

전기화학적 방법을 이용한 Ti(Grade 2)재의 최적 어닐링 열처리에 대한 연구

백 신 영*

A Study of Annealing Heat-treatment for Ti(Grade 2) by Electrochemical Methods

S-Y Baik*

Key words : Ti(Grade 2) (순수티타늄), Electro-chemical corrosion(전기화학적 부식), Solution and Annealing Heat-treatment(용체화소둔열처리), Anodic and Cyclic Polarization(양, 왕복분극), Corrosion Potential and current(부식전위, 전류)

Abstract

In this paper, the annealing heat treatments for the best corrosion resistant of Ti(Grade 2) were studied in a 3.5% NaCl solution by electrochemical methods. The annealing heat treatments were accomplished at 650, 700 and 750°C with different time of 30min., 1hour and 2 hours in a vacuum condition. The obtained results are: 1) in the case of solution heat treated 930°C for 2 hours in a vacuum and air, the corrosion potentials were -348.7 and -567.1mV, and current densities 2.32 and 22.62 μ A, respectively, 2) as increase both annealing heat treatment temperature 650, 700, 750°C and time 30min., 1 hour, 2 hours, the corrosion potential were decreased, whereas corrosion current density increased, 3) in the case of cyclic polarization, the measured charges were increased as increasing solution heat treatment temperature and time, 4) on the bases of corrosion potential, current density and charge, the best annealing temperature and time were measured as 700°C and 30min. for Ti(Grade 2) material.

1. 서 론

티타늄(Titanium)과 티타늄 합금은 2차 세계대전 이후 비강도(강도/중량)와 우수한 내식성 때문에 주로 항공기 엔진 부품으로 많이 사용되어 왔으

나 최근에는 산업이 발달하고 문화가 다양화함에 따라 개발이 가속화되고 있다. 일본에서 Ti의 용도를 살펴보면 20% 정도가 해수용 열교환기(condenser)에, 30% 정도가 화학 플랜트, 30% 정도가 스포츠, 의과용, 장식품 등으로 사용되고 나

* 종신회원, 목포해양대학교 교수

머지 20% 정도가 건물 외장재 등으로 사용되며, 미국에서는 70%정도가 우주나 미사일 등 우주항공용으로 사용되고 있다. 세계적으로 티타늄의 연간 사용량은 약 6,000톤 정도이며 보통 20년 정도의 부식량이 0.0003mm/year(0.01mils/year) 정도로 낮기 때문에 활어용 해수냉각기, 담수화 시설의 열교환기 및 선박의 경우는 침수용 볼밸브, 소화펌프, 열교환기, 요트 등의 소형선 선체, 잠수함 선체, 워트제트추진시스템, 증기터빈의 블레이드 등에 사용되며, 자원개발 재료(석유 탐사용 파이프), 해양구조물, 심해정용 재료, 화학 플랜트, 화력 및 원자력 발전소 등에 폭넓게 사용되고 있으며 특히 해수를 사용하는 열교환기나 복수기에서는 전면부식, 공식 및 찰과부식(Fretting Corrosion) 등에 대해 다른 금속이나 합금에 비해 뛰어난 내식성을 나타내므로 사용량이 증가하고 있다^{1,2,3)}.

순수한 Ti는 882.5°C에서 동소변태하며, 온도를 상승시키면 이 온도보다 낮은 온도에서는 α 상(hcp)이 높은 온도에서는 β 상(bcc)이 안정하다. 상업적으로 거의 순금속에 해당하는 Ti재료중에서 사용량이 가장 많은 것이 Grade 2 규격의 재료이다. Grade 2에서 금속적, 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 원소는 H, C, O, N 및 Fe이므로 이들의 함유량을 엄격히 제한하고 있다. 한편 조직상으로 α 상을 안정하게 하거나 확장하는 원소로서는 효과가 큰 Al 등과 약간의 효과가 있는 Sn 등의 침입형 원소(비천이원소)가 있으며, β 상을 안정화시키는 원소는 일반적으로 천이금속과 귀금속 등이 있다. 이와 같은 α 상과 β 상 안정화 원소의 첨가량이 증가하면 $\alpha + \beta$ 상이 상온에서 공존하게 된다.⁴⁾ 내식성은 백금과 유사하고 인체와 친화성이 좋고 충격 흡수율 및 진동 감쇄율이 아주 높다는 장점이 있다. 비교적 우수한 내식성은 표면에 형성된 치밀하고 안정된 TiO나 TiO₂ 등의 산화물 피막 때문이다.

