

플래시버트 용접과 연속열간압연법으로 제조된 철근의 기계적 성질과 미세조직에 미치는 합금원소의 영향

김기원·조승재·강정윤

大韓熔接·接合學會誌 第27卷 第3號 別冊

2009. 6

플래시버트 용접과 연속열간압연법으로 제조된 철근의 기계적 성질과 미세조직에 미치는 합금원소의 영향

김기원* · 조승재** · 강정윤***,†

*동국제강 품질관리팀(부산대학교 재료공학부)

**하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터

***부산대학교 재료공학부

Effect of Alloying Elements on Mechanical Properties and Microstructure of Steel Bar Fabricated by Endless Bar Rolling System with Flash Butt Welding

Ki-Won Kim*, Seung-Jae Cho** and Chung-Yum Kang***,†

*Quality control team of Dongkuk Steel Co.,(Pusan National University) Pohang 790-729, Korea

**National Core Research Center(NCRC) for hybrid Material Solution, Pusan 609-735, Korea

***Dept. of Material Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received October 27, 2008 ; Revised December 22, 2008 ; Accepted April 10, 2009)

Abstract

Flash butt welding is applied in many industries. New technology was developed recently for joining billets which called "EBROS (Endless Bar Rolling System)". After reheating billets in furnace, two billets were joined using flash butt welding. The objective of this study was to investigate the effect of alloying elements on mechanical properties of flash butt welded zone of hot rolled steel bar. The tensile properties on welded zone of Fe-Mn steel and Fe-Mn-V steel were dropped as compared with non-welded zone. Fe-Mn-Nb steel was opposed to the former. It was found that the white band at the welded zone had high ferrite volume fraction and large ferrite grain size. The vertical white band between flash butt welded billets was transformed into an arrowhead it of steel bar. According to this band, softening has been appeared. There was a interesting phenomenon with HAZ of Fe-Mn-Nb Steel, 40nm scale of particles were observed and hardness of HAZ was higher than non-welded zone.

Key Words : Flash butt welding, Billet, Endless bar rolling system, Reinforcing steel bar, White band

1. 서 론

플래시버트 용접은 저항용접법의 하나로, 단시간에 넓은 단면적을 가진 재료의 용접이 가능하고, 양호한 품질의 용접이음부와 용접재료의 전처리가 없거나 간단하여 자동차 산업, 열연 코일 간 연결방법, 레일의 연결방법 등으로 널리 사용되고 있다¹⁻³⁾. 최근에는 철근 제조 공정과정 중에 가열로에서 추출된 고온의 빌릿과 빌릿간을 플래시버트 용접으로 연결하고, 연속적으로 열간압연하는 철근 제조법인 EBROS(Endless Bar

Rolling System) 제조법이 1997년에 일본 NKK회사(현 JFE Corporation)에서 처음 개발되었다. EBROS 조업법은 일반적인 철근 제조법의 문제점인 중간압연 취입 전 빌릿 선단 크랍(crop) 제거 및 사상압연 직후의 후단 크랍 제거로 인한 회수율 저하가 발생되지 않으며, 또한 판매가 불가능한 규정 길이 이하의 철근 발생이 현저히 줄어들어 전체적인 생산성을 향상시킬 수 있는 획기적인 기술로 주목받고 있다^{4,5)}. 국내에서는 2004년에 이 조업기술이 처음 도입되어 실제 사용되고 있지만, 이 기술에 관련된 연구는 거의 전무한 실정이다. 현재 EBROS 조업법으로 항복강도 300MPa 철근

(Fe-0.27C-0.67Mn 강)이 제조되고 있지만, 부위에 따라 강도가 저하하는 문제점이 있다. 이 이유로서는 플래시버트 용접부의 강도 저하가 그 원인인 것으로 예상되지만, 아직 상세히 규명된 바는 없다.

0.35%C-0.30%Si-1.0Mn 강에서 Nb를 0.03%를 첨가하더라도 항복강도가 150MPa 증가하고, 등가인 V를 첨가하면, 항복강도가 약 50MPa 증가하는 것으로 알려져 있다¹²⁾. 따라서 문제가 되는 빌릿 용접부의 강도를 향상시키는 방법으로는 V, Nb, 등의 합금원소를 미량 첨가에 의해 가능할 것으로 예상된다.

그래서 본 연구는 플래시버트 용접과 EBROS에 의해 철근을 제조하는 새로운 공정에 대해 적용 가능하고, 품질이 우수하며, 재료비가 저렴한 강재를 개발하는 것을 목적으로 하였다. 현재 항복강도 300MPa급 철근용 빌릿으로 사용되는 Fe-0.27C-0.67Mn에 V과 Nb를 약 0.05% 미량 첨가시킨 빌릿을 EBROS법으로 철근을 제조한 경우, 특히 철근 내에 플래시버트 용접부의 인장성질 및 미세조직에 미치는 합금원소 첨가의 영향을 검토한 것을 보고한다.

2. 실험재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 빌릿의 화학조성을 Table 1에 나타낸다. 본 연구에서는 350MPa급 철근용 빌릿 소재인 Fe-0.27C-0.67Mn 강(이하 Fe-Mn강으로 표기)을 기본조성으로 하고, 여기에 V를 0.05%첨가한 Fe-Mn-V강과 Nb를 0.05%첨가한 Fe-Mn-Nb강을 사용하였다.

