

고탄소계 Cr-Ti 합금강 레일재의 용접성에 관한 기초연구 -용접용 SH-CCT도와 Enclosed-Arc 용접시공조건-

강 계 명* · 송 진 태*

A Basic Research for the Weldability of the High Carbon Cr-Ti Alloy Rail Steel -The Relation between SH-CCT Diagram for Welding and Enclosed-Arc Welding Condition-

K.M. Kang*, J.T. Song*

Key Words : SH-CCT Diagram(SH-CCT선도), HAZ(용접열영향부), Weldability(용접성), Enclosed-Arc Welding(엔크로즈아크용접), Heat Input(용접입열량), Welding Condition(용접시공조건)

Abstract

A pilot production is made to the high carbon Cr-Ti alloy rail steels with slight quantity of Cr & Ti added to the eutectoid carbon steel. As a part of weldability of these alloy steels, SH-CCT diagram for welding is first applied to the high carbon Cr-Ti alloy rail steel with 0.1wt% Ti. The microstructure, which will be appeared at the HAZ of Enclosed-arc welding of this alloy rail steel, is a single phase of pearlite. As a result of this, it shows that the welding condition of Enclosed-arc welding applied to this alloy rail steel is a good condition.

I. 서 론

강재의 CCT도는 열처리용과 용접용으로 크게 분류할 수 있다. 이중 용접용 SH-CCT도 (continuous cooling transformation diagram of synthetic heat affected zone)는 용접열영향부를 야금학적

으로 조사하기 위하여 작성되며 용접성의 판정 및 용접시공조건의 설정등에 중요한 자료^{1,2)}로 이용되어 그 응용범위가 상당히 넓다. 즉 용접성은 모재의 조직과 기계적성질 및 bond부와 용접열영향부의 조직과 기계적성질의 관계로 이를 평가하고 있다. 그러나 이들 관계를 조사하기 위하여서는 실제 용접을 하여야 함으로 많은 어려움이 있다.

* 정회원, 한양대학교 공과대학 재료공학과

이에 용접용SH-CCT도는 용접부에서 나타날 조직변화를 확연히 알 수 있게 하고, 이는 재료의 용접성연구에 기초적 자료로 이용됨으로 이에 관한 많은 연구가 행하여 지고 있다. 특히 Inagaki 등³⁻⁶⁾은 용접열영향부의 조직변태거동에 미치는 첨가원소의 영향 및 용접부중 가장 취약구역인 bond부 부근의 미세조직변화를 용접용SH-CCT도로서 설명한 다수의 연구논문을 발표하고 있다. 한편 고탄소강은 탄소당량이 높아 용접부의 열화로 그의 용접을 극력 피하고 있다. 그러나 고속전철용 레일과 같은 특수한 경우에는 용접⁷⁾을 행하여야 한다.

본 연구에서는 고속전철용 강재로 적합하다고 판단된 고탄소계Cr-Ti합금강레일재^{8,9)}의 용접성연구의 기초자료로서, 시료강에 적용시킬 기존의 enclosed-arc용접의 용접시공조건의 적합성을 조사할 목적으로 시료강의 용접용SH-CCT도를 작성하여 용접부에 나타날 조직변태거동을 조사, 검토하였고, 이들 용접조건을 시료강에 적용시켜 시료강의 용접부의 조직구성과 비교·검토하여 보았다.

2. 실험방법

2.1. 시료강의 제작

용량 30kg의 진공고주파유도로(VIM)를 사용하여 4×10^{-4} torr의 진공에서 고탄소계Cr-Ti합금강 주괴를 제작하였다. 용해는 전해철과 탄소분말, Fe-Si, 고순도의 Mn과 Cr을 노에 장입하여 용해하였다. 용락 10분후, 탈산제인 RCa-Si를 첨가하여 탈산시켰으며, 탈산 5분후 노중분위기를 진공 상태에서 Ar가스분위기로 변환시키면서 고순도 sponge Ti을 첨가하였다. 완전용해된 상태로 확인되는 1550°C에서 미리 압탕을 세워 예열시켜둔 인조규사주형에 출탕하여 주입하였다. 그후 Fig. 1과 같은 열간압연공정과 열처리과정^{10,11)}을 거쳐서 Ti성분이 각기 다른 3종의 고탄소Cr-Ti합금강 시료를 준비하였다. 이같이 제작된 시료강의 조성은 Table 1과 같다.

