



Ti 함유된 스테인리스강 용접부의 전기화학적 특성

최 한 철*

조선대학교 치과재료학교실 및 생체재료나노계면활성화센터

Electrochemical Characteristics of Welded Stainless Steels Containing Ti

Han-Cheol Choe*

Department of Dental Materials & Research Center of Nano-Interface Activation for Biomaterials,
 College of Dentistry, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

(Received 7 November 2005 ; accepted 30 November 2005)

Abstract

Electrochemical characteristics of welded stainless steels containing Ti have been studied by using the electrochemical techniques in 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN solutions at 25°C. Stainless steels with 12 mm thickness containing 0.2~0.9 wt% Ti were fabricated with vacuum melting and following rolling process. The stainless steels were solutionized for 1hr at 1050°C and welded by MIG method. Samples were individually prepared with welded zone, heat affected zone, and matrix for intergranular corrosion and pitting test. Optical microscope, XRD and SEM are used for analysing microstructure, surface and corrosion morphology of the stainless steels. The welded zone of the stainless steel with lower Ti content have shown dendrite structure mixed with γ and δ phase. The Cr-carbides were precipitated at twin and grain boundary in heat affected zone of the steel and also the matrix had the typical solutionized structure. The result of electrochemical measurements showed that the corrosion potential of welded stainless steel were increased with higher Ti content. On the other hand, reactivation(I_r), passivation and active current(I_a) density were decreased with higher Ti content. In the case of lower Ti content, the corrosion attack of welded stainless steel was remarkably occurred along intergranular boundary and γ/δ phase boundary in heat affected zone.

Keywords : Intergranular corrosion, Welded zone, Heat affected zone, Repassivation(I_r)

1. 서 론

스테인리스강은 우수한 내식성과 기계적 성질을 가지고 있어 그 수요가 증가하는 추세에 있으며 특히 AISI 304 스테인리스강은 내열 및 내식강으로서 화학공장, 핵발전소 및 식품가공 공장 등의 설비로 널리 사용되고 있으나 용접부위가 450~900°C의 구간에서 장시간 노출될 경우 예민화에 의한 석출탄화물의 형성으로 부식이 심하게 발생되고¹⁾ 재료의 특성을 잃게 된다. 이를 개선하기 위한 방법은 여러 가지가 있으나 최근에는 합금원소를 첨가하여 미세조직을 변화시키는 개선법이 연구되고 있다. 특히 Ti를 첨가하면 미세조직의 변화에 의한 내

식성뿐만 아니라 기계적 성질의 향상²⁾에 미치는 영향도 크다고 알려져 있다. 즉 Ti가 첨가되면 고온 크리프과정 동안 입내에 TiC가 석출되어 강도를 증가시키며 δ -ferrite 형성을 촉진시켜 가공성을 떨어뜨린다고 알려져 있다³⁾. 한편 이 때에 δ -ferrite량이 소량이면 δ -ferrite가 기지조직 내부의 P, S와 같은 불순물을 고용하여 균열을 방지하며 이로 인해 오스테나이트계 스테인리스강의 강중에 따라 가공성을 향상 시킨다는 보고⁴⁾가 있다. 내식성에 대하여는 Ti가 첨가되면 표면에 TiO₂의 부동태피막이 형성됨에 따라 내식성을 크게 증가시키나 용체화처리된 경우는 δ -ferrite의 형성으로 오히려 감소한다는 실험결과도 있다⁵⁾. 또 용접부와 같이 재료가 고온에서 열 영향을 받으면 γ/δ 경계와 기지에서 탄화물의 석출을 억제시킴으로써 내식성을 크게 향상시

*Corresponding author. E-mail : hcchoe@chosun.ac.kr

킨다는 보고도 있으나 Ti 함량을 변화시킨 스테인리스강을 용접하여 용착부, 열영향부 및 기지로 나누어 부식거동을 연구한 보고는 많지 않은 형편이다.

따라서 본 연구에서는 AISI 304 스테인리스강에 Ti를 0.2~0.9 wt%까지 첨가하여 약 12 mm 두께의 스테인리스강 판을 제조하고 MIG 용접법으로 용접한 후 용접부로부터 거리에 따라 용착부, 열영향부 및 기지부로 나누어 각 부분의 Ti 함량에 따르는 입계부식거동을 조사하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 시편은 AISI 304 스테인리스강을 기본조성으로 하고 여기에 Ti를 0.2~0.9 wt%의 범위로 첨가하여 진공용해시킨 후 ingot를 만들고 1100°C에서 약 12 mm 두께로 열간압연하였다. 이렇게 준비한 모재를 wire cutter를 사용하여 MIG용접을 할 수 있도록 적당한 크기로 절단한 후 1050°C의 고순도 Ar가스 분위기하에서 1시간동안 용체화처리 한 후 0°C의 물에 급랭하는 과정의 처리를 하였다. 이렇게 하여 제조된 시편의 화학적 조성은 표 1과 같고 Ti의 함량에 따라 0.2Ti, 0.4Ti와 같이 시편에 기호를 부여하였다.

