해수 환경하에서 알루미늄합금(5083F)의 외부전원법에 의한 최적 방식전위 결정에 관한 연구

김성종^{a*}, 김정일^a, 김종신^b

^a목포해양대학교, ^b한국선급

Investigation on Optimum Protection Potential Decision of Al Alloy (5083F) in Sea Water by Impressed Current Cathodic Protection

Kim Seong-Jong^{a*}, Kim Jeong-Il^a, Kim Jong-Shin^b

^aDivision of Marine System Engineering, Mokpo Maritime University

^bKorea Register

(Received November 22, 2007 ; accepted December 27, 2007)

Abstract

Recently, there has been a new appreciation of aluminum alloys as materials that are capable of reducing the environment load. This is because aluminum alloys are lightweight, easy to recycle, permit miniaturization, and have environmental friendly properties. In this study, we investigated the mechanical and electrochemical properties of 5083F aluminum alloys using slow strain rate test(SSRT) and potentiostatic tests under various potential conditions. In the potentiostatic tests, the current density in the potential range from -0.7 to -1.4 V after 1,200 s was low. After considering the results of the potentiostatic tests, maximum tensile strength, yield strength, elongation, time-to-fracture, observation of fractured specimen and fractography analysis, the optimum protection potential range was between -1.3 and -0.7 V (Ag/AgCl).

Keywords: Aluminum alloys, Slow strain rate test, Electrochemical property, Hydrogen embrittlement, Stress corrosion cracking, Optimum protection potential

1. 서 언

최근 국내외적으로 환경규제가 강화되면서 소형선의 경우 FRP선의 폐선처리가 문제시되면서 알루미늄 선박에 대한 관심이 고조되고 있다. 알루미늄선은 철강재 등 여러 재료에 비해 비강도가 높아 경량화에 의해 고속화가 가능하며, 추진용 연료의 절감, 높은 내식성에 의한 유지 보수가 용이, 폐선시 재활용이 가능하여 환경친화적이므로 이에 대한 관심이 집중되고 있다. 또한 알루미늄선은 FRP선과 목선에 비하여 레이더파를 반사시키는 강도가 강하기 때문에 충돌에 의한 해난사고를 크게 줄일 수 있을 것으로 기대되며, 그에 따른 화물 손상 및

환경오염까지 고려한다면 그 막대한 손실을 예방 또는 절감할 수 있을 것으로 판단된다^{1,2)}. 유럽, 호주 그리고 일본 등의 선진국은 이미 수 십년 전부터 자원의 재활용을 통한 환경문제에 적극적으로 대처하고자 관공선을 비롯한 어선에 이르기까지 소형선박을 알루미늄제로 건조할 것을 적극 권장하고 있으며, 일본의 경우 1950년대부터 건조하여 최대 해상보안청의 180톤급 순시선 건조, 알루미늄제 관공선은 100여척, 어선은 3000여척에 달하며, 매년 지속적으로 증가하는 추세이며, 알루미늄의 선형, 건조공법, 용접시공법 개발 등의 관련 연구가 활발하게 진행 중이다³⁾. 또한 우리나라는 반도국가로서 수천 개의 섬을 가지고 있는 국가이며, 또한 주 5일 근무제 도입으로 인하여 레저 보트, 레저 요트 등을 이용한 여가 선용 측면에서도 알루미늄 선박에

*Corresponding author. E-mail : ksj@mmu.ac.kr

사용되는 재료의 개발은 아주 중요한 문제라고 사
료되며, 도색방향이 많으므로 해양관광산업 활성화
에 기인한 해양스포츠, 어업지도선, 해양 경찰선, 탐
사선 및 순시선 건조 가능성이 높다고 할 수 있다.
알루미늄은 강선에 비하여 부식에 대한 저항성은
강할지라도 방식 시스템 적용도 대단히 중요하다^{4,5)}.

따라서 본 연구에서는 외부전원법을 이용하여 방
식을 실시하였을 경우, 해수환경 하에서 저변형을
인장 시험을 실시하여 응력부식균열이나 수소취화
의 영향이 없는 최적의 방식전위를 결정하고자 한다.