빌릿은 아크 전기로에서 제강하고, 길이 10m 가로 세로 150mm 단면의 빌릿으로 주조되었다. 철근 제조 공정은 다음과 같다. 길이 10m 빌릿 2개를 1050°C에

서 2시간 유지하여 용체화처리한 후, 추출하고, Fig. 1과 같이 용접전압 8.7V, 용접전류 70KA 조건에서 플래시버트 용접시킨 후, 1000°C에서 압연을 시작하여 880°C에서 마무리 압연하여 Fig. 1의 (b)와 같이 직경 32mm, 길이 480m의 철근을 제조하였다.

제조된 480m 철근의 위치에 따라, 특히 압연후의 용접부 인장성질을 평가하기 위하여, Fig. 1의 (b)와 같이 중앙을 기준으로 좌우 대칭으로 50cm씩 10개의 인장시험편을 채취하였고, 중앙부 좌측으로 5, 4, 3, 2, 1 순으로, 우측으로 6, 7, 8, 9, 10 순으로 번호를 붙였다. 인장시험은 KS B 0801 기준으로 행하였다.

미세조직은 인장시험편을 단면으로 절단하고, 연마한 후, 3%나이트 부식액을 이용하여 광학현미경으로 관찰하였다. 페라이트 결정립 크기와 체적률은 영상분석기(image analyzer)로 측정하였다. 경도분포는 마이크로 비커스 경도기로 측정하였으며, 측정하중은 1kg으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 첨가원소에 따른 철근 용접이음부의 강도 변화

Fig. 2, Fig. 3 및 Fig.4는 각각 Fe-Mn강, Fe-Mn-V강 및 Fe-Mn-Nb강을 EBROS으로 철근(직경 32mm, 길이 480m)을 제조한 경우, 철근에서 인장시험편이 채취된 위치와 강도와와의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서 횡축의 인장시험편 번호는 중앙부의 좌측으로 5, 4, 3, 2, 1, 우측으로 6, 7, 8, 9, 10 순으로 하였다. 따라서 4번, 5번 6번은 대략 플래시버트 용접이음부(용융부 및 열영향부)에 대응되는 것으로 생각되

Table 1 Chemical composition(wt%) of steels used

	C	Si	Mn	P	S	Cu	V	Nb	N	H
Fe-Mn	0.275	0.12	0.67	0.020	0.023	0.19	0.002	0.001	75ppm	2.8ppm
Fe-Mn-V	0.279	0.12	0.68	0.020	0.017	0.14	0.047	0.001	72ppm	2.1ppm
Fe-Mn-Nb	0.270	0.12	0.70	0.021	0.028	0.17	0.001	0.055	74ppm	1.1ppm

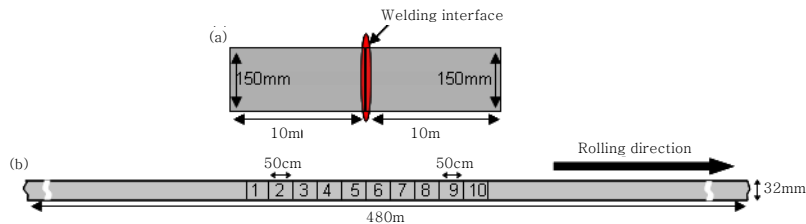


Fig. 1 Test specimen extraction from steel bar (a) Joining two billet (b) Specimen numbering from steel bar

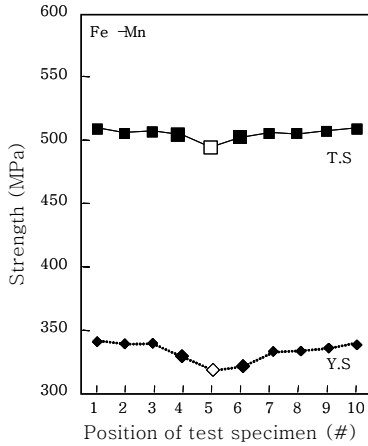


Fig. 2 Tensile strength and yield strength with position of test specimens in Fe-Mn steels

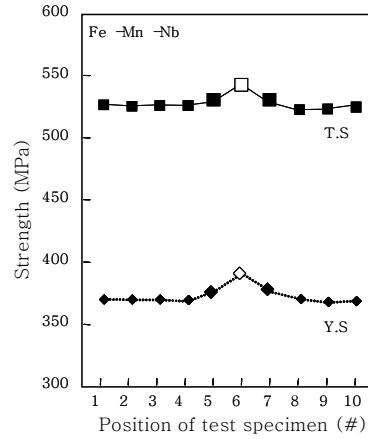


Fig. 4 Tensile strength and yield strength with position of test specimens in Fe-Mn-Nb steels

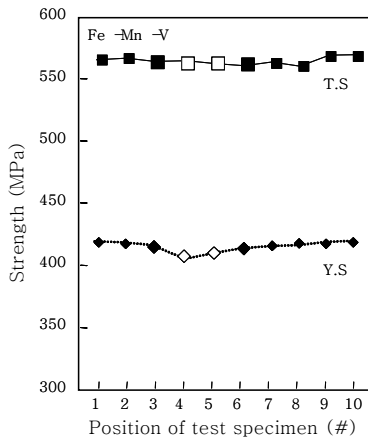


Fig. 3 Tensile strength and yield strength with position of test specimens in Fe-Mn-V steels

며, 3강종 모두 용접부에 해당하는 시험편에서 특히 항복강도가 아주 저하하거나, 상승하는 현상을 보이고 있다.

