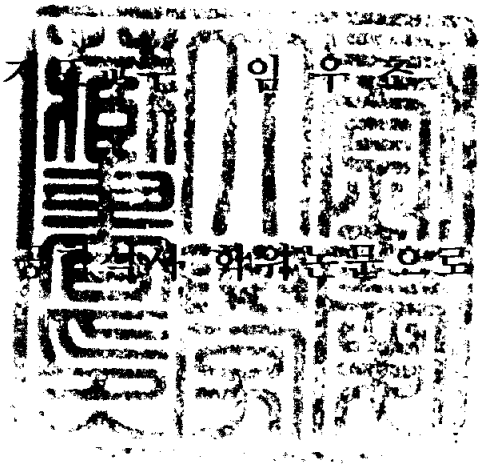
공학석사 학위논문

Al합금 열교환기의 전지작용부식에 관한 연구



이 논문을 [illegible] 학위논문으로 제출함

2004년 2월

부경대학교 대학원

기 계 공 학 부

이 은 정

이은정의 공학석사 학위논문을 인준함

2003년 12월 일

주 심 공학박사 김 남 식

위 원 공학박사 권 오 붕

위 원 공학박사 임 우 조

목 차

Abstract 1

Nomenclature 4

1. 서 론 6

2. 이론적 고찰 8
 2.1 알루미늄합금 8
  2.1.1 자동차의 재료로 사용되는 알루미늄합금재 8
  2.1.2 알루미늄합금재의 부식특성 9
 2.2 갈바닉부식 11
  2.2.1 갈바닉부식의 특징 11
  2.2.2 갈바닉부식의 전위열 12
  2.2.3 갈바닉부식에 미치는 영향인자 14
  2.2.4 갈바닉부식의 방지 16

3. 시험편 및 실험방법 18
 3.1 시험재료 18
 3.2 부식 시험편 19
 3.3 부식 실험장치 21
 3.4 부식 실험방법 23

4. 실험결과 및 고찰 26

4.1 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식 경향 26
4.2 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식 거동 28
4.3 오염수 중에서 Al합금재의 전지작용부식 거동 32
4.4 담수의 비저항에 따른 Al합금재의 전지작용부식 거동 35
4.5 부동액 혼입에 의한 Al합금재의 전지작용부식 억제거동 38
4.6 Al합금재의 연간부식율 평가 41
4.7 Al합금재의 자연부식 및 전지작용부식 양상 50

5. 결론 53

참 고 문 헌 55

The Study on the Galvanic Corrosion of Al-alloy for Heat Exchanger

Eun-Jung, Lee

Department of Mechanical Engineering, Graduate School.
Pukyong National University

Abstract

Industrial development and income increase causes rapid increase in using fossil energy like coal, petroleum and natural gas, and it results in accelerating environmental pollution owing to the increase in emission of air pollution substance. Specially, fresh water like stream and river water is acidified and specific resistance is decreased. Therefore, corrosion damage is accelerated in radiator for automobile that is using acidified water and specific resistance is decreased water.

Generally, material for radiator of automobile is composed of Al-alloy, but part of radiator material is still composed of Cu. Specially, Al-alloy replaces Cu and Cu-alloy as cooling and

heating system material for light weight.

Therefore, galvanic electronic cell is formed between Al-alloy and Cu for automobile radiator material, and Al-alloy corrosion is accelerated.

So, in this study, galvanic corrosion test of Al-alloy coupling with Cu was carried out in distilled water, tap water, polluted environment and non-freezing solution.

The main results obtained are as follows ;

1) In distilled water and tap water, corrosion potential of Al-alloy is lower about 450~480 mV/SCE than Cu. Therefore galvanic corrosion could occur in Al-alloy coupling with Cu.
2) According to decrease of pH, the galvanic corrosion of Al-alloy coupling with Cu is sensitive.
3) According to decrease of specific resistance, the galvanic corrosion current density of Al-alloy coupling with Cu is increasing.
4) According to adding non-freezing solution in tap water from 50% to 30%, the galvanic corrosion current density of Al-alloy coupling with Cu is decreasing.
5) Corrosion rate of galvanic corrosion for Al alloy coupling with Cu in tap water is high about 1.15 mmpy. But through adding

30~50% non-freezing solution in tap water, Al-alloy galvanic corrosion is lowed about 0.10~0.16 mmpy.

Nomenclature

T : Temperature (℃)

t : Test time (sec)

ρ : Specific resistance (Ω · m)

SCE : Saturated calomel electrode

E : Potential (mV/SCE)

i : Current density (μA/cm^2)

i_{cor} : Corrosion current density (μA/cm^2)

i_a : Average current density (μA/cm^2)

CR : Corrosion rate (mmpy)

d : Density of material (g/cm^3)

EW : Equivalent of material (g)

Sg : Sensitivity of galvanic corrosion

E_{cor} : Corrosion potential (mV/SCE)

T.S : Tensile strength (kgf/mm^2)

1. 서 론

자동차, 선박, 화학플랜트, 원자력발전소, 화력발전소 및 제철소의 폐열 이용장치 등 많은 곳에서 각종 열교환기인 냉각 및 난방용 방열기가 사용되고 있고, 그 사용 용도에 따라 다양한 환경에 접하고 있다. 또한 전반적인 산업발전 및 소득증가에 따라 석탄, 석유 및 가스 등의 화석에너지 소비량이 급격히 증가되고 있다. 이러한 화석에너지의 소비량이 증가됨에 따라 유황화합물, 질소화합물, 산화물 등의 대기오염물질 배출이 증대됨으로써 수질은 오염화되고 있다[1,2].

이들 대기오염물질 중에서 SO_2, SO_3, CO 및 THC 등은 대기 중의 수분이나 물에 혼입되거나 산성비에 의해 하천수나 강물 등의 담수가 산성화되며, HCl 및 Cl_2 등은 물에 혼입되면 일부는 가수분해에 의해 산성화된다.[3,4] 그리고 HCl, Cl_2 등은 담수의 비저항이 낮아지는 원인이 되기도 한다. 이와 같이 산성화되거나 비저항이 낮아진 담수를 사용함으로써 선박 및 자동차용 냉각 및 난방용 열교환기와 산업용 각종 열교환기는 부식손상이 가속화될 수 있다.[5]

최근, 선박 및 자동차용 열교환기인 냉각기와 방열기의 재질로 알루미늄합금재(Al-alloy)의 사용이 증가되지만, 열교환기의 부재 중 일부는 동(Cu) 및 동합금 등이 사용되고 있다. 특히, 냉각 및 난방용 열교환기의 재질은 경제적 및 경량화를 목적으로 동 및 동합금재로부터 Al합금재로 점차 대체되고 있다[6].

이러한 Al합금재로 제작되는 선박 및 자동차용 열교환기에 Al합

금재보다 귀전위금속인 동, 황동 및 스테인레스강 등의 이종금속을 사용하는 경우도 있으며, 이들 이종금속에 의한 Al합금재의 갈바닉전지가 이루어지게 되어 Al합금의 전지작용부식이 촉진될 수 있다.[7]

따라서 본 연구는 선박 및 자동차용 열교환기의 재료로 사용되는 동과 조합된 Al합금재의 전지작용특성을 연구하기 위하여, pH와 비저항, 부동액 혼입비에 따른 용액 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식실험을 실시하였다. 이들 실험결과를 토대로 환경조건에 따른 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식특성을 고찰함으로써 Al합금재를 사용하는 선박 및 자동차용 열교환기의 최적화 설계 및 보수 유지의 기초자료로 활용하는데 기여하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 알루미늄합금

2.1.1 자동차의 재료로 사용되는 알루미늄합금재

열교환기 관련부품에서 알루미늄 가공재가 많이 사용되고 있는데, 에어컨용 콘덴서, 증발기는 거의 100 % 알루미늄이 적용되고 있으며, 앞으로 알루미늄의 사용이 더욱 확대될 것으로 기대되는 곳은 방열기(radiator)와 히트 코어(heat core)이다. A3003은 대표적인 합금으로 마그네슘의 첨가에 의하여 순수한 알루미늄의 가공성, 내식성을 저하시키지 않으면서 강도를 약간 증가시킨 합금으로 용기, 건축재료 등에 폭넓게 사용된다.

특히, 자동차는 엔진의 냉각과 공기의 원활한 순환을 위하여 많은 열교환기가 사용되고 있으며 이것들은 다른 분야에 사용되고 있는 열교환기에 비하여 경량, 소형화의 요구가 대단히 크다. 가볍고 열전도성이 우수한 알루미늄은 자동차용 열교환기에 적당한 재료로서 1960년대부터 이미 자동차 에어컨에 채용되었고, 현재는 대부분의 자동차용 열교환기에 폭넓게 이용되며 앞으로도 사용 예가 확대될 것으로 전망된다[8].

2.1.2 알루미늄합금재의 부식특성

알루미늄이 양극용해하면 Al^{+3}와 Al^{+2}이 먼저 형성된다. 그런 다음 Al^{+}는 물을 환원시켜 수소를 발생하면서 Al^{+3}로 된다.

$$Al \rightarrow Al^{+3} + 3e^{-} \qquad E^{o} = -1.662$$

$$Al^{+} + 2H_2O \rightarrow Al^{+3} + H_2 + 2OH^{-}$$

따라서 알루미늄을 아노다이징(anodizing)시키면 음극에서와 마찬가지로 양극에서도 수소가 발생한다.

또한, 알루미늄은 기전력계열(EMF series)에서 대단히 큰 활성전위를 가지고 있다. 그런데도 불구하고 중성 또는 대부분의 산성용액에서 내식성이 좋다. 그 이유는 표면에 부동태산화피막(passive oxide film)이 생성되기 때문이다. 알루미늄의 부동태피막이 생성되는데 있어서 용해산소의 존재가 중요하기는 하지만 반드시 필수적인 것은 아니다. 알루미늄의 플래드전위(flade potential)가 수소전극보다 더 활성전위값을 가지게 되고 따라서 부동태피막이 쉽게 생성되고 안정화되기 때문이다[9].

따라서 알루미늄의 부식거동은 근본적으로 이 부동태산화피막층(passivating oxide film layer)의 형성 및 거동에 의해서 결정된다. 이 산화피막의 구조는 일반적으로 복잡하다. 그것은 Al_2O_3(alumina), $Al_2O_3 \cdot H_2O$(bohmite), $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$(bayerite), $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$(hydragilite) 등으로 구성되어 있다. Fig. 1는 알루미늄의 부동태산화피막을 나타낸

것이다[10].