이상과 같이 처리한 재료가 용접 과정에서 열영향을 받을 때 열영향의 정도에 따라, 또 Ti 함량에 따라 나타내는 효과를 알아보기 위해 용체화처리가 끝난 모재를 30°로 V홈 가공을 한 후 맞대기 용접을 하였으며 이때 사용한 용접봉은 304 스테인리스강이고 용접속도는 30 cm/min로 하였다. 용접조건은 용접전압 25 V, 용접전류 300 A이었고 shield gas는 Argon을 사용하였으며 가스 소모량은 15 liter/min으로 하였다. 용접된 시편은 각 부분별로 용착부는 MELTZ, 열영향부는 HAZ, 기지는 MATRIX로 각각 표시하였다.

용접 후 Ti 함량에 따라 용착부, 열영향부 및 기지의 미세조직변화를 조사하기 위하여 10% 옥살산에서 전해에칭하여 조직을 광학현미경으로 관찰하

였으며 EDX로 상을 확인하였다. 또한 Ti 함량에 따른 결정구조의 변화를 XRD를 사용하여 조사하였으며 이때 X-ray target은 Cu K α (파장=1.5405 Å)를 사용하였다. 또 용접부에서 결정변화와 2차상의 형성으로 인한 경도변화를 알아보기 위하여 vickers 경도계를 사용하여 #2000번까지 연마한 표면에 하중을 500 kg/mm²으로 가하여 경도를 측정하였다.

Ti 함량에 따른 스테인리스강 용접부의 부식특성을 알아보기 위해 각각의 용접부위에서 시편을 채취하여 Φ 13 mm가 되도록 시편을 준비하였다. 전기화학적 실험에 사용된 cell내의 전해액은 실험이 시작되기 60분전부터 끝날 때까지 Ar가스를 흘려보내 탈 공기된 분위기에서 실험하였으며 기준전극은 포화칼로멜전극(SCE: saturated calomel electrode)을, 보조전극은 고밀도 탄소전극을, 시험전극은 준비한 시편을 각각 사용하였다.

스테인리스강 용접부의 입계부식에 미치는 Ti 함량의 영향에 대해서는 DL-EPR(double loop electrochemical potentiokinetic reactivation)방법을 사용하여 조사하였다. 이 방법은 0.5 M H₂SO₄+0.01 M KSCN 혼합용액에서 전위주사속도를 100 mV/min로 하여 700 mV까지 정방향주사(forward scan)를 행한 후 다시 같은 전위주사속도로 역방향주사(reverse scan)시켜 측정하는 것이다. 이 곡선으로부터 재활성화전류밀도(I_r)와 활성화전류밀도(I_a)를 구하여 Ti 함량 증가가 각 용접부에서 입계부식에 미치는 영향을 비교 검토하였으며 EPR시험이 끝난 시편은 SEM을 통하여 입계부식거동을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 용접부의 조직변화에 미치는 Ti 함량

그림 1은 용접부의 미세조직에 미치는 Ti의 영향을 조사하기 위해 용착부, 열영향부 및 기지에서 시편을 채취하여 10% 옥살산에서 전해에칭한 다음 광학현미경을 사용하여 표면을 관찰한 사진으로 (a)는 Ti가 미량 함유된 스테인리스강의 용착

Table 1 Chemical composition of samples

Alloy	Elements (wt%)	C	Cr	Ni	Si	Mn	S	P	Ti	Fe	Ti/C	Cr/Ni
S		0.072	19.26	9.460	0.854	1.740	0.017	0.032	0.093	bal.	1.29	1.79
0.2Ti		0.063	19.02	9.490	0.830	1.730	0.017	0.031	0.260	bal.	4.12	1.63
0.4Ti		0.070	19.09	9.210	0.871	1.730	0.031	0.031	0.423	bal.	6.04	1.69
0.7Ti		0.070	19.00	9.240	1.010	1.760	0.030	0.030	0.710	bal.	10.14	1.99
0.9Ti		0.074	18.93	9.270	1.030	1.760	0.032	0.032	0.921	bal.	12.44	2.03