Fig. 2의 Fe-Mn강에서는 플래시버트 용접부에 해당하는 것으로 여겨지는 4,5,6번 시험편의 항복강도가 낮은 것을 볼 수 있으며, 인장강도도 약간 낮다. 5번 시험편의 항복강도(317MPa)는 1번 시험편(343MPa)과 비교하여 약 26MPa 낮고, 5번 시험편의 인장강도(495MPa)는 1번 시험편(512MPa)과 비교하여 17MPa 낮다. 용접부의 항복강도가 인장강도보다 크게 감소함을 알 수 있다.

Fe-Mn강에 약 0.05wt% V를 첨가한 Fe-Mn-V강(Fig. 3)의 인장성질을 Fe-Mn강(Fig. 2)과 비교하여 보면, Fe-Mn-V강의 항복강도 및 인장강도가 Fe-Mn강보다 각각 약 80MPa 및 약 50MPa이 높다. 또한 용접부라고 여겨지는 시험편(3, 4, 5, 6 번)의 항복강

도가 낮아지는 현상이 관찰되지만, Fe-Mn강에 비하여 감소폭이 13MPa로 적으며, 인장강도는 5MPa 차이 밖에 나지 않는다.

한편 Nb를 약 0.05wt% 첨가한 Fe-Mn-Nb강의 결과인 Fig. 4에서 용접부라고 예상되는 5, 6, 7번 시험편에서 오히려 항복강도와 더불어 인장강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 강도가 최고 높은 6번 시험편의 강도(Y.S.: 397MPa, T.S. 550MPa)와 열간압연 이력만 받은 1번 시험편의 강도(Y.S.: 371MPa, T.S.: 529MPa)와 비교하면, 6번 시험편의 항복강도가 26MPa이 높고, 인장강도가 21MPa이 높다.

이상의 결과로부터, 열간압연 이력만을 받은 철근들의 강도는 Fe-Mn-V강, Fe-Mn-Nb강, Fe-Mn강 순으로 높은 것을 알 수 있다. 또한 V를 첨가하면 플래시버트 용접 열이력에 생기는 강도 감소현상을 개선할 수 있으며, Nb를 첨가할 경우 오히려 용접부의 강도가 더 높아진다는 것을 알 수 있다.

3.2 철근의 강도와 거시조직과의 상관관계

항복강도가 감소한 Fe-Mn강 5번과 Fe-Mn-V강 4, 5번 시험편과 항복강도가 증가한 Fe-Mn-Nb강 6번 시험편의 특징을 파악하기 위하여, 인장시험한 시험편을 직경방향으로 절단하고, 단면 마크로조직을 비교하여 보았다. 그 결과를 Fig. 5에 나타낸다.

이들 시험편은 모두 압연방향으로 연신된 화살촉 모양의 백색 밴드가 존재하는 것을 알 수 있다. Fe-Mn-V강의 경우 백색 밴드가 4번과 5번 시험편에 걸쳐서 나타났다. Fe-Mn강과 Fe-Mn-Nb강의 경우는 시험편 1개에 백색 밴드가 존재하였다. 백색 밴드의 전체 길이는 35~40cm이며, 나머지 위치의 시험편에서는

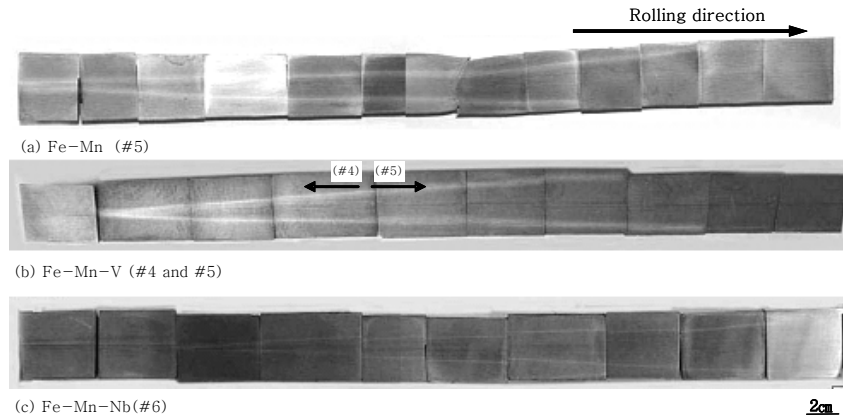


Fig. 5 Cross section of tensile test specimen with the fusion zone (white band)

