적재결정에 따른 미세한 결정립이 관찰된다. 이와 같은 동적재결정 거동에 따라 1100°C 부근에서 높은 고온 연성을 가지는 것으로 판단된다. 이러한 고온 변형 시 미세조직 변화는 On-cooling 시에도 유사하게 관찰된다. 즉, Fig. 5에서 보듯이 녹는점 부근의 최고 온도까지 가열 후 냉각 시, 1100°C 부근에서 고온 연성이 회복되며 이는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 동적재결정에 의한 결과이다. 온도가 하락함에 따라 700–900°C에서는 결정립계를 따라 균열이 발생하였다. 한편, 500°C의 경우, B steel에서는 On-heating 시와

마찬가지로 Slip traces 들이 많이 관찰되는 반면에 C steel에서는 상대적으로 이러한 Slip traces이 잘 관찰되지 않았다.

3.2 κ -carbide 석출 거동의 영향

다음의 Fig. 6은 On-cooling 중 800°C에서의 고온 변형 시험 후 C steel의 미세조직을 TEM을 이용하여 관찰한 결과이다. 그림에서 보듯이 Si를 첨가한 C steel의 경우, 800°C에서 고온 변형 시험 시 다량의 κ -carbide가 생성된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 다량의 κ -carbide 석출에 따라 상대적으로 입계가 취약해지고 Fig. 5와 같은 입계 균열 발생에 의해 Fig. 3에서 관찰되는 Ductility Dip이 발생하는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 3에서 A, B steel 대비 C steel에서 Ductility Dip이 보다 크게 발생한 이유는 κ -carbide 석출에 대한 각 합금의 첨가 원소 영향으로 판단된다.

Fig. 6 TEM micrographs of steel C after hot ductility tests at 800°C during the on-cooling cycle: (a) bright-field, (b) dark-field images, and (c) SAD pattern analyses

Fig. 7 Result of APT analyses. Iso-concentration surface image of Steel A after hot ductility tests at 800°C during the on-cooling cycle

즉, 문헌에 따르면 Mo과 Cr은 κ -carbide 생성을 억제시키는 반면에 Si은 κ -carbide 생성을 촉진시키는 것으로 보고되고 있으며^{9,10)}, 따라서 Mo, Cr을 각각 첨가한 A, B steel 대비 Si을 첨가한 C steel에서 보다 많은 양의 κ -carbide가 생성됨에 따라 입계 취화가 심화되고 따라서 Ductility Dip 거동이 보다 크게 발생한 것으로 판단된다. 다음의 Fig. 7은 앞서 Fig. 6에서 관찰한 κ -carbide 분포를 APT를 이용하여 관찰한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 C steel의 경우, κ -carbide는 규칙상으로서 입내에 높은 분율로 조대하게 석출되어 있으며, APT를 이용하여 측정한 κ -carbide의 평균 volume은 102.7 nm³으로 확인되었다.

마지막으로 Fig. 3에서 On-cooling 시, 500°C에서 모든 합금의 고온 연성이 회복되는 것을 볼 수 있다. 이는 온도 감소에 따른 κ -carbide의 석출 감소 및 500°C에서의 Slip band-induced Plasticity 거동과 관련이 있다. 즉, 문헌 보고에 따르면 500°C 부근에서 고온 변형 시, 전위의 활발한 이동에 의해 Slip이 발생하고 이에 따라 Fig. 3과 같이 고온 연성이 회복될 수 있다⁶⁾. 한편, Fig. 3에서 보면 Si을 첨가한 C steel에서 연성의 회복이 가장 적게 발생한 것을 볼 수 있으며, 이는 A, B steel 대비 C steel의 경우 Si 첨가에 의해 입내 κ -carbide가 보다 많이 발달함에 따라 상대적으로 전위의 이동이 보다 크게 방해 받기 때문으로 판단된다. Fig. 8은 500°C에서 고온 변형 시험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다. C steel은 A, B steel 대비 매우 낮은 연신율을 갖는 것을 볼 수 있으며, 이는 Fig. 3에서 관찰되는 C steel의 낮은 고온 연성과 일치하는 결과이다. 추가적으로 Fig. 8에서 확인할 수 있는 흥미로운 결과는 A, B steel의 경우, Serrated flows가 관찰되었으며, 이는 고용 C 원자에 의한 동적변형시효(Dynamic strain ageing, DSA) 거동과 관련이 있다. 즉, 고온에서 C 원자의 빠른 확산 속도에 따라 전위의 이동이 방해 받게 되고 이에 따라 DSA 거동이 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 8 Engineering stress-strain curves obtained from the hot ductility tests at 500°C during the on-cooling cycle

4. 결 론

본 연구에서는 Mo, Cr, Si의 함량을 달리한 3종의 Fe-30Mn-9Al-0.9C계 경량철강의 용접열영향부 고온 연성 거동을 평가하였으며 주요 결과는 아래와 같다.

