

연안 선박용 Al합금 프로펠러의 부식에 관한 연구

임우조† · 박희옥* · 윤병두**

(부경대학교, *대구기능대학, **부경대학교 대학원)

A Study on the Corrosion of Al-Alloy Propeller Used for a Coasting Vessel

Uh-Joh LIM† · Hee-Ok PARK* · Byoung-Du YUN**

Pukyong National University · *Daegu Polytechnic College · **Graduate School,

Pukyong National University

(Received September 3, 2003 / Accepted November 20, 2003)

Abstract

Recently, with the tendency of lightening, high-strength and high-speed in the marine industries such as marine structures, ships and propellers, it is rapidly enlarged the use of the aluminium alloy. Therefore, there occurs much interest in the study on corrosion characteristics of aluminium alloy.

This paper was studied on the corrosion characteristics of Al-Mg alloy propeller used for a coasting vessel. Under the various pH of marine environment, the corrosion test of Al-Mg alloy was carried out. And thus polarization resistance, corrosion potential, and current density behavior of Al-Mg alloy and galvanic corrosion behavior of Al-brass and Al-Mg alloy coupled Al 5086 and SS 400 for hull were investigated. The main results are as following:

1. The corrosion potential of Al-brass propeller is more nobel than materials for hull , but that of Al-Mg alloy propeller is low or similar to materials for hull. Therefore, the galvanic corrosion of hull due to Al-Mg propeller don't occur.
2. The polarization resistance of Al-Mg alloy in sea water of pH 4 is highest, and corrosion current density of Al-Mg propeller is the most controlled.
3. As pH value decreases, potential showed Evans polarization diagram approaches cathodic potential. The corrosion current density of Al-Mg alloy is controlled to anodic reaction rate, therefore, the corrosion reaction of Al-Mg alloy is anodic control.

Key words : Al-alloy propeller, Polarization resistance, Corrosion potential, Corrosion current density

I. 서론

선박 및 해양설비의 중공업이 국제 경쟁력에서

지속적으로 우위를 유지하고자 경량화에 의한 고속화 및 에너지 절약을 위해 경량성인 알루미늄 합금재의 이용이 비약적으로 증대되고 있다(山田盛

† Corresponding author : 051-620-1602, limuj@pknu.ac.kr

雄, 1995).

선박의 프로펠러는 속력, 에너지 소비량 및 선체 부식 등에 큰 영향을 미치기 때문에 선체, 기관(engine)과 더불어 선박의 3대 구성요소이므로 선박의 선택에 있어서 선박 소유주들이 매우 민감한 반응을 보이는 부품이다(이상승, 2003). 이와 같이 프로펠러는 선박에서 가장 중요한 부분이지만, 프로펠러는 수중에서 고속회전하면서 큰 추력을 받게 됨으로 프로펠러의 재료가 부적당하면 설계가 적절하더라도 절손하여 선박의 운항에 지장을 줄 뿐만 아니라 때로는 선박 전체가 위험한 상태에 빠지게 된다. 그러므로 프로펠러용 재료가 갖추어야 할 필요조건은 다음과 같다(隈元 士, 1991).

- 내부식성, 내캐비테이션 침식성이 있을 것.
- 기계적 강도가 높을 것.
- 무게가 되도록 가벼울 것(비중이 작아야함).
- 가격이 저렴할 것.

이상과 같은 프로펠러의 필요조건에 따라 내식성과 기계적 강도가 큰 고력황동(망간청동)재가 많이 사용되었고, 최근에는 중량을 경감하기 위하여 Al-황동을 사용하는 선박이 많아지고 있다(隈元 士, 1991; 전대회, 1989).

이와 같이 프로펠러의 재료로 사용되는 고력황동 및 Al-황동은 동합금재료써 전위는 선체의 전위보다 더 높기 때문에 이들 동합금재에 의해 탄소강(SS 400)이나 Al-합금재(Al 5086)로 제작되는 선체 중 프로펠러와 인접된 선미부위가 전지작용부식(galvanic corrosion)에 의해 부식손상되기 쉽다(尹藤伍郎, 1982; Denny A. 1991; 전대회, 1989; 中川 雅央, 1987). 이러한 동합금재의 프로펠러에 의한 선미부위의 전지작용부식 손상을 방지하기 위하여 음극방식법인 유전양극방식(희생양극방식)이나 외부전원방식법을 적용하고 있다(青木 健, 1989; 中川 雅央, 1987).