한편, 알루미늄의 부식거동은 불순물의 존재에 대해서 매우 민감하다. 마그네슘을 제외한 대부분의 불순물은 알루미늄에 대해서 음극이 된다. 고순도의 알루미늄금속은 공업용 알루미늄금속보다 내식성이 좋으며 마찬가지로 공업용 알루미늄금속은 알루미늄합금보다 내식성이 우수하다. 그러나 순수 알루미늄금속은 연약하다. 따라서 강도와 내식성을 동시에 증가시키기 위해서 순수 알루미늄금속 사이에, 또는 갈바닉계열에서는 더욱 활성(active)이지만 내식성은 더 큰 알루미늄 합금 사이에 고강도의 합금을 샌드위치형으로 접합시키는 경우가 많다. 이러한 형태의 접합을 알클래드(alclad) 또는 클래드(clad)라 한다. 이러한 알클래드(alclad)는 강표면의 아연피복(갈바나이징강)에서와 마찬가지로, 바깥 층의 금속이 내부 층의 금속에 대해서 희생양극으로 작용함으로써 음극보호한다. 이러한 음극보호 작용은 공식, 입계부식, 응력부식균열 등에 대해서 대단히 효과적이다.

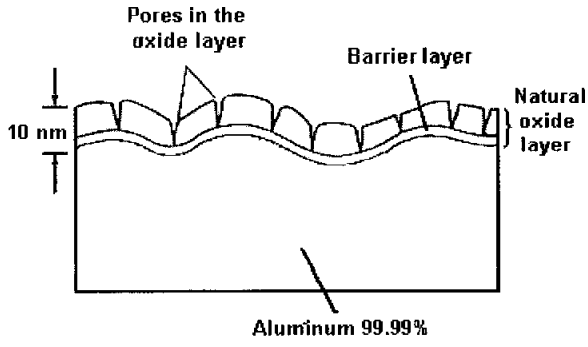


Fig. 1 Schematic of passive oxide film that forms on aluminum

2.2 갈바닉부식

2.2.1 갈바닉부식의 특징

두 이종금속이 용액 속에 담구어지게 되면 전위차가 존재하게 되고 따라서 이들 사이에 전자의 이동이 일어난다. 그리하여 귀전위(noble potential)를 가진 금속의 부식속도는 감소되고 활성전위(active potential)를 가진 금속의 부식속도는 촉진된다. 즉 전자는 음극이 되고 후자는 양극이 된다. 이러한 형태의 부식을 갈바닉부식 또는 이종금속접촉부식이라 한다.

이와 같이, 두 이종금속 사이의 가역전위 차이(reversible potential difference)는 갈바닉부식의 기전력이 되며 부식 경향을 예측하는 기준이 된다.

그러나, 이러한 갈바닉부식의 위험도를 예측하는데 있어서 갈바닉 계열에서의 상대적인 위치에만 의존하는 것은 옳지 못하다. 갈바닉부식의 크기는 이종금속의 전위차이 뿐만 아니라 각 금속의 교환전류밀도 및 타펠기울기 같은 속도론적인 인자, 양극과 음극의 면적비 등에도 의존하기 때문이다.

이처럼 갈바닉 쌍에서 환원 및 산화반응이 더욱 복잡한 상호작용을 하기 때문에 여러 인자 중의 하나만에 의해서 갈바닉부식의 속도를 예측하는 것보다는 갈바닉부식전류를 직접 측정하는 것이 훨씬 중요하다[11].

2.2.2 갈바닉부식의 전위열

두 개의 서로 다른 금속이 쌍(couple)을 이룬 상태로 부식용액에 놓이게 되면 한 금속이 우선적으로 부식되고 다른 한 금속은 부식으로부터 보호된다. 또한 서로 다른 두 금속은 서로 다른 부식전위 E_{corr}을 가지고 있다.

Table 1의 갈바닉계열에는 유용한 여러 금속 및 합금들을 E_{corr}의 순서대로 나열하였다. 어떤 금속 또는 합금이 갈바닉계열에서 더욱 귀전위를 가진 다른 금속 또는 합금과 쌍을 이루게 되면 우선적으로 부식을 일으킬 것이다. 한편, 귀전위를 가진 금속 또는 합금은 부식으로부터 보호될 것이다. 우선적으로 부식을 일으키는 금속 또는 합금을 갈바닉계열에서 더 활성금속이라고 일컫는다.

Fig. 2에 예시된 바와 같이 서로 다른 두 금속 사이의 접합부에서 발생하는 우선부식은 갈바닉부식의 특성이다. 두 금속의 접합부에서 멀리 떨어진 곳은 갈바닉부식이 줄어드는데 그 이유는 먼 거리의 전해액을 통한 저항 때문이다. 그리하여 전해액의 저항 때문에 두 금속의 접합부에 인접한 작은 표면 영역에만 전류가 흐르게 된다.

Table 1 Galvanic series in seawater

Cathodic (noble)
↑
platinum
gold
graphite
silver
zirconium
AISI Type 316, 317 stainless steel (passive)
AISI Type 304 stainless steel (passive)
AISI Type 430 stainless steel (passive)
Nickle (passive)
copper-nickel (70-30)
bronzes
copper
brasses
nickel (active)
naval brass
tin
lead
AISI Type 316, 317 stainless steel (active)
AISI Type 304 stainless steel (active)
cast iron
steel or iron
aluminum alloy 2024
cadmium
aluminum alloy 1100
zinc
magnesium and magnesium alloys
↓
Anodic (active)

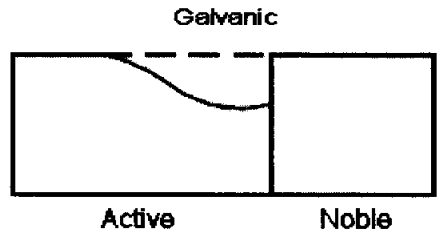


Fig. 2 Schematic summary of galvanic corrosion

2.2.3 갈바닉부식에 미치는 영향인자

(1) 교환전류밀도의 영향

기전력계열에서는 금이 플라티늄(Pt)보다 1.5V 더 귀방향의 반전지전위 값을 가지나, Table 1의 갈바닉계열에서는 그 순서가 바뀌어 금에 대한 부식전위가 플라티늄에 대한 부식전위보다 더욱 활성방향에 있다. 아연(Zn)이 묽은 산용액에서 금과 쌍을 이루었을 경우와 플라티늄과 쌍을 이루었을 경우에 대해서 각각 분극곡선을 그려 봄으로써 이러한 현상에 대한 원인을 설명할 수 있다. Fig. 3에서 명백히 알 수 있듯이 금과 플라티늄의 용해반응에 대한 반전지전위는 각각의 경우에 대한 부식전위 E_{couple} 결정에 영향을 미치지 않는다. 그러나 플라티늄 표면과 금 표면에서의 음극 수소환원반응에 대한 교환전류밀도 차이로 인해 Zn-Pt에 대한 E_{couole}보다 Zn-Au에 대한 E_{couple}이 더욱 활성값이 된다. 따라서 수소환원반응에 대한 교환전류밀도가 플라티늄 표면에서보다 금 표면에서 훨씬 더 낮기 때문에 금의 음극분극곡선이 플라티늄의 음극분극곡선보다 더욱 활성인 전위값에서 아연의 양극용해곡선과 만나게 된다.[12]

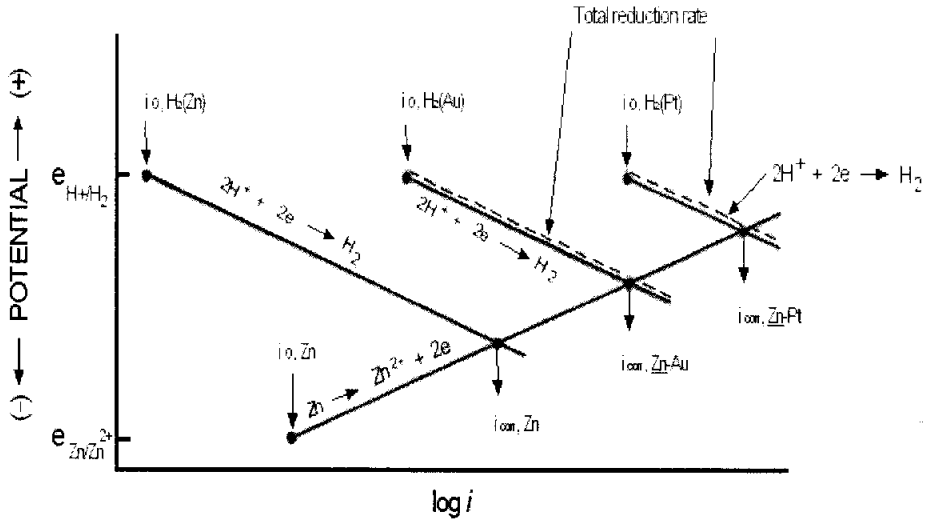


Fig. 3 Effect of platinum and gold galvanically coupled to zinc in dilute acid solution

(2) 면적의 영향

갈바닉부식에 영향을 미치는 하나는 중요한 인자는 양극과 음극의 면적비이다. 갈바닉부식에 있어서 가장 위험한 조건은 소양극-대음극이다. 양극 면적에서의 전류밀도가 높을수록 부식속도는 커지게 된다. 반대로 소음극-대양극은 갈바닉부식을 줄일 수 있는 좋은 조건이 된다. 예를 들어, 구리판에 박힌 철못과 철판에 박힌 구리못을 생각해보자. 전자는 소양극-대음극이고 후자는 소음극-대양극이다. 따라서 후자에 있어서보다 전자에 있어서의 갈바닉부식이 훨씬 심하게 되고 철못은 큰 손상을 입게 된다.

2.2.4 갈바닉부식의 방지

이종금속의 접촉이나 이종의 환경에 연결된 배관 등 이종전극이 접촉해서 형성되는 마크로셀은 피해를 일으킨 부식 요인의 큰 비율을 차지하고 있다. 마크로셀의 형성은 전자전도체 또는 이온전도체의 어느 한쪽에서 2개의 전극을 절연하면 방지할 수 있다. 이온전도체인 환경측에서 2개의 전극을 절연하는 것은 일반적으로 어렵기 때문에 통상은 전자전도체인 금속측에서 2개의 전극을 절연한다. 절연이음매는 이러한 목적으로 이용된다.

이종전극접촉부의 방식을 고려하는 경우 또는 절연이음매를 이용하는 경우에는 다음 사항에 주의한다.

(1) 양 전극의 자연전위 차

일반 담수 중이나 중성 토양 중에서는 동과 동합금, 각종 스테인레스강끼리, 동 또는 동합금과 스테인레스강 등의 내식금속재료 각각의 자연전위사이에 큰 차이는 없기 때문에 통상은 절연을 할 필요는 없다. 일반적으로 절연을 고려해야 할 이종금속의 조합이란 이들 내식성 금속재료와 보통강이나 아연도금강 등의 비내식성 금속과의 조합을 의미한다.

(2) 양전극의 면적비

이종전극접촉부식은 양전극의 면적비의 영향을 받는다. 예를 들면, 유동하는 해수중의 동, 동합금, 스텐레스강 등의 귀한 금속과 비한 연

강의 조합에서, 단독시의 연강 부식속도에 대한 접촉시의 부식속도의 비율은 연강에 대한 귀한 금속의 면적비가 1/10일 때는 1배로서 연강의 부식은 영향을 받지 않지만, 1/1에서는 3배, 10/1에서는 7배로 가속된다고 한다[14].

