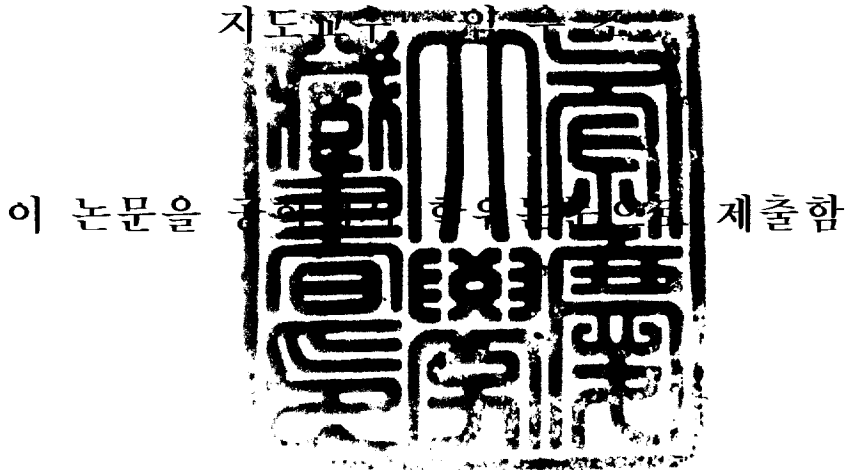


공학석사 학위논문

Al-Mg합금재의 캐비테이션 손상 특성에
관한 연구



2005년 2월


부경대학교 대학원


기계공학부


심경태

심경태의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월 일

주 심 공학박사 이도형 (인) 

위 원 공학박사 이연원 (인) 

위 원 공학박사 임우조 (인) 

목 차

Abstract	1
Nomenclature	4
1. 서 론	6
2. 이론적 고찰	9
2.1 캐비테이션의 발생과 그에 따른 침식-부식 특성	9
2.2 캐비테이션 침식-부식의 발생원인	10
2.3 알루미늄합금재의 부식특성	13
3. 시험재료 및 실험방법	16
3.1 시험재료	16
3.2 부식 시험편	16
3.3 부식 실험장치	18
3.4 부식 실험방법	20
3.5 캐비테이션 침식-부식 시험편	21
3.3 캐비테이션 침식-부식 실험장치	23
3.4 캐비테이션 침식-부식 실험방법	26

4. 실험 결과 및 고찰	27
4.1 캐비테이션 침식-부식	27
4.2 진동 캐비테이션 침식-부식의 진행기구	32
4.3 캐비테이션 침식-부식 손상양상	38
4.4 오염된 해수 중에서 Tafel 분극 및 분극저항거동	45
4.5 연간부식율 평가	48
5. 결 론	51
참고문헌	53

The Study on the Characteristics of Cavitation damage of Al-Mg alloy

Kyung-Tae, Shim

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School.
Pukyong National University*

Abstract

The propeller of ship is three components part of ship along with hull, engine because affect high speed, energy expenditure and hull implantation etc.

Lately, there are most vessels that use Al-Brass for propeller, but small size ships use Al-Mg alloy for high-speed and economy of energy by light weight.

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, it is acidified and specific

resistance is decreased. Therefore, corrosion damage is accelerated in propeller of ships that is using acidified sea water.

Due to the increased occurrence of cavitation erosion-corrosion in Al-Mg alloy in a contaminated ocean environment, there is a need to study of the characteristics on the process of cavitation erosion-corrosion.

In this study, general corrosion and cavitation erosion-corrosion characteristics of Al-Mg alloy were tested in the sea water. Corrosion tests of Al-Mg alloy was carried out under the various pH. And thus polarization resistance , Tafel polarization, cavitation erosion-corrosion rate and cavitation erosion-corrosion mechanism behavior of Al-Mg alloy for propeller were investigated.

The main results obtained are as follows ;

1) According to weight loss of cavitation erosion-corrosion by sea water in various pH is increased in $\text{pH}6.7 < \text{pH}4 < \text{pH}2$.

2) According to micropit's formation by cavitation erosion-corrosion damage is developed from border region into central part.

3) Growth of Al-Mg alloy's micropit by cavitation erosion-corrosion is bring to destruction of passive oxide film by mechanical erosion and electrochemical corrosion's synergy effects.

4) Mechanism of cavitation erosion-corrosion rate in pH6.7 has four distinct period, incubation, acceleration, decleration and steady state period and pH4 has incubation period, accelerate period and decleration period appeared long term but in pH2 has three distinct period without incubation period under sea water.

5) According to decrease of pH, open circuit potential becomes noble in sea water. And corrosion current density is increased in $\text{pH4} < \text{pH6.7} < \text{pH2}$.

6) Corrosion rate of Al-Mg alloy is increased in $\text{pH4} < \text{pH6.7} < \text{pH1}$, and corrosion rate shows tendency that increase as acidified from pH4 to pH2.

Nomenclature

- t : Test time (sec)
- ρ : Specific resistance ($\Omega \cdot \text{cm}$)
- SCE : Saturated calomel electrode
- E : Potential (mV/SCE)
- i : Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
- i_{cor} : Corrosion current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
- CR : Corrosion rate (mmpy)
- d : Density of material (g/cm^3)
- EW : Equivalent of material (g)
- R : Corrosion-erosion rate (mg/min)

R_p : Polarization resistance (kOhms)

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

T.S : Tensile strength (kgf/mm²)

W : weight loss (mg)

Wt : Chemical composition (%)

W_t : Total weight loss (mg)

1. 서 론

Al은 지각중에서 Si 다음으로 많이 존재하며 Cu와 더불어 비철금속재료의 으뜸을 이루고 있다. Al은 주조 및 가공이 용이하며, 대기, 중성 및 대부분의 산성용액에서 내식성이 우수하며, 다른 금속과의 합금이 잘되어 많은 분야에서 사용되어지고 있다. 이러한 우수한 성질로 인해서 Al의 용도는 매년 증가되고 있으며, Al은 판, 선박, 분말 등의 형상으로 자동차, 항공기, 가정용품, 화학공업용 등에 널리 사용된다⁽¹⁾.

최근에는 프로펠러 재료로 Al합동재를 사용하는 선박이 많으나, 소형선박의 경우 가격이 저렴하면서 경량화에 의해 고속화와 에너지 절약을 위해 최근에는 중·소형 선박에 적합한 Al합금 프로펠러를 개발하여 시판하고 있다^(2~4).

선박의 프로펠러에서 캐비테이션(cavitation)은 부하가 높은 프로펠러가 어떤 임계 회전수를 넘는 회전 속도로 구동될 때 나타나는 현상이며, 날개 주위의 흐름이 점진적으로 교란되고, 그 결과로서 추력의 손실이 생기게 된다. 극단의 경우에는 캐비테이션 때문에 배가 원하는 속도를 내지 못하게 되는 수도 있다.