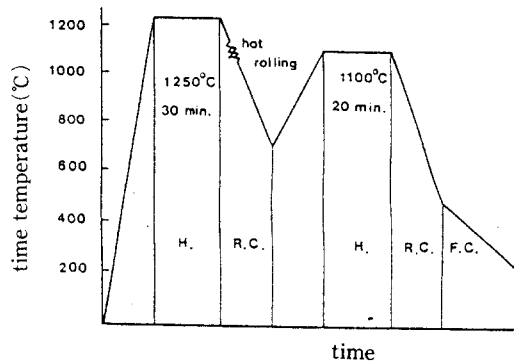


Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment of high carbon Cr-Ti alloy rail steel(H: heating, R. C.: rapid cooling, F.C.: furnace cooling)

Table 1 Chemical compositions of high carbon Cr-Ti alloy steels(wt%)

High C-Cr-Ti alloy steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
A	0.75	0.34	1.20	0.018	0.013	0.78	0.05
B	0.76	0.29	1.34	0.005	0.009	0.75	0.10
C	0.74	0.29	1.32	0.002	0.009	0.77	0.16

2.2. 용접용 SH-CCT도 작성

고탄소계Cr-Ti합금강시료의 용접용SH-CCT도는 Fig. 2에서 나타낸 바와같이 내경 2mm, 외경 3mm, 길이 10mm의 변태점측정용 시험편을 만들어 고주파가열식 자동변태점측정장치(F-Formaster Fuji Co.)를 사용하여 냉각속도를 Table 2와 같이 8조건으로 다르게 하여 각 시험편의 열팽창과 수축의 변화로부터 변태온도개시 및 종료온도를 구하였다. 이때 시험편의 최고가열온도는 용접시 bond부의 조립역에 상당하는 1350°C로 하였으며, 최고가열온도 도달직후 냉각시켰고 실험분위기는 질소가스분위기이었다. 그리고 냉각속도를 용접입열량으로 환산하는 아래와 같은 관계식¹²⁾을 이용하여 각 시험편의 냉각속도를 용접입열량으로 환산하여 Table 3에 나타내었고, 실험에 사용된 각 시험편의 조직변화에 따른 경도측정을 위하여 micro-vickers경도계(300g)를 사용하여 미소경도를 구하였다.

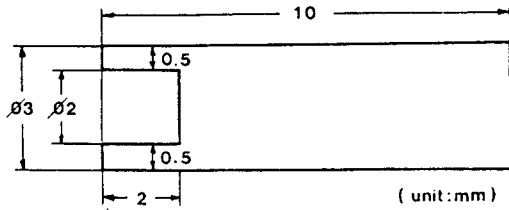


Fig. 2 Schematic diagram of specimen for SH-CCT diagram

Table 2 Cooling rate of various specimen for SH-CCT diagram

Number	1	2	3	4	5	6	7	8
Cooling rate (°C/min.)	400	200	80	70	50	40	30	10

Table 3 The relation between cooling time and heat input

Number	Cooling time(sec) (800°C-500°C)	Heat input (kJ/cm)
1	45	142.914
2	90	223.387
3	225	416.649
4	257	455.887
5	360	573.779
6	450	666.639
7	600	806.130
8	1800	1672.784
High C-Cr-Ti		577.5

$$H = \frac{60 \times E \times I}{V}$$

H : Heat input (J/cm)
E : Volts
I : Amperes
V : cm/min.

$$S = \frac{1.35 \times H^{1.5}}{\beta (600 - T)^2 \{1 + (2/\pi) \arctan[t - 14.6 / 6]\}}$$