1) 1000°C 이상 고온의 경우, 모든 합금에서 동적재결정이 발생하였으며, 이로 인해 높은 고온 연성을 가지는 것으로 확인되었다.

2) On-cooling 중, 온도가 감소함에 따라 고온 연성은 점차 감소하였으며, 700-900°C에서 다량의 κ -carbide 생성에 따라 Ductility dip 거동이 확인되었다. 한편, Mo, Cr 첨가 합금에 비해 Si 첨가 합금의 경우 고온 연성의 감소가 보다 크게 발생하였으며, 이는 Mo, Cr의 경우 κ -carbide 석출을 억제하는 원소인 반면에 Si은 이를 촉진하는 경향이 있기 때문이다.

3) 온도 감소에 따라 500°C에서는 모든 합금의 고온 연성이 회복되었으며, 이는 κ -carbide 석출 감소 및 문헌에서 보고되는 Slip band-induced Plasticity 거동과 관련이 있다.

Acknowledgement

이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

ORCID: Joonoh Moon: <http://orcid.org/0000-0002-9171-1953>

References

1. H. Kim, D. W. Suh, and N. J. Kim, Fe-Al-Mn-C lightweight structural alloys: a review on the microstructures

- and mechanical properties, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 14 (2013) 1-11.
<https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/1/014205>
2. J. Moon, S. J. Park, and C. H. Lee, Current status on development of lightweight steels and welding characteristics, *J. Weld. Join.* 38 (4) (2020) 333-341.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.4.1>
3. G. Frommeyer and U. Brx, Microstructures, and Mechanical Properties of High-Strength Fe-Mn-Al-C Lightweight TRIPLEX Steels, *Steel Res. Int.* 77 (2006) 627-633.
<https://doi.org/10.1002/srin.200606440>
4. J. H. Hwang, T. T. T. Trang, O. Lee, G. Park, A. Zargaran, and N.J. Kim, Improvement of strength -ductility balance of B2-strengthened lightweight steel, *Acta Mater.* 19 (2020) 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.03.022>
5. J. Moon, H. H. Jo, S. J. Park, S. D. Kim, T. H. Lee, C. H. Lee, M. G. Lee, H. U. Hong, D. W. Suh, and D. Raabe, Ti-bearing lightweight steel with large high temperature ductility via thermally stable multi-phase microstructure, *Mater. Sci. Eng. A* 808 (2021) 140954.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140954>
6. B. Kim, S. Jeong, S. J. Park, J. Moon, and C. Lee, Roles of (Fe,Mn)₃Al precipitates and MBIP on the hot ductility behavior of Fe-30Mn-9Al-0.9C lightweight steels, *Met. Mater. Int.* 25 (2019) 1019-1026.
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00248-9>
7. B. Kim, S. Jeong, S. J. Park, J. Moon, and C. Lee, Local brittle cracking in the heat-affected zone of lightweight steels, *Mater. Char. Phys.* 238 (2019) 121904.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121904>
8. K. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, 2nd Edition, *Butterworth, Oxford*, UK (1992) 18-23.
9. J. Moon, S. J. Park, J. H. Jang, T. H. Lee, C. H. Lee, H. U. Hong, D. W. Suh, S. H. Kim, H. N. Han, and B. H. Lee, Atomistic investigations of κ -carbide precipitation in austenitic Fe-Mn-Al-C lightweight steels and the effect of Mo addition, *Scripta Mater.* 127 (2017) 97-101.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.08.036>
10. J. Moon, H. Y. Ha, S. J. Park, T. H. Lee, J. H. Jang, C. H. Lee, H. N. Han, and H. U. Hong, Effect of Mo and Cr additions on the microstructure, mechanical properties and pitting corrosion resistance of austenitic Fe-30Mn-10.5Al-1.1C lightweight steels, *J. Alloys. Compd.* 775 (2019) 1136-1146.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.253>