예전에는 고속선에 대해서만 캐비테이션이 문제가 되었으나, 근년에 이르러 속도와 동력이 증가됨에 따라 캐비테이션으로 인한 침식 문제가 점점 중요시되게 되었으며, 특히 높은 동력의 단추진기선들에서는 심각한 문제가 되고 있다⁽⁵⁾.

전반적인 산업발전 및 국민소득증가에 따라 산업단지, 일반가정의 오폐수, 산성비 및 농약 등에 의해 하천이나 강 그리고 연안 바다의 환경오염화가 가속되고 있다. 화석에너지의 소비량이 증가됨에 따라 유황화합물인 SO_2 , SO_3 및 H_2S , 질소화합물인 NO 와 NH_3 , 산화물인 CO 그리고 염화물인 HCl 과 Cl_2 등이 대기오염물질(substances for air pollution) 배출이 증대됨으로써 환경오염을 가속시키고 있다^(6,7).

이러한 대기오염물질 배출이 증대됨으로써 각종 설비와 금속구조물의 대기부식(atmospheric corrosion) 속도를 증가시키고,^(8, 9) 이들 대기오염물질 중에서 SO_2 , SO_3 , CO 및 THC(Total hydro-carbon) 등은 결로현상에 의해 강산성화 되고, 대기 중의 수분이나 물에 혼입되거나 산성비에 의해 하천수나 강물 등의 담수가 산성화되며, HCl 및 Cl_2 등은 물에 혼입되면 일부는 가수분해에 의해 산성화됨으로써 산성부식을 일으킨다^(10~12).

이와 같이 오염화된 하천수나 강물은 바다로 유입됨으로써 연안해수가 오염화되고 있다. 오염화된 하천수나 강물은 산성화로 산성부식, 즉 수소발생형 부식을 일으키고, 해수 중의 해염인자인 Cl^- 이온의 영향과 오염화에 의한 산성의 영향으로 상승적인 부식손상을 받는다^(12~16).

결국, 이러한 환경오염과 캐비테이션 침식-부식을 방지하는 문제는 Al-Mg합금재를 사용한 설계에서의 필수 조건이 되었으며, 설계자는 반드시 재료의 부식과 캐비테이션 침식이 조합된 문제를 반드시 해결해야 하기 때문에 캐비테이션 침식과 부식의 상관관계에 관한 연구가

필요하다^(17,18).

따라서 본 연구에서는 비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 해수중에서 Al-Mg합금재의 캐비테이션 침식-부식 특성에 관한 연구를 하기 위하여, Al-Mg합금재의 부식전위, 분극저항, 개로전위, 부식전류밀도, 연간부식을 및 진동 캐비테이션 시험 장치에 의해 침식-부식 실험을 실시하였다. 이러한 실험의 결과를 토대로 Al-Mg합금재의 캐비테이션 손상특성을 고찰하고 규명하였으며 환경오염에 의한 산성화된 환경조건에 따른 캐비테이션 침식-부식손상거동을 비교·분석함으로써 해양환경 중에서 Al-Mg합금재의 캐비테이션 손상에 대한 설계, 제작 및 보수의 기초 자료로 활용하는데 기여하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 캐비테이션의 발생과 그에 따른 침식-부식 특성

유동 시스템에서 유체의 국부적인 속도의 변화 중에서 최대 속도와 낮은 압력점에서 캐비티(cavity)가 발생한다.

유동에 의하여 발생하는 캐비테이션은 travelling cavitation, fixed cavitation, vortex cavitation의 세 가지로 분류된다. 이 중에서 vortex cavitation은 선박 프로펠러 블레이드 팁(blade tip) 부위에 높은 전단력이 생기면서 발생되며 일명 tip cavitation이라고도 한다⁽¹⁹⁾.

캐비테이션은 고속의 액체 흐름에 노출된 금속표면을 따라 압력변화에 의해서 생성된 기포(cavity)들이 파괴되는 것과 관련하여 발생한다. 굽은 표면을 따라 흐르는 액체에서는 압력강하가 일어나게 되는데 이때 압력이 액체의 증기압 이하로 감소하게 되면 국부적인 비등 현상이 발생하게 된다. 기포(cavity)들이 금속표면에 닿아 파괴될 때의 반복압력과(repeted pressure impact)는 금속표면을 침식시키기에 충분하며 특히 취약한 부식생성물이 존재할 경우 그러하다. 캐비테이션 침식-부식의 경우에서처럼, 보호표면피막이 제거되거나 얇아지면 하부 소지금속의 부식이 촉진되며 그리하여 표면에 침식 가능한 부식생성물이 다시 쉽게 형성된다. 그러나 많은 경우 기포의 파괴압력은 부식생성물이 아닌 금속 자체의 표면을 침식시키기에 충분하다⁽²⁰⁾.

2.2 캐비테이션 침식-부식의 발생기구

캐비테이션 침식-부식(cavitation erosion-corrosion)은 침식부식의 특수한 형태로서 금속표면 가까이 액체에서 증기포(vapor bubble)가 생성 또는 소멸되는 것과 관련되며 캐비테이션 손상(cavitation damage)이라 일컫기도 한다. 캐비테이션 침식-부식은 수력터빈(hydraulic turbine), 선박의 프로펠러, 펌프임펠러 등과 같은 유속이 크고 또한 압력변화가 큰 곳에서 발생한다.

캐비테이션 침식-부식의 발생기구를 살펴보면, 액체의 압력이 충분히 감소된다고 하면 실온에서도 비등하게 된다. 실린더가 물로서 채워져 있고 여기에 피스톤이 물과 접촉된 상태로 단단하게 끼워져 있다고 생각하자. 만일 피스톤을 위로 밀어올려 물과 떨어지게 하면 압력이 크게 감소되고 따라서 물이 증발하면서 기포가 발생하게 된다. 여기서 다시 피스톤을 아래로 눌러 물과 접촉되게 하면 압력은 크게 증가하고 기포는 소멸된다. 수도펌프에서처럼 이러한 과정을 빠른 속도로 반복하게 되면, 증기포가 급속히 생성되고 또 소멸된다. 빠른 속도로 소멸되는 증기포는 약 60,000psi나 되는 높은 충격파를 생성한다. 이렇게 큰 힘은 많은 금속을 소성변형시킬 수 있다.

캐비테이션 손상의 외관은 공식과 어느 정도 비슷하다. 그러나 그 발생기구는 전혀 비슷하지 않다. 캐비테이션손상은 전기화학적 부식과 기계적인 소성변형이 결합해서 발생한다. 즉 소멸되는 증기포가 금속 표면의 보호피막을 파괴하게 되고 그리하여 부식이 촉진된다.

이러한 캐비테이션 발생기구가 Fig. 1에 나타나고 있다.

