

## 研究論文

大韓熔接學會誌  
第8卷第1號 1990年3月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol.8, No.1, Mar., 1990

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

강계명\* · 송진태\*

### 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(엔クロ즈아크-용접), 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 용접용SH-CCT도 (continuous cooling transformation diagram of synthetic heat affected zone)는 용접열영향부를 야금학적

으로 조사하기 위하여 작성되며 용접성의 판정 및 용접시공조건의 설정등에 중요한 자료<sup>1,2)</sup>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.

\* 정희원, 한양대학교 공과대학 재료공학과

이에 용접용SH-CCT도는 용접부에서 나타날 조직변화를 확인해 알 수 있게 하고, 이는 재료의 용접성연구에 기초적 자료로 이용됨으로 이에 관한 많은 연구가 행하여지고 있다. 특히 Inagaki 등<sup>3~6)</sup>은 용접열영향부의 조직변태거동에 미치는 첨가원소의 영향 및 용접부중 가장 취성구역인 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 용접<sup>7)</sup>을 행하여야 한다.

본 연구에서는 고속전철용 강재로 적합하다고 판단된 고탄소계Cr-Ti합금강레일재<sup>8,9)</sup>의 용접성연구의 기초자료로서, 시료강에 적용시킬 기준의 enclosed-arc용접의 용접시공조건의 적합성을 조사할 목적으로 시료강의 용접용SH-CCT도를 작성하여 용접부에 나타날 조직변태거동을 조사, 검토하였고, 이를 용접조건을 시료강에 적용시켜 시료강의 용접부의 조직구성과 비교·검토하여 보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시료강의 제작

용량 30kg의 진공고주파유도로(VIM)를 사용하여  $4 \times 10^{-4}$  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 진공상태에서 Ar가스분위기로 변환시키면서 고순도 sponge Ti을 첨가하였다. 완전용해된 상태로 확인되는 1550°C에서 미리 압팅을 세워 예열시켜둔 인조규사주형에 출탕하여 주입하였다. 그후 Fig. 1과 같은 열간압연공정과 열처리과정<sup>10,11)</sup>을 거쳐서 Ti성분이 각기 다른 3종의 고탄소Cr-Ti합금강 시료를 준비하였다. 이같이 제작된 시료강의 조성은 Table 1과 같다.

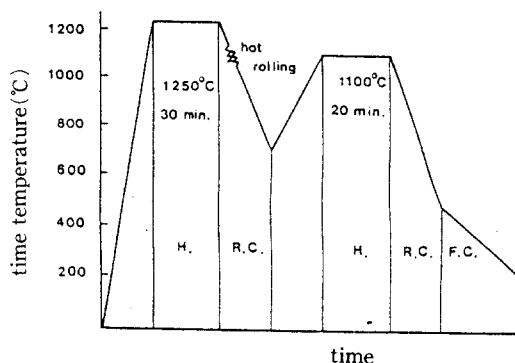


Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment of high carbon Cr-Ti alloy rail steel(H : heating, R. C. : rapid cooling, F.C. : furnace cooling)

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 질소가스분위기였다. 그리고 냉각속도를 용접입열량으로 환산하는 아래와 같은 관계식<sup>12)</sup>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.

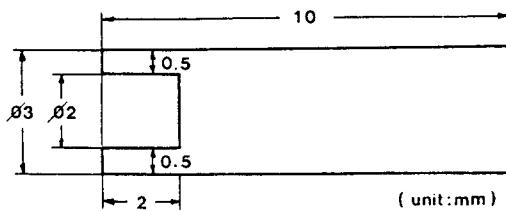


Fig. 2 Schematic diagram of specimen for SH-CCT diagram

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

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

Table 3 The relation between cooling time and heat input

| Number       | Cooling time(sec)<br>(800°C-500°C) | Heat input<br>(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 용접법<sup>13)</sup>을 필요로 한다. 특히 최근 일본의 고오베제강소(KOBE Steel LTD)에 의하여 연구개발된 enclosed-arc용접<sup>14)</sup>은 용접시간의 단축, 용접에 의한 재료의 손실이 없는 하향자세용접이어서 일본의 SINKANSEN과 우리나라의 철도용접에 시행되고 있다. 본 연구에서도 용접은 신뢰성이 있고 실현실적으로 simulation이 가능한 enclosed-arc용접법을 택하였다. Fig. 3은 enclosed-arc 용접시 사용된 장치를 나타내어 준다. 즉 압연방향에 수직방향으로 절단한 시료장의 절단면 2개를 I형 개선으로 개선간 거리를 15mm로 하여 용접부위를 구리의 브록으로 둘러싸 용접봉을 사용하여 연속적으로 용접하였으며, 이때의 용접시 공조건은 Table 4와 같다. 용접봉은 사용전에 400°C에서 1시간동안 건조시켜 불순물과 수소량을 저하시켰다.