S : Cooling time of 800°C-500°C
β : Constant (here : 1)
T : Preheating temperature (°C)
t : Plate thickness (mm)

2.3. Enclosed-Arc 용접

레일재의 용접방법으로서는 flash-butt용접, thermit용접 enclosed-arc용접, gas-pressure용접 등 특수한 용접법¹³⁾을 필요로 한다. 특히 최근 일본의 고오베제강소(KOBE Steel LTD)에 의하여 연구개발된 enclosed-arc용접¹⁴⁾은 용접시간의 단축, 용접에 의한 재료의 손실이 없는 하향자세용접이어서 일본의 SINKANSEN과 우리나라의 철도용접에 시행되고 있다. 본 연구에서도 용접은 신뢰성이 있고 실험실적으로 simulation이 가능한 enclosed-arc용접법을 택하였다. Fig. 3는 enclosed-arc 용접시 사용된 장치를 나타내어 준다. 즉 압연방향에 수직방향으로 절단한 시료강의 절단편 2개를 I형 개선으로 개선간 거리를 15mm로 하여 용접부위를 구리의 블록으로 둘러싸 용접봉을 사용하여 연속적으로 용접하였으며, 이때의 용접시공조건은 Table 4와 같다. 용접봉은 사용전에 400°C에서 1시간동안 건조시켜 불순물과 수소량을 저하시켰다.

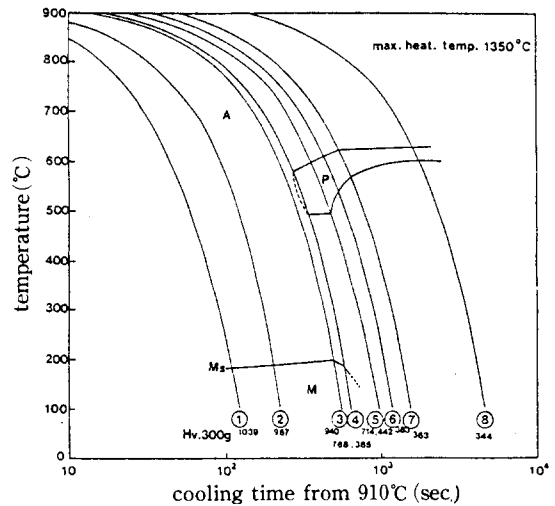


Fig. 3 SH-CCT diagram for welding of high carbon Cr-Ti alloy steel

Table 4 Welding condition for enclosed-arc welding

Heat input (kJ/cm)	Preheating (°C)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min.)	Postheating (°C)	Wire dia. (mm)
577.5	400	220	35	0.8	600	5.0

electrode LB-80E (C=0.06, Mn=1.47, Si=0.46, P=0.008, S=0.007, Ni=1.78, Cr=0.53, Mn=0.36wt%)

2. 4. 현미경조직관찰

용접용SH-CCT도작성에 사용된 시험편의 조직과 모재 및 용접 각 부위의 조직은 광학현미경과 전자현미경(SEM, TEM)을 사용하여 관찰하였다. 광학현미경관찰은 3%나이탈을 부식액으로 10-15초간 부식시켜 관찰하였고, 투과전자현미경관찰은 two-stage replica법과 thin foil법을 병행하여 조직관찰하였다.

3. 실험결과 및 검토

3. 1. 시료강의 기계적성질

합금강 주괴의 중앙부분을 절단하여 주괴의 성분분석과 응고조직을 광학현미경으로 관찰하여 보았으나 특별한 편석 및 응고조직의 이상은 볼 수 없었다. 또한 강재중의 수소함량은 분석하지 않았으나 절단부에서 shatter crack(white spot)과 같은 수소성결함은 전혀 보이지 않았다.