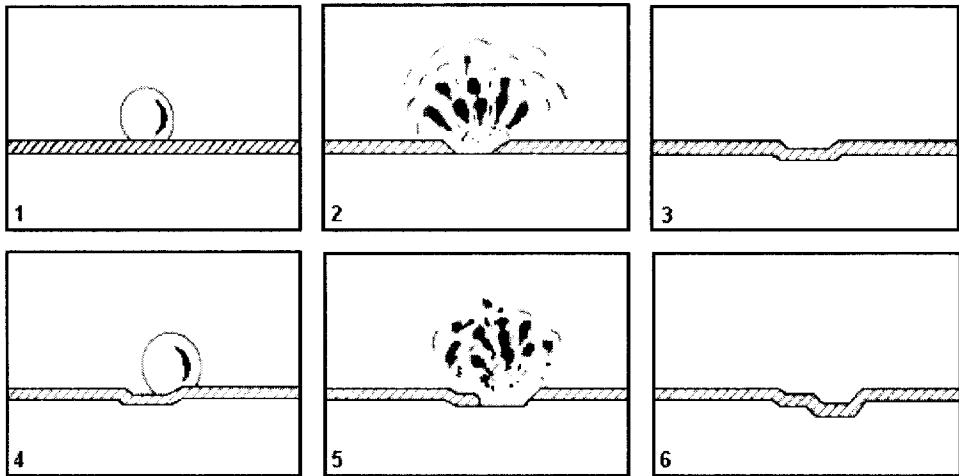


Fig. 1 Schematic representation of steps in cavitation. (*R. W. Henke*)

캐비테이션의 단계는 다음과 같다.

- ① 보호피막위에 캐비테이션 기포(bubble)가 생성된다.
- ② 기포가 소멸되면서 피막을 파괴한다.
- ③ 새로 노출되어진 금속 표면이 부식되고 따라서 피막이 다시 생성된다.
- ④ 똑같은 지점에 새로운 캐비테이션 기포가 생성된다.
- ⑤ 기포가 파멸되면서 피막을 다시 파괴한다.
- ⑥ 노출면적이 부식되고 피막이 또 다시 생성된다.

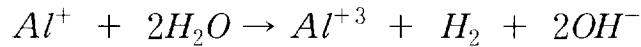
이러한 과정이 계속 반복되어 표면에 깊은 구멍이 생기면서 손상을 받는다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이, 금속표면에 존재하는 보호피막은 캐비테이션 손상의 발생을 방지하는데 전혀 도움이 되지 않는다. 증기포의 소멸에서 생기는 압력이 대단히 크기 때문에 금속표면에서 다소 멀리 떨어진 거리에서도 금속입자에 상당한 힘을 가할 수 있기 때문이다.

어떤 한 지점의 표면이 거칠게 되면 이 점은 캐비테이션 기포의 생성에 의한 우선영역이 된다는 것을 알 수 있다. 또한 캐비테이션손상은 기계적인 작용과 화학적인 작용이 결합해서 나타나는 것임을 알 수 있다⁽²¹⁾.

2.3 알루미늄합금재의 부식특성

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



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⁽²²⁾.

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. 2는 알루미늄의 부동태산화피막을 나타낸 것이나⁽²³⁾.

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 알루미늄합금 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 음극 보호한다. 이러한 음극보호 작용은 공식, 입계 부식, 응력부식균열 등에 대해서 대단히 효과적이다.

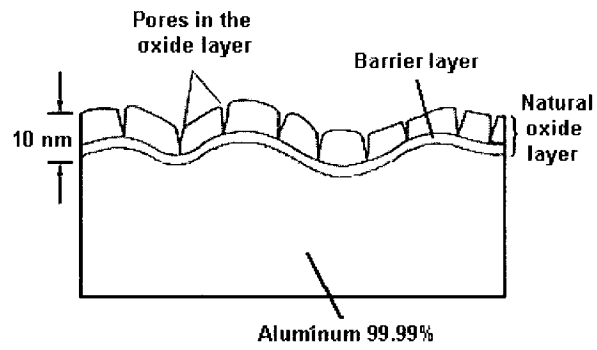


Fig. 2 Schematic of passive oxide film that forms on aluminum

3. 시험재료 및 시험방법

3.1 시험재료

본 실험에 사용된 재료는 Table 1에 나타난 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 Al-Mg합금재이다.

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

Chemical composition(Wt%)							Mechanical properties	
Al	Mg	Si	Mn	Fe	Ni	Cu	T.S(kgf/mm ²)	Elogation(%)
Remain	3.00	0.10	0.73	0.31	0.04	0.02	145.1	12

* T.S : Tensile Strength

3.2 부식 시험편

전기화학적 부식실험에 사용된 Al-Mg합금재의 분극시험편은 Table 1과 같은 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 재료의 판재로부터 절취하여 가로 10 mm, 세로 10 mm의 크기로 제작함으로써 유효 노출면적을 1.0 cm²로 하였으며, 시험편에 전선을 연결시킨 후, 불포화 폴리에스테르 수지로 마운팅(mounting)하였다. 이와 같이 제작한

전기화학적 분석시험을 위한 시험편의 형상과 크기는 Fig. 3과 같다. 또한 이 시험편의 표면은 #800~2000까지의 에머리 페이퍼를 이용하여 단계적으로 연마하여 시험편의 표면거칠기의 영향을 최소화 및 동일화하였다. 그리고 시험편 표면을 아세톤(acctone)으로 탈지하고, 증류수로 세척한 다음 열풍으로 건조시킨 후에 본 실험을 실시하였다

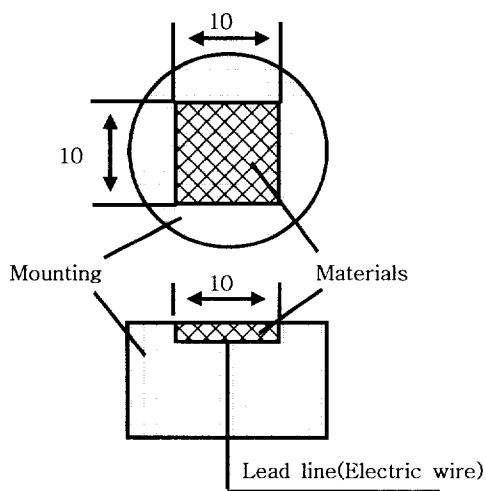


Fig. 3 Dimension of polarization test specimen(unit :mm)

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. 4는 전기화학적 분극실험장치의 전체 계통도를 나타내고 있다.