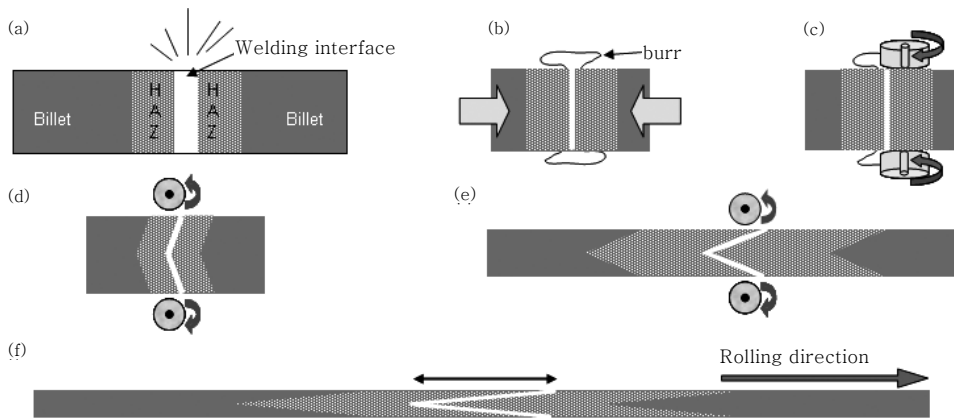


Fig. 6 Schematic diagram for the change of the welded zone shape by EBROS process (a) flashing (b) upsetting (c) deburring (d) roughing milling (e) middle milling (f) Steel bar after finishing milling

발견되지 않았다.

이러한 화살촉 모양의 백색 밴드가 발생하는 이유를 고찰하면 다음과 같다. Fig. 6은 철근 제조 중에 빌릿의 플래시버트 용접 부위가 각 공정에서 변화되는 모식도를 나타낸 것이다. 플래시버트 용접 초기에는 (a)와 같이 형성되고, 플래시가 끝나고 동시에 가압되는 업셋 공정에 의해 액상은 (b)와 같이 외부로 배출되고, 고상만 남게 되어, 좁은 백색밴드가 형성된다. 일반적으로, 플래시버트 용접 공정에서 용융부는 탈탄이 발생하여, 주변 조직보다 탄소량이 적기 때문에 백색으로 보이는 백색 밴드를 형성되고, 강도도 저하하는 것으로 보고되고 있다¹⁻³⁾. (c)와 같이 버(burr)를 제거한 후, 백색 밴드는 조압연(d), 중간압연(e), 마무리압연(f)과정을 거치는 동안에, 백색밴드와 HAZ는 점점 화살촉 모양으로 길게 늘어날 것이다. 이것은 롤에 직접적으로 가압되는 빌릿 표면은 메탈플로우(metal flow) 속도가 빠르지만, 빌릿의 중심부는 롤과 직접적으로 닿지 않아 상대적으로 느리기 때문에 압연공정에서 화살촉 모양의

로 변화한다⁷⁾. HAZ는 고상 상태이므로 업셋공정에 의한 두께 변화가 적어, 굵은 화살촉 모양으로 변화하는 것으로 생각된다.

따라서 플래시버트 용접으로 형성된 백색 밴드(WB)는 탈탄에 의해 강도가 감소할 것이 분명하지만, HAZ는 거시조직으로는 예측하기가 힘들다.

3.3 철근의 강도와 미세조직과의 상관관계

Fig. 7은 Fe-Mn강, Fig. 8은 Fe-Mn-V강 및 Fig. 9는 Fe-Mn-Nb강의 인장시험편 단면의 대표적인 미세조직을 나타낸 것이다. 각 사진에서 (a)는 플래시버트 용접의 열 영향을 전혀 받지 않은 1번 인장시험편, (c-1)과 (c-2)는 각각 항복강도가 가장 낮은 인장시험편의 HAZ 2와 백색 밴드 영역, (b)는 (c)의 시험편 바로 옆에서 채취한 인장시험편(Fe-Mn강 : 6번, Fe-Mn-V강 : 6번, Fe-Mn-Nb강 : 7번)의 미세조직(HAZ 1)이다. 모든 강종에서 공통적으로 열영향을 받지 않은 영역(이하 NWZ)의 미세조직(a)을 기준으로 다른 영역

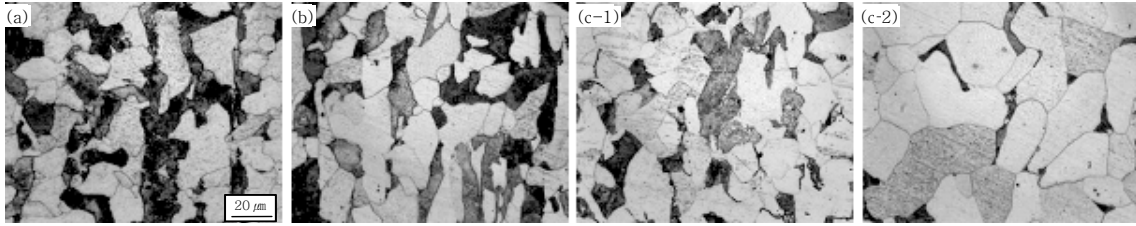


Fig. 7 Microstructures of Fe-Mn steel (a) Non welded zone(#1) (b) HAZ 1(#6) (c-1) HAZ 2(#5) (c-2) White band (#5)