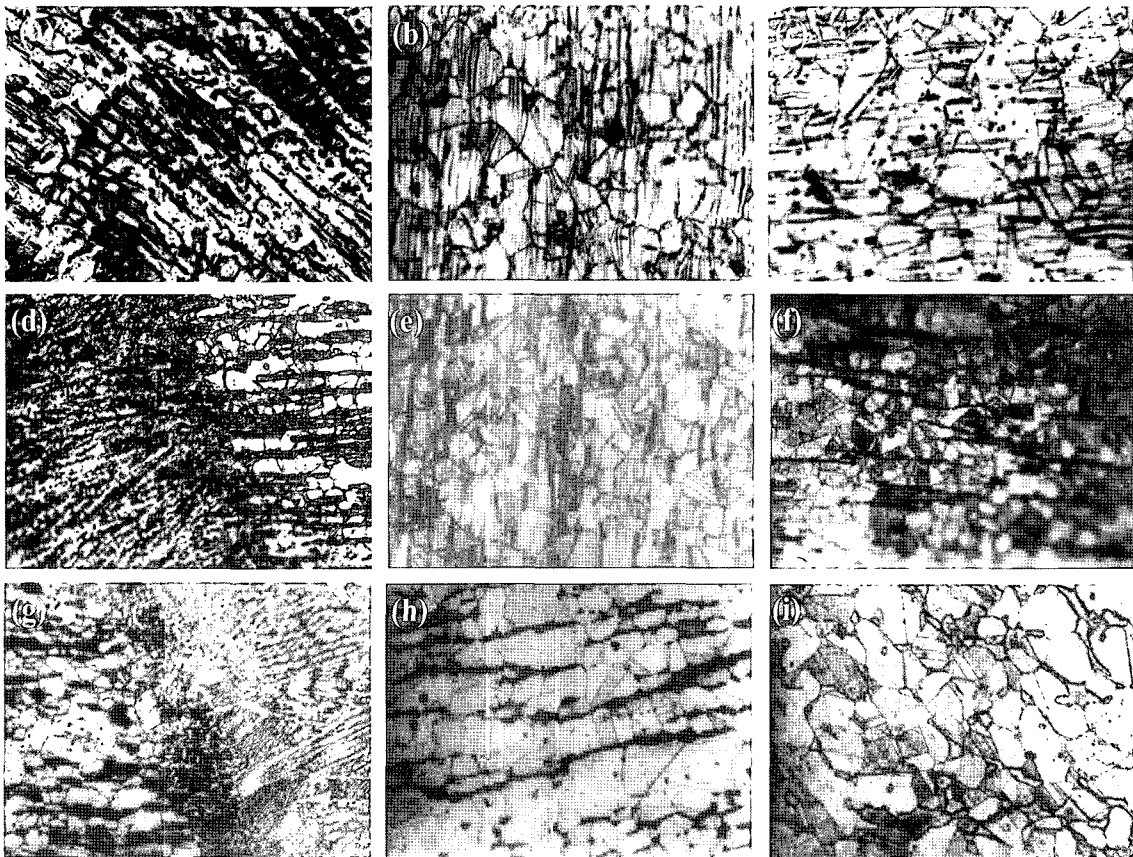


Fig. 1. Optical micrographs of S1(a), S2(b), S3(c), 0.2 Ti MELTZ(d), 0.2 Ti HAZ(e), 0.2 Ti MATRIX(f), 0.7 Ti MELTZ(g), 0.7 Ti HAZ(h) and 0.7 Ti MATRIX(i) after etching in 10% oxalic acid ($\times 200$).

부인 S1, (b)는 열영향부인 S2, (c)는 기지인 S3, (d)는 0.2TiMELTZ, (e)는 0.2TiHAZ 및 (f)는 0.2TiMATRIX, (g)는 0.7TiMELTZ, (h)는 0.7TiHAZ 및 (i)는 0.7TiMATRIX 시편의 것이다. 이로부터 Ti 함량이 0.1% 정도인 경우 용착부인 (a)는 용접시 용착대에서 나타나는 전형적인 조직을 보이고 있는데 용착부는 주로 오스테나이트 조직과 δ -ferrite가 혼합된 조직 사이에 δ -ferrite가 형성되는 수지상조직이 현저히 발달한 상태를 보인다⁶⁾. (b)는 열영향부로서 입계에서 예민화가 상당히 이루어졌음을 보이며 쌍정입계의 생성과 함께 다량의 석출물이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이때 형성된 석출물은 주로 오스테나이트계 스테인리스강이 450~900°C의 온도 범위에서 일정시간 유지되는 과정에서 $M_{23}C_6$ 형 탄화물이 석출되고 탄소 함량이 많아지면 $M_{23}C_6 + M_7C_3 + \gamma^7$ 가 형성되는데 여기서 나타나는 $M_{23}C_6$ 탄화물의 형태는 주로 $Cr_{23}C_6$ 인 것으로 알려져 있다. (c)는 용체화처리된 스테인리스강의 전형적인 조직을 보이며 이 경우에는 확산에 필요한 시간이 충분하지 못하기 때문에 (b)에서 나타나는 석출물을 형성할 수 없으며 따라서 FCC 조직의 소둔시에