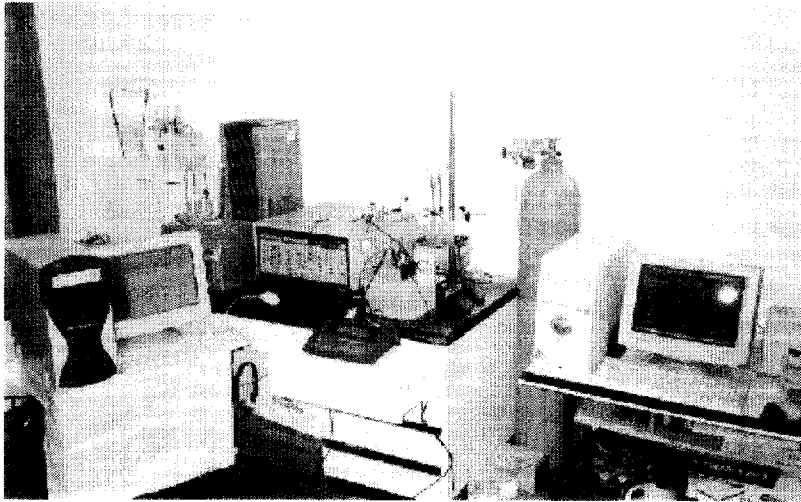
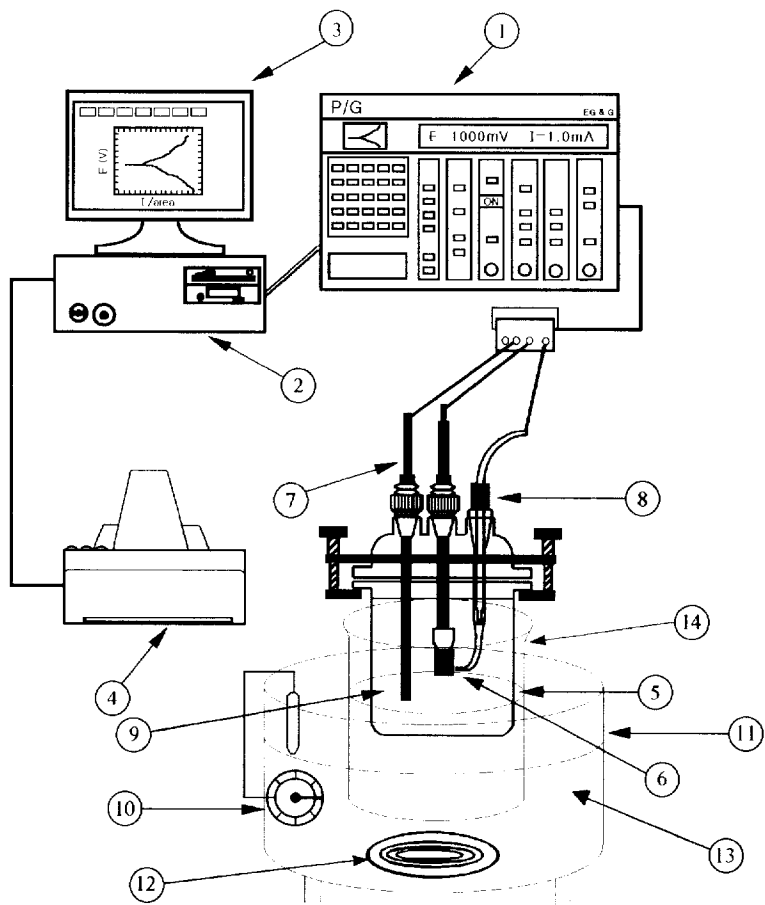


Photo. 1 Appearance of polarization test equipment



- | | | |
|----------------------------|-----------------------|----------------|
| 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. 4 Schematic diagram of polarization test equipment

3.4 부식 실험방법

본 연구의 부식실험은 Fig. 3의 형상인 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. 5에 나타내었다.

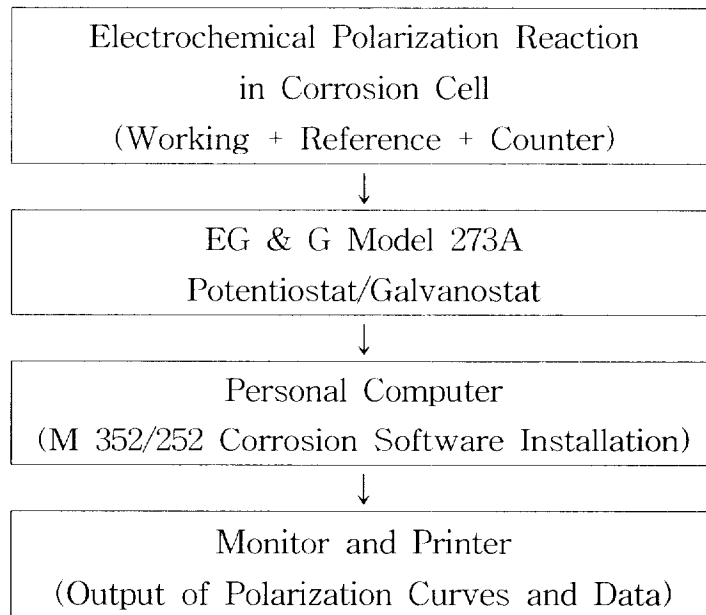


Fig. 5 Flow chart of polarization test equipment

또한 부식용액은 비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 해수 환경에 황산(H_2SO_4)을 미량 혼입하여 pH2, pH4, pH6.7로 변화시킨 환경에서 분극실험을 각각 실시하였다. 부식용액의 온도는 oil bath에 부식환경조를 설치하고, 온도감지기를 장착하여 온도를 $25 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 범위로 일정하게 유지하도록 하였다.

그리고 Tafel 분극곡선 및 부식전위를 구하기 위한 부식시험은 Fig. 3과 같이 표면처리 된 부식시험편을 Fig. 4의 분극시험장치의 회로도와 같이 배선하였다. 시험편을 부식환경조에 침지한 후 자연전위에서 10분간 안정화시킨 후 분극시험을 실시하였다.

3.5 캐비테이션 침식-부식 시험편

본 연구의 캐비테이션 침식-부식시험에 이용한 시험편은 Table 1의 화학적 성분과 기계적 특성을 가진 Al-Mg합금재로 제작되었다.

캐비테이션 침식-부식시험편은 Fig. 6과 같이 가로, 직경 18 mm, 두께 5mm의 원형 시험편으로 제작하였고, 캐비테이션 발생시에 시험편이 부상하지 않도록 Fig. 6의 고정대에 시험편을 고정할 수 있도록 하였다.

시험편 표면은 #800~2000까지의 에머리 페이퍼를 이용하여 단계적으로 연마한 다음, 시험편 표면거칠기의 영향을 최소화 및 동일화하기 위하여 연마기에서 산화알루미늄(Al_2O_3)분말을 이용하여 시험편 표면을 연마하였다. 그리고 증류수 중에서 초음파세척기로 세척한 다음, 아세톤으로 탈지한 후 열풍으로 건조시켰다.

