

한국부식학회지

Journal of the Corrosion Science Society of Korea

Vol. 10 No. 3, Sept. 1981

〈研究論文〉

Cu-Zn-Al 系 合金의 海水부식에 관한 연구

尹勝烈 · 白壽鉉 · 李秀完 · 裴大喆 · 方孝善

漢陽大學校 工科學大學

A Study on the Corrosion Behavior of Cu-Zn-Al Alloy in Sea Water

S·R·Yoon, S·H·Paek, S·W·Lee, D·C·Bae, H·S·Bang

College of Engineering, Hanyang University

Abstract

Corrosion behavior of Cu-Zn-Al alloy (Aluminum brass) in 3% NaCl and synthetic sea water has been studied by electrochemical polarization technique.

Alloy specimens used were prepared originally from electrolytic copper, zinc and aluminum with variation of aluminum content from zero to 3% holding the content of Cu 76%. The commercial alloy corresponding to ASTM B-111-1974 for Al-brass condenser tube at power plant was also tested for comparison with the laboratory specimens mentioned above.

All the experiments were carried out at room temperature. The pH of the corrodent which was open to air was 6 for NaCl solution and 7.8 for the synthetic sea water. Polarization mode adopted was potentiodynamic with the potential sweep rate of 250 mV/min.

In order to find out the effect of flow rate of the corrodent on the corrosion of the alloys the Rotating Disc Method (RDM) was attempted, which is the technique of revolving the specimen itself instead of flowing the corrodent. It was thought that RDM could simulate the flow pattern of the corrodent passing through the condenser tube of the power plant.

The following conclusions were drawn from the experimental results.

- 1) Addition of small amount of aluminum up to 3% to the 76% Cu alpha-brass increases the anodic dissolution rate of the alloy and promotes the passivation.
- 2) As the revolution speed of the specimen increased, corrosion potential drops down to more active potential. With increased the revolution speed anodic dissolution rate of the alloy tends to decrease, moving the primary passivation potential to the noble direction.
- 3) At the revolution speed of the specimen beyond 1500 rpm (39.3cm/sec) passivation phenomena did not occur in 2% Al-brass prepared at the laboratory only showing so-called erosion corrosion phenomena.
- 4) Formation of the CuCl layer on the specimen during polarization seems to be prerequisite to the primary passivation of the alloy.
- 5) The shape of the polarization curve of the alloy in the synthetic sea water was somewhat different mainly in the noble potential range from those in 3% NaCl solution.

6) Addition of ferrous ion up to 0.05 ppm as sulfate form into the synthetic sea water decreases remarkably the anodic dissolution rate of the commercial Al-brass showing great increase in anodic polarization.

1. 서 론

Cu-Zn-Al 系 合金(Aluminum brass)은 海水를 冷却 水로 使用하는 熱交換器에 많이 쓰이고 있으며 우리나라 發電所 復水器管 材質의 75% 이상을 점유하고 있다고 한다¹⁾. Al-brass 管은 海水를 냉각수로 사용하는 조건하에서 스스로 保護皮膜을 형성하여 耐蝕性을 나타내는 것으로 알려져 있는데^{2,3)} 냉각수의 流速이 증가하면 erosion 부식이 일어나서 이에 대한 대책이 필요하다.

본 연구는 이러한 流速의 영향에 중점을 두고 Al-brass 합금의 海水腐蝕學動을 電氣化學的 方法을 사용하여 조사한 것이다. 合金은 실험실에서 직접 제조한 것(이하 실험실시편이라 약칭함)과 現場에서 채취한 復水器管 材質(이하 현장시편이라 약칭함)을 모두 시험하여 서로 비교해 보았으며 부식매질로서는 海水의 主成分인 NaCl이 3% 들어있는 용액과 기타 해수성분을 첨가한 人造海水를 사용하였다.

2. 실험

2.1 시편

실험실시편은 전해동, 전해아연, 전해알루미늄을 사용하여 다음과 같이 제작하였다.

먼저 4번 흑연도가나에 소경량의 전해동을 넣고 1150°C로 유지된 muffle 爐에서 일정시간 용해시킨 후 爐 밖에서 용탕을 전봉으로 끼어주면서 전해아연 전해알루미늄을 차례로 첨가하였다. 용탕을 爐內에서 일정시간 재가열하고 Slag 제거후 약 1050°C의 용탕을 isorite brick 주형(길이 45cm, 높이 4cm, 폭 2-3cm)에 주입하여 합금을 만들었다. 이 때 주형내에서 합금

이 완전히 응고할 때 까지 공기와 접촉된 부분을 torch lamp로 계속 가열하여 편석방지과 주조결함 제거를 꾀하였다.

