

알루미늄합금 원통냉각기의 부식 특성에 관한 연구

임우조[†] · 김성진^{*} · 윤병두^{**}

부경대학교, ^{*}한국해양수산연수원, ^{**}부경대학교 대학원

The Study on the Corrosion Characteristics of Al-Alloy Shell for Cooler

Uh-Joh LIM[†], Sung-Jin KIM^{*} and Byoung-Du YUN^{**}

Pukyong National University, ^{*}Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology,

^{**}Graduate School Pukyong National University

Abstract

Most Recently, with rapid development in marine industries such as marine structures and ship, there occurs much interest in the study of corrosion characteristics which play an important role in design of cooling water system like heat-exchanger. Especially, as operating environment of fresh cooling water system in vessels is acidified, this system is seriously corroded.

In this study, to study on the corrosion characteristics of Al-alloy shell for cooler, the electrochemical polarization test of materials for the marine fresh water cooler such as Al-alloy, Cu and naval brass was carried out in fresh water. And thus the polarization resistance and anodic polarization behavior of Al-alloy, Cu and naval brass are investigated. Also, galvanic corrosion characteristics of Al-alloy coupled with Cu and naval brass is considered.

The main results obtained are as follows :

- (1) The current density of corrosion is high in order of Al-alloy > naval brass > Cu
- (2) As anodic potential increases, the corrosion resistance of naval brass is better than that of Cu.
- (3) The galvanic corrosion of Al-alloy coupled with Cu and naval brass is activated than corrosion of Al-alloy

Key words : Al-alloy(알루미늄합금), Shell cooler(원통냉각기), Polarization resistance(분극저항), Anodic polarization(양극분극), Galvanic corrosion(전지작용부식)

서 론

최근 공업의 급속한 발전과 더불어 각종 기계장치들은 고속화 및 고출력화 되고 있으며, 사용환경조건은 오염화 및 다양화되고 있다. 이와 같은 가혹한 조건에서 작동되는 기계장치와 설비들에 있어서 냉각장치(cooling system)는 필수불가결한 것이다. 특히, 선박 1척 당 20여개의 열교환기가 필요로 되며, 자

동차, 화학플랜트, 원자력발전소, 화력발전소, 제철소 폐열 이용장치 등 많은 곳에서 각종 열교환기가 사용되고 있고 사용 용도에 따라 다양한 환경에 접하고 있다.

그리고 전반적인 산업발전 및 소득증가에 따라 석탄, 석유 및 가스 등의 화석에너지 소비량이 급격히 증가되고 있다. 이러한 화석에너지의 소비량이 증가됨에 따라 유황화합물인 SO₂, SO₃ 및 H₂S, 질소화합

[†] Corresponding author : limuj@pknu.ac.kr

물인 NO와 NH₃, 산화물인 CO 그리고 염화물인 HCl 과 Cl₂ 등의 대기오염물질 배출이 증대됨으로써 환경오염을 가속시키고 있다. 이들 대기오염물질 중에서 SO₂, SO₃, CO 및 THC 등은 대기 중의 수분이나 물에 혼입되거나 산성비에 의해 하천수나 강물 등의 담수가 산성화되며, HCl 및 Cl₂ 등은 물에 혼입되면 일부는 가수분해에 의해 산성화된다. 이와 같이 산성화된 담수가 바다에 유입함으로써 연안 해수는 오염됨으로써 선박용 열교환기는 산성 해수에 의한 부식손상이 가속된다.

일반적으로 소형 박용 열교환기의 재질은 원통은 Al합금재 및 주철, 세관(tube)은 동(Cu), Al황동(Al brass), 네이발 황동(naval brass) 등이 사용되고 있으므로 여러 가지 금속의 접촉에 의한 전지작용부식(galvanic corrosion)이 발생할 수 있다.