(3) 무산소 수중의 이종금속은 절연 불필요

중성수중에서의 부식은 산소의 존재하에서 일어나는 것은 이종전극 접촉부에서도 동일하고, 비한 전극의 부식을 일으키는 귀한 전극의 카소드 반응도 용존산소가 수산화물이온으로 되는 환원반응에 지나지 않는다. 따라서 산소를 용존하는 수중에서 이종금속 접촉부에는 일반적으로 절연이 필요하게 되지만, 아연도금강관을 사용하는 밀폐순환수계와 같이 용존산소가 곧 소멸되는 수계통에서는 절연이 반드시 필요하지는 않다[15].

(4) pH 8 이상인 개방수중의 이종금속은 절연 불필요

단독금속의 경우와 마찬가지로 이종금속접촉부의 부식속도도 물의 pH의 영향을 받으므로, pH 7을 넘으면 저하하고, pH 8 이상에서는 극히 낮아진다. 그 이유는 pH의 상승에 수반하여 수산화물이온(OH^-)의 농도가 높아져, 수산화물이온을 생성하는 카소드 반응이 억제되기 때문이다.[16]

3. 시험편 및 실험방법

3.1 시험재료

본 실험에 사용된 시험편의 재료는 열교환기 본체로 사용되고 있는 Al합금재(A3003) 및 동재의 화학적 조성과 기계적 특성은 Table 2과 Table 3와 같다.

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of specimen, Al-alloy(A3003)

Chemical composition(Wt%)						Mechanical properties	
Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Hardness (HB)	T.S (kgf/㎟)
0.6	0.7	0.12	1.2	0.1	bal	28	11.3

* T.S : Tensile Strength

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of specimen, Cu

Chemical composition(Wt%)		Mechanical properties	
Cu	P	Hardness (HR)	T.S (kgf/㎟)
99.97	0.03	60	37.96

* T.S : Tensile Strength

3.2 부식 시험편

부식실험에 사용된 Al합금, 동의 전기화학적 분극시험편은 Table 2, Table 3와 같은 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 재료의 판재로부터 절취하여 가로 10 mm, 세로 10 mm의 크기로 제작함으로써 유효노출면적을 1.0 cm^2 로 하였으며, 시험편에 전선을 연결시킨 후, 불포화 폴리에스테르 수지로 마운팅(mounting)하였다. 이와 같이 제작한 전기화학적 분극시험을 위한 시험편의 형상과 크기는 Fig. 4와 같다. 또한 이 시험편의 표면은 #400~1200까지의 에머리 페이퍼를 이용하여 단계적으로 연마하여 시험편의 표면거칠기의 영향을 최소화 및 동일화하였다. 그리고 시험편 표면을 아세톤(acetone)으로 탈지하고, 증류수로 세척한 다음 열풍으로 건조시킨 후에 본 실험을 실시하였다

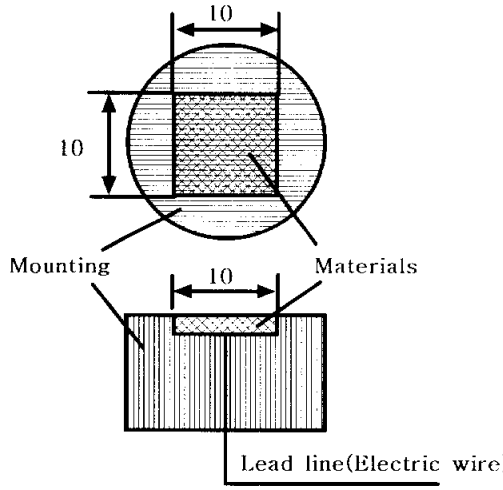


Fig. 4 Dimension of polarization test specimen(unit :mm)

3.3 부식 실험장치

본 연구에서 사용된 분극실험장치는 EG & G 사의 Model 273A Potentiostat/Galvanostat와 PC(personal computer)를 이용하였으며, M 352/252 Corrosion software를 사용하여 각종 분극 특성시험을 실시하였다. 그리고 측정에 사용된 기준전극(reference electrode)은 포화카로멜전극(SCE), 보조전극(counter electrode)은 고밀도 탄소봉으로 하였다. Photo. 1은 이 실험장치의 외관이고, Fig. 5은 전기화학적 분극실험장치의 전체 계통도를 나타내고 있다.

그리고 Al합금의 자연부식특성 시험을 위해 작동전극 시험편은 Al 합금을 사용하였고 기준전극과 보조전극에도 Al합금을 사용하였다. 또한 Al합금의 갈바닉부식 특성 시험을 위해 작동전극 시험편은 Al 합금을 사용하였고, 기준전극과 보조전극은 동을 사용하였다.

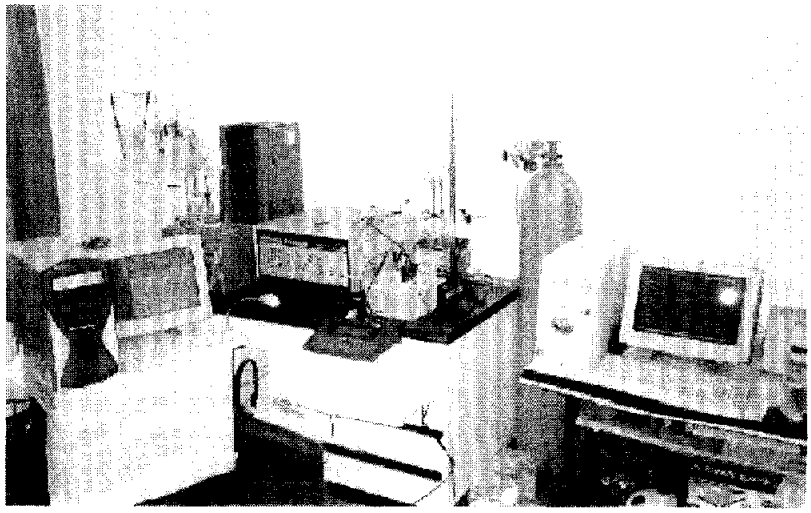
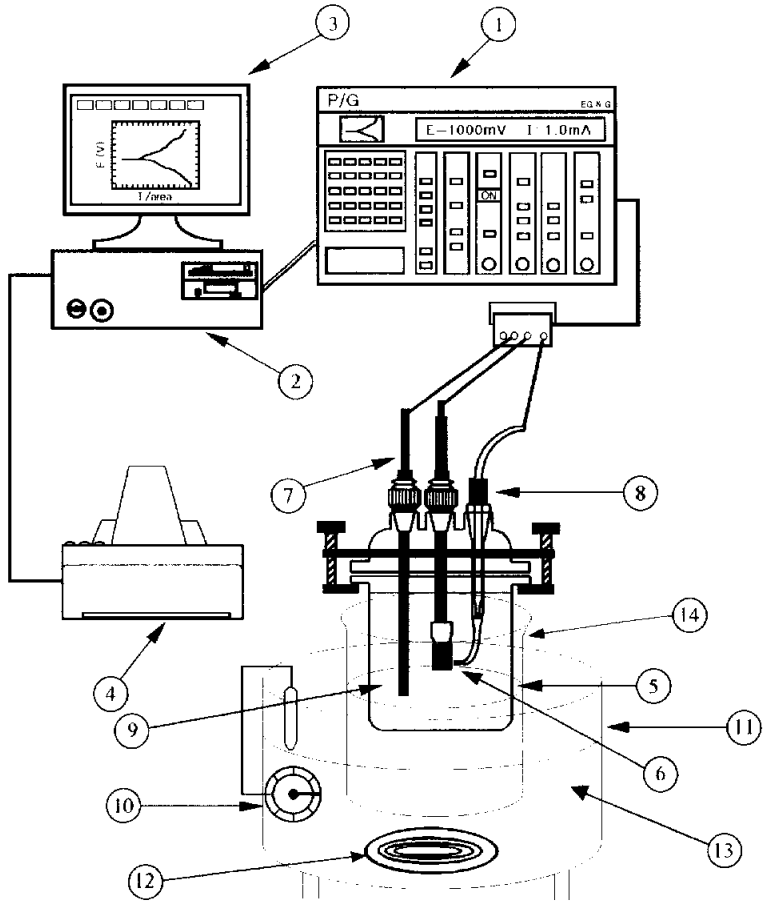


Photo. 1 Appearance of polarization test equipment



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 Silicon oil ⑭ Beaker

Fig. 5 Schematic diagram of polarization test equipment

3.4 부식 실험방법

본 연구의 부식실험은 Fig. 4의 형상의 Al합금과 동을 사용하여 실시하였으며, 부식환경조 내의 전기화학적 부식반응을 EG & G사의 Model 273A Potentiostat/Galvanostat과 M352/252 Corrosion software가 장착된 컴퓨터를 사용하여 측정하였고 모니터와 프린터로 출력되도록 하였다. 이러한 분극실험에 대한 흐름도(flow chart)를 Fig. 6에 나타내었다.

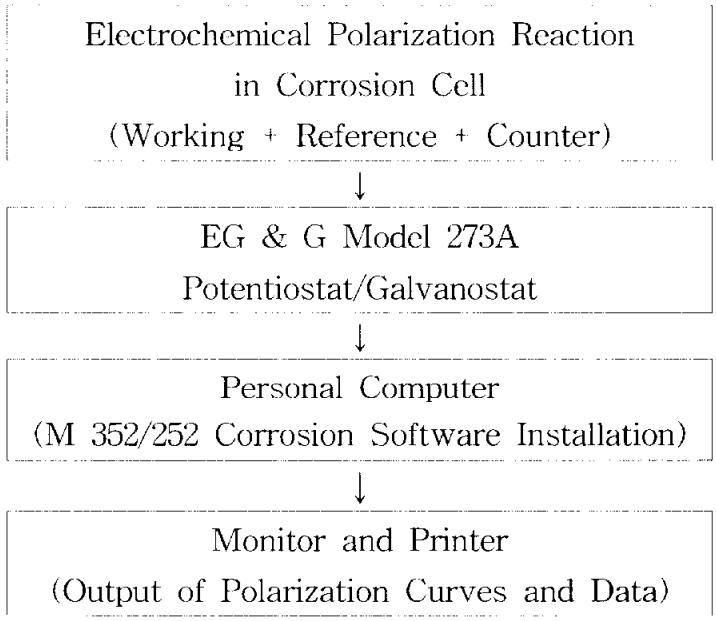


Fig. 6 Flow chart of polarization test equipment

또한 부식용액은 수도수 및 증류수, 증류수에 묽은 황산(H_2SO_4)을 미량 혼입하여 pH를 중성으로부터 산성으로 변화시키고, 증류수에 묽은 염산(HCl)을 미량혼입하여 여러 가지 비저항으로 변화시키고, 수도수 중에 부동액을 20%, 30%, 40% 및 50% 혼입한 환경에서 분극실험을 각각 실시하였다. 부식용액의 온도는 oil bath에 부식환경조를 설치하고, 온도감지기를 장착하여 온도를 25 ± 1 ℃ 범위로 일정하게 유지하도록 하였다.