2. 시험편 및 실험 방법

본 실험에 사용된 재료는 선박용 재료로 사용되
는 5000계열 중 5083F 합금을 주재료로 선택하였
다. 일반적으로 5000계열은 Mg을 주첨가 성분으로
한 강도가 높은 합금이며, 용접성이 양호하며, 해수
분위기에서도 내식성이 좋으므로 해양구조물이나
압력용기 등에 많이 사용⁶⁾되는데 본 연구에서는
5083F를 선택하였으며, 그 화학적 조성과 기계적
특성은 표 1과 같다. 정전위 실험용 시험편은 에머
리 페이퍼 600번까지 연마한 후 아세톤과 증류수
로 세척하여 드라이로 건조한 시험편을 사용하였
다. 시험편은 1 cm²만 노출시킨 시험편을 사용하였으며,
기준전극으로 은/염화은 전극(SSCE)을, 대극은 백
금전극을 사용하여 상온의 천연해수 용액조건에서
양분극과 음분극시킨 상태에서 일정전위를 유지한
후 1,200초 동안 실시하여 실험 종료 후의 전류밀
도를 각 조건별로 비교하여 평가하였다. 저변형을

인장 시험은 천연해수 용액내에서 시험편을 침적시킨
후 양분극과 음분극 상태에서 일정 전위를 유지하
면서 상온에서 0.001 mm/min의 인장 속도로 실시
하였으며, 이 때 사용된 시험편의 형상은 그림 1과
같다. 인장시험편 평행부에 노치를 가공하였는데 이
는 알루미늄의 경우 연성이 풍부한 재료이므로 경
우에 따라 어깨 부위에서도 연신이 계속 진행되어
정확한 연신율을 측정하기 어렵기 때문에 노치부
에서 파단을 유도하기 위하여 가공하였다. 또한 파단
시험편의 형상을 관찰하였으며, 파단면은 주사전자현
미경을 사용하여 분석하였다.

3. 시험결과 및 고찰

그림 2는 양분극과 음분극시킨 전위에서 정전위
실험을 1,200초 동안 실시하여 1200초 후의 전류밀
도를 상호 비교한 그래프이다. 실험을 여러차례 실
시하였으며 검은 원은 각 조건에서의 평균을 나타
내고 있다. -1.4 V~-0.7 V 사이의 전위 영역에서는
낮은 전류밀도를 나타냈기 때문에 방식전위 영역으
로 사료되며, 이보다 양분극을 더 시킨 전위에서 정
전위 실험을 실시하였을 경우는 전위 상승에 따라
꾸준히 전류밀도가 상승하는 경향을 관찰할 수 있
었으며, 비방향으로 조금 더 음분극을 시킨 전위에
서는 원자성 수소의 영향으로 전류밀도가 조금 상
승하였으며, 이보다 더 비방향으로 이행하여 실시
하였을 경우에는 분자성 수소의 영향으로 전류밀도
가 크게 상승하였음을 알 수 있었다. 따라서 방식
전위를 기준으로 양분극시킨 경우는 응력부식균열

Table 1. Chemical composition and mechanical properties for 5083F

(a) Chemical composition(%)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
5083F	0.090	0.289	0.018	0.589	4.449	0.076	0.005	0.009	Balance

(b) Mechanical properties			
	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation(%)
5083F	319.2	154.8	23.7

Fig. 1. Schematic diagram of specimen for slow strain rate test.

Fig. 2. Comparison of current density after potentiostatic experiment for 1200 s at various polarization potential in natural sea water solution.

의 위험성이 있으며, 음분극 시킨 경우는 원자성 수소나 분자성 수소의 영향으로 수소취화의 영향이 있을 것으로 판단된다. 전 연구⁷⁾에서 1050, 5456 그리고 7075 합금에 대하여 정전위 실험을 실시한 결과 1,200초 후의 전류밀도가 거의 0에 가깝게 생각했던 부위에서도 차이가 많이 있음을 확인 할 수 있었는데 전체적으로 7075의 경우가 가장 높은 전류밀도를 나타냈다. 그리고 5456의 경우가 낮게 나타났으며, 특히 $-0.72 \sim -0.90$ V에서는 아주 낮게 나타났으므로 최적의 방식전위 영역임을 밝힌 바 있다. 영국의 음극방식 기준 전위(CP 1021)에 따르면 알루미늄의 방식전위는 $-0.85 \sim -1.1$ V(SSCE)이며, 알루미늄 합금의 경우 자연전위보다 0.15 V 음분극 시키면 공식이 방지된다⁸⁾는 내용이 있는데 본 실험에서 자연전위 측정 결과, $-0.80 \sim -0.75$ V 정도이며, 가장 낮은 전류밀도를 보인 전위는 $-0.7 \sim -1.4$ V이므로 문헌과 일치한 결과를 얻을 수 있었다. 다음은 저변형을 인장 시험을 실시하여 응력부식 균열

Fig. 3. Effects of applied potential for maximum tensile strength after SSRT for 5083F in natural sea water.

