

# 해양환경하에서의 알루미늄 합금 선박용 재료의 기계적 특성과 전기화학적 특성 평가

김성종 · 고재용\* · 장석기 · 김정일

목포해양대학교 기관시스템공학부, \* 목포해양대학교 해양시스템공학부

**ABSTRACT:** Recently, it is on the increase interest for Al alloy with new material for ship application to substitute for FRP ship. The reason is that Al alloy ship has beneficial characteristics such as high sea speed, increase of loadage and easy to recycle compared with FRP ship. In this paper, mechanical and electrochemical properties are investigated by slow strain rate test experiment in various applied potential condition. These results will provide as reference data to design ship by deciding optimum protection potential regard to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking.

In general, Al and Al alloys are not corroded with forming film which has the corrosion resistance property in neutral solution. However, it was observed that formation and destruction of passive film by  $Cl^-$  ion in sea water environment. At comparison of current density after 1200 sec in potentiostatic experiment, the current density in the potential range of  $-0.68 \sim -1.5$  V is shown low value. The low current density means protection potential range. Elongation in applied potential of 0 V was high. However, the corrosion protection application in this condition is impossible potential because the toughness is low value by decreasing strength by active dissolution reaction at parallel part of specimen. The film composed with  $CaCO_3$  and  $Mg(OH)_2$  has a corrosion resistance property. However, the uniform electrodeposition coating at below  $-1.6$  V potential is not formed since the time to form the uniform electrodeposition coating is short. Therefore, it is concluded that mechanical property is poor because effect by hydrogen gas generation is larger than that of electrodeposition coating. It is concluded that the optimum protection potential range from comparison of maximum tensile strength, elongation and time to fracture is  $-1.3 \sim -0.7$  V (SSCE).

## 1. 서 론

최근 환경부하 경감을 위한 재료로서 알루미늄 합금이 여러 분야에서 재인식되고 있다. 그 이유는 경량화, 리사이클링, 기기의 소형화, 내환경성 등의 잇점을 갖고 있기 때문이다 [1]. 따라서 기존에 소형어선 등에 사용되어 왔던 FRP선의 경우 친환경적이지 못하며, 재활용이 불가능하고, 특히 폐선 시 처리할 수 있는 방법이 없다. 또한 FRP선과 목선은 크기가 작고, 구성 물질이 레이더파를 반사시키는 강도가 약하므로 중, 대형 선박이 탐지하지 못하여 충돌에 의한 해난사고가 가장 큰 비율로 발생하였다. 2002년 해양수산 통계연보에 따르면 1998년-2002년 사이의 선박 사고 발생율을 보면 어선에 의한 해양사고가 전체 해양사고(4,311척)의 약 72.4%(3,113척)를 차지하고 있으며, 전체 사고 중 선박 충돌사고(775건)에만 한정하여도 어선에 의한 충돌건수가 약 58%(448건)를 차지하고 있다 [2]. 따라서 알루미늄 합금 선박으로 대처할 경우 내구성이 좋은 선체가 경량화되기 때문에 선속 증가, 적재량의 증가, 생력화와 관련지을 수 있지만 무엇보다 중요한 것은 리사이클링이 가능하다는 점이다. 유럽, 호주, 일본 등의 선진국은 이

미 수 십년 전부터 자원의 재활용을 통한 환경문제에 적극적으로 대처하고자 관공선을 비롯한 어선에 이르기까지 소형선박을 알루미늄제로 건조할 것을 적극 권장하고 있으며, 일본의 경우 알루미늄의 선형, 건조공법, 용접시공법 개발 등의 관련 연구가 활발하게 진행 중에 있으며, 1977년도부터 알루미늄 선박을 건조한 이후 2001년말 1670척에 달하며, 점차 증가 추세에 있다 [3].