또한 탄소강재료로 제작되는 소형 선박은 경제적이나 기술적 측면에서 음극방식을 적용하기 곤란하다. 특히, 선체를 저전위 금속인 알루미늄 합금재료로 제작되는 경량화 소형 선박들은 고전위 금속

인 동합금재의 프로펠러에 의해 전지작용부식이 더 쉽게 일어난다(K. R Trechewey et al., 1995).

그러므로 동합금재의 프로펠러에 의한 전지작용부식손상이 가장 심한 선미부위에 대해 전지작용부식을 방지하는 한편 가격이 저렴하면서 경량화(J. R. Davis, 1999)에 의해 고속화와 에너지 절약을 위해 최근에 국내 B사에서 중·소형 선박에 적합한 Fig. 1과 같은 Al합금 프로펠러를 개발하여 시판하고 있다. 특히, Al-Mg 합금재는 유동성이 실용합금 중 가장 좋으며, 고온 균열도 발생하기 어렵다. 특히, 해수 중에서의 내식성이 Al 합금 중 가장 우수하여 선박용 또는 화학공업용 부품으로서 널리 사용되고 있으므로(김영식, 1993) 프로펠러용 재료가 갖추어야 할 필요조건 중 내부식성, 내캐비테이션 침식성이 있을 것, 무게가 되도록 가벼울 것(비중이 작아야함), 가격이 저렴할 것을 만족시키고 있다.

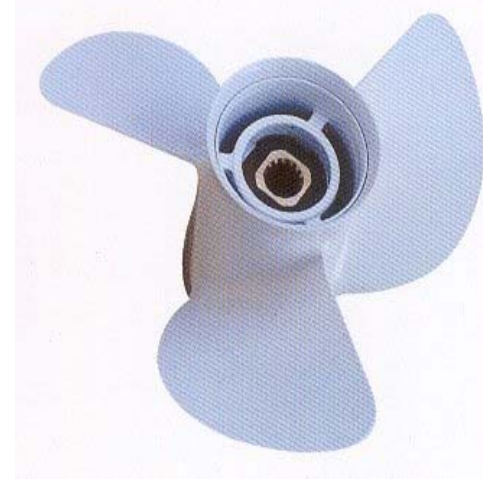


Fig. 1. Propeller of Al-Mg alloy.

그러나 전반적인 산업발전의 영향으로 석유 및 가스 등의 화석에너지 소비량이 급격히 증가되고 있으며, 이러한 화석에너지의 소비량이 증가됨에 따라 유황화합물, 질소화합물, 산화물 및 염화물 등의 대기오염물질이 증대됨으로써 이들 대기오염물질 중에서 SO₂, SO₃, CO 및 THC(total

hydro-carbon) 등은 수중에 혼입되어 오염되거나 산성비 등에 의해 하천수 및 강물은 바다로 유입됨으로써 연안 해수는 오염화되고 있다(임우조 et al., 1994; 前田泰昭 et al., 1995). 이와 같이 오염화된 연안해역을 항해하는 중·소형 선박용 Al-Mg 합금재 프로펠러의 부식에 관한 연구는 거의 찾아 볼 수 없다.

따라서 본 연구에서는 오염해수 중에서 연안선박용 Al-Mg 합금재 프로펠러의 부식 특성에 대한 연구를 하기 위해, 해수 중에서 프로펠러용 재료인 Al-황동 및 Al-Mg 합금재와 이중금속조합된 선체용 SS 400과 Al 5086의 전지작용부식시험 그리고 오염해수의 pH 변화에 따른 연안선박용 Al-Mg 합금재 프로펠러에 대한 부식시험을 실시하였다. 이들 실험결과를 토대로 하여, 프로펠러용 Al-황동 및 Al-Mg 합금재와 이중금속조합된 선체용 SS 400과 Al 5086의 전지작용부식 특성을 고찰하고, pH 변화에 따른 오염해수 중에서 연안선박 프로펠러용 Al-Mg 합금재의 분극저항, 부식전위, 부식 전류밀도 거동을 규명함으로써 오염해수 중에서 연안선박용 Al-Mg 합금재 프로펠러의 부식 및 방식의 기초설계 자료로 제공하고자 한다.