또한 각종 열교환기에 사용되는 환경은 다종의 열전달 매체, 즉 해수, 청수, 윤활유(lubricating oil) 및 연료유(fuel oil, steam) 등이고, 이러한 열전달 매체의 온도 및 유속범위가 다양하기 때문에 사용용도에 적합한 내식성 재료의 선택 및 방식설계 방안이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 선박용 고속디젤기관의 청수냉각기에서 알루미늄합금 원통의 부식 특성에 관한 연구를 하기 위하여, 청수 환경 중에서 각 세관 및 원통 재질의 전기화학적 분극시험을 실시하였다.

이들 실험결과를 토대로 하여, 청수 환경 중에서 세관과 원통의 분극저항, 개로전위, 부식전류밀도, 양극전위의 상승에 따른 부식 및 전지작용부식 특성을 고찰함으로써 청수 환경 중에서 선박 고속 디젤 기관용 열교환기의 최적화 설계 및 보수 유지의 기초자료로 활용하는데 기여하고자 한다.

시험편 및 실험방법

1. 시험편

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 박용 고속디젤기관의 청수냉각기(fresh water cooler)의 원통으로 사용되고 있는 알루미늄합금(Al-alloy, AC8A), 관판(end plate) 및 세관(tube)용으로 사용되고 있는 네이발 황동(naval brass, C4621P)과 동(Cu, C1100-H)으로서, 그 화학적 조성과 기계적 특성은 Table 1, Table 2 및 Table 3과 같다.

부식실험에 사용된 Al합금, 네이발 황동 및 동(Cu)의 전기화학적 분극 시험편은 Table 1, Table 2 및 Table 3과 같은 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 이들 재료의 판재로부터 절취하여 가로 10

mm, 세로 10 mm, 두께 5 mm의 크기로 제작함으로써 유효노출면적을 1.0 cm²로 하였으며, 전기화학적 분극시험을 위한 시험편의 형상과 크기는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of specimen, Al-alloy(AC8A)

Chemical composition (wt %)	Cu	Fe	Zn	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Al
	1.0	0.8	0.15	1.0	0.15	1.2	12	0.2	Remainer
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)				Hardness (H _B)				
	176.4				52				

Table 2. Chemical compositions and mechanical properties of specimen, naval brass (C4621P)

Chemical composition (wt %)	Cu	Pb	Fe	Sn	Zn
	62.0	0.2	0.1	1.1	Remainer
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)			Hardness (H _B)	
	313.6			-	

Table 3. Chemical compositions and mechanical properties of specimen, Cu(C1100-H)

Chemical composition (wt %)	Cu	P
	99.96	0.04
Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	Hardness (H _B)
	274.4	80

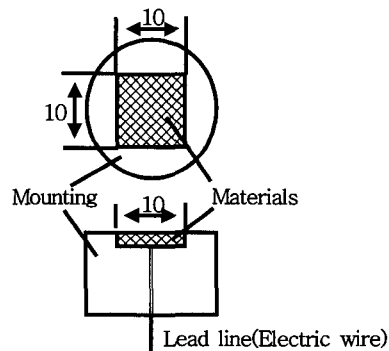


Fig. 1. Shape and dimension of polarization test specimen(unit : mm).

이 시험편의 제작에 있어서 가공경화 및 열응력을 배제하기 위해 시험재료를 다이아몬드 휠 커터로 저속 절단한 후 시험편에 전선을 연결시키고, 호마이커로 마운팅(mounting)하였다.

2. 부식실험방법

본 실험에 사용된 부식 특성시험에 이용될 실험장치는 다른 부식·방식의 평가법보다 실험시간이 짧게 되고, 비파괴적으로 실시할 수 있기 때문에 부식 및 방식 평가법으로 많이 이용되고 있는 전기화학적 분극시험을 실시하였다. 이 분극실험장치의 전체 계통도는 Fig. 2와 같다.

이 분극실험장치는 EG&G社의 Model 273A Potentiostat/Galvanostat와 PC를 이용하였으며, M 352/ 252 corrosion software를 사용하여 분극 특성시험을 실시하였다. 여기서 부식시험은 부식환경조 중에서 시험편을 알루미늄합금, 동 및 네이발 황동으로 하고, 기준전극은 포화카로멜전극(Standard

calomel elec-trode, SCE), 보조전극(Counter electrode)은 고밀도 탄소봉으로 하였다.