그러나 국내에서는 일부 조선소에서 경비정용 수 척 건조한 후 단절되었으며, 용접 기술자가 20여명에 불과하므로 체계적인 용접조건 등의 연구가 절실하다 [4]. 또한 해양강국건설을 위한 해양과학기술 개발 계획(2004. 7. 28)에 따르면, 해양과학기술(MT ; Marine Technology) 개발 사업이 본격화하여 14개 중점 추진 분야에 10년간 총 3조 1천억원 투자 예정이며, 그 내용 중 환경친화적이고 자원 수급과 재활용이 용이한 연료절감형 고부가가치 알루미늄 합금 어선의 수급 일반화 및 어업지도선 확충, 노후어업지도선 대체(알루미늄 합금), 고속 단속정 구입 등이 포함되는 등 해양수산부에서 연구개발 분야 중 알루미늄 합금선 개발이 포함되어 있다 [5].

전 연구에서는 해양 분위기하에서 알루미늄 합금(5456)에

대한 전기화학적 실험을 실시하여 최적의 방식전위를 결정하였으며, 따라서 본 연구에서는 여러 인가 전위에서 정전위 저변형을 인장실험을 실시하여 기계적 특성과 전기화학적 특성을 고찰하여 응력부식균열과 수소취화를 고려한 최적의 방식전위를 결정하여 실제 알루미늄 선박 건조시 지침이 될 것이며, 국내 및 해외에서 중소형 조선소에서 건조될 알루미늄 선박 건조 관련 특허 취득에 따른 기술력 확보로 국가 경쟁력이 강화될 것으로 사료된다.

## 2. 시험편 및 실험 방법

본 실험에 사용된 Al-Mg 합금은 Mg을 주첨가 성분으로 한 강도가 높은 합금으로, 용접성이 양호하며, 해수분위기에서도 내식성이 좋으므로 선박 및 해양구조물 등에 많이 사용되는 재료이다. 본 연구에 사용된 알루미늄 합금 5456-H116(이하 5456)의 화학적 조성과 기계적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of mechanical properties and chemical composition for 5456-H116.

Mechanical property	Tensile Strength (MPa)			Yield Strength (MPa)			Elongation (%)		
		534.1			397.9			14	
Chemical composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
	0.08	0.20	0.05	0.79	4.80	0.09	0.09	0.02	Balance

전기화학적 실험용 5456 시험편을 에머리 페이퍼 600번까지 연마한 후 아세톤과 증류수로 세척하여 드라이로 건조한 시험편을 사용하였다. 자연전위 측정은 상온의 천연해수 용액에서 24시간 동안 실시하였다. 분극실험은 1 cm<sup>2</sup>만 노출시킨 시편을 사용하였으며, 기준전극으로 은/염화은 전극(SSCE)을, 대극은 백금전극을 사용하여 2 mV/s의 주사속도로 상온의 천연해수 용액조건에서 실시하였다. 양분극 실험과 음분극 실험은 개로전위에서 3.0 V와 -2.0 V까지 실시하였다. 저변형을 인장시험(Slow strain rate test, SSRT)시 사용된 시편의 형상은 길이 240mm, 평행부의 지름은 4mm, 폭은 18mm, 두께 6t인 시편을 사용하였다. 또한 평행부에서의 파단을 유도하기 위하여 깊이와 폭이 1mm가 되는 노치를 중앙에 가공하였다. 저변형을 인장시험의 조건은 상온의 천연해수 용액에서 0.001mm/min의 인장속도로 여러 인가 전위에서 실시하여 기계적 특성 및 수소취화 특성을 상호 비교 평가하여 최적의 방식전위를 규명하였다.

## 3. 시험결과 및 고찰

Fig. 1은 알루미늄 합금 5456을 천연해수 용액내에서 86,400초(24시간) 동안 자연전위를 측정된 그래프이다. 해수

환경하에서 침지 초기에는 알루미늄 합금이 염소이온에 의해 피막이 파괴되어 급격히 전위가 비방향으로 이행하였으며, 8,000초 전후에서 -0.88 V 정도의 전위를 나타냈다. 일반적으로 중성용액 내에서 알루미늄은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3H<sub>2</sub>O와 같은 피막 형성으로 인하여 내식성을 가지나, 해수 용액내에서도 급격히 전위가 상승하여 -0.69 V의 전위를 나타냈다. 이후 형성된 피막으로 인하여 안정된 전위를 보이다 40,000초 전후에서 해수내에 포함된 염소이온에 의해 부분적으로 피막을 파괴시켜 전위가 비방향으로 이행한 후 거의 안정된 전위값을 나타냈다.