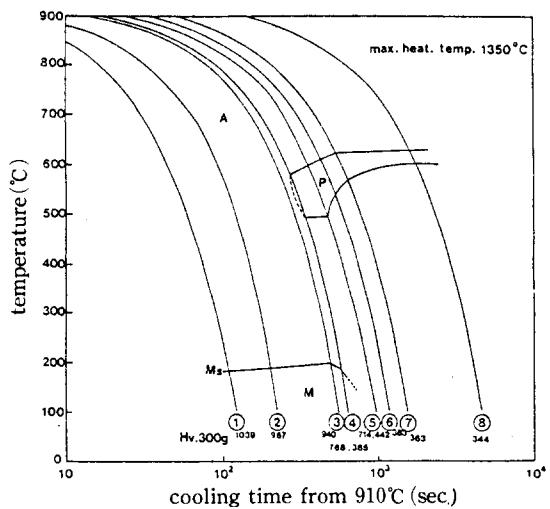


Fig. 3 SH-CCT diagram for welding of high carbon Cr-Ti alloy steel

Table 4 Welding condition for enclosed-arc welding

| Heat input<br>(kJ/cm) | Preheating<br>(°C) | Current<br>(A) | Voltage<br>(V) | Welding speed<br>(cm/min.) | Postheating<br>(°C) | Wire dia.<br>(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 성분편석과 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 전연 보이지 않았다.

한편 앞서의 열처리과정에 의하여 준비된 Ti가 0.05wt%, 0.1wt%, 0.16wt%인 고탄소계Cr-Ti 합금강과 국내강원산업제품인 50kg/m급 일반고 탄소 레일재의 기계적성질을 Table 5에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 고탄소계Cr-Ti합금강들은 120~130kg/mm<sup>2</sup>의 인장강도를 가지며, 경도에 있어서도 일반레일재의 H<sub>B</sub>255에 대하여 H<sub>B</sub>350~370의 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.

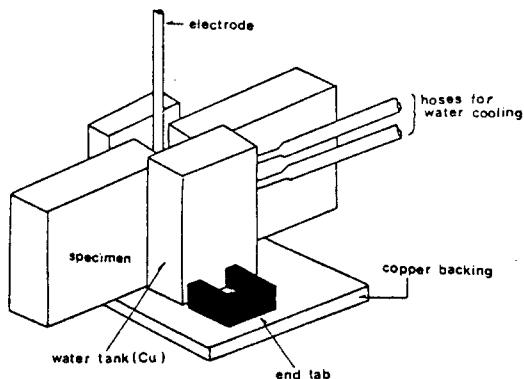


Fig. 4 Experimental apparatus of enclosed-arc welding

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

| Specimens                      | Y.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | T.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | H <sub>B</sub><br>(3000kg) | Elong.<br>(%) | R. A.<br>(%) |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|--------------|
| High C-Cr-Ti<br>alloy steel(A) | 84.3                          | 129.0                         | 361                        | 7.23          | 10.2         |
| High C-Cr-Ti<br>alloy steel(B) | 90.8                          | 129.4                         | 361                        | 7.31          | 10.3         |
| High C-Cr-Ti<br>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 정도분포로 전체가 펠라이트로 구성된 단일상 조직임을 알 수 있었다.