한편 앞서의 열처리과정에 의하여 준비된 Ti가 0.05wt%, 0.1wt%, 0.16wt%인 고탄소계Cr-Ti 합금강과 국내강원산업제품인 50kg/m급 일반고탄소 레일재의 기계적성질을 Table 5에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 고탄소계Cr-Ti합금강들은 120-130kg/mm²의 인장강도를 가지며, 경도에 있어서도 일반레일재의 H_B255에 대하여 H_B350-370의 고경도를 보였다. 이들 3종의 고탄소계Cr-Ti합금강중에서 Ti함량이 0.1wt%인 고탄소Cr-Ti(B)합금강을 용접용SH-CCT도 작성의 시료강 및 enclosed-arc용접용 시료강으로 채택하였다.

3. 2. 용접용SH-CCT도

Fig. 4는 8조건의 냉각속도로 냉각시켜 완성한 용접용SH-CCT도로서 그림에는 냉각조건과 미세경도를 함께 표시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와같이 1번 시험편은 183°C의 저온변태점과 Hv1039의 높은 경도로 마르텐사이트조직임을 쉽게 알 수 있었으며, 냉각속도가 보다 느린 2번, 3번 시험편에서도 변태온도와 미세경도로 미루어 마르텐사이트의 단일상 조직임을 알 수 있었다. 4번 시험편에서는 581°C-493°C 및 182°C의 변태온도가 나타났으며 경도도 각각 Hv768과 Hv385를 가져, 이로 미루어 마르텐사이트+펄라이트가 혼합된 2상조직으로 생각되었다. 5번 시험편의 경우 하나의 변태점만이 관찰되었으나 조직특성차에 따른 경도변화는 Hv714와 Hv442의 2개의 경도값으로 4번 시험편과 동일한 2상조직으로 생각된다.

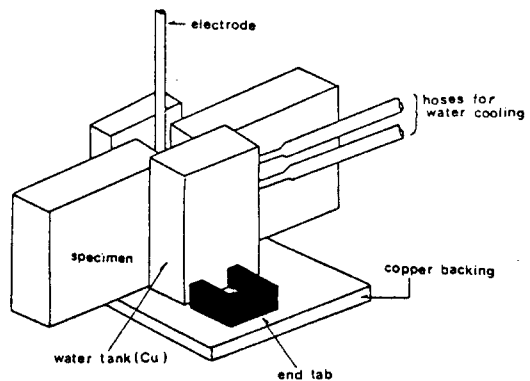


Fig. 4 Experimental apparatus of enclosed-arc welding

Table 5 Mechanical properties of high carbon Cr-Ti alloy steels and commercial rail steel

Specimens	Y.S. (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	H _B (3000kg)	Elong. (%)	R. A. (%)
High C-Cr-Ti alloy steel(A)	84.3	129.0	361	7.23	10.2
High C-Cr-Ti alloy steel(B)	90.8	129.4	361	7.31	10.3
High C-Cr-Ti alloy steel(C)	93.9	132.6	370	7.47	10.5
Commercial rail steel	58.5	89.1	255		

이보다 느린 냉각속도인 6번, 7번, 8번 시험편은 모두 하나의 변태점, 그리고 거의 같은 경도분포로 전체가 펄라이트로 구성된 단일상 조직임을 알 수 있었다.

이를 명확히 하기 위하여 각 시험편의 미세경도 변화에 따른 압흔자의 크기 및 각 냉각속도에 따른 시험편의 미세조직을 SEM으로 관찰하여 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 먼저 광학현미경

으로 압흔자의 크기를 관찰하여 보았으나 압흔자의 형상을 명확히 관찰할 수 없어, SEM을 사용하여 저배율로 관찰한 사진이 Fig. 5이다. Fig. 5는 저배율 SEM사진으로서 확실한 조직특성은 알 수 없었으나, 경도시험시 다이아몬드압흔자의 압흔크기의 변화로 조직변화를 알 수 있었다. Fig. 6은 이들을 고배율로 관찰한 SEM사진으로서 1번, 2번, 3번 시험편은 모두 단일상의 마르텐사이