그리고 Tafel 분극곡선 및 부식전위를 구하기 위한 부식시험은 Fig. 4과 같이 표면처리 된 부식시험편을 Fig. 5의 분극시험장치의 회로도와 같이 배선하였다. 또한 이종금속조합에 의한 전지작용부식시험은 Fig. 7와 같이 Al합금 시험편과 기준전극 및 보조전극간의 거리를 일정하게 유지하기 위하여 환경조 바닥부분에 아크릴 틀을 설치하여 17mm로 유지하였다. 여기서 시험편을 부식환경조에 침지한 후 자연전위에서 10분간 안정화시킨 후 분극시험을 실시하였다.

이와 같은 전기화학적 분극실험조건은 Table 4와 같고, 각 환경에서 자연부식 전류밀도와 전지작용부식 전류밀도의 차이를 알아보기 위하여 Al합금과 동종의 Al합금 및 Al합금과 Cu의 갈바닉 부식실험을 실시하였다.

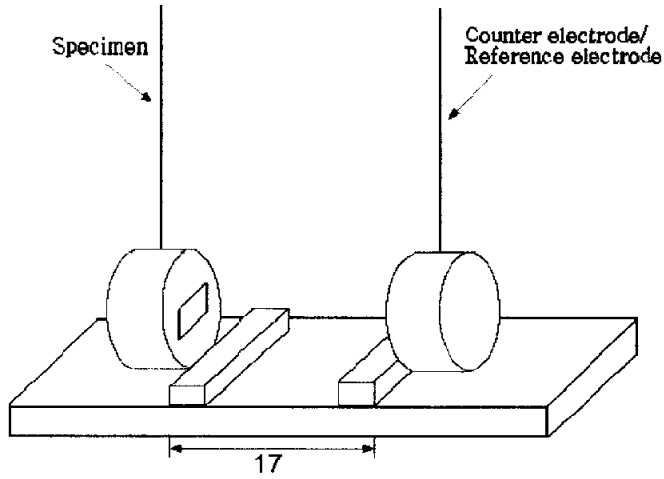


Fig. 7 Schematic of galvanic corrosion test specimen(unit : mm)

Table 4 Experimental conditions of the polarization test

Instrument	EG & G Model 273A	
Electrolyte	Distilled water and Tap water	
	pH	2, 3.5, 5 and 6.5
	specific resistance(Ω · m)	10, 30, 100 and 900
	nonfreezing solution ratio	20%, 30%, 40% and 50%
Material	Al-alloy and Cu	
Surface area of specimen	1.0 cm^2	
Polarization test	Galvanic corrosion Test	
Temperature	25 ± 1 ℃	

4. 실험결과 및 고찰

4.1 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식 경향

부식환경 중에서 이종금속의 조합시킬 때에 어느 금속이 양극으로 되어 전지작용부식이 일어날 것인가는 그 부식환경 중에서 그들 금속의 부식전위에 의해서 판단할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 증류수 및 수도수 중에서 동(Cu)과 Al합금재를 조합하여 사용할 경우에 Al합금재의 전지작용부식이 일어날 수 있는가를 고찰하기 위하여, Fig. 8 및 Fig. 9에 시간경과에 따른 부식전위를 나타내었다.

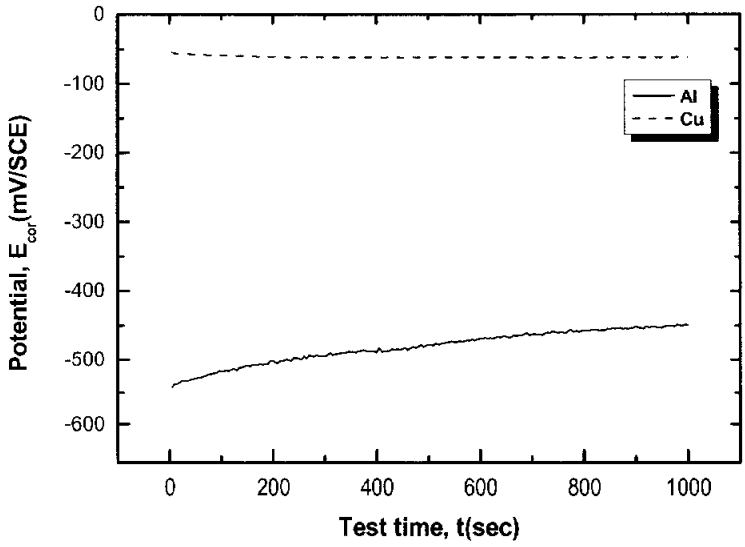


Fig. 8 Corrosion potential of Al alloy and Cu vs. test time in distilled water at 25℃

Fig. 8은 증류수 중에서 Al합금재 및 동의 부식전위를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다. 증류수 중에서 Al합금재의 부식전위는 동의 부식전위보다 약 450 ㎷/SCE 정도 더 비전위되는 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 수도수 중에서 Al합금재 및 동의 부식전위를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다. 증류수 중에서와 같이 수도수 중에서도 Al합금재의 부식전위는 동의 부식전위보다 약 480 ㎷/SCE 정도 더 비전위되는 경향을 나타내고 있다.

전지작용부식이 일어날 가능성은 이종금속의 부식전위차가 50㎷ 이상의 전위차에 의해 일어나고 있으므로 Al합금재의 부식전위가 동의 부식전위보다 450~480 ㎷/SCE 정도 더 비전위화 됨으로써 증류수 및 수도수 중에서 동과 이종금속조합되는 Al합금재는 전지작용부식이 일어날 것으로 판단된다.

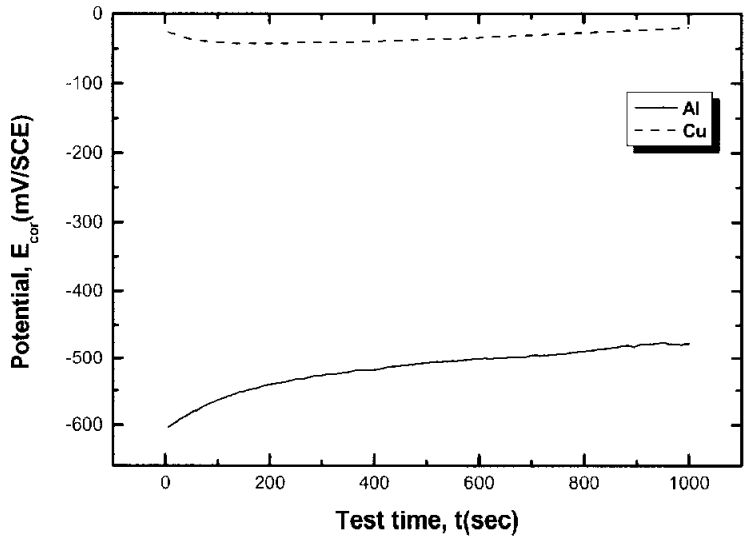


Fig. 9 Corrosion potential of Al alloy and Cu vs. test time in tap water at 25℃

4.2 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식 거동

이종금속의 부식전위 차가 크게 되어질수록 전지작용부식이 일어날 가능성은 크게 되지만, 실제에 일어나는 전지작용부식속도는 그때에 생기는 부식전류밀도의 크기에 따라 결정되는 것으로 보고되고 있다. 그러므로 종류수 및 수도수 중에서 Al합금재와 동종금속조합인 Al합금재의 자연부식속도 그리고 동(Cu)과 Al합금재를 이종금속조합하여 사용할 경우에 Al합금재의 전지작용부식속도에 대해 고찰하기 위하여, Fig. 10 및 Fig. 11에 시간경과에 따른 부식전류밀도를 나타내었다.

Fig. 10은 종류수 중에서 Al합금재와 동종조합된 Al합금재의 자연부식 전류밀도 변화 및 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도 변화를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다.

이종금속조합인 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 Al합금재와 동종금속조합된 Al합금재의 자연부식 전류밀도보다 약 14배 정도 더 높게 배류된다.

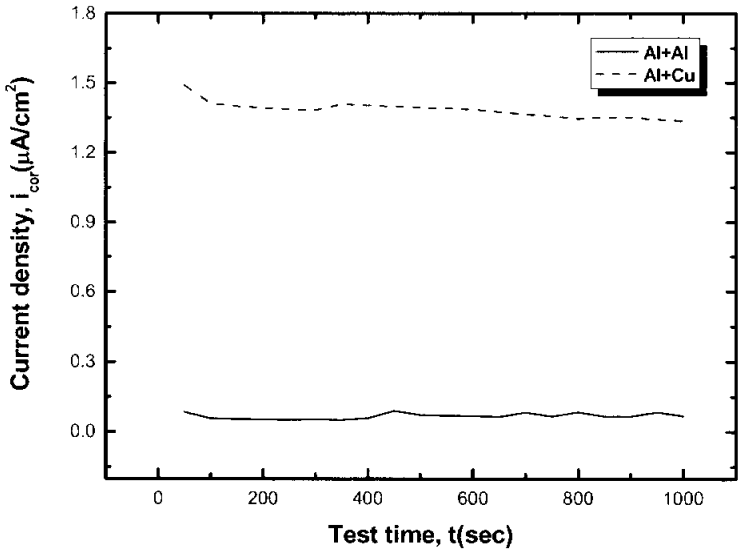


Fig. 10 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. test time in distilled water at 25℃

Fig. 11은 수도수 중에서 Al합금재와 동종조합된 Al합금재의 자연부식 전류밀도 변화 및 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도 변화를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다.

이종금속조합인 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 Al합금과 동종금속조합된 Al합금재의 자연부식 전류밀도보다 약 23배 정도 더 높게 배류된다.

Fig. 10 및 Fig. 11에 의하면 동종금속의 조합인 Al합금재의 자연부식보다 이종금속조합인 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식이 더 민감하고, 수도수 중에서 동과 조합된 Al합금재의 전지작용부식은 증류수 중에서보다 더 민감함을 알 수 있다.

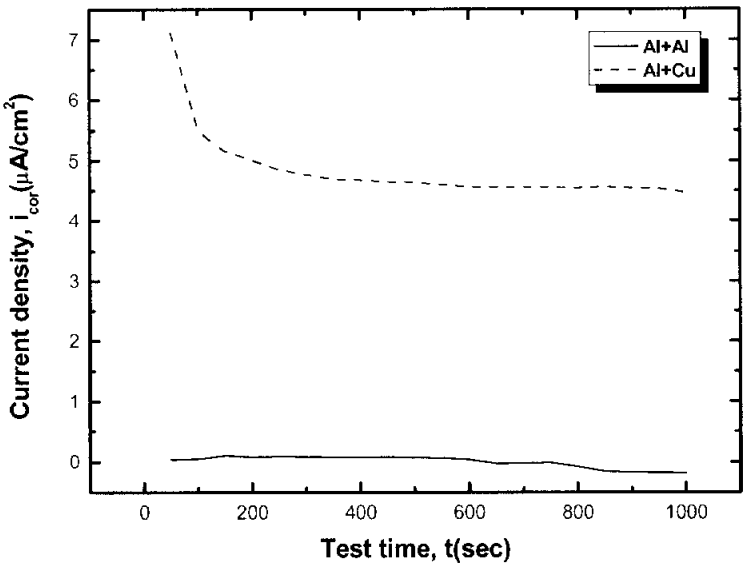


Fig. 11 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. test time in tap water at 25℃

Fig. 12은 증류수 및 수도수 중에서 Al합금재와 동종조합된 Al합금재의 자연부식 평균전류밀도 및 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 평균전류밀도를 나타낸 것이다.