생성되는 소둔쌍정만이 나타나 있고 입계는 결정방향차이에 의한 침식과 똑같은 양상을 보이고 있다. Ti 함량을 0.26 wt% 첨가한 경우 Ti는 ferrite의 안정원소로서 이 상의 형성을 촉진하며 따라서 사진 (d)에서 알 수 있듯이 (a)에 비하여 다량의 δ 상이 주상정조직을 이루면서 형성되어 있음을 알 수 있다. 또 열영향부인 사진(e)에서는 (b)에 비하여 석출물은 많이 관찰되지 않지만 δ -ferrite상이 조금씩 나타나고 있다. 또 γ/δ -ferrite 경계에서는 약간의 $M_{23}C_6$ 의 석출탄화물도 형성되어 있음을 볼 수 있는데 Becket 등의 보고^{8,9)}에 의하면 시효초기에 δ -ferrite에서 농축된 Cr과 오스테나이트상에 존재하였던 탄소가 γ/δ 경계로 확산되어 크롬탄화물을 형성하는 과정과 유사하게 석출된다고 하였다. Ti가 0.26 wt% 함유된 스테인리스강을 예민화 처리한 경우는 기지와 입계사이에 크롬고갈대를 생기게 하기도 하며 또한 δ/γ 계면에서 $Cr_{23}C_6$ 가 형성되기도 한다. 그러나 이 경우는 $Cr_{23}C_6$ 의 형성에 의한 조성의 차이에서 오는 영향보다는 미미하기 때문에 Ti의 첨가가 스테인리스강의 내식성을 증가시키게 된다. 기지인 (f)에서도 δ -ferrite가 형성되어 있으며 쌍정

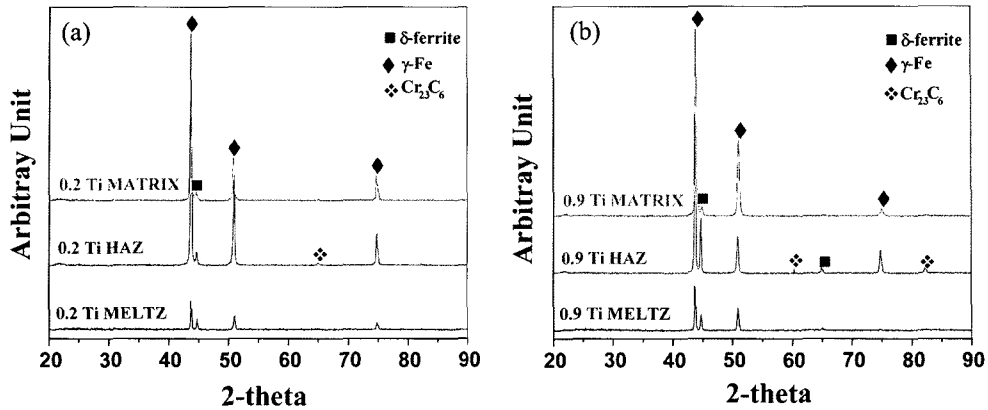


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of 0.2 Ti(a) and 0.9 Ti(b).

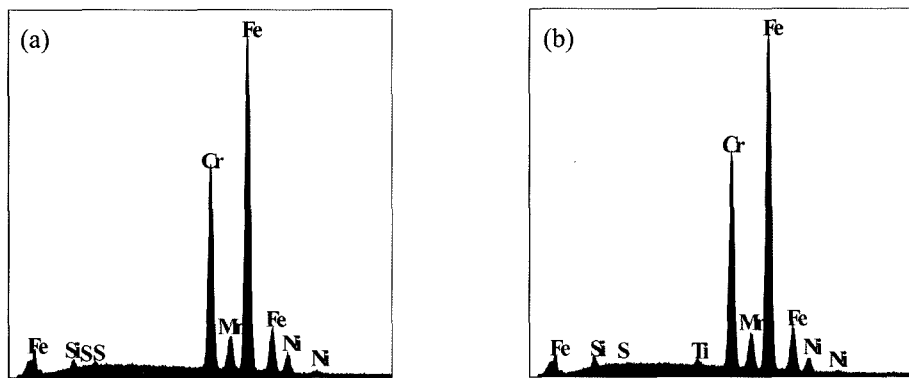
조직도 보인다. Ti 함량을 0.71 wt%로 증가시키면 열영향부에서 입계의 침식상태가 현저히 감소하며 δ -ferrite 상은 크게 증가하는 양상을 보인다. 그림 (h)에서 2차상이 열간압연과정 동안 압연방향으로 길게 늘어난 실선모양으로 관찰되는데¹⁰⁾ 이는 BCC 구조의 δ -ferrite상으로 생각된다.