Ti재료를 사용하는 열교환기는 내식성이 좋고, 가볍고 강하기 때문에 두께가 얇은 박육관(薄肉管)사용으로 경량, 소형 설계가 가능하며, 표면 품질이 일정하여 장기간 사용하더라도 열교환율이 거의 변하지 않고, 부식으로 인한 고장이 적어 장기간 사용이 가능하고, 산성, 유화수소, 유황, 탄산수소염, 유산염, 염화물 및 탄산 가스 등에 대해서도

내식성이 크며, 인체에 무해하고 수질도 변질시키지 않으므로 온천물 등을 적당한 온도로 가열, 냉각시키는 곳에도 적합하다.⁵⁾ 이러한 장점을 활용하여 영국에서는 티탄 전열관을 두께 1.0mm 이상의 압출-인발관이, 미국에서는 0.7mm 이상의 용접관을 개발하여 사용하고 있으나 일본에서는 가격의 저렴화, 전열효율이 크다는 점 등의 이유로 용접 티탄관의 박육화 연구가 진행되고 있다. 실제로 일본에서는 발전소의 복수기에 두께 0.3mm 티탄관을 15년 사용 후 조사한 결과 부식 발생이 거의 없었고 Al관과 황동관에 비해 내식성, 열효율이 우수하다고 보고되었으며⁶⁾, 발전소용 전열관으로 두께 0.5mm 티탄관을 사용한 결과 12년이 경과되어도 부식으로 인한 사고는 없다는 보고 등으로 볼 때 부식, 침식, 해수오염, 환경오염이 거의 없다고 볼 수 있다. 이런 점에서 유지비가 적게드는 큰 장점이 있다.^{7,8,9)}

이와 같은 많은 장점에도 불구하고 열전도계수가 적고, 성형가공이 어려우며, 재료의 가격이 고가인 점 때문에 비교적 사용이 제한되어 왔으나 열전도성의 문제와 소재 가격의 문제는 박육화함으로써, 가공 문제는 성형기술의 개발에 따라서 사용량이 증가되고 있는 실정이다. 그러나 모재의 경우는 높은 내식성을 가진다고 하나 압연이나 인발 등의 성형가공시에 잔류응력이 존재하게 되면 내식성은 크게 변하게 될 것이다. 이런 점을 고려하여 이 연구에서는 잔류응력을 제거하는 어닐링 열처리가 내식성에 미치는 영향을 양분극곡선과 왕복(cyclic) 분극곡선으로 분석하고자 한다. 어닐링 열처리는 650, 700 및 750°C에서 각각 30분 1시간 및 2시간을 진공분위기에서 실시하였으며 이러한 어닐링 열처리가 재료의 부식에 미치는 영향을 전기화학적 방법으로 시험하여 가장 내식성이 좋은 온도와 시간을 규명하고자 한다.

2. 재료 및 실험 방법

2-1. 실험 재료 및 시편 형상

이 시험에 사용한 재료는 ASTM B 348에 해당하는 Ti(Grade 2)재로서 화학적 성분과 ASTM 규

Table 1. Chemical compositions of specimen(wt %)

Element wt %	C	Fe	H	N	O	Ti
Specimen	0.01	0.06	0.0011	0.004	0.015	99.91
ASTM Specification(Max)	0.1	0.3	0.015	0.03	0.25	99.2

Table 2. Mechanical properties of specimen.

Mechanical Property	Ultimate Tensile Strength (MPa)	0.2% Proof Strength (MPa)	Elongation %	Reduction in Area%	Density
	specimen	415	307	42	
ASTM specification	Min. 345	Min. 275	Min. 20	Min. 35	4.51

격은¹⁰⁾ Table 1과 같다.

이 시험재는 인발 가공된 직경 15mm x 길이 2,000mm로 기계적 성질은 Table 2와 같다.