II. 시험재료 및 실험방법

1. 시험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 주 시험재료는 연안 소형선박의 프로펠러 제작에 이용되고 있는 Al-Mg 합금재이며, 그 화학적 조성과 기계적 특성은 Table 1과 같다. 또한 선미의 전지작용부식을 비교하기 위하여 동합금재인 Al-황동 프로펠러의 보조 시험재료의 화학적 조성과 기계적 특성을 Table 2에서 살펴 보았다. 그리고 선박 및 해양구조물 등에 그 활용도가 높은 탄소강(SS 400)의 화학적 성분 및 기계적 특성을 Table 3에 나타내었다. 또한 경량화 선박 건조용인 Al 합금(Al 5086)의 화학적 성분 및 기계적 특성을 Table 4에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of 3% Al-Mg alloy

Chemical compositions (wt%)	Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Al
	3.03	0.02	0.10	0.32	0.70	Remainder
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)			Elongation(%)		
	145.1			12		

Table 2. Chemical compositions and mechanical properties of Al-brass

Chemical compositions (wt%)	Cu	Pb	Fe	Al	As	Zn
	76.0	0.05	0.05	1.85	0.02	Remainder
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)			Elongation(%)		
	345			39		

Table 3. Chemical compositions and mechanical properties of SS 400

Chemical compositions (wt%)	C	Si	Mn	P	S	Cu
	0.16	0.06	0.58	0.018	0.01	0.10
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)			Elongation(%)		
	426			25		

Table 4. Chemical compositions and mechanical properties of Al 5086

Chemical compositions (wt%)	Cr	Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Al
	0.11	0.19	4.07	0.37	0.48	0.47	Remainder
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)			Elongation(%)			
	236.4			13.5			

Table 1, Table 2, Table 3 및 Table 4의 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 각 재료들로부터 절취하여 두께 5 mm, 가로 10 mm, 세로 10 mm의 크기로 시험편을 제작하였다. 각 시험편의 제작에 있어서 가공경화 및 열응력을 배제하기 위해 시험재료를 다이아몬드 휠 커터로 저속 절단하였다. 이와 같이 제작하여 가공한 각 시험편의 유효노출면적

을 1.0 cm^2 로 한 다음 시험편에 전선을 연결시킨 후에 호마이크로 마운팅(mounting)하였고, 각 부식시험편의 형상과 크기는 Fig. 2와 같다.

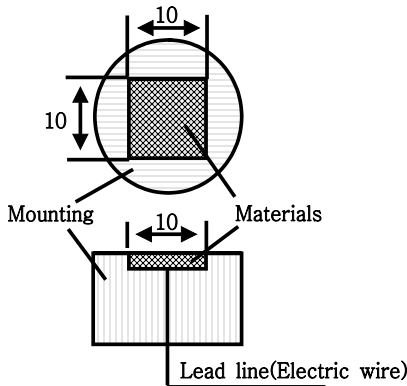


Fig. 2. Shape and dimension of corrosion test specimen(unit :mm).

2. 시험장치 및 실험방법

본 실험에 사용된 부식특성 실험장치는 다른 부식 평가법 보다 실험시간이 짧고, 비파괴적으로 실시할 수 있기 때문에 전기화학적 분극시험을 부식 평가법으로 실시하였다.

이 분극실험장치의 전체 계통도는 Fig. 3과 같고, 이 실험장치는 EG & G社의 Model 273A Potentiostat/Galvanostat와 PC를 이용하였으며, M352/252 corrosion software를 사용하여 부식 전위거동 시험을 실시하였다. 여기서, 부식시험은 부식환경조 중에서 시험편을 Fig. 1의 각 시험재료 하고, 기준전극은 포화 카로멜 전극(Saturated calomel electrode, sce), 보조전극은 고밀도 탄소봉으로 하였다.