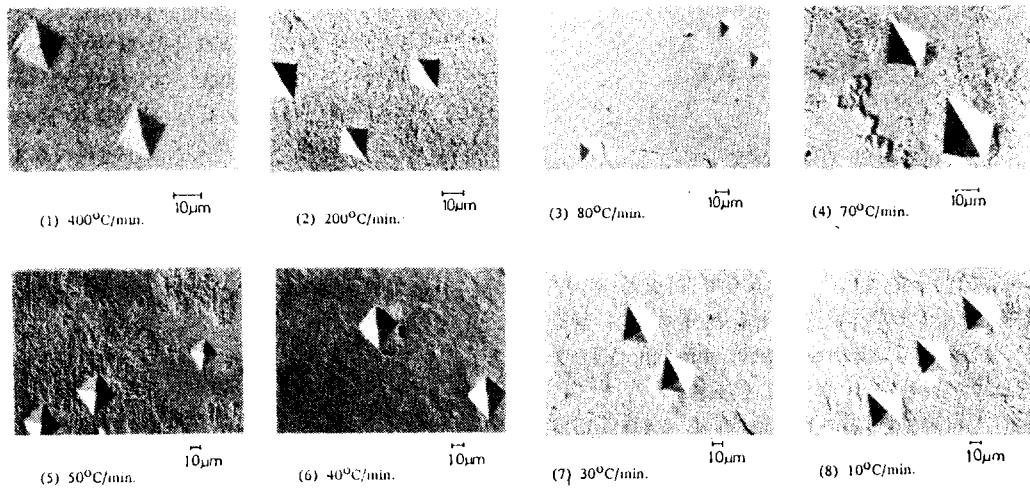


Fig. 5 SEM micrographs of various specimen for SH-CCT diagram

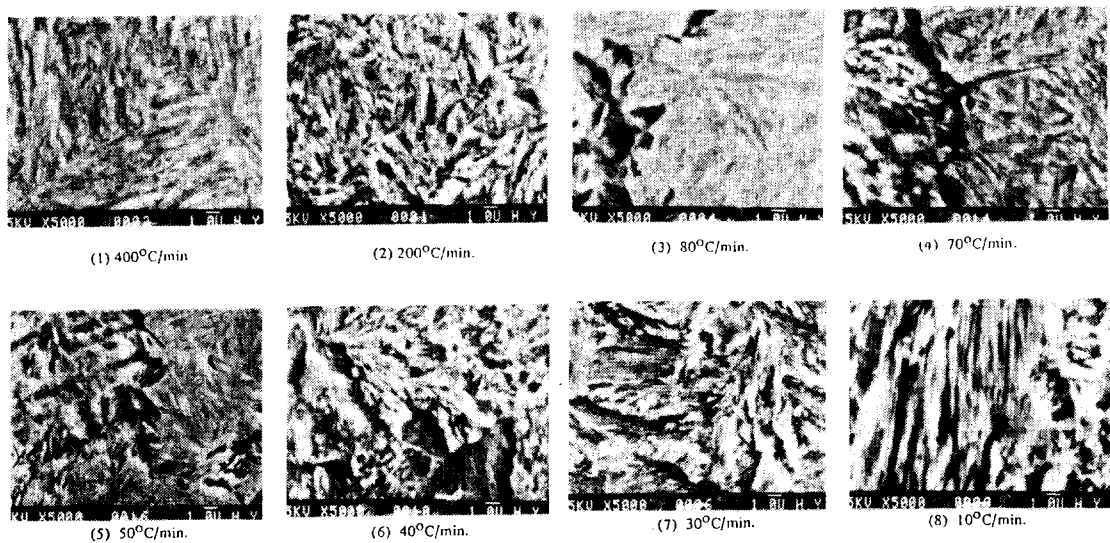


Fig. 6 SEM micrographs of various specimen for SH-CCT diagram

트조직을 보였다. 4번 시험편에서는 전술한 바와 같이 마르텐사이트와 펄라이트의 혼합조직으로서 여기서는 펄라이트의 부피분율보다 마르텐사이트의 부피분율이 보다 컸다. 또한 5번 시험편의 경우 역시 마르텐사이트+펄라이트의 혼합조직이었으나, 펄라이트조직에 마르텐사이트가 제2상으로 드문 드문 석출한 형태를 띠었다. 6번, 7번, 8번 시험편에서는 모두 전술한 바와같은 단일상의 펄라이트조직을 보였다. 이들 냉각조건에 따라 나타날 조직변화와 합금강시료에 적용시킬 enclosed-arc용접시공조건과의 관계에 관하여 고찰하여 보았다.

먼저 앞서의 Fig. 4의 시료강의 용접용SH-CCT도 및 Fig. 5, 6에서 볼 수 있듯이 용접열영향부에서 나타날 수 있는 조직변화는 냉각속도에 따라서 마르텐사이트조직으로부터 마르텐사이트+펄라이트조직으로, 또한 단일상의 펄라이트조직으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이중 용접열영향부에서 펄라이트단일조직으로 나타난 냉각속도는 50°C/min.