이렇게 만든 합금을 지름 15mm인 環棒으로 가공한 후, hot copper turning 위로 통과시킨 N₂ 가스 분위기(730°C)하에서 2시간 동안 균질화처리를 하고, 인발기로 최종지름이 5mm 되게 뽑아내었다. 인발된 棒을 길이 0.5cm 되게 자른 후 다시 500°C에서 10분간 균질화 열처리를 하고 원통형 시편의 一斷面에 전침을 남명하여 최종시편들을 만들었다. 이 최종시편들은 실험하기 직전에 하나씩 Teflon tape로 감싼뒤 부식매질에 노출될 斷面을 #1000 emery paper에 연마하고 증류수로 여러번 세척한 뒤 後述할 시편 holder에 끼워 사용하였다.

Table 1 에는 본 연구에서 사용한 제조 시편들의 화학분석 결과를 나타내었다. 시편의 화학분석은 Kolthoff 등⁴⁾에 따라 Cu는 전기중량법, Zn은 EDTA법, Al은 중량법으로 분석하였다.

현장 현장시편은 외경 1" 짜리(두께 1.245mm) 管을 발전소에서 직접 구입하여 실험실시편과 같은 최종 dimension으로 가공한 후 사용하였는데 현장시편의 data도 Table 1에 실어 놓았다.

또 Fig. 1은 제조과정에 따른 실험실시편의 현미경 조직 사진과 현장 시편의 현미경조직 사진을 보인 것이다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 2는 시편의 회전장치를 나타낸 것이다. 회전방식은 Rotating Disc Method를 채택하였다. 시편은 Fig. 3의 시편 holder set를 사용하여 Fig. 2의 rotating spindle 아래쪽에 연결하였다. rotating spindle 材

Table 1. Chemical composition of the specimens used.

wt. %

	Number or standard	Cu	Al	Zn	Pb	Fe	As	Other impurities
Laboratory specimen	# 0	76.01	0	remainder				
	# 1	76.02	1.01	remainder				
	# 2	76.02	2.03	remainder				
	# 3	76.01	3.02	remainder				
Plant specimen	ASTM B-111-1974 Symbol 687	76.0~79.0	1.8~2.5	remainder	max. 0.07	max. 0.06	0.02~0.10	max 0.15

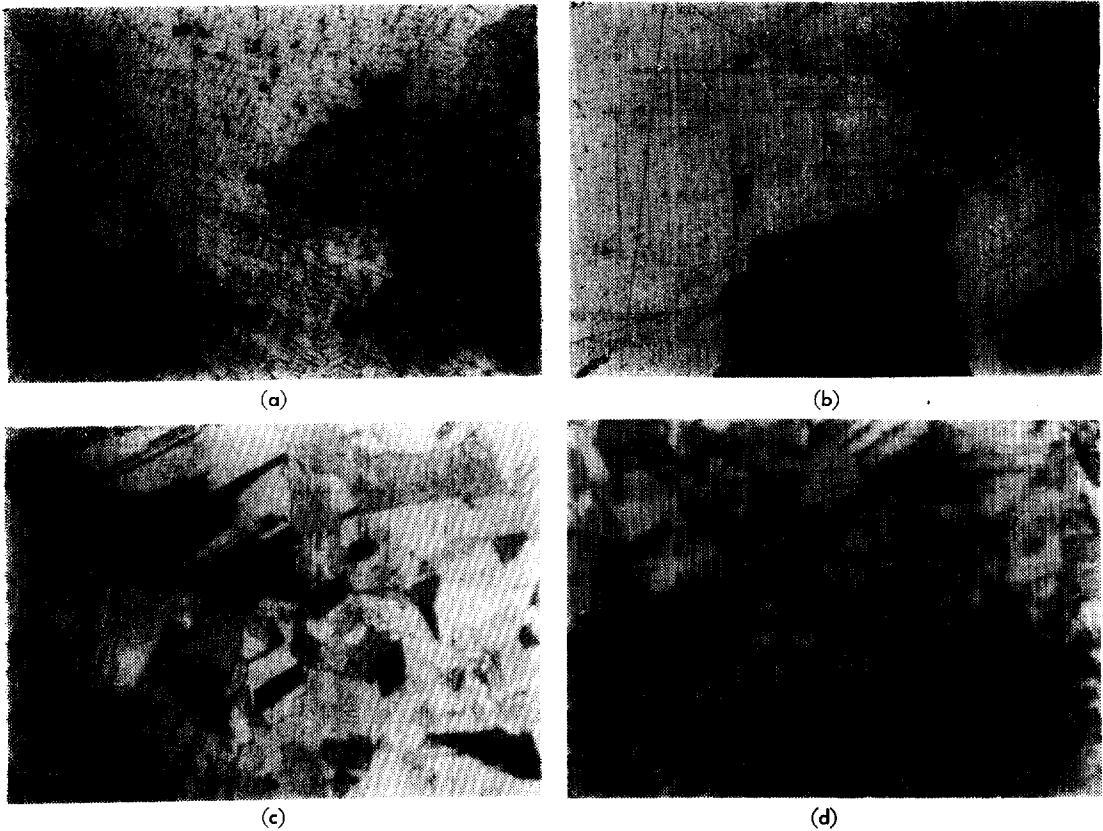


Fig. 1 Microstructures of the specimens. All in magnification of 50x.