시험편을 열처리 및 전기화학적 시험을 위하여 직경 15mm, 높이 10mm의 실린더형으로 절삭 가공하고 시편 표면을 220, 400, 600, 800, 1,000, 1,500번 사포지로 연마하였으며 최종 0.25 μ m 입자의 diamond paste로 연마하였다. 부식시험편은 입수한 그대로인 모재와 이 모재를 $\alpha \leftrightarrow \beta$ 의 변태 온도보다 50 $^{\circ}$ C가 높은 930 $^{\circ}$ C에서 2시간 용체화 열처리하였으며 분위기에 따른 부식 거동 차이를 살펴보기 위하여 같은 온도에서 공기중과 진공분위기에서 열처리하였다. 모재를 어닐링하였을 때 부식에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 모재를 650 $^{\circ}$ C, 700 $^{\circ}$ C 및 750 $^{\circ}$ C에서 각각 30분, 1시간 및 2시간씩 진공중에서 어닐링 열처리를 실시하였다.

2 - 2. 시험 및 분석

전기화학적 분극곡선은 이 재료를 해수에 사용할 것을 고려하여 3.5% NaCl 부식 용액을 사용하였다. 시험 전 30분 이상 아르곤 가스를 통과시켜 용존산소를 탈기하였으며 용액의 온도는 25 \pm 1 $^{\circ}$ C로 하였다. 전기화학적 분극곡선 측정은 Gamry사의 CMS-100을 사용하였으며, 양분극곡선은 -700 mV에서 +1,500 mV까지 정전위로 주사하였으며 왕복(cyclic) 분극곡선은 시험 용액에서 1시간 정도 피막을 안정시킨 후 -700 mV에서 +1,500 mV까지 분

극 후 역으로 -700 mV까지 주사하였다. 기준전극은 포화칼로멜을 사용하였으며, 전위주사(scan) 속도는 ASTM에서 규정한 바와 같이 0.17 mV/sec (600 mV/hour)로 주사하였다. 부식시험 후 SEM(Hitachi S-2150)과 금속현미경(Meiji MLT형)을 사용하여 표면의 부식상태, 공식 및 부식이 발생한 상태를 분석하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3-1. 양극 분극특성

3-1-1. 모재와 용체화 열처리한 시편의 분극특성
3.5% NaCl 용액에서 모재와, 930 $^{\circ}$ C에서 공기중과 진공중에서 2시간 용체화 열처리한 시편의 분극특성은 Fig. 1과 같다.

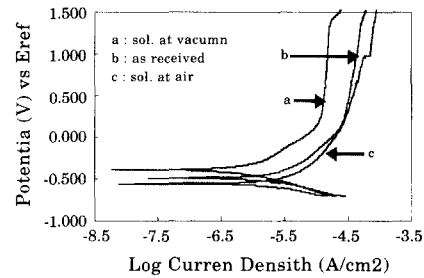


Fig. 1 Potentiodynamic polarization curve for Ti(grade 2) base metal and solution heat treated under 930 $^{\circ}$ C 2 hours at vacuum and air, in 3.5% NaCl Media.

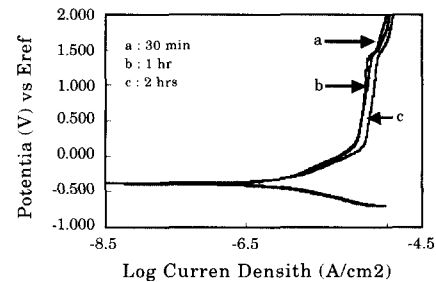


Fig. 2 Potentiodynamic polarization curve for Ti(grade 2) metal, annealed at 650 $^{\circ}$ C 30min., 1hour and 2hours at vacuum, in 3.5% NaCl Media.

3-1-2. 650℃에서 어닐링한 시편의 분극특성
3.5% NaCl 용액에서 모재를 650℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 시편에 대한 분극특성은 Fig. 2와 같다.

3-1-3. 700℃에서 어닐링한 시편의 분극특성
모재를 700℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 시편의 분극특성은 Fig. 3과 같다.

3-1-4. 750℃에서 어닐링한 시편의 분극특성
모재를 750℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 시편의 분극곡선은 Fig.4와 같다.

3.5% NaCl 용액에서 실험한 Fig.1-4의 분극곡선에서 부식전류 (이하: E_{cor})와 부식전류 (이하: i_{cor}) 값을 구하면 Table 3과 같다.