의 5번 시험편보다는 조금 느리고 40°C/min.의 6번 시험편보다 다소 빠른 것으로서, 이들 냉각속도를 용접입열량으로 환산한 Table 2에 의하면 573kJ/cm에 상당하는 5번 시험편의 경우가 본 시료강의 enclosed-arc용접시 용접입열량인 577.5 kJ/cm와 비슷한 것을 알 수 있다. 이는 5번 시험편의 냉각속도보다는 조금 느린 냉각속도로부터 모재의 조직과 동일한 펄라이트조직을 용접열영향

부에서 관찰할 수 있음을 일러준다. 이렇게 구성될 용접열영향부의 조직변화는 6번, 7번, 8번시험편에서 나타날 펄라이트조직보다 미세화될 것은 주지하는 바와같이 조직변태에 미치는 냉각속도와 관계¹⁵⁾에서 쉽게 짐작할 수 있게 하며, 따라서 본 시료강에 적용시킬 기존의 enclosed-arc용접시공조건은 양호한 것으로 생각된다.

3.3. 현미경조직

합금강레일재의 모재의 광학조직사진과 SEM조직사진은 Fig. 7과 같다. 사진에서 볼 수 있듯이 아주 치밀하고 미세한 펄라이트조직을 볼 수 있

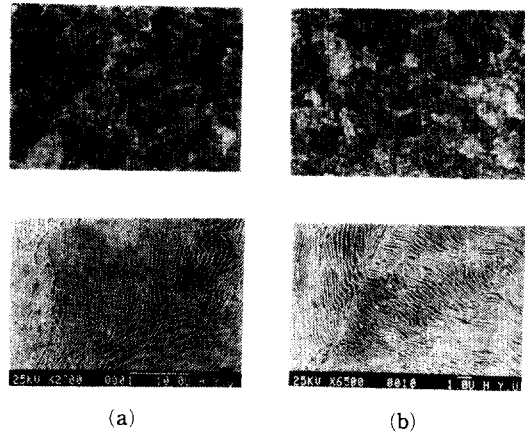


Fig. 7 Optical and SEM micrographs of commercial rail steel(a) and high C-Cr-Ti alloy steel(b)