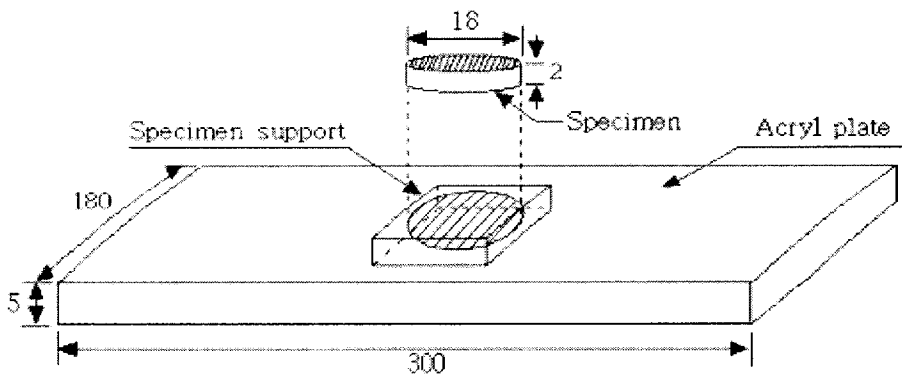


Fig. 6 Shape of specimen for cavitation erosion test

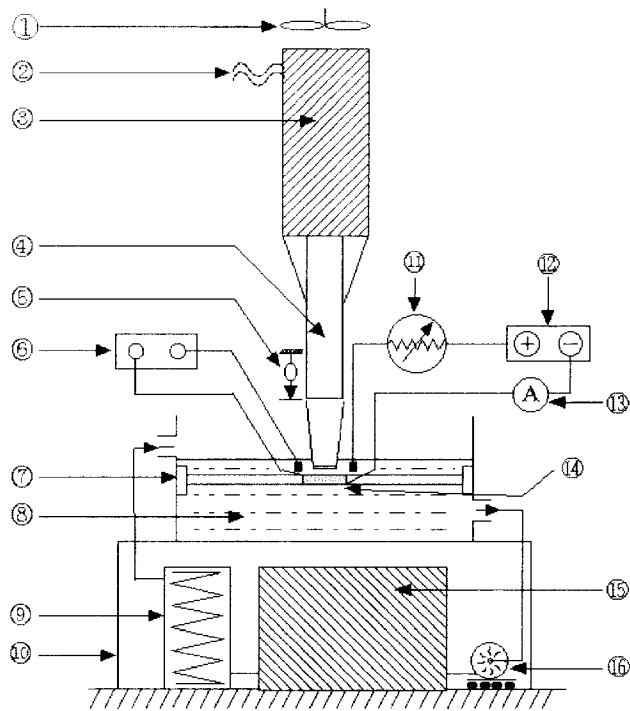
3.3 캐비테이션 침식-부식 실험장치

유체기계나 각종 설비 등에 있어서 기계의 성능 및 수명에 치명적인 영향을 미치는 캐비테이션 침식-부식 손상을 방지하기 위한 대책이 요구됨에 따라, 이에 필요한 기초자료를 얻기 위해서 다양한 가속 캐비테이션 침식-부식 시험법이 이용되고 있다.

이 중에서 시험편을 부식시험용액 중에서 고주파에 의해 상하로 진동시켜 캐비테이션 현상을 일으키는 진동캐비테이션 발생장치가 많이 사용되고 있다. 진동캐비테이션 발생 장치는 시험에 사용되는 용액량이 적을 뿐만 아니라 시험편도 작고 사용 방법이 비교적 간단한 장점이 있다^(24~26).

따라서 본 실험에서는 진동캐비테이션 발생 시험장치를 사용하였으며 초음파를 응용한 진동가속시험기의 전체 계통도는 Fig. 7과 같다. Fig. 7의 캐비테이션 발생실험장치는 진동자(transducer)의 혼(horn, 직경 15mm)과 시험편을 대향하게 하고 아크릴 판 위에 금속에 의한 영향을 줄이기 위해 테프론지그를 고정시켜 시험편 고정물을 장치하여 시험편을 고정시킨 상태에서 캐비테이션을 발생시켰고, 혼은 시험편에 수직하게 상하로 진동하였다.

이때 진동자의 공진주파수는 ASTM 규정에 따라 20 kHz로 하였고, 진폭은 24 μm 로 일정하게 유지하였다. 여기서, 초음파진동기는 60Hz, 220V 전압을 입력으로 $20\pm 0.2\text{kHz}$ 의 정격 출력을 발생시켜 진동자로 공급하고 있다.



- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Cooling fan | 9. Temp. regulator |
| 2. Power supply | 10. Stand bed |
| 3. Transducer | 11. Rheostats |
| 4. Horn skirt | 12. DC power supply |
| 5. Dial gauge | 13. Ampere meter |
| 6. Potentiometer | 14. Specimen |
| 7. Specimen supporter | 15. Power control box |
| 8. Soluble liquid | 16. Circulating pump |

Fig. 7 Schematic diagram of cavitation erosion-corrosion test apparatus

실험장치의 구성은 Fig. 8의 흐름도와 같이 초음파 발생장치, 증폭장치, 출력장치로 진동자, 증폭 혼(booster horn) 등으로 되어 있으며, 제어장치(control unit)와 자동 타이머(auto stop timer) 등이 있다. 진동자는 발전기로부터 입력된 전기에너지를 진동에너지로 변환시켜 증폭기에 전달하도록 되어 있다.

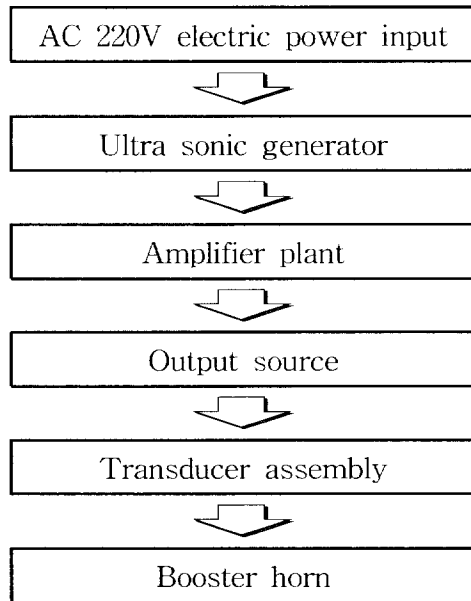


Fig. 8 Flow chart of ultrasonic unit

3.4 캐비테이션 침식-부식 실험방법

Al-Mg 합금재의 진동 캐비테이션 침식-부식거동 연구에 사용된 부식환경으로는 비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 해수와 오염된 연안해수 환경은 비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 해수에 황산(H_2SO_4)을 미량으로 혼입하면서 pH를 2, 4, 6.7로 조절하였다.

또한 진동 캐비테이션 침식-부식실험에서 시험편과 환경조의 전지 작용부식 영향을 고려하여 아크릴제의 환경조를 제작하여 실험에 적용하였고, 대향 설치된 시험편과 혼(horn)의 간격(h)은 틸새 게이지 (feeler gauge) 및 버니어 캘리퍼스(vernier calipers)로 측정하였고, 캐비테이션 침식-부식에 의한 시험편의 무게 감소량은 자동 타이머 (timer) 및 수동 스톱워치(stop watch)로 실험시간을 정확하게 조정하여 측정토록 하였다.