또한 부식환경 조건은 오염 연안해수 환경조건과 유사한 환경으로 하고, 천연해수 중에 H_2SO_4 를 미량으로 혼입하여서 천연해수의 pH를 1.0, 2.0, 4.0 및 6.7로 변화시키고, 부식용액의 온도는 가열코일이 부착된 oil bath에 온도감지기를 설치하여, 온도를 $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 범위 내에서 유지하도록 하였다.

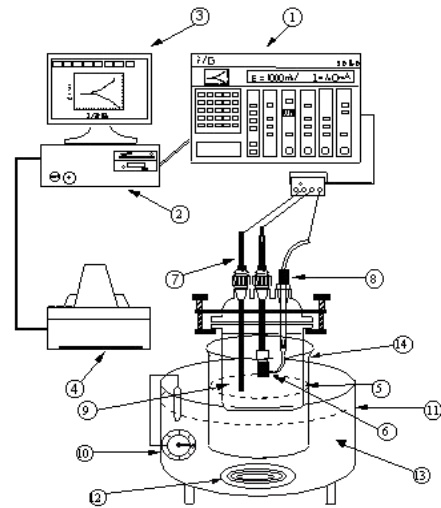


Fig. 3. Schematic diagram of polarization test equipment.

- ① Potentiostat/Galvanostat
- ② Personal computer
- ③ Monitor
- ④ Printer
- ⑤ Corrosion cell
- ⑥ Specimen
- ⑦ Counter electrode
- ⑧ Reference electrode
- ⑨ Electrolyte
- ⑩ Temperature controller
- ⑪ Heater body
- ⑫ Heating coil
- ⑬ Oil bath
- ⑭ Heating beaker

그리고 분극시험에 있어서 Fig. 2의 부식시험편 표면 거칠기의 영향을 최소화, 동일화하기 위하여 연마기에서 산화알루미늄(Al_2O_3 , 평균입자크기=0.3 μm)분말을 이용하여 시험편 표면을 마무리 연마하였다. 그리고 증류수 중에서 초음파세척기로 1분간 세척한 다음, 아세톤으로 탈지 한 후 열풍으로 건조시켰다. 최종적으로 시험편과 호마이크 사이의 틈을 방지하고, 일정한 시험편의 유효노출면적(1 cm^2)을 얻기 위하여 래커(lacquer)를 이용하여 2차 피복을 하였다. 이와 같이 표면처리된 각각의 부식 시험편을 Fig. 3의 분극시험장치의 회로도와 같이 배선하였고, 시험편을 부식환경조에 침지한 후 자연 전위에서 10분간 안정시키고 난 후 부식시험을 실시하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

1. 부식전위 거동

부식환경 중에서 이종금속을 조합시킬 때에 어느 금속이 양극으로 되어 전지작용부식이 일어날 것인가는 그 부식환경 중에서 그들 금속의 부식전위에 의해서 판단할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 해수 중에서 선체용 재료인 SS 400 및 Al 5086과 프로펠러용 재료인 Al-황동 및 Al-Mg 합금재를 조합하여 사용할 경우에 전지작용부식이 일어날 수 있는 경향을 고찰하였다. Fig. 4 및 Fig. 5는 시간경과에 따른 부식전위를 나타내었다.

Fig. 4는 해수 중에서 선체용 SS 400 그리고 프로펠러용 Al-황동 및 Al-Mg 합금재의 부식전위를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다.

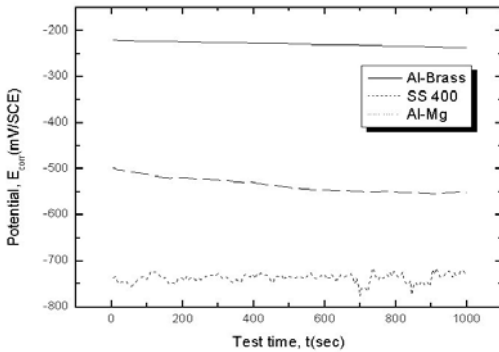


Fig. 4. Corrosion potential of SS 400, Al-brass and Al-Mg alloy vs. test time in sea water at 25°C.