- (a) laboratory specimen as casted
- (b) laboratory specimen after casting
- (c) laboratory specimen under investigation. This microstructure was obtained through the casting→annealing→cold working→annealing processes as specified in the text.
- (d) plant specimen under investigation.

質은 가운데 구멍이 뚫린 스테인레스鋼材 管인데 그 하단부는 Fig. 3의 좌측에 보인 나사달린 steel holder를 끼우게 되어 있고, 이 steel holder에 Fig. 3 우측의 Teflon holder를 다시 끼울 수 있도록 설계하였다. Teflon holder의 하단부에는 Fig. 3에 보인 바와 같이 電極으로 사용할 최종시편이 삽입되게 되어 있는데 이때 부식매질에 노출될 시편의 겉보기 단면적은 0.196 cm^2 이 된다.

한편, rotating spindle 관의 가운데로는 시편에 납땀하여 연결한 전선이 통과하며 이 전선은 시편 회전장치 상단에 설치한 brass ring에 납땀 되어 있고 brass ring에는 흑연전극을 Fig. 2에 보인 바와 같이 접촉시켜 시편이 회전하는 동안에도 전기적 접촉이 가능하도록 만들었다.

위의 시편 회전장치는 원래 8000rpm 까지 측정가능

하도록 설계한 것이며 motor의 전압을 조절하여 원하는 회전속도를 얻을 수 있었다. 회전속도 측정은 Tachometer로 하였다.

부식매질로는 3% NaCl 용액과 salinity 3.5%, chlorinity 19%를 기준으로한 人造海水용액(Table 2 참조)을 문헌^{5,6)}을 참고하여 만들어 사용하였고 용액의 pH는 미국 Corning社 pH/ion meter 135를 사용하여 측정하였다. 모든 실험은 부식매질이 대기에 노출된 狀態下 室溫에서 수행하였다.

전기화학적 측정은 다른 곳⁷⁾에 나타난 바와 같이 장치와 방법을 사용하여 행하였고 기준전극으로는 포준 카로멜전극을 사용하였다. 앞으로 나타내는 전위 값은 모두 이 포준 Calomel 전극 (SCE)에 대하여 읽은 값이다.

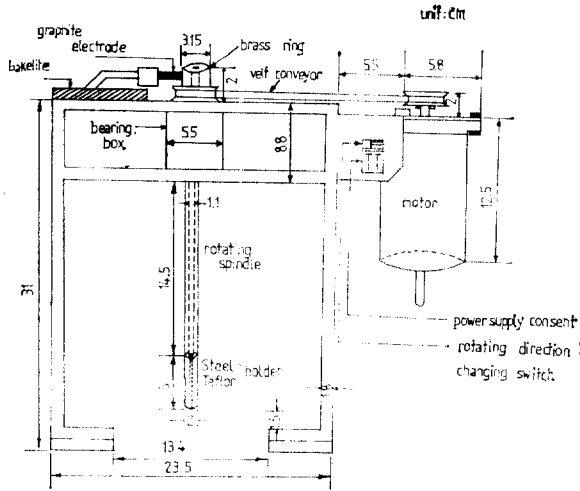


Fig. 2 Apparatus for rotating specimen.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 3% NaCl 용액 (pH=6)내에서 Al 함량에 따라 측정된 동전위 분극곡선의 모양을 나타낸 것이다. 이 때 시편의 회전속도는 200rpm이었다. 전위주사는 낮은 (active)전위로부터 높은(noble) 전위쪽(以下 正方向이라 약칭함)으로 시작하였다가 +1000mV 근처에서 다시 낮은 전위쪽(以下 逆方向이라 약칭함)으로 돌아 움직인 것이며 전위주사속도는 250mV/min이었다.

Fig. 4에서 정방향으로 전위주사를 하였을 때의 분극특성을 살펴 보면 -150~-200mV에 도달할 때까지는 극소량의 환원전류가 흐르다가 환원전류에서 산화전류로 바뀌는 transition potential을 지나서는 산화전류가 갑자기 증가하기 시작하여 +150~+200mV 부근에서 1차 부동태화 현상을 나타내고 있으며 +250mV를 전후하여 산화전류는 다시 증가하기 시작하여 +500mV를 전후하여 제 2차 부동태화 현상을 보이고 있다.

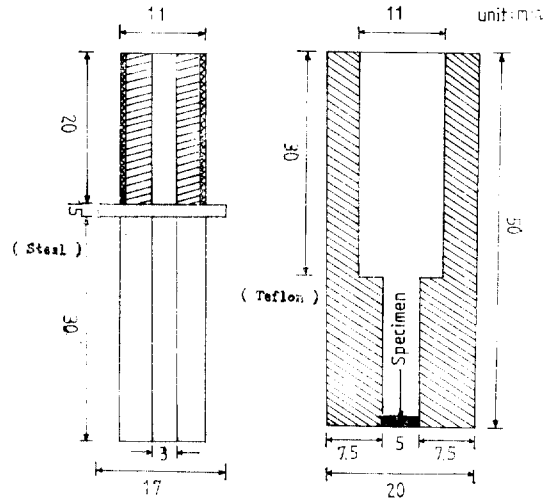


Fig. 3 A schematic drawing of specimen holder.
left: steel part, right: Teflon part.