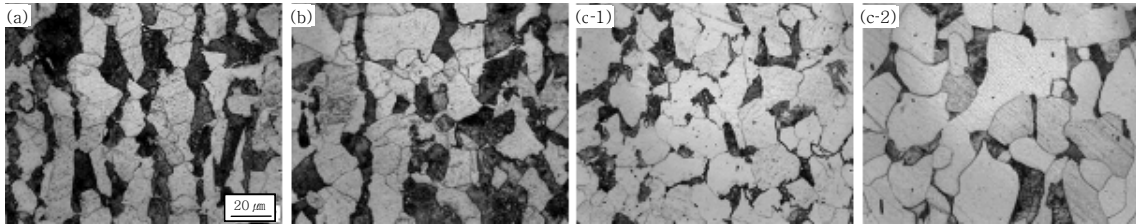


Fig. 8 Microstructures of Fe-Mn-V steel (a) Non welded zone(#1) (b) HAZ 1(#6) (c-1) HAZ 2(#4) (c-2) White band (#4)

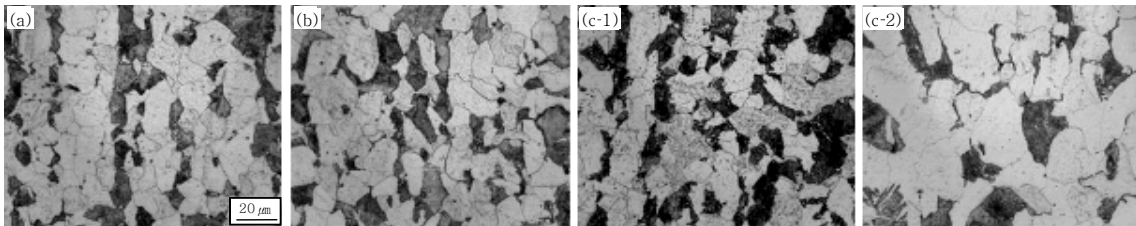


Fig. 9 Microstructures of Fe-Mn-Nb steel (a) Non welded zone(#1) (b) HAZ 1(#7) (c-1) HAZ 2(#6) (c-2) White band (#6)

의 것과 비교하면, 백색 밴드(c-2)는 페라이트 결정립의 크기가 조대하고, 체적률도 높아 다른 영역과 확연히 구별되지만, HAZ 1(b)은 NWZ의 것과 거의 유사하고, HAZ 2(c-1)는 HAZ 1과 달리 상들의 배열이 압연방향에 따라 배열되어 있지 않고, 다소 랜덤하게 분포하고 있는 것이 차이점이다.

인장강도와 미세조직의 상관관계를 파악하기 위하여, 각 영역의 미세조직에 대하여 보다 정량적으로 평가하여 보았다. Table 2은 3강종의 각 영온도역의 페라이트 결정립 크기와 체적률과 더불어 각 영역의 평균 경도값, 항복강도 및 인장강도를 비교한 것이다.

Fig. 7~Fig. 9에서 HAZ1과 HAZ2의 상 배열이 다르고, 페라이트의 크기 및 체적률이 다른 것은 Fig. 10과 같이 HAZ2가 용점근처 온도로 가열된 영역이며, HAZ1이 압연온도 1050℃보다 약간 높은 온도로 가열된 것이기 때문이다. 이와 같이 인장시험편에 따라서 미세조직 구성이 다르기 때문에 경도 및 강도도 다른 것으로 사료된다.

Fe-Mn강의 5번 시험편은 페라이트의 크기가 크고,

체적률도 높아 경도가 아주 낮은 백색 밴드(WB)와 HAZ 2로 구성되어 있기 때문에 강도가 낮은 것으로 생각된다. 5번 시험편 옆에 위치하는 4번 시험편과 6번 시험편은 NWZ와 비교하여 페라이트 크기가 약간 크고, 체적률도 약간 높은 HAZ1 혹은 HAZ+NWZ를

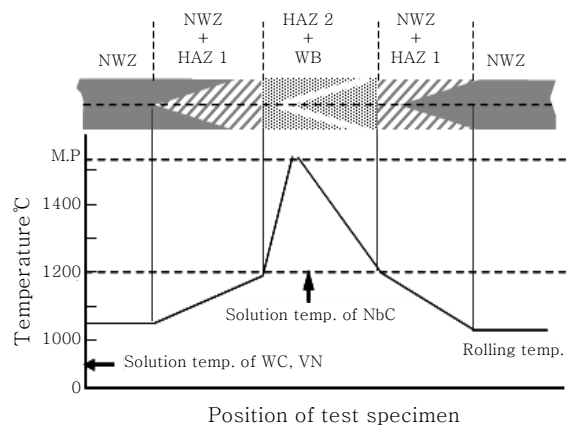


Fig 10 Schematic for temperature distribution near weld after flash butt welding

찾기 때문에 순수 NWZ만을 같은 시험편(#1)보다 강도가 낮은 것으로 생각된다.

Fe-Mn-V강의 경우, Fig. 5의 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 4번과 5번 시험편 모두 백색 밴드(WB)+HAZ 2를 갖는다. 백색 밴드의 길이가 35~40cm임을 감안한다면, 4번과 5번 시험편은 모두 백색 밴드(WB)+HAZ 2+HAZ1으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 4번과 5번 시험편의 강도가 가장 낮으며, HAZ 1과 NWZ가 공존하는 3번 위치와 6번 시험편도 HAZ1 존재 때문에 강도가 다소 감소하는 것으로 여겨진다.