프로펠러용 Al-Mg 합금재의 부식전위는 선체용 SS 400의 부식전위보다 약 180 mV/sce 정도 더 낮게 나타나는 경향을 나타내고, 프로펠러용 Al-황동의 부식전위는 선체용 SS 400의 부식전위보다 약 320 mV/sce 이상 더 높게 나타내고 있다. 그러므로 전위가 높은 Al-황동의 프로펠러는 전위가 더 낮은 SS 400으로 제작된 선체에 대해 전지작용부식을 일으킬 수 있지만, 전위가 낮은 Al-Mg 합금재의 프로펠러는 전위가 높은 선체용인 SS 400에서는

전지작용부식이 일어나지 않을 것으로 추정된다.

Fig. 5는 해수 중에서 선체용 Al 5086 그리고 프로펠러용 Al-황동 및 Al-Mg 합금재의 부식전위를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다.

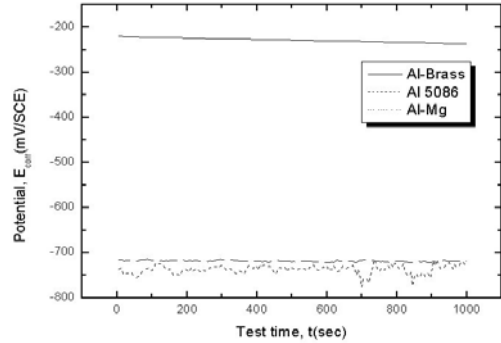


Fig. 5. Corrosion potential of Al 5086, Al-brass and Al-Mg alloy vs. test time in sea water at 25°C.

Fig. 4의 선체용 SS 400과 달리 프로펠러용 Al-Mg 합금재의 부식전위는 선체용 Al 5086의 부식전위보다 약간 낮게 나타나지만, 프로펠러용 Al-황동의 부식전위는 선체용 Al 5086의 부식전위보다 약 500 mV/sce 이상 더 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 그러므로 Al-황동으로 제작된 프로펠러는 선체용 Al 5086으로 제작된 선체에 대해 Fig. 4의 선체용 SS 400보다 전지작용부식에 민감할 것으로 사료된다.

2. Tafel 분극 특성

Fig. 6은 연안해양환경의 오염화에 의해 해수의 중성으로부터 산성으로 변화(해수의 pH 변화)함에 따른 프로펠러용 Al-Mg 합금재의 Tafel 분극곡선을 정리하여 나타낸 것이다. 중성인 pH 6.7인 해수로부터 산성화(pH가 낮아짐)됨으로써 개로전위는 비전위화되는 경향을 나타내고, 분극거동은 전류 밀도가 큰 방향(우측)으로 이동되고 있음을 알 수 있다.

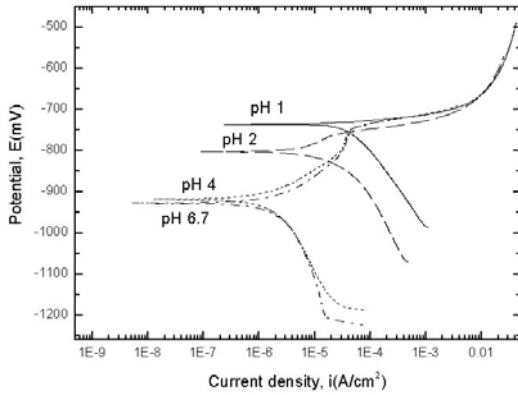


Fig. 6. Tafel polarization curves of Al-Mg alloy in various pH of sea water.

3. 분극저항 및 부식전류밀도 거동

Fig. 7은 연안해수의 pH 변화에 따른 프로펠러용 Al-Mg 합금재의 분극저항 거동을 정리하여 나타낸 것이다.