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

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

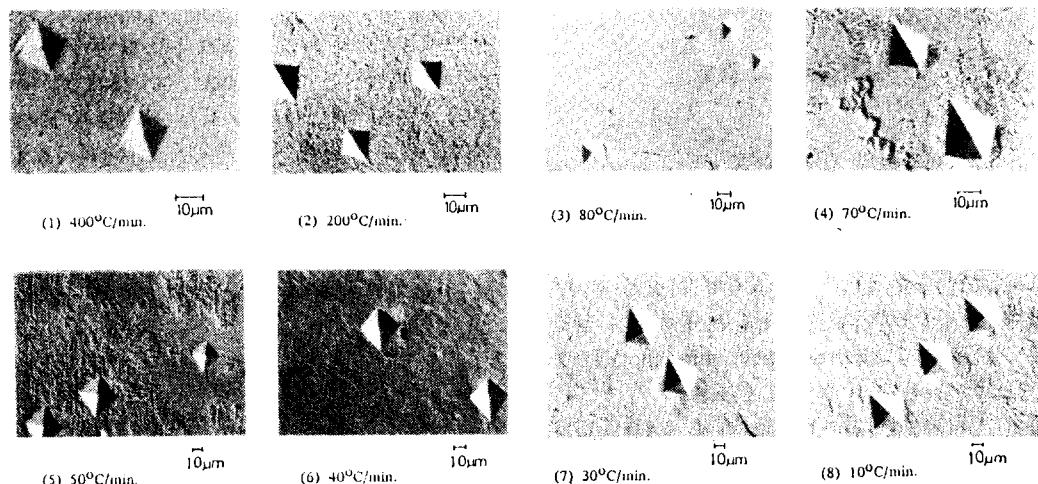


Fig. 5 SEM micrographs of various specimen for SH-CCT diagram

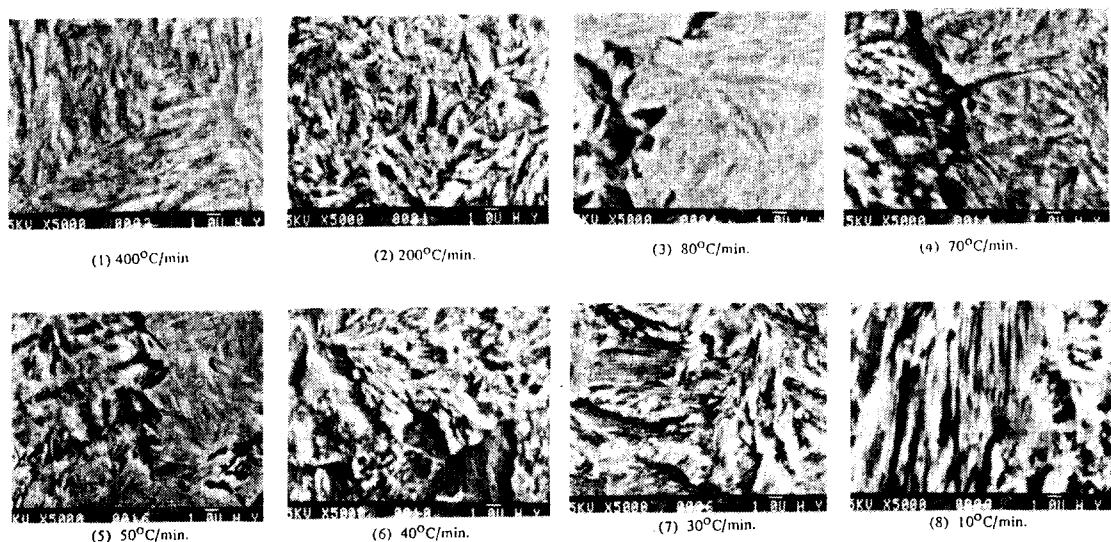


Fig. 6 SEM micrographs of various specimen for SH-CCT diagram

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. 이를 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 냉각속도와의 관계<sup>15)</sup>에서 쉽게 짐작할 수 있게 하며, 따라서 본 시료강에 적용시킬 기준의 enclosed-arc용접시 공조건은 양호한 것으로 생각된다.

### 3.3. 현미경조직

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

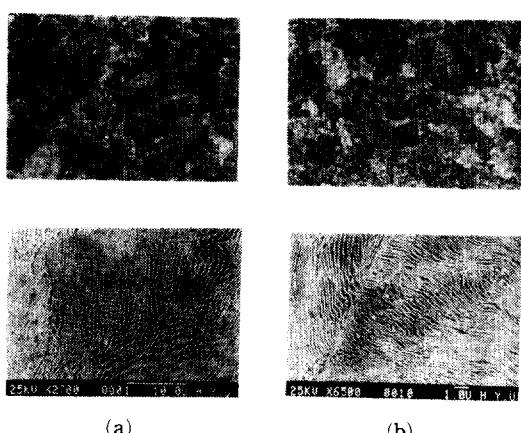


Fig. 7 Optical and SEM micrographs of commercial rail steel(a) and high C-Cr-Ti alloy steel(b)