Fig. 2는 알루미늄 합금 5456에 대하여 천연해수 용액에서의 양분극과 음분극 실험을 실시하여 두 그래프를 조합한 것이다.

먼저 양분극 경향은 개로전위(Open circuit potential)에서부터 전류밀도의 급격한 상승을 보인 후 -0.4 V 전후에서 전류밀도 감소 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 해수환경 하에서 부동태 피막이 형성되었기 때문으로 사료되며, 그 경향은 0.4 V까지 지속된 후 피막이 파괴되어 높은 전류밀도를 나타낸 후 다시 재생된 피막에 의해 재부동태화 현상이 관찰되었다.

음분극 경향은 개로전위에서부터 용존산소환원반응에 의한 농도분극과 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈다. 양극방식에 비해 음극방식의 경우가 용존산소의 농도분극의 영역에서 보다 낮은 전류밀도를 나타냈으며, 방식전위 영역도 넓기 때문에 양극 방식에 비해 음극방식의 경우가 효과적인 것으로 사료된다. 그러나 1050 시험편에 대하여 마찰교반 용접을 실시하였을 경우 양극방식 즉, 부동태 전위영역에서의 방식이 경제적이거나 사실을 규명한 바 있다. 또한 알루미늄 내에 포함된 잔류용력이 마찰 교반 용접으로 인하여 발생한 열에 의해 잔류용력의 일부가 제거됨으로써 내식성이 개선되는 효과에 관해 연구한 바 있다[6].

알루미늄의 음분극곡선에서 5456 합금의 용존산소환원반응에 의한 농도분극과 수소가스 발생에 의한 활성화 분극의 변곡점은 대략 -1.70 V로 나타났다. 또한 양분극 곡선에서는 부동태 피막이 파괴된 이후에도 재부동태 형성과 피막 파괴가 반복되었으나, 음분극곡선에서는 일단 수소가스가 발생되는 전위에서는 급격한 전류밀도의 상승이 관찰되었다.

또한 알루미늄의 E-pH 다이어그램[7]을 보면 부식전위가 산성이나 알칼리성 모두에서 수소발생영역에 있으므로 수소발생형 부식이 일어난다. 즉, 강산성영역에서는 물을 분해하여 수소발생을 동반하는 Al<sup>3+</sup>로서 용해하고, 알칼리성 영역에서는 물을 분해하여 수소발생을 동반하는 AlO<sub>2</sub><sup>-</sup>로 용해한다. 어느 쪽이든 수소발생을 동반하기 때문에 이것이 공식이나 균열내의 좁은 영역에서 일어난다면 불충분한 확산이기 때문에 pH 값의 변화가 일어난다. 또한 해수의 경우 pH는 8.0 전후이므로 알루미늄의 E-pH 다이어그램에서는 방식영역으로 판단되었으나 해수 속에 포함된 Cl<sup>-</sup> 이온은 부동태 피막을 파괴하는 역할을 하기 때문에 타 중성용액과는 다른 특성을 나타내고

있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 5456 시험편에 대하여 천연해수 용액내에서 Fig. 3을 참조하여 양분극과 음분극 시킨 후 일정 전위에서 정전위 실험 시 1200초인 경우 전류밀도 값을 상호 비교한 그래프이다. 대체적으로 -0.68 ~ -1.5 V 사이의 전위 영역에서는 낮은 전류밀도를 나타냈다. 일단 이 영역내에 포함된 전위가 방식 전위라고 유추는 가능하지만 정확한 값이라고는 단정 지을 수가 없다. 방식전위로 유추되는 전위 영역보다 비 방향으로 전위가 이행하면 수소취화 현상으로 인하여 전류밀도가 증가하고, 귀 방향으로 이행하면 활성화반응에 의하여 급격히 전류밀도가 증가한다는 사실을 알 수 있으며, 이는 분극곡선을 통해서도 그 경향을 파악할 수 있다.