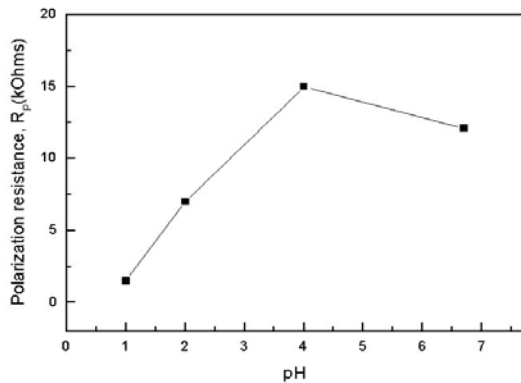


Fig. 7. Polarization resistance of Al-Mg alloy vs. various pH of sea water.

중성인 pH 6.7의 해수로부터 약산성인 pH 4.0의 해수로 변화되면서 분극저항은 증가하는 경향을 나타내고, 약산성인 pH 4.0의 해수로부터 강산성인 pH 2 및 pH 1의 해수로 pH가 낮아지면서 분극저항은 급격히 감소되는 경향을 나타내고 있다. 특히, 약산성인 pH 4.0의 해수 중에서 분극저

항이 가장 높게 나타남으로써 Al-Mg 합금재의 부식전류밀도는 억제될 것으로 추정된다.

Fig. 8은 연안해수의 pH 변화에 따른 프로펠러용 Al-Mg 합금재의 부식전류밀도 거동을 정리하여 나타낸 것이다.

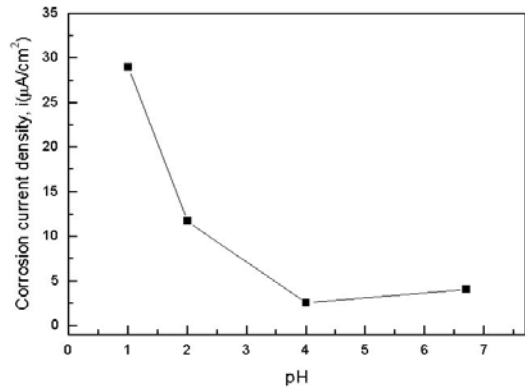


Fig. 8. Corrosion current density of Al-Mg alloy vs. various pH of sea water.

이미 Fig. 7에서 추정된 바와 같이 약산성인 pH 4.0의 해수 중에서 분극저항이 가장 높게 나타남으로써 Al-Mg 합금재의 부식전류밀도가 실제로 가장 억제되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 약산성인 pH 4.0의 해수 중에서 Al-Mg 합금재의 분극저항이 높게 나타나면서 부식전류밀도가 가장 억제되는 이유는 약산성인 pH 4.0의 해수 중에서 부동태 산화피막(passive oxide film)이 형성되기 때문인 것으로 사료된다(이학열, 1990). 즉, 중성인 pH 6.7인 해수 중에서 보다 약산성인 pH 4.0의 해수 중에서 Al-Mg 합금재의 내식성이 더 우수하게 나타나지만, 강산성인 pH 1 및 pH 2의 해수 중에서는 분극저항은 낮게 나타나면서 부식전류밀도는 높게 배류됨으로써 Al-Mg 합금재의 부식성은 민감하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 대부분의 연안해수는 강산성화되지 않지만, 특정한 강산성인 오염해안에서 사용되는 Al-Mg 합금재 프로펠러는 피복(coating)처리하여야 할 것으로 추정된다.

4. 분극지배기구

Evans 분극도인 전위-부식전류밀도(E-i) 선도에서 Al-Mg 합금재에 대한 부식전류밀도(부식속도)의 분극지배형식을 고찰하고자, Fig. 9에 해양환경의 pH 변화에 따른 Al-Mg 합금재의 E-i 분극선도를 나타내었다.

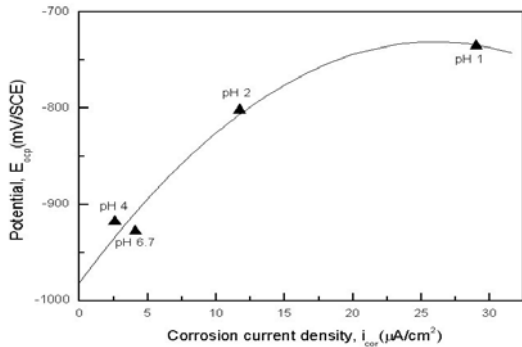


Fig. 9. Potential vs. current density(E-i) of Al-Mg alloy in various pH sea water.