3.2 용접부의 결정구조와 경도변화에 미치는 Ti 함량

그림 2는 Ti가 0.26 wt%와 0.92 wt% 함유된 시편의 용접부에 대한 결정구조를 조사하기 위하여 XRD를 사용하여 분석한 것이며 (a)는 0.2TiMELTZ, 0.2TiHAZ 및 0.2TiMATRIX에서 나타난 피크이고 (b)는 0.9TiMELTZ, 0.9TiHAZ 및 0.9TiMATRIX에서의 XRD 피크이다. 그림에서 보면 용착부에서 δ -ferrite의 피크가 크게 나타나 ferrite상이 다량 형성되어 있음을 다시 확인할 수 있다. 또 Ti 함량이 0.43 wt%로 증가하여도 같은 경향을 보이며 열영향

부에서는 용착부에서 나타나지 않았던 Cr 탄화물이 형성되어 있음을 알 수 있고 δ -ferrite상은 Ti 함량이 증가된 0.9TiHAZ에서도 많이 형성되어 있음을 나타내어 앞의 그림 7에서 고찰한 내용과 일치함을 확인할 수 있으며 기지는 두 경우 모두 γ -Fe가 대부분이고 Ti가 증가된 0.9TiMATRIX에서 δ -ferrite가 미세하게 나타나 Ti 함량의 영향을 보여주고 있다.

그림 3은 0.2TiMELTZ(a)과 0.9TiMELTZ(b)의 δ -ferrite로 보이는 2차상에서 EDX 분석을 행한 것으로 0.2TiMELTZ이나 0.9TiMELTZ 모두 2차상에서 Cr이 약 23 wt% 검출되었으며 0.9TiMELTZ의 경우 Ti가 검출되어 Ti 함량이 높을수록 2차상에서도 Ti가 존재하고 있음을 알 수 있다. 즉 기지에서는 304 오스테나이트계 스테인리스강의 기본 조성으로 19wt%의 Cr함량을 나타내었으며 2차상에서는 23wt%의 Cr함량으로 나타나 ferrite상이 형성되었음을 예측할 수 있다⁶⁾.



Element	O	Si	S	Cr	Mn	Fe	Ni
Weight %	1.22	0.44	0.21	22.97	1.63	66.86	6.68
Atomic %	4.05	0.83	0.35	23.49	1.57	63.65	6.05

Element	O	Si	S	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Weight %	0.38	0.54	0.07	0.50	24.55	1.35	67.52	5.10
Atomic %	1.29	1.04	0.11	0.57	25.55	1.33	65.42	4.70

Fig. 3. EDX results at second phase of 0.2 Ti MELTZ(a) and 0.9 Ti MELTZ(b) samples after etching in 10% oxalic acid.

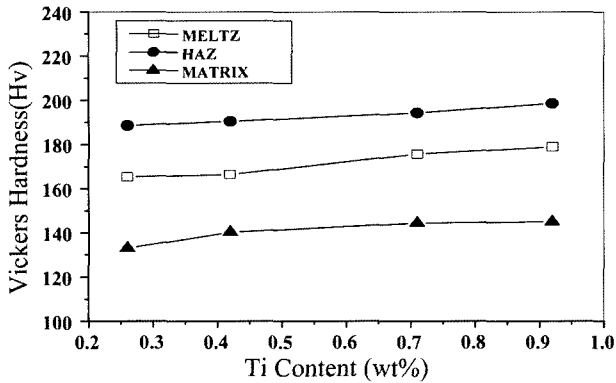


Fig. 4. Micro-vickers hardness of MELTZ, HAZ and MATRIX for stainless steel as a function of Ti content.

그림 4는 Ti함량의 증가에 따른 용착부, 열영향부 및 기지에서 미세조직 변화가 정도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 vickers 경도기를 사용하여 측정된 결과로서 열영향부, 용착부, 기지 순으로 높은 경도를 보이며 또한 Ti 함량이 많아질수록 세 부위 모두 경도가 증가되는 경향을 나타내는데 이는 Ti 첨가로 인한 δ -ferrite 석출에 의한 섬유강화¹¹⁾와 TiC의 석출효과에 의한 것으로 생각된다.