진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 따른 시험편의 무게감소량은 0.1mg의 정밀전자저울에 의해 측정하였으며, 실험시간 18분 주기로 무게감소와 디지털카메라에 의해서 표면손상상태를 촬영하였다.

그리고 진동 캐비테이션 장치의 부스터 혼의 온도상승에 의한 주파수 변동을 고려하여 캐비테이션 발생시간을 3분 단위로 실험하였으며, 시험편과 혼 사이의 간격은 0.6mm로 일정하게 조정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 캐비테이션 침식-부식

Fig. 9는 오염된 해수 환경에서 pH변화에 따른 Al-Mg합금재의 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게감소량(weight loss)을 시간 경과에 따라 정리한 것이다.

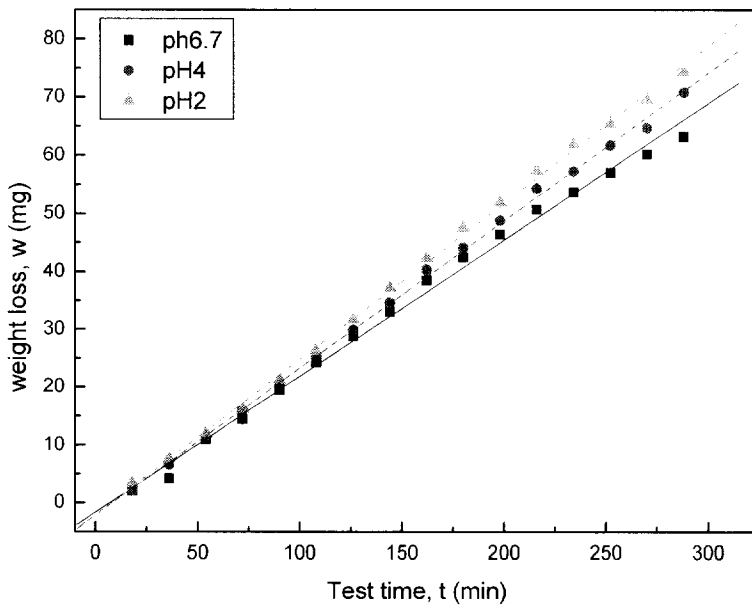


Fig. 9 Weight loss of Al-Mg alloy Cavitation erosion-corrosion vs. test time in various pH of sea water

진동 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 무게 감소량 변화 거동은 시간이 증가함에 따라 각 환경에서 선형적으로 증가되는 경향을 나타내고 있다. 해수의 pH변화에 따른 진동캐비테이션 침식-부식에 의한 무게 감소량은 pH6.7 < pH4 < pH2의 순으로 높게 나타나고 있다.

알루미늄 재료는 pH4~pH9 사이의 영역에서는 대단히 낮은 부식속도를 가지고 있다. pH6.7의 환경에서는 Al-Mg합금재의 부동태산화피막이 존재하여 pH4와 pH2의 환경에 비해 적은 무게 감소량을 나타낸다. 반면 pH4와 pH2의 산성환경에서는 비슷한 무게 감소량을 보인다.

이는 Fig. 10에 나타난 알루미늄의 pH포베도표에서 음영이 있는 부분은 알루미늄의 부식영역이며 음영이 존재하는 않는 부분은 Al₂O₃인 부동태산화피막이 존재하는 부동태영역이다. pH4.5~pH7사이에서 부식속도가 가장 낮으며 4.5이하 또는 7이상의 pH값에서는 부식속도가 현저히 증가한다⁽²⁷⁾. pH4의 영역에서는 알루미늄은 부식영역이 되며, 산성용액의 영향과 캐비테이션에 의한 영향으로 부식이 가속화되어 pH2의 강 산성환경에 비해 무게감소량이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다. pH2는 강산성 영역으로 캐비테이션에 의한 침식과 산의 영향으로 알루미늄 표면의 산화피막이 제거되어 부식이 더욱 가속화됨을 알 수 있다.

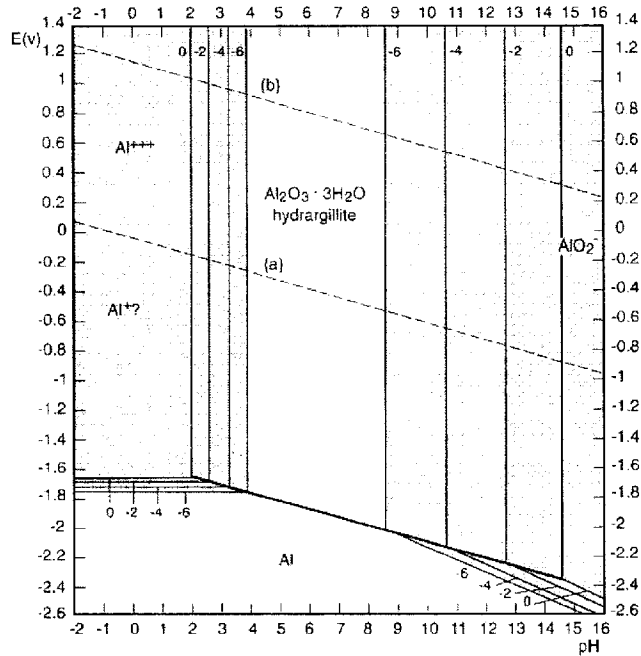


Fig. 10 Pourbaix diagrams for aluminum

산성환경으로 갈수록 Al-Mg 합금재의 무게 감소량이 증가하는 이유는 부동태산화피막을 가진 알루미늄 금속의 경우 Cl^- 이온이 존재하는 환경에서는 부식속도가 증가하며, pH가 산성화됨에 따라 Al-Mg 합금의 부동태산화피막(Al_2O_3)이 불안정해져서 수소발생형부식을 일으키기 때문인 것으로 사료된다⁽²⁸⁾.

Fig. 11은 해수환경의 pH 변화에 따른 Al-Mg합금재의 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 총 무게감소량(total weight loss)을 정리하여 나타낸 것이다.

산성영역인 pH2와 pH4의 환경에서는 앞 절에서 고찰한 바와 같이 중성인 pH6.7에 비해 총 무게감소량이 큰 차이를 보이고 있다. 중성인 pH6.7은 Al금속이 pH4~9 사이에서 부식속도가 가장 느리기 때문에 총 무게감소량이 다른 두 환경에 비해 적게 나타났으나, pH2와 pH4의 산성영역에서는 유사한 양상을 보이고 있다.