또한 부식환경 조건은 비저항 5000 Ω·cm인 청수로 하고, 부식용액의 온도는 가열코일이 부착된 oil bath에 온도감지기를 설치하여, 온도를 25±1℃ 범위 내에서 유지하도록 하였다.

그리고 전기화학적 분극시험에 있어서 Fig. 1의 부식시험편 표면을 #400~1200번까지의 에머리 페이퍼를 이용하여 단계적으로 연마한 다음, 시험편 표면 거칠기의 영향을 최소화 및 동일화하기 위하여 연마기에서 산화알루미늄(Al₂O₃)분말을 이용하여 시험편 표면을 마무리 연마하였다. 그리고 증류수 중에서 초음파세척기로 세척한 다음, 아세톤으로 탈지한 후 열풍으로 건조시켰다. 이와 같이 표면처리된 부식 시험편을 Fig. 2의 분극시험장치의 회로도와 같이 배선하였고, 시험편을 부식환경조에 침지한 후 자연 전위에서 30분간 안정시키고 난 후 각 분극시험을 실시하였다. 이와 같은 분극실험조건은 Table 4와 같다.

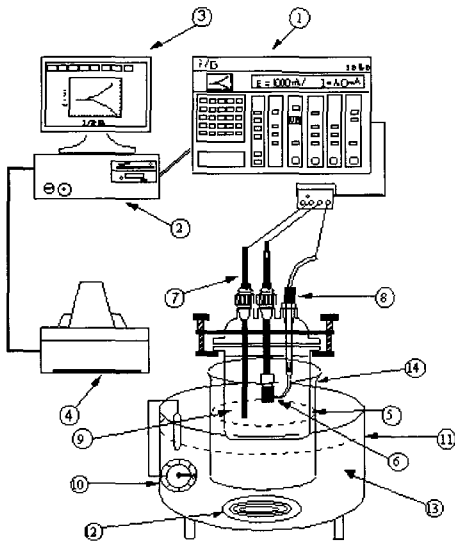


Fig. 2. Schematic diagram of polarization test equipment.

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

Table 4. Experimental conditions of the polarization test

Instrument	EG & G Model 273A
Electrolyte	Fresh water(5000 Ωcm)
Material	Al-alloy, Cu and Naval brass
Scan rate	0.167 mV/s
Area of specimen	10 mm ²
Temperature	25±1 °C
Polarization test	Tafel polarization test Anodic polarization test Potentiostatic polarization test Galvanic corrosion test

결과 및 고찰

1. 분극저항 거동

Fig. 3은 비저항 5000 Ω·cm인 청수 중에서 알루미늄 합금, 동 및 네이발 황동의 분극저항을 나타낸 것이다. 여기서, 청수의 온도는 25±1℃이다.

동의 분극저항이 가장 높게 나타나고, 알루미늄합금 및 네이발 황동의 분극저항은 유사하게 나타나고 있다. 이와 같이 동의 분극저항이 높게 나타나는 이유는 동이 부동태화 금속이기 때문인 것으로 사료되고, 알루미늄 합금이나 네이발 황동의 분극저항이 낮게 나타나는 이유는 이들 합금의 화학적 성분인 알루미늄(Al)이나 아연(Zn)이 활성화 금속이기 때문

인 것으로 생각된다. 그러므로 분극저항이 높게 나타나는 동의 내식성이 알루미늄 합금재 및 네이발 황동의 내식성보다 더 우수할 것으로 추찰된다.

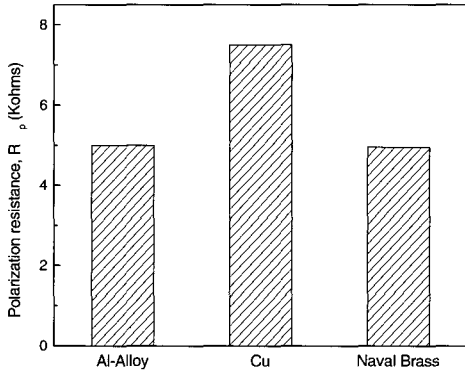


Fig. 3. Polarization resistance of Al-alloy, Cu and naval brass in fresh water at 25 °C.