Fe-Mn-V강이 Fe-Mn강보다 항복강도와 인장강도가 높은 것은 Fig. 11과 같이 V(C,N)의 석출 강화 때문인 것으로 생각된다. Fig. 11은 HAZ 2 영역의 TEM 사진(a)과 석출물을 EDX로 분석한 결과(b)를 나타낸 것이다. V 석출물은 구형의 60nm 크기이며, 주로 퍼얼라이트의 말단부에서 주로 관찰되었다. 또한 플래시버트 용접부에서 강도 감소가 낮아지는 원인은

다음과 같이 생각된다. VN의 고용온도는 약 990°C 전후, VC의 고용온도는 약 860°C이고^{8,11,13,14}, 압연이 1050°C로 가열된 빌릿을 1000°C에서 시작하여, 880°C에서 마무리압연이 실시되므로, 압연 공정 중에 용융부인 WZ와 HAZ2에서도 오스테나이트 구역에서 VN 혹은 VC가 석출되어 페라이트의 미세화 효과와 더불어, 석출강화 효과 때문인 것으로 생각된다.

Fe-Mn-Nb강의 경우, Table 2에 나타낸 것처럼 WB에서 경도 감소가 나타나지만, HAZ 2와 HAZ 1의 경도는 NWZ보다 오히려 높다. 이러한 현상은 Fe-Mn강과 Fe-Mn-V강과 다르다.

0.35%C-0.30%Si-1.0Mn강에 0.03%의 Nb와 V를 각각 첨가한 경우, Nb를 첨가한 강의 항복강도는 약 150MPa 증가하고, V를 첨가한 강은 약 50MPa 증가하는 것으로 알려져 있다¹²). 따라서 V를 첨가한 강보다도 항복강도가 높아야 함에도 불구하고 낮다. 이것은 Fe-Mn-Nb강의 NbC 및 NbN의 고용온도가 약 1100°C 및 1200°C이고⁸⁻¹⁵), 이 조업에서 용체화처리

Table 2 Relationship among grain size, ferrite volume fraction, hardness and yield strength

	Fe-Mn				Fe-Mn-V				Fe-Mn-Nb			
	# 1	#6	#5		# 1	#6	#4		# 1	#7	#6	
	NWZ	HAZ 1	HAZ 2	WB	NWZ	HAZ 1	HAZ 2	WB	NWZ	HAZ 1	HAZ 2	WB
Grain size (μm)	10.4	10.7	10.8	18.8	8.7	9.8	10.1	14.2	10.1	9.8	8.9	15.5
ΔGS (Gs _x -V _{NWZ})		+0.3	+0.4	+8.4		+1.1	+1.4	+5.5		-0.3	-1.2	+5.4
Volume fraction (%)	67.3	71.3	69.0	93.2	65.4	68.4	72.5	89.8	66.8	69.0	68.3	82.7
ΔVf (V _x -V _{NWZ})		+4.0	+1.7	+17.0		+3.0	+7.1	+24.4		+2.2	+1.5	+15.9
Hardness (Hv)	190.1	185.8	184.7	169.7	228.4	218.5	202.6	173.6	197.9	218.1	222.1	189.1
ΔHv (Hv _x -V _{NWZ})		-4.3	-5.4	-20.4		-9.9	-25.8	-55.2		+20.2	+23.2	-8.8
Y.S.(MPa)	343	323	317		419	414	406		371	379	397	
ΔY.S.(MPa)		-20	-26			-5	-13			+8	+26	
T.S.(MPa)	512	503	495		565	562	560		529	533	550	
ΔT.S.(MPa)		-15	-17			-3	-5			+4	+21	

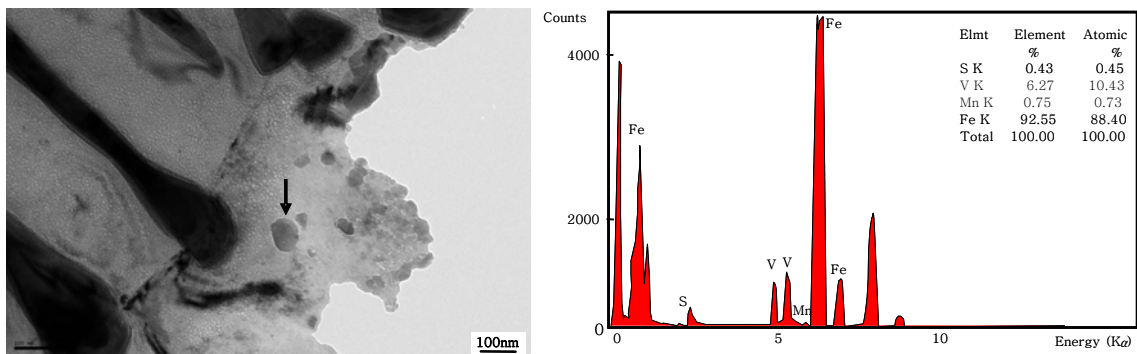


Fig. 11 TEM structure and result of EDS analysis for VX(X: C, N) precipitates at HAZ 2 area in Fe-Mn-V steel