Table 3에서 모재의 E_{cor} 은 -535.7mV이고 이 재료를 진공중에서 2시간 930℃에서 열처리하면

Table 3. The result of potentiodynamic polarization in a 3.5% NaCl media.

	Heating Time	E_{cor} (SCE:mV)	i_{cor} (μ A)	
base Metal		-535.7	15.71	
sol. at Vacuum	2hours	-348.7	2.32	
	sol in Air	2hours	-567.1	14.62
	30min.	-359.3	5.98	
annealin at 650℃	1hour	-368.7	6.43	
	2hours	-372.2	8.42	

	Heating Time	E_{cor} (SCE:mV)	i_{cor} (μ A)
annealing at 700℃	30min.	-360.7	3.64
	1hour	-426.0	4.52
	2hours	-460.0	9.45
annealing at 750℃	30min.	-456.1	13.63
	1hour	-475.7	16.73
	2hours	-510.9	18.21

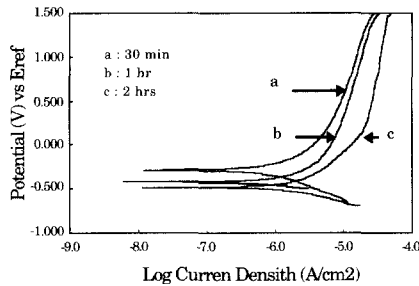


Fig.3 Potentiodynamic polarization curve for Ti(grade 2) metal, annealed at 700℃ 30min., 1hour and 2hrs at vacuum, in 3.5% NaCl Media.

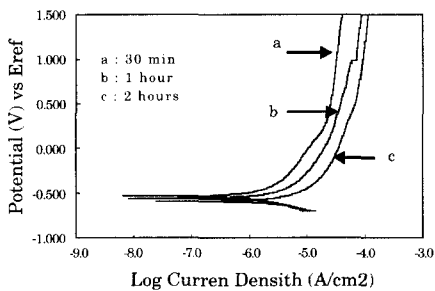


Fig.4 Potentiodynamic polarization curve for Ti(grade 2) metal, annealed at 750℃ 30min., 1hour and 2hrs at vacuum, in 3.5% NaCl Media.

E_{cor} 이 -348.7mV로 상승하며 공기중에서 같은 온도에서 열처리하면 E_{cor} 이 -567.1mV로 낮아진다. 따라서 용체화 열처리하면 내식성이 높아지면서 E_{cor} 은 높을 것으로 예상하였으나 공기중에서 용체화 열처리하면 오히려 모재보다 낮아졌다. i_{cor} 을 살펴보면 모재의 경우 15.71 μ A, 930℃에서 진공중에서 용체화 열처리하면 2.32 μ A 및 공기중에서 같은 온도와 시간에서 열처리한 경우 22.62 μ A로 나타났다. 이 측정된 값을 부식속도 계산식 $mmy = 3.268(Mi/dn)$ (여기에서 M: 물질량, i: 부식전류 밀도, d: 금속의 밀도, n: 금속의 원자가)에서 알 수 있는 바와 같이 i_{cor} 에 비례하여 부식이 발생한다. 650℃에서 30분과 2시간 동안 열처리한 시편에서는 시간이 증가할수록 E_{cor} 이 -359.3에서 -372.2로 감소하고 700℃에서는 -360.7에서 -460.0mV로, 750℃에서는 -456.1에서 -510.9mV로 모두 시간이 경과할수록 E_{cor} 은 감소하였다. 한편 30분과 2시간 어닐링한 시편에서 i_{cor} 은 5.98 및 8.42 μ A, 700℃에서는 3.64 및 9.45, 750℃에서는 13.03 및 18.21 μ A로 모두 열처리 시간이 길어질수록 그 값이 증가하였다. 이때 E_{cor} 과 i_{corr} 을 고찰 할 때 700℃ 30분의 경우가 내식성이 가장 높았다. 이 이유는 Photo. 1과 Photo. 2에서와 같이 현미경 조직에서 열처리

시간이 경과할수록 입열량이 증가함에 따라서 결정립의 크기는 증가하며 가열온도와 시간에 따른 평균 결정립 직경은 $D = kt^n$ (k:온도의 변화에 따른 상수, t:가열 시간, n:상수)으로 변화한다고 Miller¹¹⁾가 보고한 바가 있다. 즉, 가열 온도와 가열 시간이 증가할수록 결정립의 크기가 증가한다. 또한 가열온도가 높아지고 가열시간이 길어질수록 구성 성분 원소의 확산에 필요한 에너지가 증가되며 이러한 결과로 Photo.2에서 보는 바와 같이 입계와 입내의 성분적 또는 형태의 차이가 부식이 발생하는 원인이 되는 것으로 판단된다.