지금까지의 시험결과에서 유추한 방식전위를 보다 구체적으로 규명하기 위하여 여러 전위에서 정전위 저변형을 인장시험을 실시하였다.

Fig. 4는 해수 상태에서와 -0.7 V ~ 0 V의 전위로 인가한 후 저변형을 인장시험을 실시한 경우 응력-변형을 곡선을 보여주고 있다. 0 V인 경우는 현저한 강도 저하가 발견되었다. 이러한 강도 저하가 생긴 이유는 알루미늄 시편이 심한 활성화 용해반응에 의해 응력을 받는 평행부의 단면 감소로 인하여 저하한 것으로 판단된다. 해수 용액(무방식 상태)내에서만 인장시험을 실시한 경우에 비해 오히려 -0.5, -0.65 V에서 실시한 경우가 오히려 강도와 연신율의 저하를 확인할 수 있었다. 이 전위는 용해반응을 나타낸 전위로, 개로전위에서 전류밀도가 상승하는 단계이기 때문으로 사료된다. 그러나 -0.7 V에서는 가장 높은 강도와 연신율을 보였기 때문에 이 전위 영역에서는 방식 상태라 할 수 있으며, 분극곡선에서도 다른 전위보다 낮은 전류밀도를 나타냈다.

Fig. 5는 해수 상태와 -1.3 V ~ -0.8 V의 전위영역에서 정전위하에서 저변형을 인장 실험을 실시한 경우의 응력-변형을 곡선을 나타내고 있다. 낮은 전류밀도를 보인 용존산소 환원반응에 의한 농도분극에 해당하는 전위이며, -1.3 V에서 가장 양호한 특성을 보였다. 또한 해수상태(무방식 상태)에 비해 양호한 강도와 연신율을 나타냈으므로 방식 전위라 판단된다.

Fig. 6은 해수 상태와 -1.6 V ~ -2.3 V의 전위영역에서 저변형을 인장 실험을 실시한 경우의 응력-변형을 곡선을 나타내고 있다. 분극곡선을 보는 바와 같이 -1.6 V ~ -1.8 V의 전위영역은 용존산소 환원반응에 의한 농도분극과 수소발생에 의한 활성화분극의 변곡점 전후에 해당된다. 모든 조건에서 연신율이 해수상태(무방식 상태)보다 낮은 값을 나타냈으므로 과방식이 된 것으로 판단된다. 음분극 곡선에서는 방식영역에 가까우나 실제로는 원자성 수소에 의한 취화 현상이 발생한 것으로 사료된다. -2.3 V인 경우는 분자성 수소에 의한 취화 현상이 발생하여 최대인장강도와 연신율이 가장 낮게 나타났다. 전체적으로 인가전위가 비방향일수록 최대인장강도와 연신율이 저하하는 경향을 나타냈다. 또한 고장력강의 수소취화에 관한 연구[8-11]에서 개로전위에서 활성화반응의 경향

을 보인 후 용존산소환원반응 ( $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ )에 의한 농도분극과  $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ 의 수소발생에 의한 활성화분극의 경향을 나타냈으며, 농도분극과 활성화분극의 변곡점은 대략 -1.0V (SCE)로 나타났다. 그러나 변곡점보다 높은 전위에서 수소취화 현상이 관찰되었는데 이는 원자성 수소의 영향에 기인한 것임을 입증한 바 있다.

Fig. 7은 여러 인가 전위 조건에 따라 저변형을 인장실험을 실시한 경우 최대인장강도를 상호 비교하였다. 무방식 상태에서는 581.71 MPa를 나타냈으며, 인가 전위 -1.6 ~ -0.7 V의 영역에서는 모두 해수 상태보다 높은 인장 강도를 나타냈으므로 이 전위영역은 Fig. 4에서 낮은 전류밀도를 나타낸 전위 -1.5V ~ -0.68 V와 거의 유사한 전위영역에 해당되며, 이 영역은 방식이 된 영역으로 판단된다. 이 전위 영역에 비해 비방향과 귀방향으로 이행할수록 낮은 인장 강도를 나타냈으며, 특히 귀방향으로 이행할수록 활성화 용해반응에 의해 강도가 저하하여 낮은 인장강도를 나타내어 0 V에서는 현저히 낮은 353.38 MPa를 나타냈다.