3.3 용접부의 입계부식특성

그림 5는 용접부의 입계부식에 미치는 Ti의 영향을 조사하기 위해 0.26 wt% Ti의 시편에 대해서 용착부, 열영향부 및 기지에서 시편을 채취한 다음 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN 용액에서 EPR 곡선을 측정된 것으로 Ti 함량이 0.26 wt%일 때 용착부, 기지, 열영향부 순으로 재활성화전류밀도(I_r)가 증가하여 기지와 용착부가 입계부식에 대한 저항성이 우수하며 열영향부에서는 입계의 용출이 심하게 나타나 입계부식이 발생되었음을 예측할 수 있다. 또 활성화전류밀도(I_a)는 열영향부에서 가장 높게 나타났지만 큰 차이를 보이지는 않았다.

그림 6은 용접부의 입계부식에 미치는 Ti의 영향을 조사하기 위해 Ti 함량을 0.42 wt%로 증가시킨 시편에 대해서 용착부, 열영향부 및 기지별로 측정된 EPR 곡선으로 Ti함량이 0.26에서 0.42 wt%로 증가하면 기지의 재활성화전류밀도(I_r)는 크게 감소하지 않지만 열영향부의 I_r 값은 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 Ti가 첨가됨으로써 TiC가 형성되어 γ/δ 계면에서 형성되는 Cr₂₃C₆의 탄화물 생성을 억제하였기 때문으로 생각된다. 또 용착부의 I_r 값이 낮게 나타나는데 이는 δ -ferrite가 형성되면 γ/δ 계면을 따라서 Cr₂₃C₆의 탄화물이 형성되기 때문에 내식성이 감소한다는 보고¹²⁾가 있지만 용

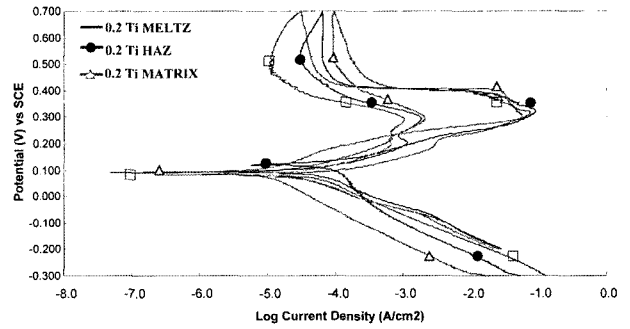


Fig. 5. EPR curves for 0.2 Ti samples in 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN solution at 25°C.

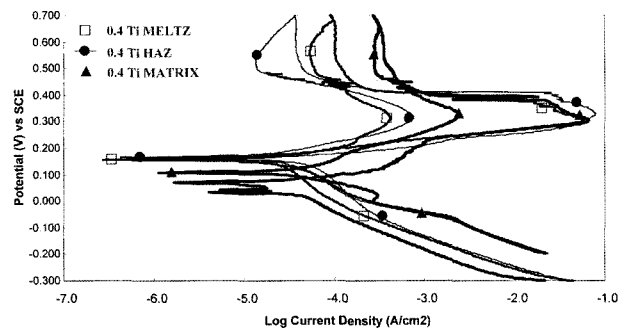


Fig. 6. EPR curves for 0.4 Ti samples in 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN solution at 25°C.

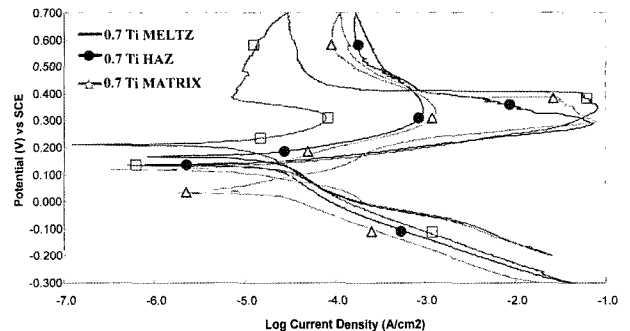


Fig. 7. EPR curves for 0.7 Ti samples in 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN solution at 25°C.

대에서는 Ti가 Cr₂₃C₆의 탄화물형성을 억제하기 때문에 I_r 값이 기지의 그것과 근접하게 나타난 것으로 생각된다. 활성화전류밀도(I_a)는 0.26 wt% Ti가 첨가된 경우와 같이 열영향부에서 가장 높은 값을 나타내는데 이는 입계의 석출물존재에 기인한 것임을 알 수 있다.