과 수소취화 특성을 고찰하고자 한다. 정전위 저변형을 인장 시험을 실행하기 위해서는 전위를 결정하는 것이 대단히 중요하기 때문에 응력부식균열 영역, 수소취화 영역 그리고 방식영역 등으로 나누어 실시해야 한다.

그림 3은 해수용액 하에서 저변형을 인장시험을 실시한 경우, 최대인장강도와 각 적용전위와의 관계를 나타낸 그래프이다. 먼저 그림 2에서 해수용액 하에서 응력부식균열과 수소취화에 관한 정전위 시험에서 응력부식균열과 수소취화를 발생하지 않는 최적의 방식전위는 $-1.4 \sim -0.7$ V임을 규명하였으므로 이보다 넓은 $-1.8 \sim -0.5$ V의 전위범위에서 정전위 저변형을 인장 시험을 실시하였다. 그 결과 최적의 방식전위로 규명한 영역에서 최대인장 강도는 높게 나타났으며, -0.7 V에서 가장 높은 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 방식영역 중 -0.8 V에서는 가장 낮은 값을 나타냈는데 그 이유는 자연전위의 범위에 가깝기 때문에 해수환경 하에서 염소이온등의 침입에 의한 공식등과 같은 현상에 기인한 것으로 판단된다. 또한 전기화학적 실험을 통해서도 알 수 있듯이 최적방식영역보다 음분극을 더 시키면 원자성 수소나 분자성 수소로 인하여 수소취화 현상이 관찰되었으며, 양분극을 더 시키면 응력부식균열에 인하여 전류밀도가 급격히 상승하였음을 고찰한 바 있다⁹⁻¹⁴⁾. 그와 마찬가지로 저변형을 인장 시험 결과 최대인장강도도 최적 방식전위영역보다 음분극과 양분극을 더 시킨 상태에서 실험을 실시하면 최대인장 값이 급격히 저하하는 현상을 관찰할 수 있었다.

그림 4는 해수용액 하에서 저변형을 인장시험을 실시한 경우 항복강도와 각 적용전위와의 관계를 나타낸 그래프이다. 항복강도 중 가장 높은 값을 나

Fig. 4. Effects of applied potential for yield strength after SSRT for 5083F in natural sea water.

Fig. 6. Effects of applied potential for time-to-fracture after SSRT for 5083F in natural sea water.

타낸 적용 전위는 최대인장강도와 마찬가지로 -0.7 V로 나타났다. 전체적인 경향은 -0.7 V에서 비방향으로 이행할수록 큰 변화없이 완만한 값을 나타낸 반면 양분극 더 시켜 실시할 경우 급격한 저하를 관찰할 수 있었다. 해양 환경 하에서 고장력강의 수소취화에 관한 연구에서는 최대인장강도와 항복강도는 인가전위, 용접방법 그리고 용접후열처리 유무에 따라 특별한 상관관계를 나타내지 않았다¹⁵⁻¹⁹). 그러나 알루미늄 합금(5456)의 경우¹⁹)는 최대인장강도는 인가전위와의 상관관계가 관찰된 반면 항복강도는 인가 전위에 따라 특별한 상관관계가 관찰되지 않았는데 5083F 합금의 경우도 유사한 거동을 보여 주었다.

그림 5는 해수용액 하에서 저변형을 인장시험을 실시한 경우 연신율과 각 적용전위와의 관계를 나타낸 그래프이다. 최대인장강도와 적용전위와의 관계에 관하여 고찰한 바와 같이 최적 방식전위 영역

Fig. 5. Effects of applied potential for elongation after SSRT for 5083F in natural sea water.

에서 양호한 값을 나타냈으며, 음분극을 더 시킨 상태에서 저변형을 인장시험을 실시한 경우 음분극쪽으로 이행할수록 원자성 수소와 분자성 수소로 인하여 수소취화 현상에 의하여 연신을 저하 현상이 관찰되었다. 한편 양분극을 더 시킨 상태에서는 금속표면의 용해반응, 즉 용력부식균열의 증가로 인하여 짧은 연신율을 나타냈다.