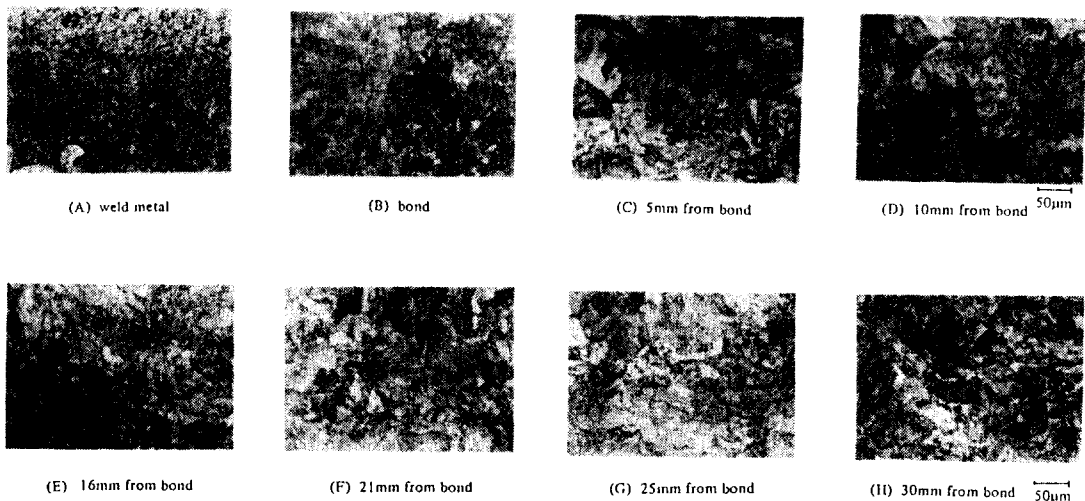


Fig. 8 Optical micrographs of enclosed-arc welded joint in high C-Cr-Ti alloy steel

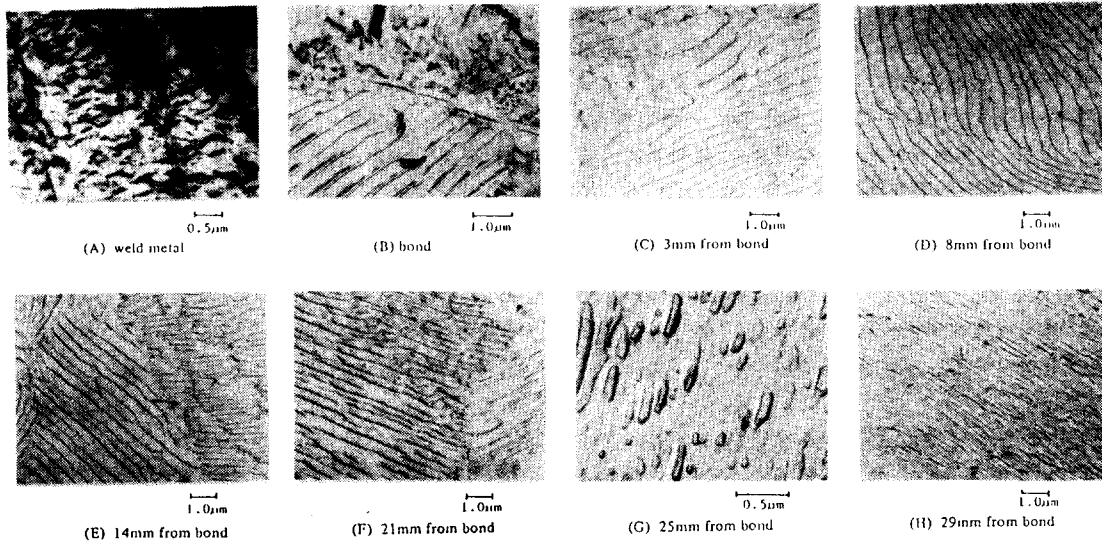


Fig. 9 Transmission electron micrographs of enclosed-arc welded joint in high C-Cr-Ti alloy steel

다. 이러한 조직특성은 미량첨가시킨 Ti의 영향으로 설명할 수 있겠다. 즉 Ti는 강력한 탄화물 생성원소로서 이는 기지내에 미세하고 많은 Ti탄화물을 생성시켜 변태된 오스테나이트를 미세화시키고, 또한 A1온도를 상승시킴으로 인하여 펄라이트 라멜라간격의 미세화에 영향을 주는 과냉도(Δt)를 증가¹⁶⁾시켜 나타난 결과로 생각된다.