이상의 분극특성은 양극분극 전류의 크기가 시편의 크기의 영향으로 크게 증가된 경향을 보이고 있는등 실험조건의 차이에 의한 peak 전위의 위치와 전류밀도의 크기에 차이가 있기는 하나 0.5 M NaCl내에서의 α-brass의 분극특성⁷⁾과 아주 유사한 꼴을 보이고 있는데 위에 언급한 문헌⁷⁾ 참고로 하여 Fig. 4의 분극특성과 해당 전극반응 사이의 관계를 고찰해 보면 Table 3와 같다. Al의 첨가 효과는 정방향 전위주사시의 양극분극 곡선에서 비교적 뚜렷하게 나타나고 있는데 예를들이 0~100mV 전위 범위에서 Al을 첨가한 시편은 합금용해 속도가 크게 나타나 있으며 부동태화도 3% 경사를 제외하고는 다소 낮은 전위에서 일어나고 있다.

한편 역방향으로 전위주사를 하였을 때에는 예상과 있던 바와 같이 hysteresis 현상이 뚜렷하게 일어났으며

Table 2. Composition of the synthetic sea water and the method of preparing it.

NaCl	23.926 g	} in 750 ml of distilled water	+	distilled water	=	1kg of Synthetic sea water pH of which is 7.8
Na ₂ SO ₄	4.008 g					
KCl	0.677 g					
NaHCO ₃	0.196 g					
KBr	0.098 g					
H ₃ BO ₃	0.026 g					
NaF	0.03 g					
MgCl ₂ ·6H ₂ O 1M solution	53.27 ml					
CaCl ₂ ·2H ₂ O 1M solution	10.33 ml					
SrCl ₂ ·6H ₂ O 0.1M solution	0.9 ml					

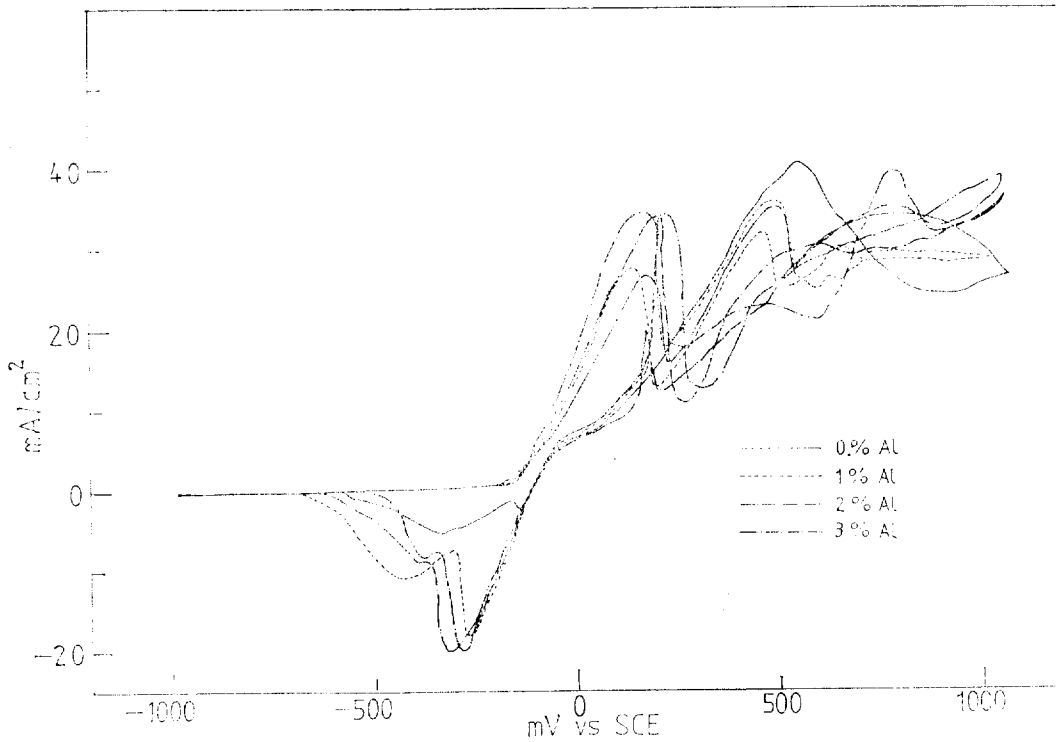


Fig. 4 Potentiodynamic polarization behavior of Cu-Zn-Al alloy in 3% NaCl solution. Scan rate 250 mV/min, rpm = 200, pH=6, 16°C