중성인 pH 6.7로부터 약산성인 pH 4.0으로 낮아지면서 Al-Mg 합금재의 전위는 높아(귀전위화)지면서 부식전류밀도는 더 억제되고 있다. 그러나 강산성인 pH 2.0 및 pH 1.0으로 pH가 낮아지면서 Al-Mg 합금재의 전위는 높아지면서 부식전류밀도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 경향을 나타내는 이유는 중성인 pH 6.7~ 약산성인 pH 4.0의 범위에서 Al-Mg 합금재의 산화피막에 의해 부동태화하지만, pH가 더 낮아짐에 따라 Al-Mg 합금재의 산화피막은 불안정해져서 수소발생형 부식을 일으키기 때문인 것으로 사료된다(尹藤伍郎, 1982).

그리고 중성으로부터 산성으로 pH가 낮아짐에 따라 전위는 Evans 분극도의 음극전위에 접근되며, 부식전류밀도(부식속도)는 분극이 큰 양극의 반응속도에 지배되고 있으므로 중성으로부터 산성으로 pH가 낮아짐에 따른 Al-Mg 합금재의 부식반응은 양극지배(anodic control)로 판단된다(임우조 et al., 1994).

IV. 결 론

본 연구는 해수 중에서 Al-Mg 합금재의 전지작용부식 거동 및 연안 오염해수 중에서 분극거동, 분극저항 및 부식전류밀도 거동에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Al-황동 프로펠러의 부식전위는 선체용 재료의 부식전위보다 더 높게 나타나지만, Al-Mg 합금재 프로펠러의 부식전위는 선체용 재료의 부식전위와 거의 유사하거나 낮게 나타남으로써 Al-Mg 합금재 프로펠러에 의한 선체의 전지작용부식은 일어나지 않을 것으로 판단된다.
- (2) 약산성인 pH 4.0의 해수 중에서 Al-Mg 합금재의 분극저항이 가장 높게 나타나면서 부식전류밀도가 억제된다.
- (3) 중성으로부터 산성으로 pH가 낮아짐에 따라 전위는 Evans 분극도의 음극전위에 접근되며, 부식전류밀도(부식속도)는 분극이 큰 양극의 반응속도에 지배되고 있으므로 Al-Mg 합금재의 부식반응은 양극지배로 판단된다.

참고 문헌

전대회, 실용방식공학, 태화출판사, pp.150~154, 1989.
 이상승, 현대중공업(주)의 업체동정, 한국박용기 관학회지, Vol. 27, No. 2, pp.1~2, 2003.
 김영식, 최신 기계재료학, 형설출판사, pp.288~291, 1993.
 임우조 · 양학회 · 인현만 · 이진열, 부식과방식, 원창출판사, pp. 301~303, 1994.
 이학열, 금속부식공학, 연경문화사, pp.263~264, 1990.
 山田盛雄, アルミニウム技術便覽”, 日本輕合金出判株式會社, pp.1675~1701, 1995.
 隈元 士, 船用プロペラと軸系, 日本成山堂書店, pp.35~38, 1991.

- 尹藤伍郎, 機械工學全書 6(腐食と防食), 日本コロナ社, pp.87~89, 1982.
- Denny A. Johes, Principles and prevention of corrosion, Macmillan publishing company , pp.168~169, 1991.
- 中川 雅央, 電氣防食法の實際, 日本地人書館, pp.248~249, 1987.
- 青木 健, プロペラと軸系装置, 日本海文堂, pp.55~57, 1989.
- K. R Trechewey · J. Chamberlain, Corrosion for Science and Engineering, Longman Scientific & Technical, 2nd edition, pp.135~137, 1995.
- J. R. Davis, Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, pp.1~10, 1999.
- 前田泰昭 · 竹中規, 地球規での酸性雨現狀と材料劣化, 日本材料と環境, Vo1.40, No. 9, pp.619~629, 1995.
- 尹藤伍郎, 機械工學全書 6(腐食と防食), 日本コロナ社, pp.272~273, 1982.