Photo. 1은 구입한 모재의 분극후 표면사진으로서 표면에 약간의 부식이 발생하였으며 930℃에서 2시간 용체화 열처리한 시편 표면은 부식이 거의 없는 평활한 모양으로 나타났으나 공기중에서 같은 온도와 시간동안 열처리한 Photo.2의 시편에서는 결정립계 등에서 심하게 부식이 발생한 것을

확인 할 수 있었다. 공기중에서 용체화한 시편에서 부식이 심하게 발생하는 현상에 대해서 Mazhar¹²⁾와 Kim 등¹³⁾이 밝힌 바와 같이 일반적으로 T_1 는 표면에 부동태 피막이 형성되어 내식성이 높은 것으로 발표되고 있으나 초기에 형성되는 피막은 Ti_2O_3 성분으로서 모재와 밀착성이 높고 압축응력이 발생되나 고온에서 장기간 노출되면 피막의 두께가 증가하면서 계속적으로 압축되어 결과적으로 피막의 내부는 높은 응력으로 파괴가 일어나며 실제로 이 실험의 열처리 과정중에 형성된 백색 피막은 0.1mm정도로 두꺼웠다. 이렇게 피막이 파괴되면 파괴된 피막의 틈사이로 NaCl 성분중 특히 Cl-이 침투하여 부식이 심하게 증가되어 E_{cor} 을 감소시키고 i_{cor} 을 증가시키게 된다고 판단된다.

3-2. 왕복(cyclic) 분극특성

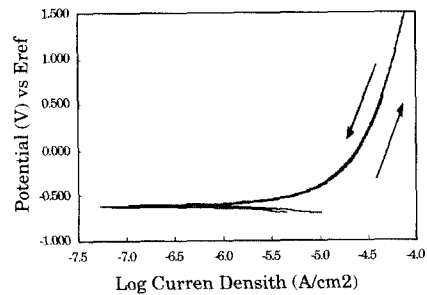
3-2-1. 모재와 용체화 열처리한 시편의cyclic 분극특성



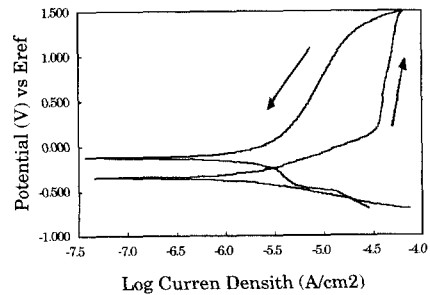
Photo. 1. Surface of base metal, afterpolarization.



Photo. 2. Surface of solution treated in air, after polarization.



a) solutionized at vacuum



b) solutionized at air

Fig. 5 Cyclic polarization curve for base metal: solution heat treated at 930℃2hours at a) at vacuum and b) at air for Ti(grade 2) in 3.5% NaCl Media.

3.5% NaCl 용액에서 모재와 930℃에서 공기중과 진공중에서 2시간 용체화 열처리한 시편의 왕복(cyclic) 분극특성은 Fig. 5와 같으며 정방향 주사와 역방향 주사에서의 전하의 차이는 a)진공중 0.00065쿨롱이고 b)의 공기중은 0.0212쿨롱이다.

3-2-2. 650℃에서 어닐링한 시편의 cyclic 분극특성

모재를 650℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 시편의 cyclic 분극특성은 Fig. 6과 같으며 정방향 주사와 역방향 주사에서의 측정된 전하의 차이는 a)30분의 경우는 0.00231쿨롱 b)의 2시간은 0.012쿨롱이다.