수도수 중에서 Al합금재와 동종조합된 Al합금재의 자연부식 전류밀도는 증류수 중에서보다 약간 증가하지만, 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 증류수 중에서보다 더 높게 배류되는 경향을 나타내고 있다. 그러므로 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식은 Al합금재의 자연부식보다 부식환경에 더 민감함을 알 수 있다.

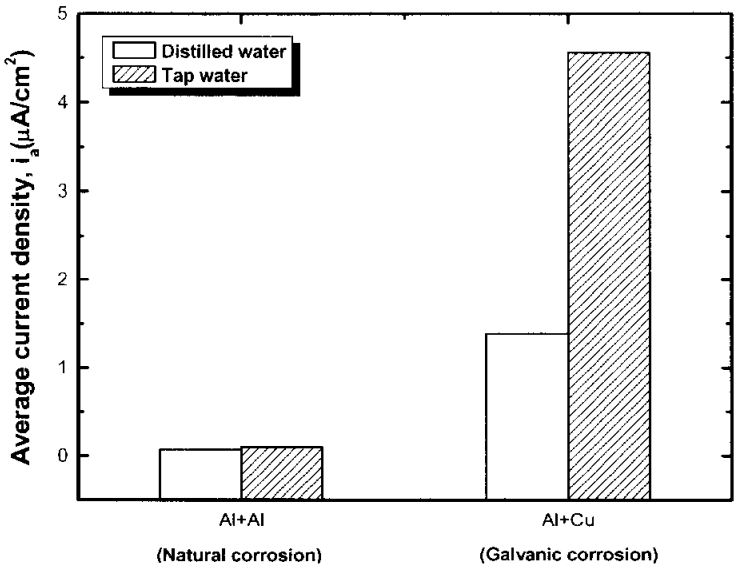


Fig. 12 Average galvanic current density of Al alloy coupling with Al alloy and Cu vs. test time in distilled water and tap water at 25℃

4.3 오염수 중에서 Al합금재의 전지작용부식 거동

이미 4.1절에서 증류수 및 수도수 중에서 Al합금재의 부식전위는 동의 부식전위보다 450~480 ㎷/SCE 정도 '더 비전위화 됨으로써 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식은 일어날 수 있고, 4.2절에서 동과 이종금조합된 Al합금재의 전지작용부식은 동종금속으로 조합된 Al합금재의 자연부식보다 더 민감함을 고찰하였다. 그러므로 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 미치는 담수의 산성화된 오염수가 미치는 영향을 고찰하기 위하여, Fig. 13 및 Fig. 14에 중성 및 산성환경(pH 값 변화)중에서 시간경과에 따른 부식전류밀도 거동을 나타내었다.

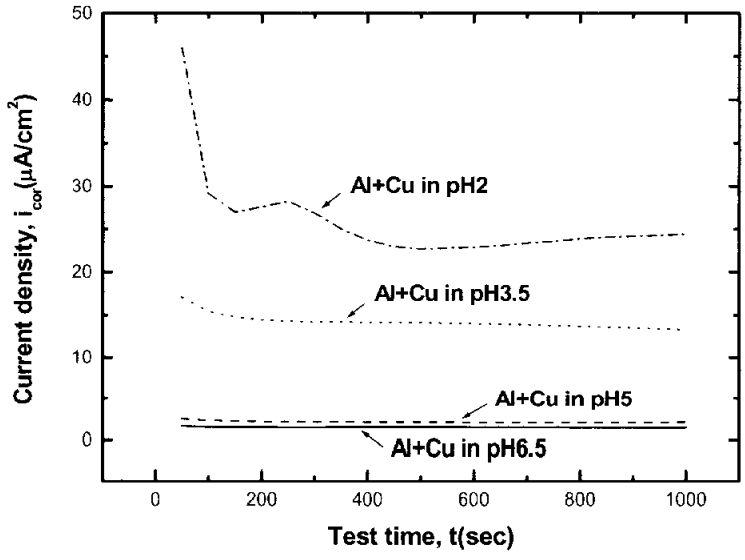


Fig. 13 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. test time in solution of various pH at 25℃

Fig. 13은 중성 및 산성환경 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도 변화를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다. 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 pH 6.5로부터 pH 5로 낮아지는 중성 수용액 중에서는 별로 증가하지 않는다. 그러나 pH 3.5로부터 pH 2로 낮아지는 산성 수용액 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 14는 중성 및 산성환경의 pH변화에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도 거동을 정리하여 나타낸 것이다.

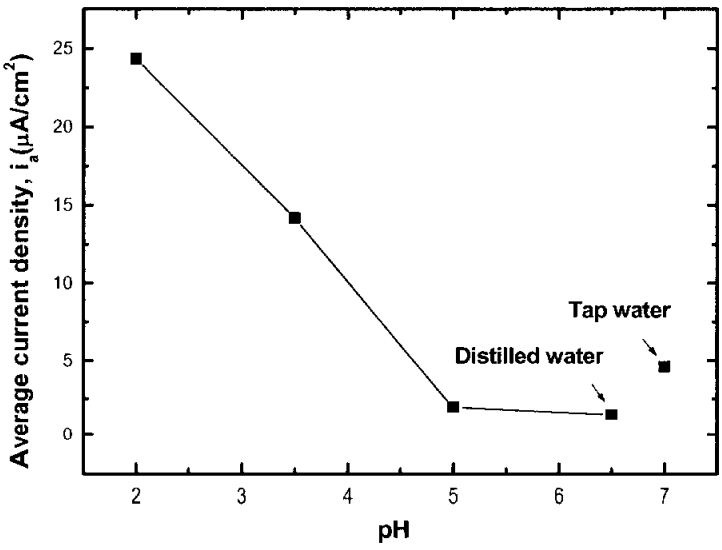


Fig. 14 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. various pH in solution at 25℃

동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 pH 6.5인 증류수로부터 pH 5까지는 완만하게 증가한다. 그러나 산성영역에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 약산성인 pH 3.5인 수용액에서부터 강산성인 pH 2인 수용액 중에서 선형적으로 증가하는 이유는 음극인 동은 중성인 수중에서 부동태가 형성되지만 산성인 수중에서 동의 부동태는 파괴됨으로써 양극인 Al합금재로부터 부식전류가 더 많이 배류되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 수도수의 pH는 증류수의 pH보다 높지만 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 증류수 중에서보다 더 높게 배류되고 있는 양상이며, 이와 같은 양상으로 나타나는 이유는 수도수 중에 포화되어 있는 각종 불순물에 의해 비저항이 증류수의 비저항보다 더 낮기 때문인 것으로 추정된다.[16] 그리고 담수의 pH가 감소함에 따라 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식은 더욱 민감하다. 즉, 담수가 오염화되어 산성으로 되면 전지작용부식은 더 민감해진다.

4.4 담수의 비저항에 따른 Al합금재의 전지작용 부식 거동

이미 4.1 및 4.2절에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용 부식은 일어날 수 있고, 동과 이종금조합된 Al합금재의 전지작용부식은 Al합금재의 자연부식보다 더 민감함을 고찰하였다. 그러므로 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 미치는 담수의 비저항(specific resistance, Ω · m)이 미치는 영향을 고찰하기 위하여, Fig. 15 및 Fig. 16에 비저항 변화에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도 거동을 나타내었다.

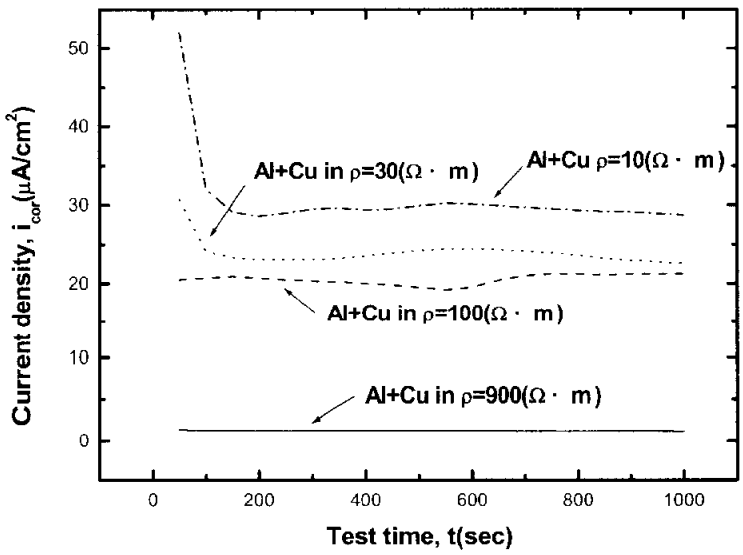


Fig. 15 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. test time in various specific resistance solution at 25℃

Fig. 15는 여러 가지 비저항의 환경 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도 변화를 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다. 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 환경의 비저항이 감소함에 따라 증가함을 알 수 있다.

Fig. 16은 담수의 비저항 변화에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도 거동을 정리하여 나타낸 것이다.

동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 환경의 비저항이 감소함에 따라 급격히 증가하고 있다.