Table 3. Possible electrode reactions related to polarization characteristics

	전극반응	분극특성과의 관계
(1)	$Cu^{++} - 2e = (Cu-Zn-Al)$	정방향 전위주사시 처음으로 산화전류가 증가하기 시작하는 부분에서의 반응
(2)	$CuCl - e = (Cu-Zn-Al) + Cl^-$	"
(3)	$Cu_2O - 2H^+ + 2e = 2(Cu-Zn-Al) + H_2O$	1차 부동태화에 관련된 반응
(4)	$2CuCl + H_2O = Cu_2O + 2Cl^- + 2H^+$	"
(5)	$CuCl - Cl^- = CuCl_2^-$	정방향 전위주사시 전위가 높은 방향으로 증가함에 따라 생기는 산화전류 변화에 관련된 반응. 식(4)와 더불어, CuCl과 Cu ₂ O의 안정도가 전극표면에서의 전위, pH, Cl ⁻ , Cu ⁺⁺ , CuCl ₂ ⁻ 이온농도에 따라 달라지는 것에 영향을 미칠것임.
(6)	$Cu^{++} - 2Cl^- + e = CuCl_2^-$	
(7)	$Cu^{++} - Cl^- + e = CuCl$	

Al이 포함된 시편의 경우, 정방향 전위주사시 1차 부동태화가 일어났던 +200mV 근처에서 산화전류가 다시 증가하여 異狀 peak를 나타내는 아주 흥미있는 현상을 보였다. 이러한 현상은 Al이 부동태화 형성에

중요한 역할을 하고 있음을 뜻하는 것으로 부동태화 피막이 파괴되어 급속히 부식매질에 노출된 부분에 re-passivation이 일어나서 노출된 금속을 다시 부동태화하는 과정에 관련된 것이라 생각되었다. 한편 역방향주

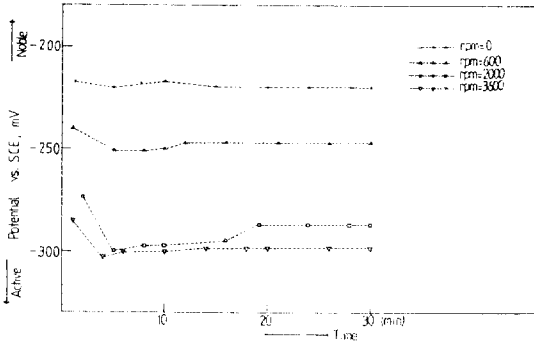


Fig. 5 Corrosion potential versus time for the specimen of 2%Al-brass with variation of rpm in 3% NaCl solution pH of which 6.0, 17°C.

사시에 나타나는 환원 peak는 정방향 주사시에 용해된 물질의 환원에 기인된 것으로 보이며 이상과 같이 1 Cycle의 전위주사를 끝낸 시편을 부식용액에서 꺼내 보면 0%Al 시편이나 Al이 첨가된 시편 모두, 시편 표면은 붉은 구리색 층으로 완전히 덮여 있었는데 이것은 황아연현상으로 인한 Cu로 추정된다.

Fig. 5는 2%Al 합금시편의 부식전위를 시편의 회전속도에 따라 측정한 것이고 Fig. 6은 정방향 전위주사의 동전위 분극특성을 시편의 회전속도에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 시편의 부식전위는 부식용액에 침적후 30분이내에 정상상태에 도달하였으며 시편의 회전속도가 증가함에 따라 점점 낮은 전위 쪽으로 떨어지고 있다. 이와 같이 부식전위 값이 낮아지는 이유는 시편의 회전속도가 증가함에 따라 시편/용액 계면의 diffusion layer 두께가 감소되어, 부식 반응으로 용해된 금속이온이 시편/용액의 계면에서 쉽게 제거되기 때문에 결국 금속의 용해반응을 분극시키지 못하기 때문이라고 생각되었다.

그러나 확산층의 두께가 작아지면 이에는 용액내의 H⁺, Cl⁻ 이온이 시편/용액 계면으로 확산하여 들어가는 속도도 증가하게 된다. 따라서 Table 3의 반응 (2)는 산화반응 쪽으로 진행될 가능성이 많아지고 반응(3)은 환원반응 쪽으로 진행될 가능성이 많아질 것이다. 즉 시편회전속도가 증가함에 따라 CuCl의 생성은 Cu₂O의 생성보다 용이해질 가능성이 많아지고 한편 CuCl은 Table 3의 식 (5) (6) (7)의 반응과 연관된 것이