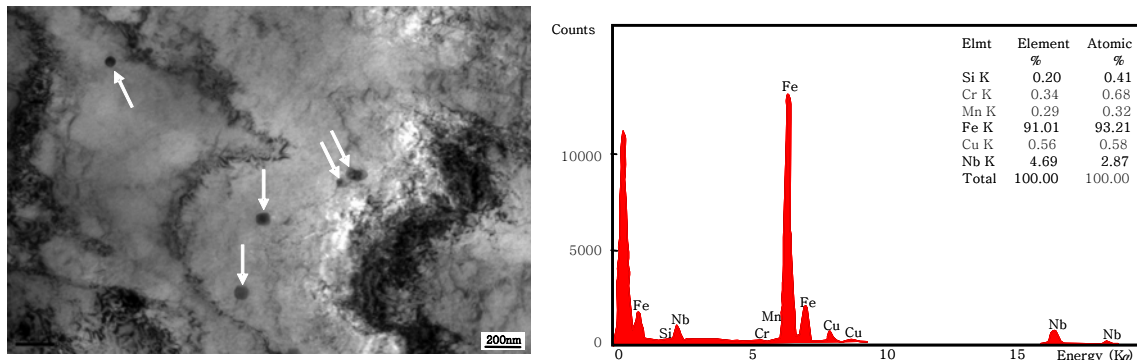


Fig. 12 TEM structure and result of EDS analysis for NbX(X: C, N) precipitates at HAZ 2 area in Fe-Mn-Nb steel

온도가 1050°C이므로, Nb 석출물들이 빌릿에서 조대한 크기로 석출된 상태에서 압연되기 때문에, NWZ와 HAZ1은 압연공정에서 Nb 첨가 효과가 거의 없거나 혹은 적어지기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 플래시버트용접 열이력에 의해 형성된 WB와 HAZ2는 Nb석출물 고온온도 이상으로 가열되므로, 압연공정 중에 미세한 NbC, NbN 및 Nb(C,N)가 석출 된다. 따라서 백색 밴드는 탈탄에 의해 석출효과가 적어, 경도 및 강도가 다소 낮지만, HAZ2는 Nb 첨가에 따른 페라이트의 미세화 효과와 석출물 효과가 생기므로, 오히려 NWZ보다 강도가 높을 것으로 생각된다.

Fig. 12는 Fe-Mn-Nb강의 HAZ 2 영역의 TEM 사진(a)과 석출물을 EDX로 분석한 결과(b)를 나타낸 것이다. HAZ2에서 40nm 크기의 사각 형상인 미세한 Nb계 석출물들이 존재하는 것을 알 수 있다. 한편 백색 밴드와 HAZ2로 구성된 시험편 6은 백색 밴드가 차지하는 면적이 적고, Nb 석출물에 의해 강도가 높은 HAZ2로 구성되어 있어, 오히려 NWZ보다 강도가 높은 것으로 생각된다. 시험편 5번과 7번은 HAZ1과 HAZ2로 구성되어 있으므로, HAZ2는 Nb 첨가 효과가 큰 부분이고, HAZ1은 Nb 첨가 효과가 다소 나타나는 영역으로 생각되므로, 시험편 5번과 7번은 NWZ보다 강도가 다소 높다고 여겨진다.

일반적으로 Nb를 첨가한 강은 용체화 온도를 1200°C 이상으로 가열하여 사용하고 있다. 철근은 자동차 강판, 조선용 후판 및 형강과 같은 고급 강재와 달리 저가인 제품이므로, 1200°C 이상에서 조업하면 제조단가가 급등하게 된다. 따라서 V과 Nb가 첨가된 강은 일반적인 항복강도 300MPa급 Fe-Mn강의 용체화처리 온도인 1050°C에서 조업이 가능하여야 한다는 것이 필수조건이다.

이상의 결과로부터 가격 때문에, Fe-Mn-Nb강을 용

체화처리 온도보다 낮은 1050°C에서 조업하더라도, 목표로 하는 항복강도가 350MPa 이상을 만족하며, 용접이음부에서 강도 감소현상이 없는 것을 확인하였다. 또한 EBROS 조업으로 철근을 제조할 경우, Nb 합금철의 국제가격이 V 합금철 국제가격 대비 1/8 수준에 불과하므로, 원가 측면에서 Fe-Mn-Nb강이 Fe-Mn-V강보다 더 유리함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 EBROS 조업으로 제조된 350MPa급 철근 및 플래시버트 용접이음부의 인장성질 및 미세조직에 미치는 V과 Nb 첨가의 영향을 체계적으로 검토해 보았고, 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) EBROS 조업으로 철근을 제조할 경우, 용접 열 영향을 받지 않은 철근의 항복강도와 인장강도는 Fe-Mn강, Fe-Mn-Nb강, Fe-Mn-V강 순으로 높았다. 용접부에 해당하는 철근의 경우, Fe-Mn강과 Fe-Mn-V강은 항복강도 및 인장강도가 감소하였지만, V이 첨가된 강은 강도의 감소폭이 적어졌다. 한편 Fe-Mn-Nb강의 용접부는 강도가 오히려 증가하였다. Nb 합금철의 가격이 V 합금철의 1/8로 저렴하고, 항복강도가 350MPa 이상이며, 용접부의 강도 저하 현상이 없다는 점에서 Fe-Mn-Nb 강이 EBROS 조업에 적합한 강임을 알 수 있었다.