그림 6은 해수용액 하에서 저변형을 인장시험을 실시한 경우 파단 시간과 각 적용전위와의 관계를 나타낸 그래프이다. 파단 시간은 연신율이 증가할수록 증가하는 경향이 일치하였다. 이는 연성이 증대할수록 연신율이 증대되며, 또한 연성의 증대는 파단면의 양상이 뒤편형이며, 쉬어립(Shear lip)이 많이 발생하여 파단 시간이 증가하게 된다. 특히 -0.7 V인 경우는 연신율과 파단시간이 긴 것으로 보아 최적의 음극방식 상태에 있으며, 또한 수소가스의 생성과 침입에 의한 수소취성과 금속의 용해반응을 동반하는 용력부식균열의 영향이 없는 것으로 판단된다. 고장력강 용접부 시편에 대하여 열영향부의 특성을 평가하기 위하여 열영향부에 노치를 가공하여 저변형을 인장시험을 실시한 경우, 노치부의 용력집중과 수소의 침입으로 인하여 수소취화 현상이 방식전위에 해당되는 영역에서 관찰되었다^{11,12,14,16,17,19}). 이는 노치를 가공하지 않는 부위보다 귀방향의 전위에서 수소취화 현상이 관찰되었다는 것을 의미한다. 따라서 구조물 설계 시 표면에 가수분해 현상에 기인한 크랙이나 용력집중의 영향으로 인하여 음극방식시 주의해야 할 것으로 판단된다.

그림 7~8은 5083F 알루미늄 합금에 대하여 열처리를 전혀 실시하지 않은 경우 여러 인가 전위 조건에 따라 저변형을 인장실험을 실시한 경우 파단

Fig. 7. Photographs of fractured specimen after SSRT at air and applied potential of -0.5 V ~ -1.0 V in natural sea water solution.

된 시험편을 보여 주고 있다. 공기중에서 해수의 영향을 전혀 받지 않은 조건으로 실시되었기 때문에 수소취화와 응력부식균열의 영향이 전혀 관찰되지 않았으며, 시험편도 아주 깨끗한 상태에서 파단되었다. -0.5 V 와 -0.6 V 는 용해반응에 의해 부식과 피팅이 동시에 발생하였으며, 특히 평행부 중앙에서 보다 많은 용해현상이 관찰되었다. 또한 -0.5 V 의 경우가 -0.6 V 에 비하여 보다 용해반응이 많이 발생하였는데 이는 양분극 곡선²⁰⁾에서도 높은 전류밀도를 나타냈기 때문에 용해반응이 진전된 것으로 사료된다. -1.3 V ~ -0.7 V 는 방식이 이뤄진 상태이기 때문에 대체적으로 깨끗한 상태를 유지하면서 파단되었으나, 최대인장강도, 연신을 그리고 파단시간이 낮게 나타난 -0.8 V 에서는 자연전위와 가장 가까운 전위로 약간 변색이 발생하면서 파단된 모습을 보여주고 있다. 또한 -1.4 V 에서는 전기화학적 측면에서는 방식전위에 해당되기는 하나 저변형

Fig. 8. Photographs of fractured specimen after SSRT at -1.25 V ~ -1.8 V in natural sea water solution.

을 인장 시험 분석결과, 대체적으로 낮아지는 단계의 기계적 특성을 보여준 전위인데 이는 시험 표면에 피팅에 기인한 것으로 사료된다. 이에 비해 -1.8 V ~ -1.6 V 에서는 방식시 시험 표면에 흰색 코팅의 형성을 볼 수 있다. 이는 해수중 음극방식을 적용하면 음극표면에는 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 나 CaCO_3 등의 전착물 (Electrodeposit film, Calcareous deposit)²¹⁻²⁵⁾이 석출된다. 이러한 CaCO_3 와 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 으로 이뤄진 피막은 내식성을 갖는 피막이나 -1.6 V 에서는 이러한 피막이 열게 형성되었으며, -1.7 V 에서는 두껍게 형성되었고, -1.8 V 에서는 오히려 피막이 얇게 형성된 것을 볼 수 있는데 이는 보다 많은 수소가스의 생성으로 전착물의 핵생성을 저지하기 때문으로 사료된다. 이러한 전착물은 내식성을 가지나 오히려 열악한 기계적, 전기화학적 특성을 보인 이유는 두껍고, 균일한 전착코팅을 형성하기 위한 시간이 부족하여 불균일한 전착코팅이 형성되기 때문에 오히

Fig. 9. Analysis of fractography after SSRT in Air, -0.5, -0.6 and -0.7 V of applied potential for 5083F.