2. 전면부식속도 특성

Fig. 4는 비저항 5000 $\Omega \cdot cm$ 인 청수 중에서 알루미늄 합금재, 동 및 네이발 황동의 Tafel 분극곡선을 나타낸 것이다. 여기서, 청수의 온도는 25 ± 1 °C이다.

동 및 네이발 황동의 개로전위(open circuit potential, OCP)는 알루미늄 합금재의 개로전위보다 더 귀전위화되고 있다. 그리고 청수 중에서 각 재료의 부식성을 좀 더 정량적으로 고찰하고자, Fig. 4의 Tafel 분극곡선으로부터 Tafel 외삽법을 M 352/252 corrosion software로부터 분석하여 구해진 부식전류밀도($\mu A/cm^2$) 값을 Fig. 5에 나타내었다.

부식전류밀도는 알루미늄 합금재 > 네이발 황동 >

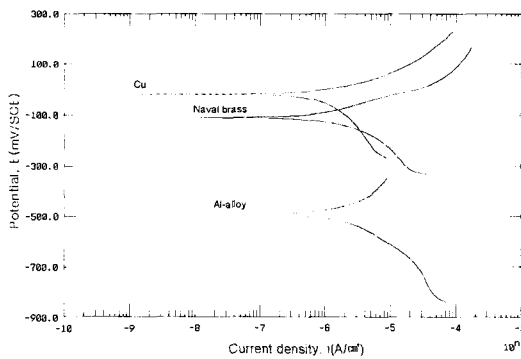


Fig. 4. Tafel polarization curves of Al-alloy, Cu and naval brass in fresh water at 25 °C.

> 동의 순으로 더 높게 배류되는 경향을 나타내고 있다. 이미 Fig. 3의 분극저항으로부터 추찰된 바와 같이 비저항 5000 $\Omega \cdot cm$ 인 청수 중에서 전면부식에 대한 동의 내식성이 가장 우수하고, 네이발 황동의 내식성은 알루미늄 합금재의 내식성보다 약간 우수함이 실제로 나타나고 있다.

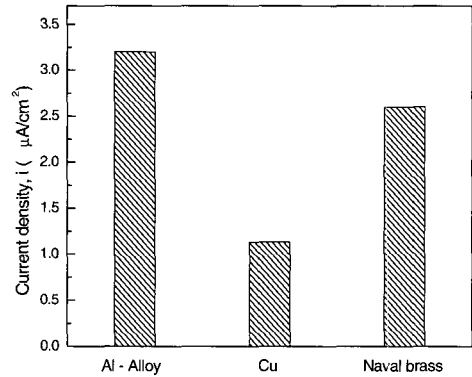


Fig. 5. Corrosion current density of Al-alloy, Cu and naval brass in fresh water at 25 °C.

3. 양극분극거동

외부용력, 잔류용력, 유속 및 온도 등으로 인한 양극전위가 상승하면 부식전류는 높게 배류됨으로써 국부부식이 활성화될 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 양극전위의 상승에 따른 박용 고속디젤기관의 냉각용 청수냉각기의 부식거동을 고찰하고자, 비저항 5000 $\Omega \cdot cm$ 인 청수 중에서 알루미늄합금재, 동 및 네이발 황동의 양극분극곡선을 정리하여 Fig. 6에 나타내었다.

개로전위에서부터 양극전위가 상승하면서도 알루미늄 합금재의 부식전류밀도가 동이나 네이발 황동의 부식전류밀도보다 더 높게 배류됨으로써 부식성이 가장 활성화되고 있다. 또한 네이발 황동의 부식전류밀도는

개로전위로부터 양극전위 약 +850 mV/SCE 까지는 Fig. 3 및 Fig. 5에서 고찰된 바와 같이 동의 부식전류밀도보다 더 높게 배류되지만, 양극전위 약 +850 mV/SCE 이후부터 양극전위가 상승할수록 네이발 황동의 부식전류밀도는 동의 부식전류밀도보다 더 억제 되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 외부용력, 잔류용력, 유속 및 온도 등으로 인한 양극전위가 상승하는 경우에는 네이발 황동의 내식성이 동의 내식성이 더 우수할 것으로 추정된다.