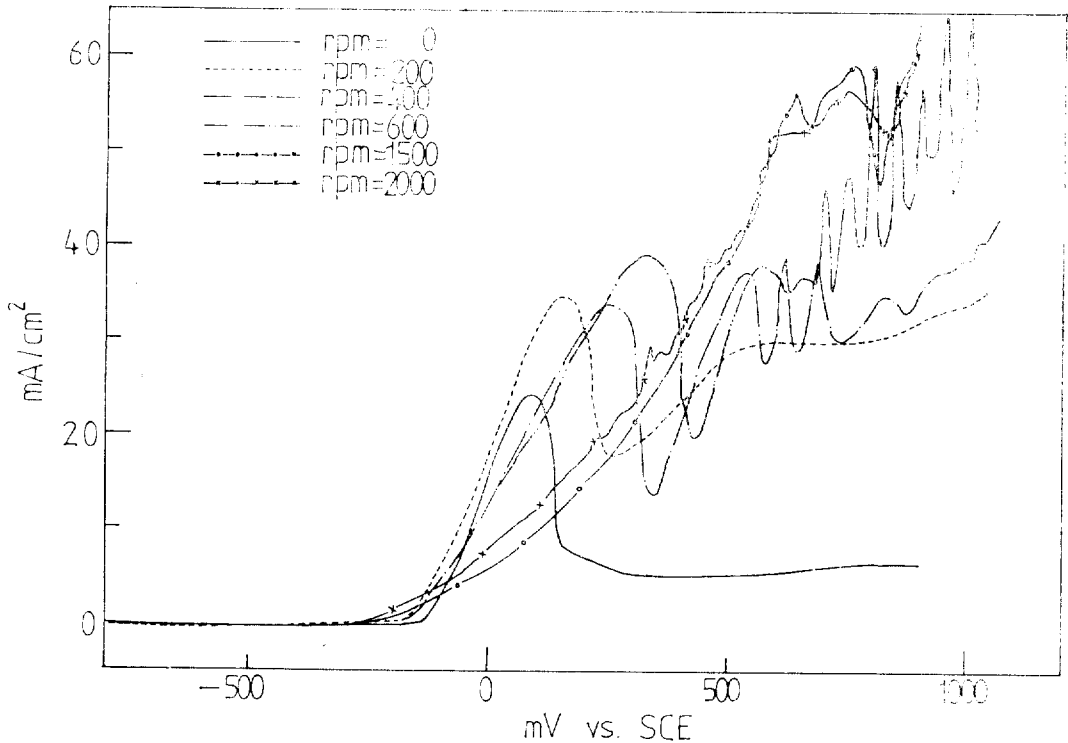


Fig. 6 Potentiodynamic polarization behavior of 2%Al-brass in 3% NaCl solution with variation of rpm. Scan rate 250mV/min, pH=6.0, 16°C

당연하므로 시편 표면에서는 CuCl의 생성과 용해가 반복되는 과정이 주로 진행되며 Cu₂O에 의한 부동태화의 진행은 rpm이 점점 증가함에 따라 어려워 지리라 예상된다.

이러한 해석은 Fig. 6에서 시편회전속도가 증가함에 따라 제 1차 부동태화 peak 전위의 위치가 점점 높은 전위 쪽으로 이동해 가는 것을 주의해보면 타당한 설명이라 생각된다. 이렇게 추론하면 rpm이 400과 600일 때 높은 전위에서 톱니모양의 분극현상을 나타내는 것도 시편표면에서의 부동태층 형성과 용해가 반복되기 때문에 나타나게된 현상이라 볼 수 있다.

한편 시편의 회전속도가 1500 rpm 이상이 되면 제 1차 부동태화 peak는 나타나지 않고 있으며 시편의 분극정도도 600 rpm 이하의 경우와 큰 차이를 보이고 있다. (예를들어 10mA/cm²에서 전위값을 rpm에 따라 주목해 보기 바란다)

또 이 때에는 탈아연 현상도 전혀 일어나지 않았으며 분극측정이 끝난후 시편이 들어 있던 용기 내에는 구리화합물로 추정되는 녹색의 부유물이 떠 다니는 것을 육안으로 관찰할 수 있었다. 이 녹색부유물은 시편 표면의 CuCl 층이 기계적으로 떨어져 나왔거나 또는 2가 구리이온의 수산화물이 형성된 것이 아닌가 생각된다.

이러한 사실들로 미루어 보아 시편회전 속도가 1500 rpm일 때의 분극거동은 (시편의 직경이 0.5cm이므로 시편 가장자리에서의 유속은 이때 39.3cm/sec) 600rpm

이하의 경우와는 다른 매커니즘으로 진행되어 소위 erosion 현상을 나타내는것 같았다. 즉 rpm이 작을 때에는 Tale 3의 식(2)에 따라 일단 형성된 CuCl 층이 식(3)의 반응과 짝지어져 금속을 계속 산화시키면서 Cu₂O 부동태층을 형성하여 정방향주사시 산화전류는 커지고 부동태화도 낮은 전위에서 일어날 수 있으나 rpm이 클 때에는 표면의 CuCl 층이 기계적으로 박리되어 Cu₂O를 형성할 수 없어 부동태화도 일어나지 않으며 금속의 용해만이 완만한 속도로 진행되는것 같았다. 이상을 요약하면 부동태층의 형성은 CuCl의 형성이 先行條件이 아닌가 생각된다. 또 rpm이 높을 때에는 용해된 Cu⁺⁺가 시편/용액 계면에서 헛사리 제거되어 Cu⁺⁺의 재석출이 어떻게 되므로? 탈아연현상도 일어날 수 없었다고 추측된다.