려 수소가스 발생에 의한 영향이 크게 나타났기 때문이며, 전착코팅과 모재와의 틈부식 그리고 불균일한 코팅 형성으로 인한 마이크로 갈바닉 셀의 형성으로 인하여 양호한 기계적 특성을 갖지 못한 것으로 판단된다.

그림 9~그림 11은 5083F 알루미늄 합금에 대한 각 적용 전위에 따른 저변형을 인장 시험을 실시한 후 파단면 사진을 보여 주고 있다. 공기중(Air) 상태에서는 전체적으로 연성 파괴의 전형적인 형상인 덩플형 파면이 관찰되었으며, 부분적으로 준벽개형인 취성 파괴의 파단면이 관찰되었다. -0.5 V와 -0.6 V의 적용전위에서는 응력부식균열이 발생하는 영역으로 공기중인 상태와 거의 유사한 파단면의

형상이 관찰되었으나, 준벽개 파면의 형상이 더 많이 관찰되었다. -0.6 V인 경우는 -0.5 V에 비하여 취성파면의 형상이 많이 관찰되었으나 쉬어림이 많이 관찰되었기 때문에 양호한 기계적 특성을 보인 것으로 사료된다. -0.7 V에서는 기계적 특성이 가장 우수한 적용전위를 나타낸 것으로 타 전위에 비하여 덩플의 형상과 쉬어림이 전체적으로 많이 관찰되었기 때문에 연신율이 가장 높게 나타난 것으로 사료된다. -0.8 V인 경우는 방식전위에 해당되는 전위이기는 하나 자연전위에 가장 가까운 값으로 해수용액 내에 포함되어 있는 염소이온 등의 영향으로 취성적인 파단면이 나타났다. 그리고 -1.0 V~ -1.3 V 영역은 방식전위에 해당되는 구간으로 전

Fig. 10. Analysis of fractography after SSRT in -0.8, -1.0, -1.2 and -1.3 V of applied potential for 5083F.

체적으로 덩플형 파면과 쉬어립의 형상이 관찰되었다. 한편 -1.4 V~-1.8 V의 전위에서는 수소취성의 영향이 관찰되는 구간으로서 덩플형의 연성파면은 거의 관찰되지 않았다. 따라서 연신율과 파단시간이 짧게 나타난 것으로 판단된다.

표 2는 여러 실험 결과 중 최적의 조건인 것으로 판단되는 범위를 상호 비교한 표이다. 표에서 보는 바와 같이 정전위 시험, 최대인장강도, 연신율 그리고 파단시간은 동일한 -1.4 V~-0.7 V의 범위를 나타낸 반면, 항복강도는 수소취화의 영역에서도 대체적으로 양호한 특성을 보여 주었으며, 파단 시편 관찰과 파단면 분석 결과는 -1.3 V~-0.7 V의 범위를 나타냈으므로 종합적으로 관찰한 결과 공통적으

로 포함되는 영역, 즉 최적의 방식 전위 영역은 -1.3 V~-0.7 V로 판단된다.

4. 결 론

(1) 전기화학적 실험을 통해서도 알 수 있듯이 최적방식영역보다 음분극을 더 시키면 원자성 수소나 분자성 수소로 인하여 수소취화 현상이 관찰되었으며, 양분극을 더 시키면 응력부식균열로 인하여 전류밀도가 급격히 상승하는 현상이 관찰되었다. 저변형을 인장 시험 결과 최대인장강도, 연신율 그리고 파단시간 등도 방식전위영역보다 음분극과 양분극을 더 시킨 상태에서 실시하면 그 값이 급격히

Fig. 11. Analysis of fractography after SSRT in -1.4, -1.6, -1.7 and -1.8 V of applied potential for 5083F.

Table 2. Comparison of results obtained by various experiments for 5083F

		Range
Potentiostatic Experiment		-1.4 V~-0.7 V
Slow Strain Rate Test	Maximum Tensile Strength	-1.4 V~-0.7 V
	Yielding Strength	-1.8 V~-0.7 V
	Elongation	-1.4 V~-0.7 V
	Time-to-Fracture	-1.4 V~-0.7 V
Observation of Fractured Specimen		-1.3 V~-0.7 V
Fractography Analysis		-1.3 V~-0.7 V

저하하는 현상이 관찰되었다.