이와 같이 양극전위가 상승함에 따른 네이발 황동과 동을 내식성을 좀 더 정량적으로 비교하고자, Fig. 7에 비저항 $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 청수 중에서 $E=3000 \text{ mV/SCE}$ 로 인가전위를 부가한 경우의 동 및 네이발 황동의 부식전류밀도 변화를 시간경과에 따라 나타내었다.

Fig. 6에서 양극전위 약 $+850 \text{ mV/SCE}$ 이후부터 양극전위가 상승할수록 네이발 황동의 부식전류밀도는 동을 부식전류밀도보다 더 억제되는 경향과 같이 양극전위를 $E=3000 \text{ mV/SCE}$ 로 인가한 경우에도 네이발 황동의 부식전류밀도는 동을 부식전류밀도보다 크게 억제되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 양극전위가 약 $+850 \text{ mV/SCE}$ 이후부터 양극전위가 상승할수록 네이발 황동의 내식성이 동을 내식성이 더 우수할 것으로 판단된다.

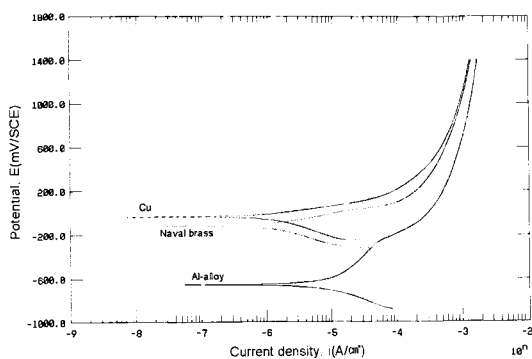


Fig. 6. Anodic polarization curves of Al-alloy, Cu and naval brass in fresh water at 25 °C.

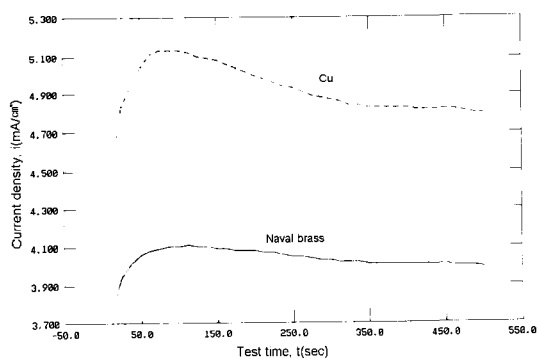


Fig. 7. Potentiostatic polarization curves of Cu and naval brass by impressed potential ($E=3 \text{ V/SCE}$) in fresh water at 25 °C.

4. 알루미늄합금의 전지작용부식 경향

냉각용 청수냉각기에서 원통재료인 알루미늄 합금과 세관재료인 동이나 네이발 황동의 이종금속 사용에 따른 이종금속접촉부식(전지작용부식, galvanic corrosion)의 경향에 대해 고찰하고자, 비저항 $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 청수 중에서 알루미늄합금, 동 및 네이발 황동의 자연전위를 시간경과에 따라 Fig. 8에 나타낸 것이다.

청수냉각기의 원통재료인 알루미늄 합금재의 자연전위는 세관재료인 동 및 네이발 황동의 자연전위보다 약 $350 \sim 500 \text{ mV/SCE}$ 정도로 더 비전위(卑電位)화되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 이종금속이 조합되는 각종 설비에서 전위차가 약 50 mV/SCE 이상이면 전지작용부식이 일어나는 것으로 보고되고 있으므로 고속디젤기관의 냉각용 청수냉각기에서 원통재로 사용되는 알루미늄 합금재는 세관재인 동이나

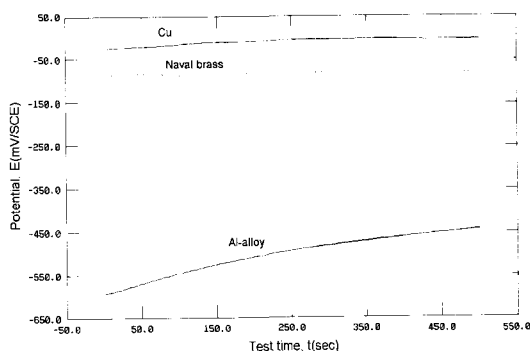


Fig. 8. Potential of Al-alloy, Cu and naval brass vs. test time in fresh water at 25 °C.