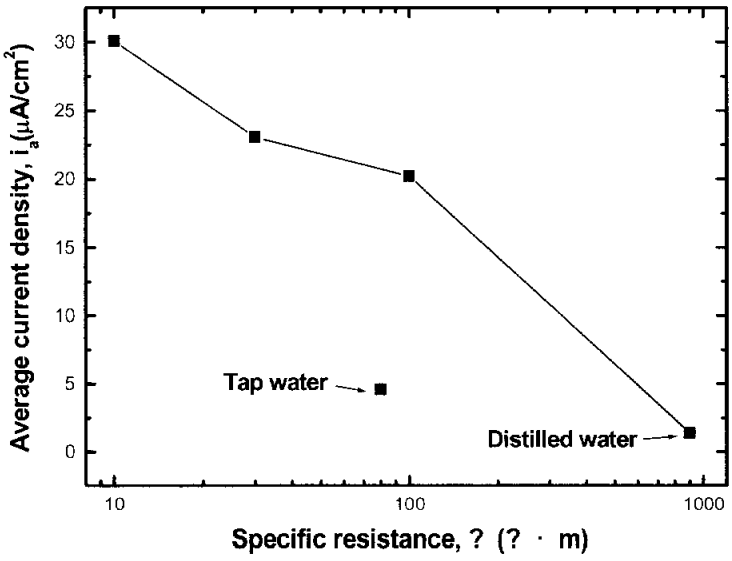


Fig. 16 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. various specific resistance in solution at 25℃

이와 같이 비저항이 감소함에 따라 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도가 급격히 증가하는 이유는 수도수 중에 미량 혼입된 Cl이온이 음극인 동의 부동태를 파괴시키므로써 음극이 활성화 되어 양극인 Al합금재로부터 전류밀도가 많이 배류되기 때문인 것으로 사료된다. 또한 비저항이 80 Ω·m인 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 증류수에 HCl를 미량 혼입한 비저항 100 Ω·m의 수용액 중에서보다 비저항은 낮지만 더 억제되고 있다. 이와 같이 비저항이 80 Ω·m인 수도수 중에서 Al합금재의 전지작용부식이 HCl를 미량 혼입한 비저항 100 Ω·m의 수용액 중에서보다 더 억제되는 이유는 비저항 100 Ω·m의 수용액에서 Cl이온이 양극인 Al합금재와 음극인 동을 부식활성화 시키는 반면에 수도수 중에서는 탄산칼슘($CaCO_3$)이 양극 및 음극부에 보호피막을 일부 형성하기 때문인 것으로 추정된다.

4.5 부동액 혼입에 의한 Al합금재의 전지작용부식 억제거동

Fig. 17은 부동액을 20, 30, 40 및 50% 혼입한 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 억제거동을 시간경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다. 여기서, 본 연구에서 사용된 부동액의 사양서에는 물과 부피비로 빙점에 따라 30%~55%까지 혼입하도록 되어 있다.

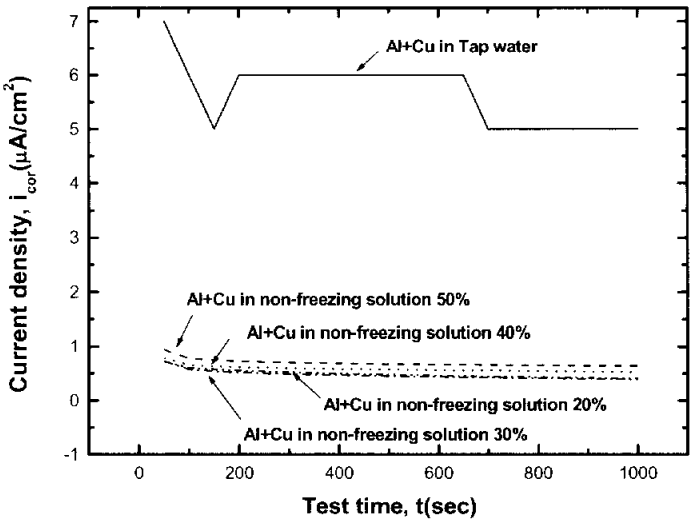


Fig. 17 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. test time in tap water+20, 30, 40 and 50% non-freezing solution at 25℃

부동액을 20 %로부터 50 %로까지 혼입한 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 부식전류밀도는 수도수 중에서보다 크게 억제된다. 특히, 부동액을 50 %로부터 30 %까지 감소함에 따라 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 부식전류밀도는 더 낮게 배류되는 경향을 나타내고 있다. 그러나 부동액 20 % 혼입한 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 부식전류밀도는 부동액 30 % 혼입한 수도수 중에서보다 더 높게 배류된다.

Fig. 18은 수도물에 혼입된 부동액의 혼합비에 대한 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 평균전류밀도의 억제거동을 정리하여 나타낸 것이다.

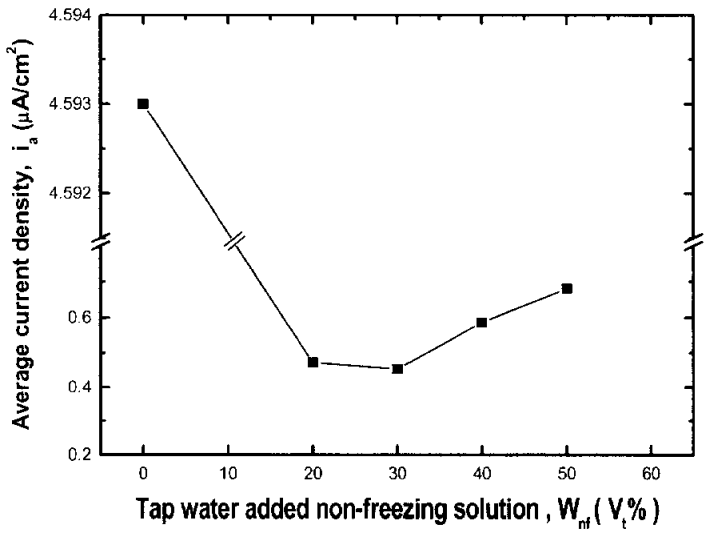


Fig. 18 Galvanic current density of Al alloy coupling with Cu vs. ratio non-freezing solution added tap water at 25℃

수도수 중에 부동액을 20 %로부터 50 %로까지 혼입함으로써 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 평균전류밀도는 수도수 중에서보다 크게 억제되는 경향을 나타내고, 수도수 중에 부동액 30 %를 혼입하는 것이 최적이라 판단된다. 이와 같이 수도수 중에 부동액 30 %를 혼입함으로써 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식을 억제하는데 최적으로 나타나는 이유는 수도수 중에 혼입된 부동액이 30 % 이상 증가함으로써 부동액 중의 동결을 방지하는 에틸렌글리콜 등이 증가함으로써 부식억제제에 의한 부식방지효과를 저하시키기 때문인 것으로 사료된다.[18] 또한 부동액 30% 혼입한 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 평균부식전류밀도는 수도수 중에서보다 약 1/14 정도로 전지작용부식을 크게 억제하고 있다.

4.6 Al합금재의 연간부식률 평가

부식환경 중에서 금속재료의 부식속도를 측정하기 위한 방법은 무게감소량에 의한 방법(weight loss measurement)과 전기화학적 분극(polarization)에 의한 방법이 있다.

무게감소량에 의한 방법은 재래식 방법으로서 부식속도를 결정하는데 수일 또는 그 이상의 장기간이 소요된다.

그러나 전기화학적 분극에 의한 부식속도 측정법은 단시간에 결친 부식실험으로 부식속도를 결정할 수 있고 비파괴시험이므로 동일한 시험편으로 부식속도를 연속적으로 측정할 수 있는 특징이 있기 때문에 최근 부식공학에 관한 연구 및 현장에서의 부식거동 관찰 등에 유용하게 이용된다.

이와 같이 유용한 전기화학적 분극법에 의한 금속의 부식속도 측정법은 타펠외삽법(Tafel extrapolation method)과 분극저항법(polarization resistance method)이 있다[19].

본 연구에서는 전기화학적 분극법에 Tafel 분극실험을 실시한 후 타펠 외삽법을 적용한 M352/252 Corrosion Software로부터 분석하여 구해진 부식전류밀도($\mu A/cm^2$) 값으로부터 연간부식율(corrosion rate, CR)을 다음 식(4-1)에 따라 계산하였다.[20]

$$CR(mmpy) = \frac{0.0033\, I_{cor}(EW)}{d} \quad \text{----------(4-1)}$$

여기서, I_{cor} = Corrosion current density ($\mu A/cm^2$)

EW = Equivalent of material (g)

d = Density of material (g/cm^3)이다.

Fig. 19는 수도수 중에서 Al합금재의 Tafel 분극곡선을 정리하여 나타낸 것이다.

수도수 중에서 Al합금재의 개로전위(open circuit potential)는 약 -640 mV/SCE이고, 개로전위하의 부식전류밀도는 약 4.27 $\mu A/cm^2$로 나타내고 있다. 여기서, 부식전류밀도 i = 4.27 $\mu A/cm^2$를 (4-1)식에 대입하여 계산한 수도수 중에서 Al합금재의 연간부식율은 CRt = 0.047 mm/y이다.

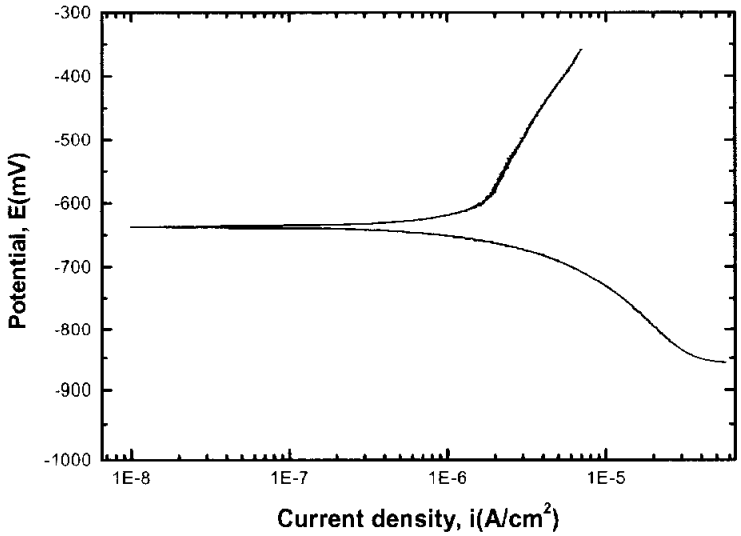


Fig. 19 Tafel polarization curve of Al-alloy in tap water at 25℃

각 부식환경조건에 따른 전지작용부식에 의한 Al합금재의 연간부식률을 평가하고자, 전지작용부식 감수성(Sensitivity of galvanic corrosion, Sg)은 각 환경 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도, i_g를 수도수 중에서 Al합금재의 자연부식 전류밀도, i_n (실제 주로 사용되는 냉각수는 수도수가 사용되기 때문에 수도수를 기준으로 함)로 나눈 값으로 다음 식과 같다.

$$Sg = i_g / i_n \text{ ----------(4-2)}$$

Fig. 20은 중성 및 산성환경의 pH변화에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 감수성을 (4-2)식에 의해 계산하여 나타낸 것이다.

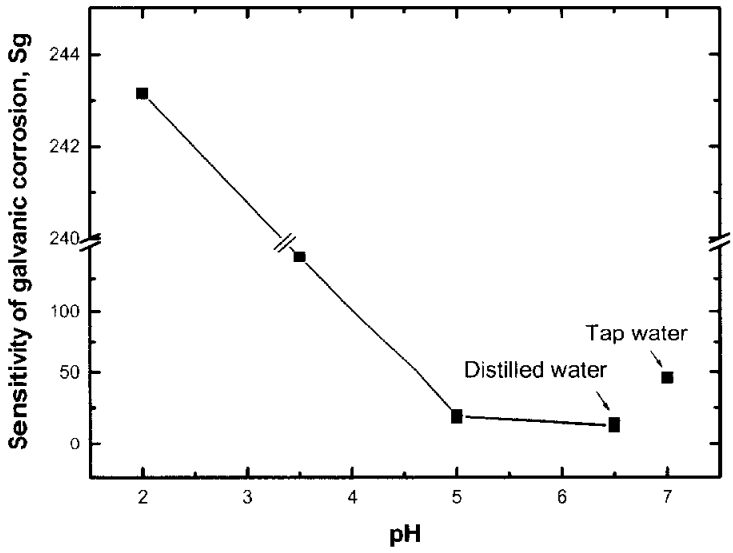


Fig. 20 Sensitivity of galvanic corrosion for Al alloy coupling with Cu vs. various pH in solution at 25℃

동과 조합되는 Al합금재의 전지작용부식 감수성은 pH 값이 낮아질수록(산성화될수록) 민감하지만 중성에서는 거의 유사하게 나타나고 있다.