(2) 해수용액 하에서 -0.5~-1.8 V의 전위범위에서 저변형을 인장시험을 실시한 결과 정전위 시험

에서 최적의 방식전위로 규명된 영역에서 최대인장강도, 연신율 그리고 파단시간 등이 높게 나타났다. 그 중 -0.7 V에서 가장 높은 값을 나타냈다. 반면에 -0.8 V에서는 가장 낮은 값을 나타냈는데 그 이유는 자연전위에 가깝기 때문에 해수환경 하에서 염소이온의 침입에 의한 공식 발생에 기인한 것으로 판단된다.

(3) 파단 시간은 연신율이 증가할수록 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 연성이 증대할수록 연신율이 증대되며, 파단면이 덩풀형과 쉬어립(Shear lip)이 많이 발생하기 때문에 파단 시간이 증가된 것으로 사료된다.

(4) -0.5 V와 -0.6 V의 적용전위에서는 응력부식 균열이 발생한 영역이며, -0.7 V~-1.3 V 영역에서

는 기계적 특성이 우수하여 방식영역으로 판단되며, $-1.4\text{ V} \sim -1.8\text{ V}$ 의 전위에서는 수소취성의 영향이 관찰되었다.

(5) 여러 가지 기계적 특성 및 현미경 특성 등을 종합적으로 분석하면 공통적으로 포함되는 최적의 방식 전위 영역은 $-1.3\text{ V} \sim -0.7\text{ V}$ 으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

1. S. J. Kim, S. K. Jang, Materials Science Forum, 510-511 (2006) 162.
2. S. J. Kim, J. Y. Ko, The Korean Journal of Chemical Engineering, 23(5) (2006) 847.
3. 강병윤, 조제형, 대한용접학회, 22(3) (2004) 39.
4. 김성중, 고재용, 마린엔지니어링학회, 30(1) (2006) 157.
5. 김성중, 마린엔지니어링학회, 30(5) (2006) 14.
6. 한국선급, 선급 및 강선규칙 제2편 재료 및 용접 (2004) 79.
7. S. J. Kim, Materials Science Forum, 510-511 (2006) 158.
8. 전대회, 부식과 방식의 관리, 일중사 (1985) 316.
9. S. J. Kim, J. Y. Ko, M. S. Han, The Korean Journal of Chemical Engineering, 23(6) (2006) 1028.
10. S. J. Kim, S. K. Jang, The 56th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Busan, Korea (2005) 751.
11. S. J. Kim, K. M. Moon, Metals and Materials International, 8(4) (2002) 395.
12. S. J. Kim, Masazumi Okido, K. M. Moon, Surface and Coatings Technology, 169-170 (2003) 163.
13. S. J. Kim, Masazumi Okido, K. M. Moon, The Korean Journal of Chemical Engineering, 20(3) (2003) 560.
14. S. J. Kim, K. M. Moon, Metals and Materials International, 8(4) (2002) 387.
15. S. J. Kim, J. K. Kim, J. H. Kim, M. H. Lee, Y. S. Kim, K. M. Moon, Journal of the Korean Society of Marine Engineers, 24(4) (2000) 68.
16. S. J. Kim, K. M. Moon, Metals and Materials International, 8(4) (2002) 395.
17. S. J. Kim, K. M. Moon, Metals and Materials International, 8(4) (2002) 387.
18. S. J. Kim, M. Okido, K. M. Moon, The Korean Journal of Chemical Engineering, 20(3) (2003) 560.
19. S. J. Kim, M. Okido, K. M. Moon, Surface and Coatings Technology, 169-170 (2003) 163.
20. S. J. Kim, S. C. Ko, J. S. Park, 2007 European Materials Research Society, Poland (2007), 117.
21. C. Deslouis, D. Festy, O. Gil, G. Rius, S. Touzain, B. Tribollet, Electrochimica Acta, 43(12-13) (1998) 1891.
22. Anne Neville, Arnaud P. Morizot, Journal of Crystal Growth, 243 (2002) 4890.
23. C. Deslouis, D. Festy, O. Gil, V. Maillot, S. Touzain, B. Tribollet, Electrochimica Acta, 45 (2000) 1837.
24. L. J. Simpson, Electrochimica Acta, 43(16-17) (1998) 2543.
25. Ch. Barchiche *et al.*, Electrochimica Acta, 48 (2003) 1645.