3-2-3. 700℃에서 어닐링한 시편의 cyclic 분극특성

모재를 700℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 시편의 cyclic 분극특성은 Fig. 7과 같으며 정방향 주사와 역방향 주사에서의 측정된 전하의 차이는 a)30분의 경우는 0.00105쿨롱이고 b)의 2시간의 경우는 0.00685쿨롱으로 나타났다.

3-2-4. 750℃에서 어닐링한 시편의 분극특성

모재를 750℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 시편의 분극특성은 Fig. 8과 같으며 정방향 주사와 역방향 주사에서의 측정된 전하의 차이는 a)의 30분의 경우는 0.00628쿨롱, b)의 2시간의 경우는 0.01633쿨롱이다.

ASTM G5-87의 recommend¹¹⁾에 따른 주사속도를 0.17mV/s 주사속도와 여러 논문에서 왕복

(cyclic) 분극실험의 효용성을 활용하고 있으며¹⁴⁻²⁰⁾ 본 연구에서도 이 방법을 이용한 실험 결과 Fig.5-8에서 전하 즉 전류(i) x 시간(t)을 계측하면 Table 4와 같다.

Table 4에서 살펴보면 모재의 경우 0.00465, 진공중에서 2시간 용체화 한 경우 0.00065, 공기중에서는 0.02140쿨롱으로, 650℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 경우 0.00231, 0.00481 및 0.0120쿨롱으로, 700℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 경우 0.00105, 0.00223 및 0.00685쿨롱으로, 750℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리한 경우 0.00628, 0.00758 및 0.01633 쿨롱으로 나타났다. 이러한 전하량의 측정에서 정방향주사와 역방향 주사를 할 때 전하의 차이는 피막의 안정성과 관계하며 피막이 안정한 경우 즉 내식성이 높은 경우는 그 차이가 적으며 피막이 불안정할수록 금속이온의 용출에 따른 전하량이 크게된다고 보고된 바 있다¹⁶⁾. 이러한 전하의 측정 결과를 살펴보면 각 온도에서 30분 어닐링 할 경우 700℃가 0.00105쿨롱으로 가장 낮았다. 한편 어닐링 시간이 30분, 1시간, 2시간으로 길어질수록 측정된 전하 값이 증가하였다. 이와같이 650에서 700 및 750℃로 온도가 증가하면 Arrhenius의 방정식 즉 $k = Ae^{E/RT}$ 에서 알 수 있는 바와 같이 온도 T가 상승하면 반응속도가 k가 증가하여 응력완화는 지수적으로 커지게 되지만 온

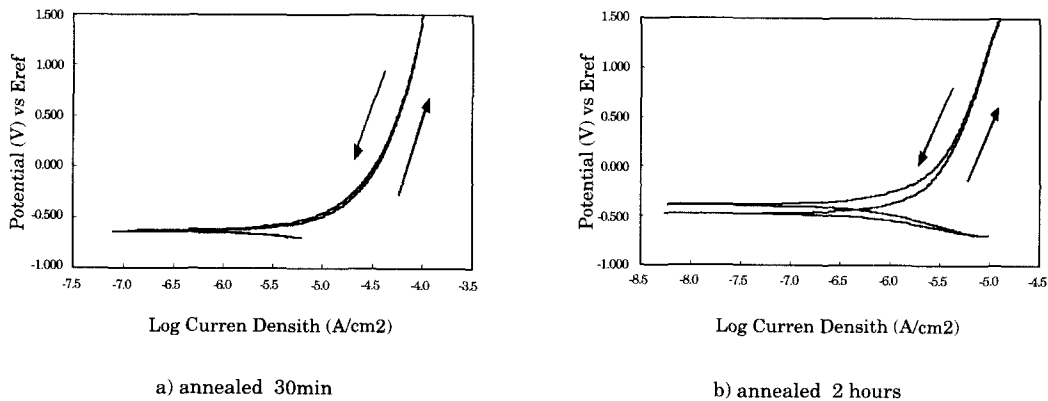
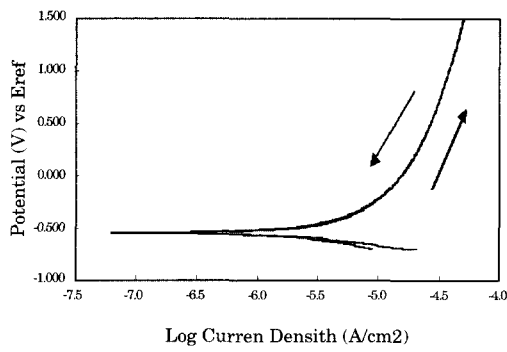
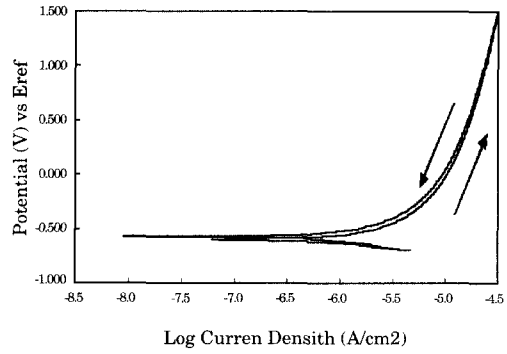