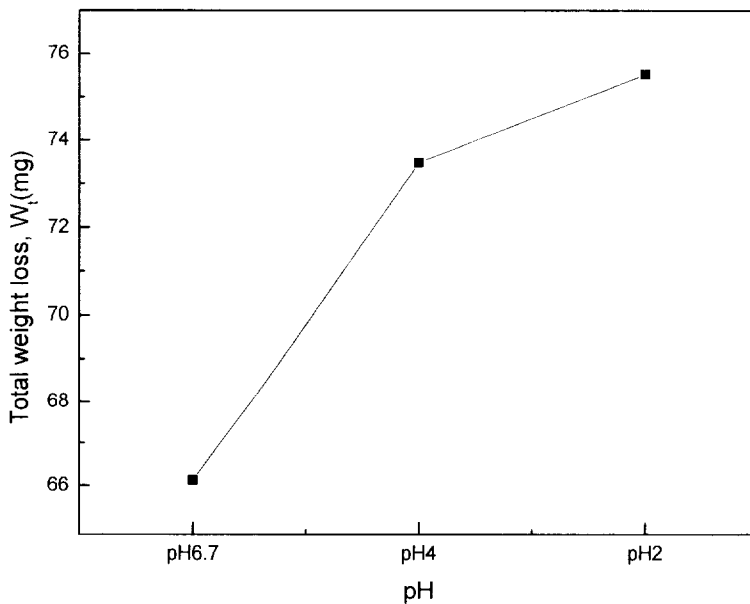


Fig. 11 Total weight loss of Al-Mg alloy by cavitation erosion-corrosion vs. pH of sea water

이와 같이 산성영역에서 총 무게감소량이 크게 나타나는 이유는 Al-Mg합금재의 재료표면에 형성된 부동태산화피막(passive oxide film)이 중성인 pH6.7의 환경에서는 부동태산화피막층(passive oxide film layer)이 유지되지만 산성영역인 pH2와 pH4의 환경에서는 부동태산화피막층이 캐비테이션이 발생하는 환경에서는 발생된 기포의 충격력에 의한 기계적 침식에 의해 부동태산화피막층이 파괴되기 때문인 것으로 사료된다⁽²⁹⁾.

4.2 진동 캐비테이션 침식-부식의 진행기구

유체중에서 캐비테이션의 발생에 의한 각종 재료의 침식-부식 속도의 진행기구로서 Thiruvengadam이 제시한 침식-부식 속도-시간곡선(R-t curve)을 Fig. 12에 나타내었다. 여기서, I:잠복기(incubation period or I.P), II:증가기(acceleration period or A.C.P), III:감쇠기(attenuation period or A.T.P), IV:안정기(steady state period of S.P)의 4단계로 구분되고, Plesset, Devine등도 같은 침식-부식 속도의 진행기구에 대한 의견을 제시하고 있다⁽³⁰⁾.

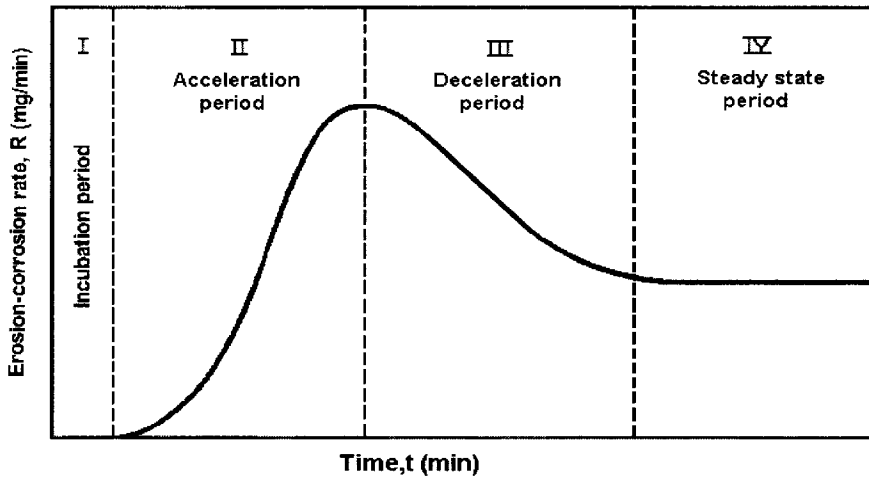


Fig. 12 Progress mechanism of erosion-corrosion rate by cavitation

캐비테이션 침식-부식의 영향을 받는 Al-Mg합금재의 캐비테이션 침식-부식의 진행기구를 고찰하고자 Fig. 13은 해수 환경(비저항 25 $\Omega \cdot \text{cm}$)중에서 Al-Mg합금재의 각 환경별 침식-부식 속도를 시간 경과에 따라 정리하여 나타낸 것이다.

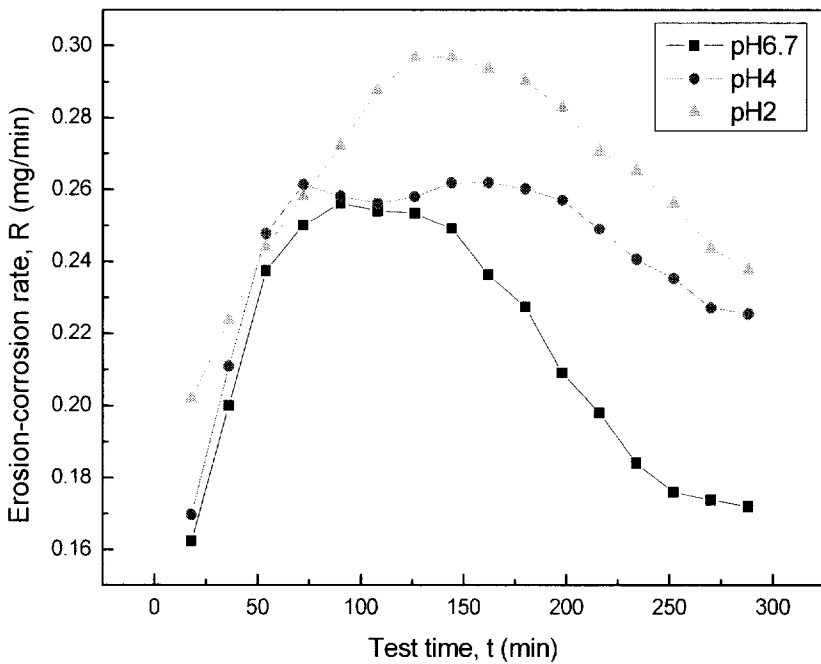


Fig. 13 Erosion-corrosion rate of Al-Mg alloy by cavitation vs. test time in various pH of sea water($\rho=25\Omega \cdot \text{cm}$)

해수 환경 중에서 진동 캐비테이션에 의한 침식-부식의 속도는 pH2 > pH4 > pH6.7의 순으로 큰 경향을 나타내고 있다.