Fig. 21는 환경의 비저항화에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 감수성을 (4-2)식에 의해 계산하여 나타낸 것이다.

동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 감수성은 환경의 비저항이 감소함에 따라 매우 민감해지고 있다. 또한 비저항이 80 Ω·m인 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 감수성은 증류수에 HCl를 미량 혼입한 비저항 100 Ω·m의 수용액 중에서보다 비저항은 낮지만 더 둔화되는 경향을 보이고 있다.

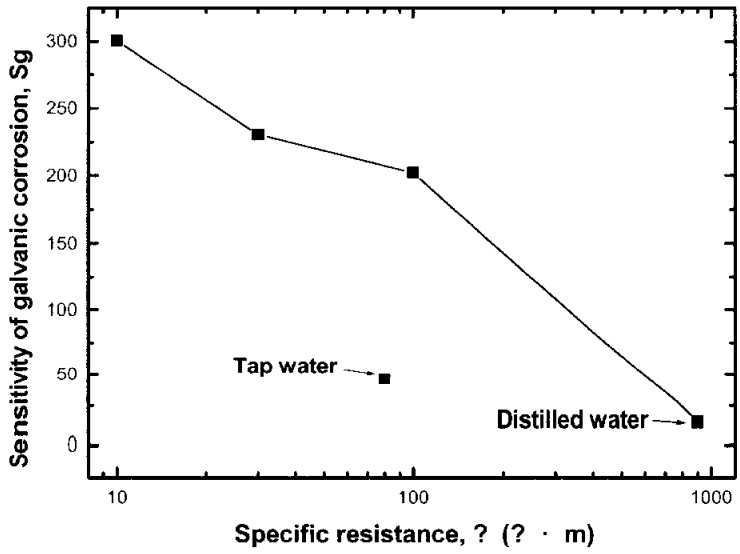


Fig. 21 Sensitivity of galvanic corrosion for Al alloy coupling with Cu vs. various specific resistance of solution at 25℃

이와 같은 경향을 나타내는 이유는 이미 Fig. 16에서 나타낸 바와 같이 수도수 중에서 탄산칼슘($CaCO_3$)이 양극 및 음극부에 보호피막을 일부 형성하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 22는 수도수 중에서 혼입시킨 부동액의 비율에 따라 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 감수성을 (4-2)식에 의해 계산하여 나타낸 것이다.

Al합금재의 전지작용부식 감수성은 수도수 중에 혼입된 부동액의 농도가 증가할수록 더 둔화되다가 30%의 부동액에서 가장 낮게 나타나고, 부동액이 40% 및 50%로 증가함으로써 Al합금재의 전지작용부식 감수성은 점차 민감해지는 경향을 나타내고 있다.

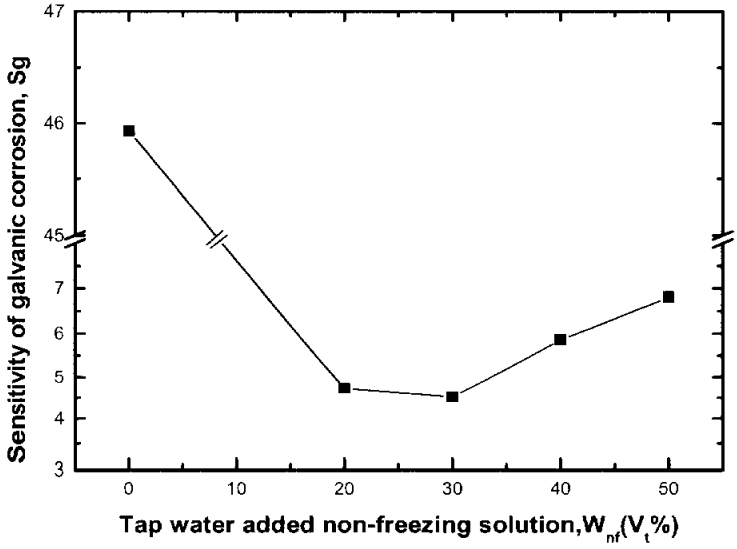


Fig. 22 Sensitivity of galvanic corrosion for Al alloy coupling with Cu vs. ratio of non-freezing solution in tap water at 25℃

동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율을 구하고자, pH 변화와 비저항 변화에 따른 수도수 그리고 20, 30, 40 및 50 %의 부동액을 혼입시킨 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율은 수도수 중에서 Tafel분극곡선에 의해 구한 Al합금재의 연간부식율 CR_t에 각 환경조건에 따른 전지작용부식 감수성을 곱한 값으로 다음 식과 같다.

$$CR = CR_t \times Sg \quad \text{----------(4-3)}$$

Fig. 23은 중성 및 산성환경의 pH변화에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율을 (4-3)식에 의해 계산하여 나타낸 것이다.

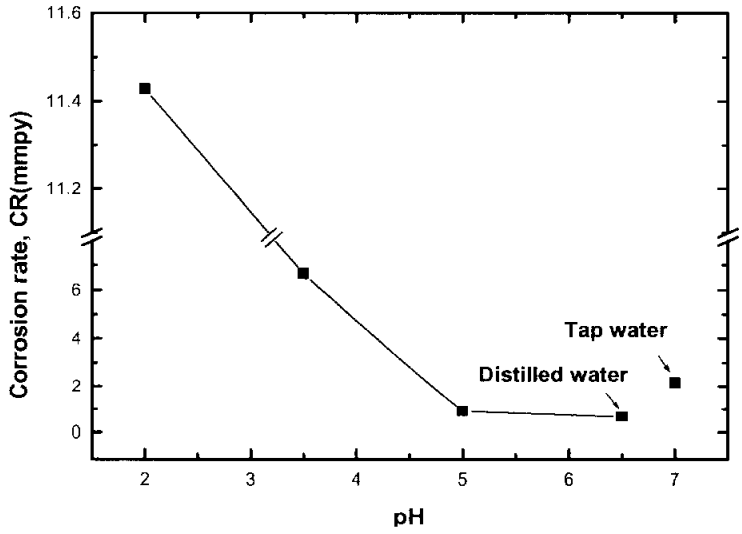


Fig. 23 Corrosion rate of galvanic corrosion for Al alloy coupling with Cu vs. various pH of solution at 25℃

동과 조합되는 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율은 중성인 pH 5 및 pH 6.5의 용액에서는 거의 유사하게 나타나다가 산성화되면서 급격히 높아짐을 알 수 있다.

Fig. 24은 담수의 비저항 변화에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율을 (4-3)식에 의해 계산하여 나타낸 것이다. 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율은 담수의 비저항이 감소함에 따라 높아지는 경향을 나타내고 있다.

특히, 비저항이 80 Ω·m인 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율은 증류수에 HCl를 미량 혼입한 비저항 100 Ω·m의 수용액 중에서보다 비저항은 낮지만 더 둔화되는 경향을 보이고 있다.

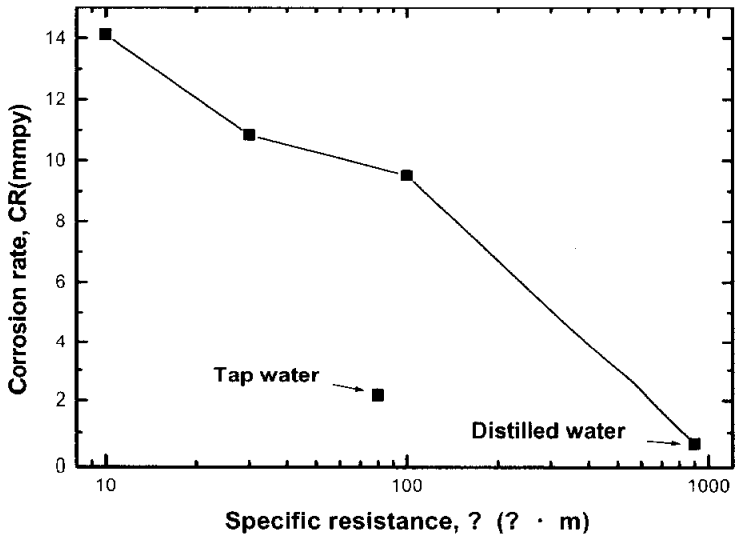


Fig. 24 Corrosion rate of galvanic corrosion for Al alloy coupling with Cu vs. various specific resistance of solution at 25℃

이와 같은 경향을 나타내는 이유는 이미 Fig. 16 및 Fig. 21에서 나타낸 바와 같이 수도수 중의 탄산칼슘($CaCO_3$)이 양극 및 음극부에 보호피막을 일부 형성하기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 25는 20, 30, 40 및 50 %의 부동액을 혼입시킨 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율을 (4-3)식에 의해 계산하여 나타낸 것이다.

동과 이종금속조합된 Al합금의 전지작용부식에 의한 연간부식율은 30 % 부동액을 혼입한 수도수 중에서 가장 낮게 나타나고, 이것보다 부동액이 적거나 많이 혼입되면 전지작용부식에 의한 연간부식율은 오히려 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.

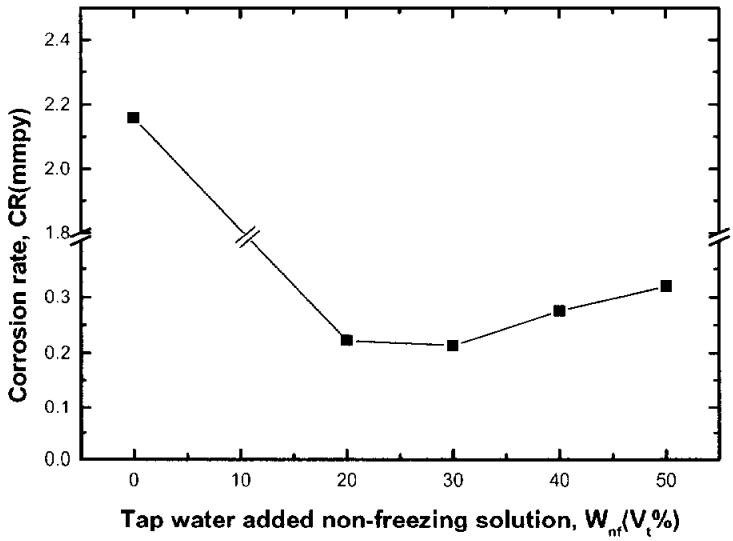


Fig. 25 Corrosion rate of galvanic corrosion for Al alloy coupling with Cu vs. ratio non-freezing solution added tap water at 25℃

20, 30, 40 및 50% 부동액을 혼입한 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금의 전지작용부식에 의한 연간부식율은 약 0.10 ~ 0.16 mmpy의 값으로 낮게 나타나지만, 수도수, pH 3.5인 약산성용액, 비저항 100 Ω·m인 수용액 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 연간부식율은 약 1.15 ~ 4.75 mmpy의 값으로 매우 높게 나타나고 있다.