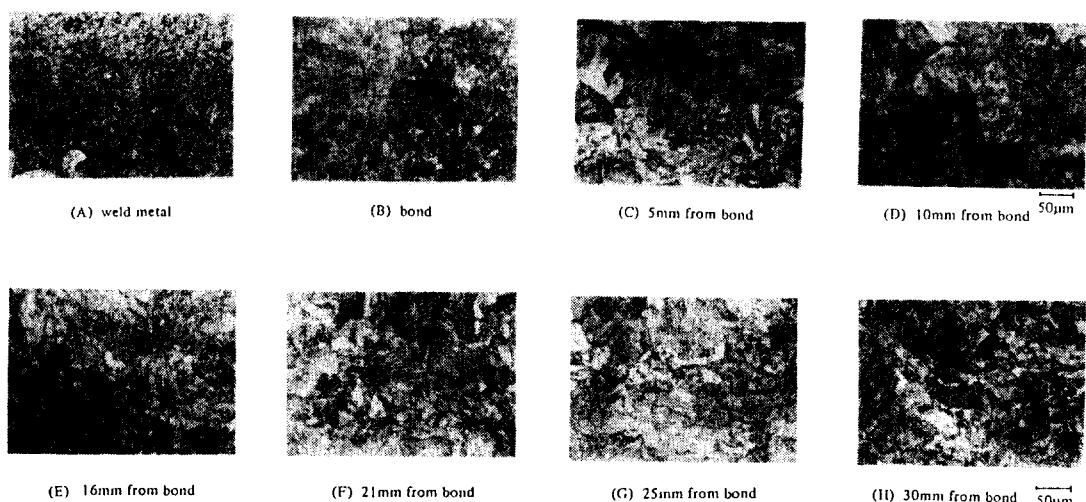


Fig. 8 Optical micrographs of enclosed-arc welded joint in high C-Cr-Ti alloy steel

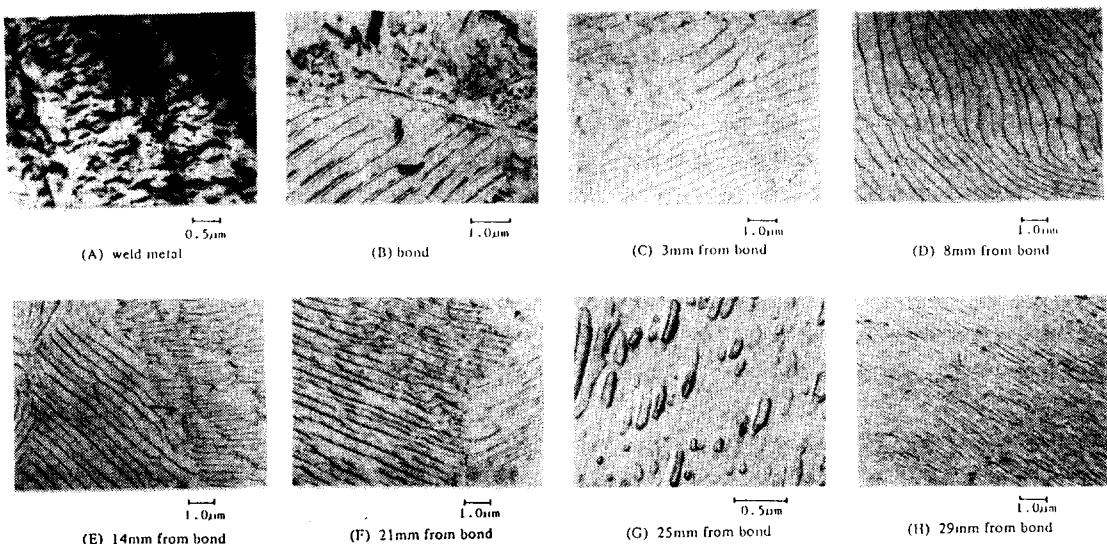


Fig. 9 Transmission electron micrographs of enclosed-arc welded joint in high C-Cr-Ti alloy steel

다. 이러한 조직특성은 미량첨가시킨 Ti의 영향으로 설명할 수 있겠다. 즉 Ti는 강력한 탄화물 생성원소로서 이는 기지내에 미세하고 많은 Ti탄화물을 생성시켜 변태전 오스테나이트를 미세화시키고, 또한 A1온도를 상승시킴으로 인하여 펄라이트 라멜라간격의 미세화에 영향을 주는 과냉도( $\Delta t$ )를 증가<sup>16)</sup>시켜 나타난 결과로 생각된다.

한편 enclosed-arc용접시킨 시료강의 용접부의 광학사진은 Fig. 8로서, 이들 광학사진만으로는 조직특성을 명료하게 구별할 수는 없었으나 용접 각 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 결정입자에 초석페라이트가 석출한 조대한 펄라이트조직이며, 용접열영향부에서는 앞서 알 수 있었듯이 단일상의 펄라이트조직으로 나타났다.

#### 4. 결론

고탄소Cr-Ti합금강레일재의 용접성평가에 관한 기초적 연구로서 시료강의 용접용SH-CCT도를

작성하였다. 이 용접용SH-CCT도에서 577.5kJ/cm의 용접열량인 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圖におけ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変態挙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変態挙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変態挙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挙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, 產報出版, (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