Fig. 8은 여러 인가 전위 조건에 따라 저변형을 인장실험을 실시한 경우 항복강도를 상호 비교하였다. 최대인장강도와 비교하여 항복강도는 인가전위에 따라 일정한 경향은 관찰되지 않았으나 -1.3 V의 인가 전위에서 가장 높은 값을 나타낸 반면 최대인장강도가 현저히 낮았던 0 V인 경우는 가장 낮은 항복강도를 나타냈다.

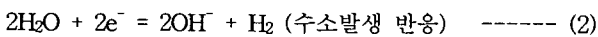
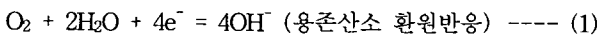
해양환경하에서 고장력강의 수소취화에 관한 연구[8-11]에서는 최대인장강도와 항복강도는 인가전위, 용접방법 그리고 용접후열처리 유무에 따라 특별한 상관관계를 나타내지 않았다. 그러나 알루미늄 합금의 경우 최대인장강도는 인가전위의 상관관계가 관찰된 반면 항복강도는 인가 전위에 따라 특별한 상관관계가 관찰되지 않았으므로 고장력강의 경우와 서로 다른 경향을 보임을 알 수 있었다.

Fig. 9는 여러 인가 전위 조건에 따라 저변형을 인장실험을 실시한 경우 연신율을 상호 비교하였다. 최대인장강도가 무방식 상태보다 높게 나타났던 인가 전위 -1.3 ~ -0.7 V의 영역에서는 모두 해수 상태보다 높은 연신율을 나타냈으며, 0 V인 경우가 특이하게 높은 연신율을 보였으나 이 조건에서는 강도저하로 인하여 최대흡수 에너지가 낮기 때문에 방식 적용은 불가능하다. 그 이외의 영역에서는 귀방향과 비방향으로 이행할수록 낮은 연신율을 나타냈다. 따라서 무방식상태보다 양호한 -1.3 ~ -0.7 V의 인가전위로 방식하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

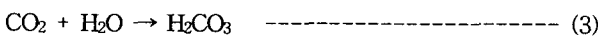
Fig. 10은 여러 인가 전위 조건에 따라 저변형을 인장실험을 실시한 경우 파단시간을 상호 비교하였다. 최대인장강도와 연신율이 무방식 상태보다 높게 나타났던 -1.3 ~ -0.7 V의 전위영역에서는 모두 해수 상태보다 높은 파단시간을 나타냈다. 0 V인 경우는 연신율과 같이 파단되는데 걸리는 시간이 길게 나타났으나 용해반응에 의한 강도저하로 인하여 최대흡수 에너지가 낮기 때문에 방식 적용은 불가능하다. 그 이외의 영역에서 귀방향과 비방향으로 이행할수록 파단시간이 짧

게 나타났다. 따라서 무방식상태보다 양호한 -1.3 ~ -0.7 V의 인가전위가 타당할 것으로 사료된다. 그러나 전기화학적 실험을 통해서 실시한 경우 정전위 실험을 실시하여 1200초 경과후 가장 낮은 전류를 나타낸 전위에서 방식전위를 결정하여 -1.5 ~ -0.68 V였으나 이 전위도 저변형을 인장실험을 통해서 얻은 실험결과에 포함된 방식전위 영역임이 확인되었다.