NACE(National Association of Corrosion Engineers)의 내식성 평가에 의하면 연간부식율이 < 0.5 mmpy 이면 사용 가능한 것으로 보고되고 있다[21].

그러므로 동과 이종금속조합된 Al합금재는 20, 30, 40 및 50% 부동액을 혼입한 수도수 중에서의 사용은 가능할 것으로 판단되지만, 수도수, pH 3.5인 산성용액 및 비저항 100 Ω·m인 수용액 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 사용이 불가능할 것으로 사료된다.

4.7 Al합금재의 자연부식 및 전지작용부식 양상

Photo. 2은 동종금속인 Al합금재를 조합한 Al합금재를 pH 3.5인 약산성용액 중에서 10일 동안 침지한 후에 나타난 Al합금재의 자연부식된 조직사진이다. Al합금재의 자연부식의 결과로써 부식양상은 일부 나타나지만 공식(pitting)은 거의 찾아 볼 수 없다.

Photo. 3는 동과 이종금속조합된 Al합금재를 pH 3.5인 약산성용액 중에서 10일 동안 침지한 후에 나타난 Al합금재의 전지작용부식된 조직사진이다. 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식은 전면부식은 거의 나타나지 않고, 주로 공식이 나타나고 있으며, 이들 공식은 깊이 방향보다 평면방향으로 주로 성장하고 있다.

Photo. 4은 동종금속인 Al합금재를 조합한 Al합금재를 비저항 100 Ω·m인 수용액 중에서 10일 동안 침지한 후에 나타난 Al합금재의 자연부식된 조직사진이다. Al합금재의 자연부식에서 공식은 일부 나타나지만, 심한 공식은 거의 찾아 볼 수 없다.

Photo. 5는 동과 이종금속조합된 Al합금재를 비저항 100 Ω·m인 수용액 중에서 10일 동안 침지한 후에 나타난 Al합금재의 전지작용부식된 조직사진이다.

동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식은 전면부식은 거의 나타나지 않고, pH 3.5인 약산성용액 중에서의 공식과는 달리 주로 깊이 방향으로 심한 공식이 나타나고 있다.

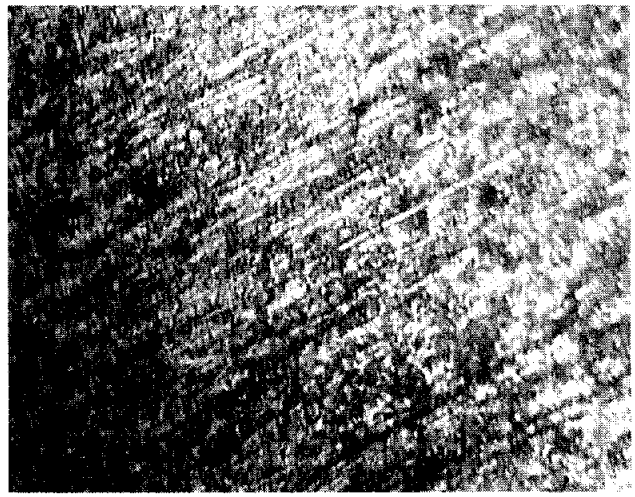


Photo. 2 Natural corrosion photography of Al-alloy in acidic solution(pH 3.5) at 25℃ after 10 days(×100)

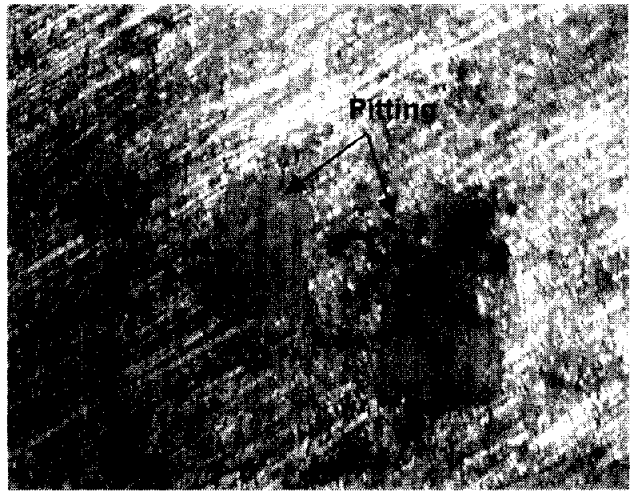


Photo. 3 Galvanic corrosion photography of Al-alloy coupled with Cu in acidic solution(pH 3.5) at 25℃ after 10 days(×100)

Photo. 4 Natural corrosion photography of Al-alloy in ρ=100 Ω · m solution at 25℃ after 10 days(×100)

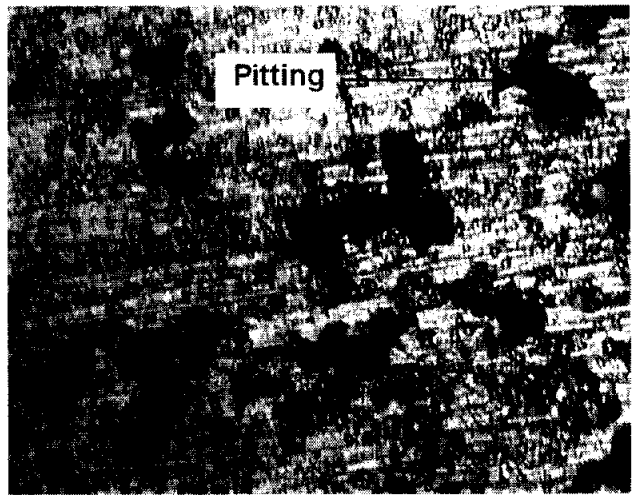


Photo. 5 Galvanic corrosion photography of Al-alloy coupled with Cu in ρ=100 Ω · m solution at 25℃ after 10 days(×100)

5. 결론

본 연구는 담수의 pH와 비저항 변화 그리고 부동액의 혼입에 따른 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에 의한 부식전위, 전지작용부식, 연간부식율에 대해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 담수 중에서 알루미늄합금재의 부식전위는 동의 부식전위보다 약 450 ~ 480 ㎷/SCE 정도 더 비전위화 됨으로써 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식은 일어날 수 있다.

2) 담수의 pH가 감소함에 따라 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식은 더욱 민감하다.

3) 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 전류밀도는 환경의 비저항이 감소함에 따라 급격히 증가한다.

4) 수도수에 혼입된 부동액이 50%로부터 30%까지 감소함에 따라 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식 부식전류밀도는 억제된다.

5) 수도수 중에서 동과 이종금속조합된 Al합금재의 전지작용부식에

의한 연간부식율은 약 1.15 mmpy로 높게 나타나지만, 30 ~ 50% 부동액을 혼입한 수도수 중에서 연간부식율은 약 0.10 ~ 0.16 mmpy로 Al합금재의 전지작용부식이 억제된다.

참 고 문 헌

(1) 임우조, 양학희, 인현만, 이진열(1994) : 부식과 방식, 원창출판사, pp. 302-305

(2) 임우조, 김성진, 황재호, 윤대영(2001) : Al합금 원통 냉각기의 부식 거동에 관한 연구, 한국동력기계공학회 추계학술대회 논문집, pp. 209-210

(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, pp. 619-629

(4) Denny A. Jones(1991) : Principles and prevention of corrosion, Macmillan publishing company, pp. 398-401

(5) 임우조, 정기철(2002) "공조설비의 부식과 방식", 태훈출판사, pp. 1~5

(6) Joseph R. Davis(1999) : Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, pp. 19-21

(7) 손운태(1981) : 금속부식학, pp. 100-106

(8) 김학신, 안병국(2000) : 자동차재료학, 원창출판사, pp. 89~119

(9) Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie(1985) : Corrosion and Corrosion Control, John Willey & Sons, pp. 341~354

(10) 前揭書(1), pp. 25~43

(11) 이학열(1997) : 金屬腐蝕工學, 淵鋭文化社, pp. 90~91

(12) Denny A. Jones(1991) : Principles and prevention of corrosion,

Macmillan publishing company, pp. 168~175

(13) 이상열(1997) : 金屬腐蝕工學, 淵鏡文化社, pp. 91~92

(14) 山本輝明(1984) : 異種金屬接触腐蝕, 防蝕技術, 33 [8], p. 478

(15) 山手利博, 他(1989) : 建築設備管系での 異種金屬接触腐蝕に關する研究-その2-實驗結果, 日本建築學會大會 學術講演梗概集D, p. 4282

(16) 前揭書(7), pp. 89~93.

(17) 임우조, 정기철(2002) : 공조설비의 부식과 방식, 태훈출판사, pp. 21~23

(18) 이병근, 강탁, 강춘식(1985) : 에틸렌글리콜 수용액에서 공정 Al-Si합금의 부식, 한국부식학회지, p. 7

(19) 前揭書(12), pp. 142~146

(20) 前揭書(13), pp. 74~79

(21) 전대희(1985) : 부식과 방식의 관리, 일중사, pp. 316~317

감사의 글

본 논문을 완성하기까지 항상 헌신적인 지도와 격려를 베풀어주신 임우조 지도교수님께 진심으로 감사 드리며, 바쁘신 가운데도 유익한 논문이 되도록 조언과 비판으로 심사하여 주신 김남식 교수님, 권오붕 교수님께 감사 드립니다.

항상 따뜻한 격려와 많은 도움을 주신 재료공학과 남기우 교수님께 감사 드리며, 대학원 과정을 통하여 폭넓은 지식을 가르쳐 주신 기계공학부 이도형 교수님, 김민남 교수님께도 감사 드립니다.

학문적 연구에 많은 도움을 주신 방식연구회 회원인 정해규 선배님, 강성수 선배님, 김진배 선배님에게 고마움을 전하며, 실험실 생활을 같이 하며 힘들 때 많은 도움을 주신 윤병두 선배님과 윤대영, 심경태, 이주형 선배님, 동갑 재학에게도 고마움을 전합니다.

대학동기인 영미, 승연, 지원, 근희, 만길오빠와 그리고 오랜 나의 친구 윤정, 효진, 민희, 성희에게도 고마움을 전합니다.

특히, 20여년 동안 힘들게 고생하시며 지켜봐 주신 사랑하는 어머니의 빠른 쾌유를 빌며 그리고 자상하신 큰외삼촌과 동생 상민, 숙인이와 이 작은 결실을 함께 하고자 합니다.

2003년 12월

이은정 拜上