그림 7은 용접부의 입계부식에 미치는 Ti의 영향을 조사하기 위해 Ti함량을 0.71 wt%로 증가시킨 시편의 용착부, 열영향부 및 기지별로 측정된 EPR 곡선이다. 여기에서 시편 0.7Ti 용착부의 I_r 값은 0.2Ti 및 0.4Ti에서 나타난 바와 같이 기지 혹은 용

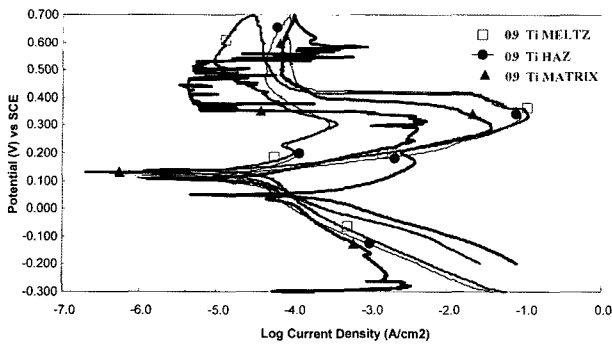


Fig. 8. EPR curves for 0.9 Ti samples in 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN solution at 25°C

착부의 I_p 값보다 곡선이 1 order 정도 왼쪽으로 이동하여 전류밀도가 감소되었음을 알 수 있다. 또한 기지를 비롯한 열영향부에서도 낮은 I_p 값을 보여 Ti 함량이 0.71 wt%로 증가됨으로써 입계부식에 대한 저항이 크게 증가함을 알 수 있다.

그림 8은 Ti 함량을 0.92 wt%로 증가시킨 시편의 용착부, 열영향부 및 기지별로 측정된 EPR 곡선으로 Ti함량이 1 wt%에 가까운 0.92 wt%로 증가되면 용착부와 열영향부의 재활성화전류밀도(I_p)에 거의 차이가 없다는 것이 특징이다. 즉 입계에 탄화물이 거의 석출되지 않으며 여기서 나타내는 I_p 값은 단지 δ -ferrite의 계면이 용출될 때 나타나는 전류밀도로 생각된다. 활성화전류밀도(I_a)는 열영향부와 용착부보다는 기지에서 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다.

그림 9는 용접부의 입계부식에 미치는 Ti의 영향을 조사하기 위해 0.26 wt% Ti의 시편과 0.92 wt%

Ti의 시편에 대해서 용착부, 열영향부 및 기지별로 채취한 시편을 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN 용액에서 EPR시험 후 부식표면을 SEM을 사용하여 촬영한 사진이다. 여기에서 (a), (b), (c)는 0.2Ti 시편의 용착부, 열영향부 및 기지의 사진이고 (d), (e), (f)는 0.9Ti의 용착부, 열영향부 및 기지의 사진으로 용착부인 (a)를 보면 주상정의 조직이 뚜렷하게 나타나 있으며 δ -ferrite가 γ 기지에 그물모양으로 성장되어 있음을 보여주나 입계에서의 부식상은 나타나지 않았다. (b)는 열영향부에서의 입계부식 사진으로 입계와 δ 상의 경계부근에서 심하게 부식된 형태를 보이는데 이로부터 γ/δ 상의 경계에서 석출된 탄화물주위에서 크롬 고갈대를 형성하여 입계가 SCN⁻에 의해 쉽게 파괴되어 심하게 침식되었음을 알 수 있고 이는 그림 5의 EPR 곡선과 일치하는 내용이다. 또한 입계에는 Cr₂₃C₆의 석출물이 존재하였던 부위에 핏트 형태의 부식이 나타나 있는데 이는 SCN⁻이 Cl⁻과 같이 침식성 음이온이기 때문에 계면활성뿐만 아니라 공식을 축진시키는 이온¹³⁾으로 작용한 결과에서 기인된 것으로 생각된다. 기지인 (c)에서는 δ 상이 존재하였던 부위에서 부식이 발생하였으나 입계에서의 침식은 거의 나타나지 않았다. Ti함량이 0.92 wt%로 증가하면 (d)에서 볼 수 있듯이 용착대에 δ 상이 증가하였음을 나타내며 열영향부인 (e)에서는 입계에서 부식이 거의 발견되지 않아 크롬탄화물이 석출되지 않았음을 알 수 있다. 기지도 용체화처리한 경우의 입계부식경향과 똑 같은 양상임을 확인할 수 있으며⁵⁾ 이 또한 I_p 값이 감소한 EPR 곡선 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