Fig. 11은 여러 인가 전위 조건에 따라 저변형을 인장실험을 실시한 경우 파단된 시험편을 보여 주고 있다. 0 V에서 저변형을 인장시험을 실시한 경우는 강한 용해반응으로 인하여 평행부의 형태가 거의 부식되어 나타나지 않아 가장 낮은 최대인장강도와 항복강도를 나타낸 전위이다. -0.5 V와 -0.65 V는 용해반응에 의해 피팅이 발생하면서 부식된 모습을 보이고 있으며, -0.5 V의 경우가 -0.65 V에 비해 용해현상이 뚜렷하게 나타났음을 알 수 있는데 양분극 곡선에서도 전류밀도가 보다 높은 영역에 해당되기 때문이다. 또한 -1.3 V ~ -0.7 V는 방식이 이뤄진 상태에서 파단된 모습을 보여주고 있다. 이에 비해 -2.3 V ~ -1.6 V에서는 방식시 시편 표면에 흰색 코팅의 형성을 볼 수 있다. 이는 해수중 음극방식을 적용하면 음극표면에는 Mg(OH)<sub>2</sub>나 CaCO<sub>3</sub> 등의 전착물(Electrodeposit film, Calcareous deposit)이 석출된다[12-16]. 이러한 전착 코팅의 생성은 음극표면에서 (1) 식과 (2)식의 반응이 발생한다.



또한 대기중의 CO<sub>2</sub>는 해수내에서 (3) 식과 같이 물분자와 결합하여 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>를 형성한다.



이때 형성된 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>는 물분자 보다 약한 결합력으로 연결되어 있기 때문에 H<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>이온으로 (4) 식과 (5) 식과 같이 해리된다.



이와 같이 음극 표면에서 만들어진 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>이온과 OH<sup>-</sup>이온은 해수 중에 용존하는 Ca<sup>2+</sup> 또는 Mg<sup>2+</sup>이온과 결합하여 (6), (7) 식과 같이, CaCO<sub>3</sub> 또는 Mg(OH)<sub>2</sub>의 화합물을 음극 표면에 형성하게 된다.



(6) 식과 (7) 식에 의해 형성된 CaCO<sub>3</sub>와 Mg(OH)<sub>2</sub>으로 이뤄진 피막은 내식성을 갖는 피막이나 -1.6 V 이하의 전위에서는 두껍고, 균일한 전착코팅을 형성하기 위한 시간이 부족하여 불균일한 전착코팅이 형성되기 때문에 오히려 수소가스 발생에 의한 영향이 크게 나타나며, 전착코팅과 모재와의 틈부

식 그리고 불균일한 코팅 형성으로 인한 마이크로 갈바닉 셀의 형성으로 인하여 양호한 기계적 특성을 갖지 못한 것으로 판단된다. 지금까지의 연구 결과를 종합해 보면 인가전위와 특별한 상관관계를 보인 최대인장강도, 연신을 그리고 파단시간을 비교한 결과 방식전위 영역은 대략 -1.3 ~ -0.7 V로 판단된다.

#### 4. 결 론

지금까지 알루미늄 선박용 재료(5456)의 저변형을 인장 시험에 의한 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 알루미늄은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 3H<sub>2</sub>O와 같은 내식성을 갖는 피막이 형성되어 전류밀도가 감소되어 부식이 되지 않으나, 해수환경 하에서는 해수 속에 포함되어 있는 염소이온은 부동태 피막을 파괴시키나, 다시 재생성된 피막에 의해 재부동태화 현상이 관찰되었다.

(2) 일정 전위에서 정전위 실험 시 1200초인 경우 전류밀도 값을 비교한 결과 -0.68 ~ -1.5 V 사이의 전위 영역에서는 낮은 전류밀도를 나타냈으므로 방식전위에 해당되는 것으로 유추가 가능하였다.

(3) 0 V인 경우는 높은 연신율을 보였으나 이 조건에서는 평행부에서의 용해반응에 의하여 강도가 저하하여 최대흡수 에너지가 낮기 때문에 방식 적용은 불가능하다.