Fig. 7은 2000rpm (52.3cm/sec)에서 황동(76% Cu-24% Zn)시편과 Al-brass (76%Cu-22%Zn-2%Al)시편의 양극분극곡선을 비교한 것이다. 각 시편의 부식전위는 황동의 경우 -280mV, Al-brass의 경우 -287.5mV로 큰 차이가 없었으나 이와같이 회전속도가 아주 클 때에는 Fig. 4의 경우와는 달리 양극분극시의 산화전류밀도 값은 황동쪽이 크게 나타나고 있어 Al의 첨가가 합금의 용해속도를 감소시킴을 알 수 있다. 이러한 용해속도의 감소는 시편 표면에 노출된 Al이 지고한 산화물(Al₂O₃)을 형성하여 합금의 내식성을 향상시

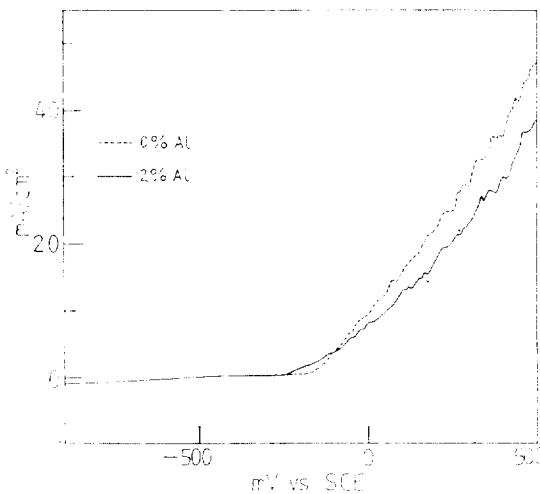


Fig. 7 Potentiodynamic polarization curves for 76Cu-24Zn brass and 76Cu-22Zn-2Al brass in 3% NaCl solution. rpm=2000, scan rate 250mV/min, pH=6.0, 18 °C

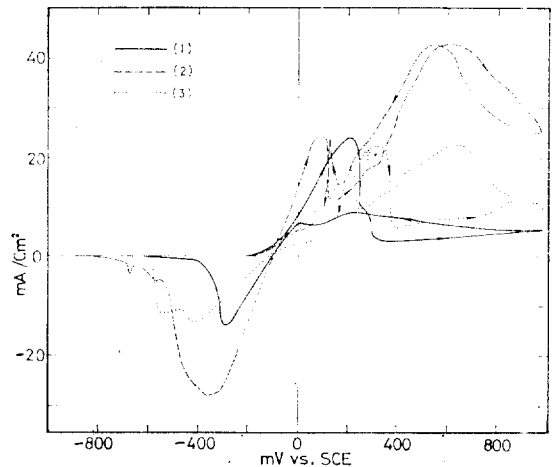


Fig. 8 Potentiodynamic polarization behavior of the Al-brass specimens in the synthetic sea water. Scan rate 250mV/min, rpm=0, 17°C
 (1) for plant specimen in 3% NaCl,
 (2) for plant specimen in synthetic sea water,
 (3) for laboratory specimen(2%Al)in synthetic sea water.

키는 것으로 판단하고 더 이상 자세한 분석은 하지 않았다.

Fig. 8의 곡선(1)은 3% NaCl 내에서 현장시편의 분극곡선, (2)와 (3)은 人造海水 내에서의 현장시편과 실험시편(2% Al)의 전형적인 분극곡선을 각각 나타낸 것이다. Fig. 8을 보면 人造海水 내에서의 분극특성은 3% NaCl 용액 내에서의 경우와 많은 차이점이 있음을 알 수 있는데(특히 정방향 전위주사시 높은 전위 범위에서의 분극전류크기를 주목하기 바란다) 이는 Table. 2에 나타낸 바와 같이 人造海水에는 여러가지 성분이 포함되어 있어서 Cl⁻만으로 구성된 NaCl 용액보다는 多様な金屬錯이온을 형성하고 이에 따라 酸化還元反應系도 크게 달라지기 때문에 나오게 된 현상이라고 생각된다.

Fig. 8을 보면 人造海水 내에서 현장시편의 분극전류가 실험시편의 분극전류에 비하여 전 전위범위에서 큰 값을 나타내고 있고 정방향 주사시 처음으로 산화전류가 증가하기 시작하는 부분에서의 분극정도도 현장시편의 경우가 적게 나타나고 있다. 현장시편과 실험시편에서 나타나는 이러한 분극특성의 차이점은 아마도 현장시편 성분중의 Fe, Pb, As 등의 첨가원소가 분극특성에 영향을 미치는 것으로 보이며 금속학적 관점에서 볼때 grain size와 열처리 조건 등 시편의 제조이력에도 분극특성이 달라지지 않았나 생각되었다.