Fig. 6 Cyclic polarization curve for annealing heated at 650℃ 30min. and 2hours for Ti (grade 2) in 3.5% NaCl Media.

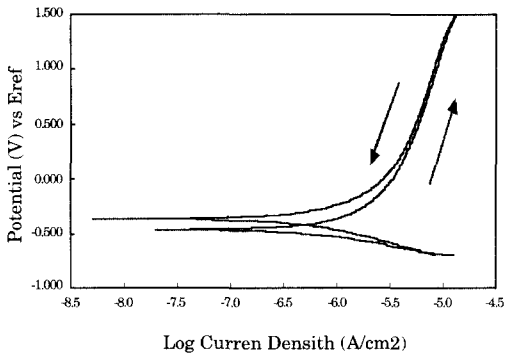


a) annealed 30min.

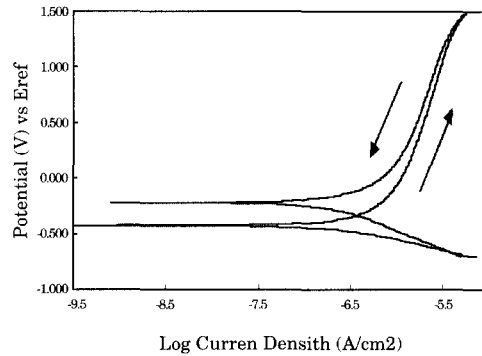


b) annealed 2 hours

Fig. 7 Cyclic polarization curve for annealing heated at 700°C 30min. and 2hours for Ti (grade 2) in 3.5% NaCl Media.



a) annealed 30min.



b) annealed 2 hours

Fig. 8 Cyclic polarization curve for annealing heated at 750°C 30min. and 2hours for Ti (grade 2) in 3.5% NaCl Media.

Table 4. Cyclic polarization result for charge(coulomb) in 3.5% NaCl media.

Material	Heating Time	Coulomb	Material	Heating Time	Coulomb
base Metal		0.00465	annealing	30min.	0.00105
sol. at Vacuum	2hours	0.00065	at 700°C	1hour	0.00223
sol. in Air	2hours	0.02140		2hours	0.00685
	30min.	0.00231	annealing	30min.	0.00 628
annealing	1hour	0.00481		1hour	0.00758
at 650°C	2hours	0.01200	at 750°C	2hours	0.01633

도가 너무 높은 750℃에서는 앞의 Photo 2에서 살펴본 바와 같이 결정립의 경계가 성장하면서 결정립계가 불안정해지며, 같은 온도에서 어닐링 열처리 시간이 30분에서 1시간 2시간으로 증가하면 더욱더 이런 현상은 심해진다. 따라서 결정성장과 입열량을 고려할 때 700℃ 30분의 경우가 피막이 가장 안정하게 되며, 가장 양호한 내식성을 나타내는 열처리의 온도와 시간은 700℃에서 30분으로 나타난다. 이러한 경향은 Fig.1-2와 Table 3의 분극곡선 실험과 비슷하게 나타나며, 왕복분극곡선 측정으로 피막의 안정성을 전하값으로 측정하여 이들을 수치화 할 수 있었다.