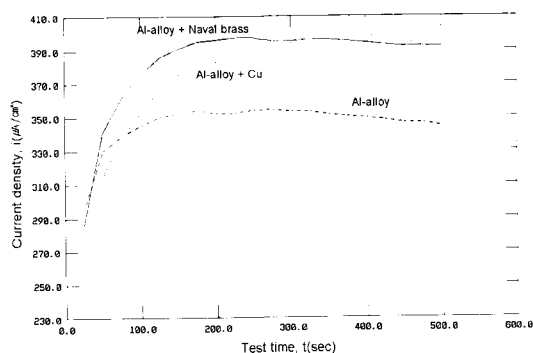


Fig. 9. Corrosion current density of Al-alloy and galvanic couple Al-alloy with Cu and naval brass vs. test time in fresh water at 25 °C.

네이발 황동에 의해 전지작용부식이 일어날 것으로 추정된다.

Fig. 9는 비저항 $5000 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 청수 중에서 동 및 네이발 황동과 조합된 알루미늄합금의 전지작용 부식에 의한 부식전류밀도 및 알루미늄 합금재의 부식전류밀도 변화를 시간경과에 따라 나타낸 것이다.

이미 Fig. 8에서 원통재로 사용되는 알루미늄 합금재는 세관재인 동이나 네이발 황동에 의해 전지작용부식이 일어날 것으로 추정된 바와 같이 동 및 네이발 황동과 조합된 알루미늄 합금재의 전지작용부식에 의한 부식전류밀도는 알루미늄 합금재 단독의 부식전류밀도보다 더 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

결론

청수 환경 중에서 박용 고속디젤기관의 냉각용 청수냉각기의 원통재료인 알루미늄 합금재 그리고 세관재료인 동 및 네이발 황동에 대한 분극저항, 부식전류밀도, 양극분극거동 및 전지작용부식 경향에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 부식전류밀도는 알루미늄 합금재 > 네이발 황동 > 동의 순으로 높게 나타난다.
- 2) 양극전위가 상승할수록 네이발 황동의 내식성이 동의 내식성보다 더 우수할 것으로 판단된다.
- 3) 동 및 네이발 황동과 조합된 알루미늄합금의 전지

작용부식은 알루미늄합금 단독의 부식보다 더 활성화 된다.

참고문헌

- 1) 임우조 · 양학희 · 인현만 · 이진열(1994) : 부식과 방식, 원창출판사, 302-305.
- 2) Davis, Joseph R.(1999) : Corrosion of Aluminum and Aluminum alloy, ASM International, 19- 21.
- 3) 前田泰昭 · 竹中規訓(1995) : 地球規模での酸性雨現狀と材料劣化, 日本材料と環境, Vol. 40, No. 9, 619-629.
- 4) Denny A. Jones(1991) : Principles and prevention of corrosion, Macmillan publishing company, 398-401.
- 5) W. H. Ailor(1988) : Engine Coolants Testing, State of the Art, ASTM, STP 705, 81-101.
- 6) 伊藤伍郎(1986) : 日本機械工學全集 6, 腐食と防食, 日本コロナ社, 78-79.
- 7) 임우조 · 정해규(1999) : 원통다관형 열교환기의 침식-부식 특성에 관한 연구(1), 한국어업기술학회지, Vol. 35, No. 2, 196-200.
- 8) 日本材料學會(1990) : 材料強度學, 日本進行印刷出版, 173-175.

2003년 4월 24일 접수

2003년 5월 2일 수리