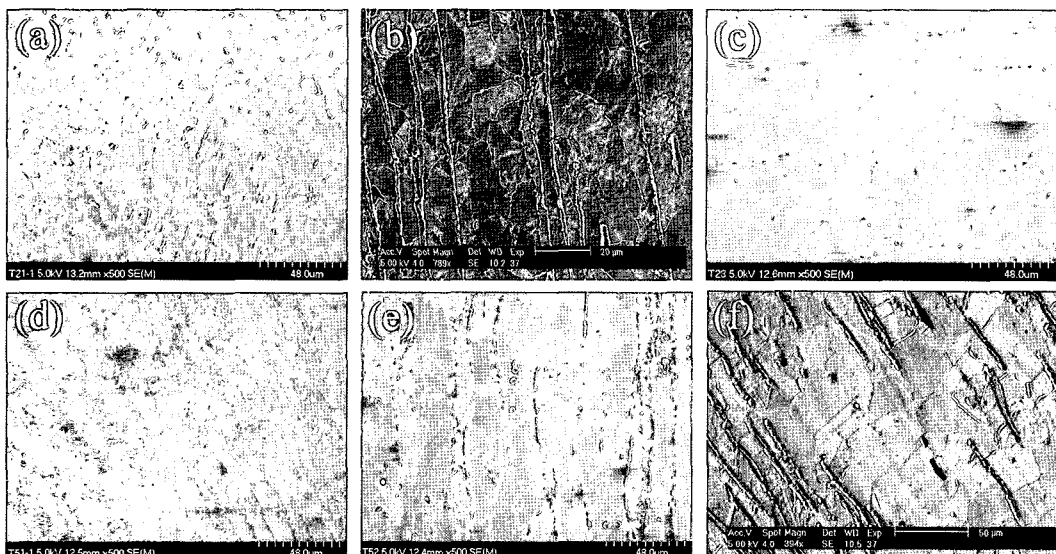


Fig. 9. SEM showing intergranular corrosion of 0.2 Ti MELTZ(a), 0.2 Ti HAZ(b), 0.2 Ti MATRIX(c), 0.9 Ti MELTZ(d), 0.9 Ti HAZ(e) and 0.9 Ti MATRIX (samples after EPR test in 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN solution at 25°C.

4. 결 론

Ti 함유된 스테인리스강 용접부의 전기화학적 특성을 조사하기 위하여 Ti 함량을 0.2~0.9 wt%까지 첨가하여 합금을 제조하고 MIG법으로 용접을 행한 후 용착부, 열영향부 및 기지에서 시편을 채취하여 0.5 M H₂SO₄ + 0.01 M KSCN 혼합용액에서 입계 부식을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Ti 함량이 낮은 경우에 용착부의 조직은 γ 와 δ -ferrite가 혼합된 수지상조직이고 열영향부는 쌍정 입계와 입계에 석출물이 다량 형성된 조직이다. 기지는 용체화처리된 스테인리스강의 전형적인 조직을 나타낸다.

2) Ti 함량의 증가에 따른 용접부의 입계부식 특성조사 결과, 재활성화전류밀도(I_p)가 용착부, 기지, 열영향부 순으로 증가하고 입계부식에 대한 저항성이 우수하며 Ti 함량이 증가할수록 용착부와 열영향부의 재활성화전류밀도(I_p)의 차이가 거의 없어진다.

3) Ti 함량이 낮으면 열영향부의 입계와 γ/δ 상 경계부근에서 심하게 부식되며 Ti 함량이 높으면 열영향부의 입계에서 부식이 거의 발생되지 않는다.

- Amer. Soc. Steel Treat., 21 (1933) 481.
2. S. O. Cha, H. C. Choe, K. H. Kim, J. of the Korean Inst. of Met & Mater, 36 (1998) 138.
3. J. H. Decrox, A. M. Neveu, R. J. Castro, Deformation under Hot Working Condition, Iron Steel Inst. Spec. Rep, (1968) 135.
4. S. R. Keown, Hot working and Forging Processes, Proc. Conf. Sheffield, England, (1979) 140.
5. 차승욱, 최한철, 김관휴, 대한금속학회지, 36 (1998) 138.
6. 차승욱, 최한철, 김관휴, 대한금속학회지, 37 (1999) 137.
7. 김창원, 김대용, 최한철, 김관휴, 한국부식학회 춘계 학술발표회 초록집, (2000) 79.
8. F. R. Beckitt, J. Iron Steel Inst, 207 (1969) 632.
9. R. A. Farrar, J. Mater. Sci, 20 (1985) 4215.
10. C. Tseng, Y. Shen, S. W. Thomson, M. C. Mataya, G. Krauss, Metall Trans. 25A, (1994) 1147.
11. Yoshitaka Iwabuchi, Materials Transactions, JIM, 33 (1992) 627.
12. T. P. S. Gill *et al.*, Corrosion, 44 (1988) 511.
13. S. Szklarska-Smialowska, Pitting Corrosion of Metals, NACE, (1986) 218.

참고문헌

1. E. C. Bain, R. H. Aborn, J. J. B. Rutherford, Trans.