4. 결 론

Ti(Grade 2)재를 압연이나 인발 등의 기계가공을 하면 재료 내부에 잔류 응력이 발생하며 이러한 잔류 응력은 내식성을 감소시키게 된다. 본 실험에서는 내식성 향상을 위한 가장 적합한 어닐링 열처리 온도와 시간을 결정하기 위하여 650, 700 및 750℃와 30분, 1시간 및 2시간으로 온도와 시간을 변화시키면서 3.5% NaCl 용액에서 양극분극과 왕복(cyclic) 분극실험을 하였다. 실험 결과 모재의 경우에 비하여 930℃에서 진공중 어닐링한 시편이 부식전류, 부식전위 및 왕복 분극곡선측정에서 부식이 가장 적었으며, 930℃에서 공기중 용체화 열처리를 실시하면 오히려 부식이 많았다. 모재의 경우는 진공중과 공기중에서 용체화 열처리한 사이의 경향을 나타냈다. 가장 적당한 어닐링 열처리 온도와 시간은 700℃에서 30분으로 나타났으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 930℃에서 진공중과 공기중에서 2시간씩 용체화 열처리한 재료의 양분극곡선에서 부식전위(E_{cor})는 각각 -348.7과 -567.1mV로 진공중에서 열처리하면 약간 전위가 상승하며, 부식전류밀도(i_{cor})는 2.32와 22.62 μ A로 진공중의 경우가 아주 낮았다.

2. 650, 700 및 750℃에서 30분, 1시간 및 2시간 어닐링 열처리 한 경우 시간이 길어질수록 부식전위는 감소하고 부식전류밀도는 증가하였다.

3. 왕복(cyclic) 분극곡선에서 진공중과 공기중에서 2시간씩 용체화 열처리한 경우 측정 전하는

0.0065 및 0.00214 쿨롱이었으며, 600, 700 및 750℃로 온도를 올리면서 시간을 30분, 1시간 및 2시간으로 증가시킨 결과 700℃ 30분의 경우가 0.00105 쿨롱으로 가장 낮았다.

References

1. 草道英武, 日本金屬學會誌, vol.61, no.4, pp. 27 - 37, 1991.
2. E.W. Collings, Titanium Alloys, ASM series, pp. 39-88, 1984.
3. 杉崎康昭, 日本金屬學會誌, vol. 65, no. 1, pp. 76 - 78, 1995.
4. 古原忠, 牧正志, 日本金屬學會誌, vol. 66, no. 4, pp. 287 - 296, 1996.
5. 村瀬系三, 日本金屬學會誌, vol. 66, no. 8, pp. 72 - 723, 1996.
6. 草道英武, 日本金屬學會誌, vol. 64, no. 7, pp. 32 - 33, 1994.
7. 草道英武, 日本金屬學會誌, vol. 64, no. 7 pp. 36 - 37, 1994
8. R. W. Schutz and D. E. Thomas, ASM Metals Handbook 1987.
9. D. Eylon, Met. Soc. AIME, 1981.
10. ASM Committee, "Metal Handbook 9th ed.," vol. 3, p. 372, 1980.
11. O. O. Miller, Metal Trans, A.S.M. vol. 43, p. 260, 1951.
12. A. A. Mazhar and A. G. Allah, Corrosion, vol. 45, no. 5, pp. 381-386, 1988.
13. Kim Kee-Joo et al., J. of Corros. Sci. of Korea, vol. 25, no. 1, pp. 89-99, 1996.
14. P. McKay and D.B. Miton, Corrosion, vol. 41, no. 1, pp. 52 - 62, 1985.
15. S. Zhou, A. Turnbull, British Corrosion Jr. vol. 35, no. 2, pp. 120-124, 2000.
16. Horoji, Nakauchi, Corrosion Protection, vol. 9, pp. 331-343, 1992.
17. 白新榮, 韓國船舶用機關學會誌, vol. 24, no. 6, pp. 742-749, 2000.
18. P. McKay, D. B. Miton, Corrosion, vol. 41, no. 1, pp. 52-62, 1985.
19. S. Frangini and A. Mignone, Corrosion, vol. 48, no. 9, pp. 715-726, 1992.

20. ASTM Designation G61-86, Annual Book of ASTM Standard, pp. 229-233, 1993.

저 자 소 개



백신열 (伯新榮)

1951년 4월생. 1975년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 금속공학(석사). 1991년 전남대학교 대학원 금속공학 졸업(박사). 1985년~현재 목포해양대학교 교수.