(4) CaCO<sub>3</sub>와 Mg(OH)<sub>2</sub>으로 이뤄진 피막은 내식성을 갖는 피막이나 -1.6 V 이하의 전위에서는 두껍고, 균일한 전착코팅을 형성하기 위한 시간이 부족하여 불균일한 전착코팅이 형성되기 때문에 오히려 수소가스 발생에 의한 영향이 크게 나타나서 양호한 기계적 특성을 갖지 못한 것으로 판단된다. 또한 인가전위와 특별한 상관관계를 보인 최대인장강도, 연신을 그리고 파단시간을 비교한 결과 방식전위 영역은 대략 -1.3 ~ -0.7 V로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

[1] Zen-ichi Tanabe, Fumio Matsumoto, Actualities and problems of Al alloy for the environmental resistance, 경금속용접, Vol. 39, No. 3, 125-132, 2001.  
 [2] 김성종, 고재용, 해양 환경 하에서 알루미늄 선박용 재료(5456)의 방식전위 결정을 위한 전기화학적 특성 평가, 대한 조선학회, 투고중  
 [3] Sky Al products corporation, Foundation of Al alloy ship projects, 경금속용접, Vol. 41, No. 11, 544-545, 2003.  
 [4] 강병윤, 조재형, 알루미늄 소형선의 구조와 시공 주안점, 제22권, 제3호, 39-44, 2004. 6  
 [5] 해양수산부, 수산업 · 어업 종합대책, 20-29, 2004. 7.  
 [6] 장석기, 이돈출, 김성종, 전정일, 김상환, Investigation of

- Macrostructures and Properties for Friction Stir Welded 1050 Aluminum Alloy Sheet, 한국박용기관학회 추계학술대회, 2004
- [7] M. Pourbaix, Atlas of electrochemical equilibria, NACE, 168-176, 1974.
- [8] Seong-Jong Kim, and Kyung-Man Moon, Hydrogen embrittlement properties of heat affected zone of high strength steel in shielded metal arc welding, Metals and materials international, Vol. 8, No. 4, 395-401, 2002
- [9] Seong-Jong Kim, and Kyung-Man Moon, The relationship between corrosion protection and hydrogen embrittlement properties of HAZ in flux cored arc welding, Metals and materials international, Vol. 8, No. 4, 387-393, 2002
- [10] Seong-Jong Kim, Masazumi Okido, Kyung-Man Moon, An electrochemical study of cathodic protection of steel used for marine structures, The Korean journal of chemical engineering, Vol. 20, No. 3, 560-565, 2003
- [11] Seong-Jong Kim, Masazumi. Okido, & Kyung-Man Moon, The electrochemical study on mechanical and hydrogen embrittlement properties of HAZ part as a function of post-weld heat treatment in SMAW, Surface and coatings Technology, Vol. 169-170, 163-167, 2003
- [12] C. Deslouis, D. Festy, O. Gil, G. Rius, S. Touzain, B. Tribollet, Characterization of calcareous deposits in artificial sea water by impedance techniques-1. Deposit of  $\text{CaCO}_3$  without  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , Electrochimica Acta, Vol. 43, Nos. 12-13, 1891-1901, 1998.
- [13] Anne Neville, Arnaud P. Morizot, Calcareous scales formed by cathodic protection-an assessment of characteristics and kinetics, Journal of Crystal growth, Vol. 243, 4890-502, 2002.
- [14] C. Deslouis, D. Festy, O. Gil, V. Maillot, S. Touzain, B. Tribollet, Characterization of calcareous deposits in artificial sea water by impedance techniques-2. Deposit of  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  without  $\text{CaCO}_3$ , Electrochimica Acta, Vol. 45, 1837-1845, 2000.
- [15] L. J. Simpson, Electrochemically generated  $\text{CaCO}_3$  deposits on iron studied with FTIR and Raman spectroscopy, Electrochimica Acta, Vol. 43, Nos. 16-17, 2543-2547, 1998.
- [16] Ch. Barchiche, C. Deslouis, D. Festy, O. Gil, Ph. Refait, S. Touzain, B. Tribollet, Characterization of calcareous deposits in artificial sea water by impedance techniques-3. Deposit of  $\text{CaCO}_3$  in the presence of  $\text{Mg}(\text{II})$ , Electrochimica Acta, Vol. 48, 1645-1654, 2003.