오래된 문헌에 나타난 事例報告⁸⁾에 의하면 少量의 FeSO₄를 주기적으로 냉각수에 첨가할 경우 Al-brass condenser tube에 impingement attack 현상이 전혀 나타나지 않았다고 하며 condenser tube 내壁上에 견고한 철산화물 피막이 형성되어도 熱交換効果는 큰 변화가 없었다고 한다. 이러한 FeSO₄의 注入効果는 古日本⁹⁾과 우리나라에서도¹⁾ 인정을 받고 있는데 Fig. 9는 FeSO₄에 의한 Al-brass 현장시편의 防蝕効果를 動電位陽極分極特性으로 관찰해 본 것이다.

Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 Fe²⁺의 농도가 極少量 증가하여도 양극산화전류는 대폭 감소하는 경향을 보이고 있으며 제 1차 부동태화가 일어나는 전위도 높은 값으로 이동해 가고 있다. 이러한 현상은 시편표면에 Fe 수산화물이 沈着되어 시편을 부식용액으로부터 차단시키기 때문이라고 보고 앞으로의 계속연구를 통하여 Fe²⁺첨가에 의한 부식억제 메카니즘과 적절한 첨가량을 알아볼 예정이다.

4. 결 론

3% NaCl(pH=6) 및 人造海水내에서 Cu-Zn-Al 합

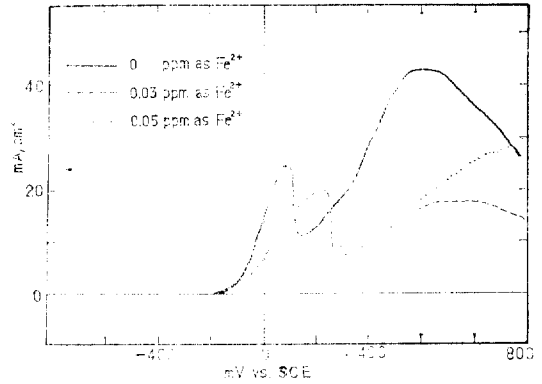


Fig. 9 Effect of Fe²⁺ on the polarization behavior of Al-brass plant specimen in the synthetic sea water. Scan rate 250mV/min, 17°C, rpm=0

금(Al-brass)의 동전위 분극특성을 연구해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) α-황동에 Al을 소량(3%까지) 첨가하면 陽極分極時에 舍金溶解속도가 증가하고 不動態化를 촉진함을 알았다.
- 2) 시편의 회전속도가 증가하면 부식전위는 낮은 전위 쪽으로 이동하였고 양극분극시의 합금의 용해속도도 점점 감소하는 경향을 보이며 제 1차 부동태화 전위도 높은 전위 쪽으로 이동하였다.
- 3) 시편의 회전속도가 1500rpm (39.3cm/sec) 이상이 되면 2% Al-brass의 부동태화 현상은 일어나지 않았으며 소위 erosion 부식이 진행되는데 같았다.
- 4) 부동태층의 형성은 CuCl의 형성이 先行條件이 되어야 함을 알았다.
- 5) 人造海水 내에서의 분극특성은 3% NaCl 내에서의 경우와 비교할 때 높은 전위에서의 분극특성에 주요한 차이를 보였다.
- 6) 人造海水 내에 Fe²⁺ (FeSO₄)를 0.05ppm 까지 주입함에 따라 양극분극시의 금속용해속도는 대폭 감소하여 Fe²⁺가 합금시편의 분극에 큰 기여를 함을 알았다.

참 고 문 헌

- 1) 蔡千錫 외 3人, 研究所報, 第14號, 1980년 3월, 한국전력주식회사 기술연구소刊, p 295
- 2) F. L. LaQue, Marine Corrosion, Wiley, N. Y., 1975, pp 264-276
- 3) P. T. Gilbert and W. North, Trans. Inst. Mar. Eng., 84, 520 (1972)

4) I. M. Kolthoff, et al., Quantitative Chemical Analysis, 4th ed., Macmillan, London, 1969, pp 1109-1117
5) 日本腐食防食協會, 金屬防食技術便覽, p177(1972)
6) D. R. Cester, et al., Linnol. Oceanogr., 12, 176 (1967)
7) 尹勝烈 外 2 人, 한국부식학회지, 제 8 권 2 호, 6 (1979)

8) T. W. Bostwick, Corrosion, 17, Aug., 12 (1961)
9) 安藤秀一 外 4 人, 火力發電(日本), 23, 207(1972)

後 記

이 연구는 1980年度 産學協同財團 및 漢陽大學校 産業科學研究所의 學術研究費로 이루어진 것이며 연구비 지급에 감사드립니다.