2) 모든 플래시버트 용접부에는 빌릿의 플래시버트 용접시 탈탄으로 접합면에 형성된 얇은 층이 압연과정에서 화살촉 모양으로 변형된 백색 밴드가 존재하였다. 백색 밴드는 페라이트의 결정립이 조대하고, 페라이트 체적률도 높아 강도가 감소하는 요인이 되었다.

3) Fe-Mn강과 Fe-Mn-V강에서는 페라이트 체적률이 높고, 결정립 크기가 큰 백색밴드와 HAZ2(고온 HAZ)가 존재하는 시험편은 강도가 가장 낮았다. V의

첨가로 압연후 냉각 중에 V계 석출물의 석출에 의해 강도가 보상되어 감소폭이 저하하였다. 반면에 Fe-Mn-Nb강은 Nb석출물의 고용온도가 1200℃ 이상으로 높아 용융부 및 그 근처의 HAZ2 영역, 일부 HAZ1에서만 충분한 고용이 가능하여 Nb 석출물 효과가 일어나고, 1200℃ 이하로 주로 가열된 HAZ1 영역은 Nb의 첨가 효과가 적어지기 때문에 오히려 용융부와 HAZ2를 갖는 부위에서 항복강도 및 인장강도가 가장 높은 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-02004-0)과 동국제강 지원으로 수행되었음. 이에 감사드립니다.

참 고 논 문

1. K.Ando, S. Nakata and T. Sugimoto : study on the Flash Welding Phenomena of Steel(2ndReport)-Observation by High Speed Motion Pictures-, Journal of JWS, **40-1** (1971), 35-53 (in Japanese)
2. K.Ando, S. Nakata and T. Sugimoto : study on the Flash Welding Phenomena of Steel(3rdReport)-On the Upsetting Process-, Journal of JWS, **40-2** (1971), 137-151 (in Japanese)
3. Boyoung Jeong, In-Su Woo, Jeong-kil Kim and Jong-Bong Lee : Mechanical properties of the Flash Butt Welded joint of 590MPa high Strength Steel, Journal of KWJS, **25-2** (2007), 55-61 (in Korean)
4. NKK corporation : Endless Bar Rolling System, 1996, Japan Society of Mechanical Engineers
5. AUSTEN Terry H : EBROS , Endless bar rolling system, Association of Iron and Steel Engineers, **80** (2003), 41-46
6. Boyoung Jeong, In-Su Woo and Jong-Bong Lee: Effect of welding parameters on the properties of flash butt welded joints of high strength steel of 590MPa grade, Journal of KWJS, Spring, 2006, 118-120 (in Korean)
7. H.Dyja, P.Szota, S.Mroz : 3D FEM modeling and its experimental verification of the rolling of reinforcement rod, journal of materials processing thechnology, **153-154** (2004), 115-121
8. Jai-Hyun Park and In-Bae Kim : A study of Mechanical Properties with Variation of Heattreatments on HLSA Cast Steels Microalloyed With Nb, Ti, and V, Journal of Materials Reserch, **10-11** (2000), 760-769 (in Korean)
9. Seung Chan Hong, Seong Ryoung Kang nad Kyung Sun Lee : Influnce of finishing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of as-hot-rolled Dual phase Steels, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater, **39-1** (2001), 17-26
10. J. Heslop and N. J. Petch : Phill. Magzine, 2 (1957), 649
11. Tae Young Kim, Byoung Moon oh and Yeon Chul Yoo : High Temperature Deformation Behavior of Vanadium-Microalloyed Steel, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater, **29-9** (1991), 967-975
12. CBMM Asia Co.,Ltd : Niobium, 2005, 96
13. W.G. Leslie : The Physical Metallurgy of steels, Mc-Graw-Hill, 1981, 135
14. J.Rassizadehghani : Ph. D. Theis, University of Kansas, 1990, 46
15. Inane Park, Namhyun Kang, Suyoung Kim, Young jung Lee, and Kyoung mox Cho : Microstructure and Mechanical properties of Control Rolled Fe-0.1C-(V,Nb) Steels, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater, **45-5** (2007), 321-328
16. G. Krauss : Fine Structure of Austenite produced by the Reverse Martensitic Transformation. Acta Met, **11** (1963), 499-509
17. J.Y.Park, J.K.Park, W.Y.Choo and S.W.Lee : Effect of the pricipitation of Mangeses Sulfide and Vanadium Carbonitrides on the Intraganular Ferrite, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater, **36-11** (1998), 2003-2011
18. Young Min Kim, Sang Young Shin, Hakcheol Lee, Byoungchul Hwang, Byung Gyu Park, Sunghak Lee and Nack J.Kim : Effect of Mo and V on Tensile and Charpy Impact Properties of API X70 Linepipe Steels, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater, **44-4** (2006) 2003-2011, J. Kor. Inst. Met. & Mater, **44-4** (2006)