한편 enclosed-arc용접시킨 시료강의 용접부의 광학사진은 Fig. 8로서, 이들 광학사진만으로는 조직특성을 명료하게 구별할 수는 없었으나 용접각 부위인 용접금속부, bond부, 용접열영향부의 구별은 가능하였다. 이들 조직을 보다 자세히 보여 주는 것이 Fig. 9의 TEM사진이다. Fig. 9에서 볼 수 있는 바와같이 시료강의 용접금속부는 하부 베이나이트조직이었고, bond부에서는 모재로부터 탄소가 용접금속부로 확산되어 탄소량이 적어진 결정입계에 초석페라이트가 석출한 조대한 펄라이트조직이며, 용접열영향부에서는 앞서 알 수 있듯이 단일상의 펄라이트조직으로 나타났다.

4. 결 론

고탄소Cr-Ti합금강레일재의 용접성평가에 관한 기초적 연구로서 시료강의 용접용SH-CCT도를

작성하였다. 이 용접용SH-CCT도에서 577.5kJ/cm의 용접입열량인 enclosed-arc용접의 용접열영향부에서 나타날 조직은 모재의 조직과 같은 펄라이트조직임을 알 수 있었고, 이로 미루어 시료강에 적용될 용접시공조건은 양호한 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) E.F. Nippes and W.F. Savage : Development of specimen simulating weld heat-affected zones, *Welding Research Supplement*. Nov. (1949), p. 534-s
- 2) M. Inagaki and T. Kasugai : 溶接用SH-CCT圖におはるフェライトの析出について, *J. Jap. Weld. Soc.*, Vol 39, No. 3, (1970), p. 175
- 3) M. Inagaki and T. Kasugi : 鋼材再現溶接熱影響部の變態舉動におよぼす成分元素の影響(第1報), *ibid.*, Vol 43, No. 10, (1974), p. 1004
- 4) M. inagaki and T. Kasugai : 鋼材再現溶接熱影響部の變態舉動におよぼす成分元素の影響(第3報), *ibid.*, Vol 44, No. 3, (1975), p. 220
- 5) M. Inagaki and T. Kasugai : 鋼材再現溶接熱影響部の變態舉動におよぼす成分元素の影響

- (第4報), *ibid.*, Vol 44, No. 4, (1975), p. 323
- 6) M. Inagaki and T. Kasugai : 鋼材再現熔接熱影響部の變態舉動におよぼす成分元素の影響 (第5報), *ibid.*, Vol 44, No. 8, (1975), p. 687
- 7) M. Nakata, Y. Tamura, H. Nomura, M. Ueda, Y. Watanabe and S. Mori : Welding of railroad rails, Nippon Kokan Tech. Report Overseas No.32,(1981), p. 34
- 8) J.T. Song and C.S. Park : 高炭素系合金鋼 Rail材의 開發에 관한 基礎研究, J. Korean Inst. Metals, Vol 21,(1983), p. 995
- 9) K.M. Kang, S.S. Ko and J.T. Song : 高炭素系 Cr-Ti合金鋼 레일재의 磨耗特性에 관한 研究, *ibid.*, Vol 26, (1988), p. 1164
- 10) Y.J. Park : Development of slack-quenched chromium-molybdenum high strength rails, Climax Report L-311-20, June, (1980)
- 11) F.B. Fletcher : Development of high strength chromium - molybdenum rail steel with improved weldability, *ibid.*, L-311-16, March, (1978)
- 12) 鈴木春義, 田村 博, : 現代熔接技術大系, Vol. 1, 産報出版, (1980), p.61
- 13) A.W.S. : Welding Handbook 7th Vol.5, C. Weisman(Ed.), 1976
- 14) Technical Commission on Welding Process, The Jap. Weld. Soc. : Narrow Gap Welding (NGW), (1984), p.193
- 15) R.R. Reed - Hill : Physical Metallurgy Principles, 2nd Ed., D.Van Nostrand Co., N.Y, (1973), p.689
- 16) G. Krauss : Principles of Heat Treatment of Steel, ASM Metals Park, Ohio,(1972), p.916