pH6.7의 환경에서는 초기 실험시작부터 30여분까지 잠복기를 보이고 있으며 실험시작 후 30분이 경과되면서 증가기가 나타난다. 이러한 잠복기는 캐비테이션에 생성된 기포의 충격력에 의해 금속표면에 소성변형이 생기면서 산화피막이 파괴되기까지 소공이 형성되는 기간으로 보여진다. 50분이 경과되면서 침식율이 급격하게 증가하며, 80분경에서 최대침식율을 나타낸다. 120분이 경과되며 감쇠기 단계의 양상을 보여주고 있다. 250분이 경과되면서 증가기에 형성된 소공의 발달로 인해 캐비테이션에 의한 기계적 침식작용의 약화로 침식-부식속도가 느려지면서 안정기의 단계로 접어든 것으로 판단된다.

pH4는 pH6.7과 비슷한 양상의 잠복기 형성을 보이지만 최대 침식율이 pH6.7에 비해 먼저 발생되며 70분이 경과하면서 손실율이 급격히 증가한다. 다른 두 환경에 비해 증가기와 감쇠기의 진행단계가 길게 나타남을 보여주고 있다. pH2의 환경은 다른 두 환경과는 달리 20분 이전부터 잠복기를 거쳐 200분경까지 증가기를 보여주고 있다. 200분이 지나면서 감쇠기의 단계로 접어든 것으로 판단된다. 200분이 경과되면서 감쇠기의 단계를 나타내고 있다. 증가기에서 형성된 소공에 수소가스가 발생하여 캐비테이션 침식작용에 완충역할을 하여 캐비테이션에 의한 기계적 침식작용의 영향은 줄어들지만 약산성 환경의 영향으로 pH6.7보다는 빠른 부식속도를 나타낸 것으로 판단된다.

pH2는 다른 두 환경과는 달리 증가기가 길게 진행되고 최대침식율도 가장 크게 나타난다. 본 실험기간 동안 감쇠기 단계까지만 보여주고 있으며 300분이 경과된 후 안정기의 단계가 보일 것으로 판단된

다.

pH2와 pH4의 환경에서 증가기와 감소기 단계의 진행이 길게 나타나는 원인으로서는 Al-Mg합금재의 부동태산화피막(passive oxide film)이 산성의 환경에서 파괴되며, 캐비테이션에 의한 기계적 침식의 상승작용으로 Al-Mg합금재의 침식율이 크게 나타난 것으로 사료된다

(31)

Fig. 13에서는 캐비테이션에 의한 침식-부식 진행기구 중에서 잠복기 단계가 명확하게 나타나지 않으므로 이를 고찰하고자 잠복기에 대한 실험을 별도로 실행하였다. 환경은 위와 같이 해수(비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$)에 각 pH환경별로 3분 간격으로 18분까지의 캐비테이션 침식-부식에 대한 실험을 다시 실시하여 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

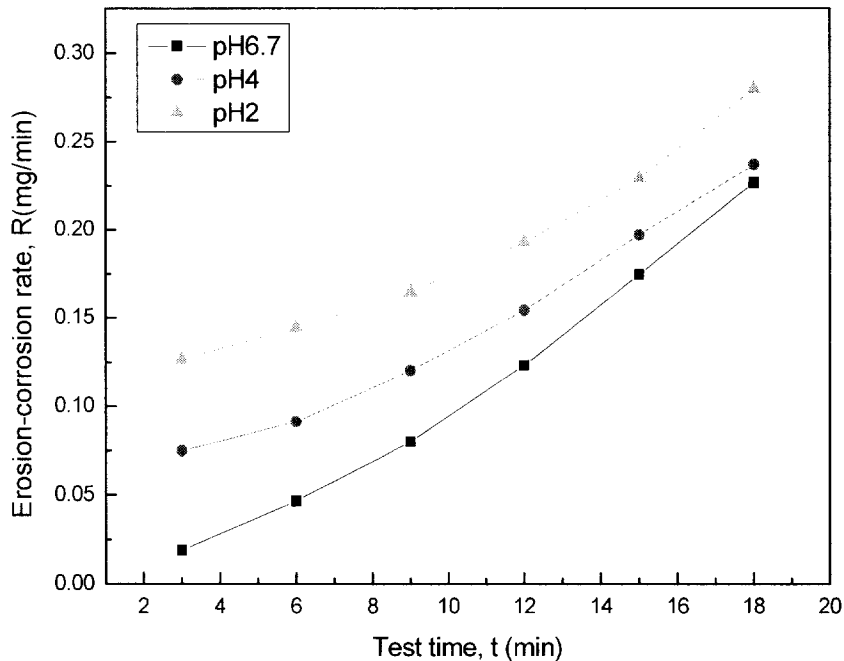


Fig. 14 Incubation period of Erosion-corrosion rate by cavitation of Al-Mg alloy

해수 환경중에서의 캐비테이션 침식-부식율은 $\text{pH}6.7 > \text{pH}4 > \text{pH}2$ 의 순으로 잠복기가 길게 나타남을 보여주고 있다. Fig. 14에서는 $\text{pH}6.7$ 을 제외한 나머지 환경에서는 잠복기의 구별이 명확하지 못하였으나 Fig. 14에서는 $\text{pH}2$ 를 제외한 $\text{pH}4$ 와 $\text{pH}6.7$ 에서는 9분까지 잠복기가 존재함을 보여주고 있다. 이 두 환경에서의 잠복기는 캐비테이션에 생성된 기포의 충격력에 의해 금속표면에 소성변형이 생기면서 산화피막이 파괴되기까지 소공이 형성되는 기간으로 보여진다. 반면에 $\text{pH}2$ 의 환경에서는 기계적 침식에 의한 영향보다 산으로 인한 Al-Mg합금재의 표면에 수소발생형 부식의 발생으로 잠복기의 단계가 없는 것으로 사료된다⁽³²⁾.

4.3 캐비테이션 침식-부식 손상양상

앞의 4.2절에서 살펴본 캐비테이션 침식-부식 거동에서 Fig. 13에서 실험한 시험편을 가시적으로 비교·관찰하기 위하여 Fig. 15와 Fig. 16을 4.2절에서 고찰된 캐비테이션 침식-부식의 진행기구에 맞춰 각 단계의 사진을 각 pH환경별로 나타내었다.

잠복기(incubation period)가 끝나는 지점인 18분이 경과된 사진에서는 아직 캐비테이션 침식에 의한 소공의 형상이 명확히 드러나지는 않으나, 증가기를 거치는 72분의 사진에서는 진동캐비테이션 혼의 테두리부분에서부터 소공이 형성되어 중앙부로 진전됨을 보여주고 있다. pH6.7 > pH4 > pH2의 순으로 pit의 수와 깊이 방향으로 캐비테이션 침식-부식을 일으킴을 알 수 있다. 감쇠기와 안정기가 진행된 후의 시험편에서는 중앙부위에 많은 소공들이 형성되었으며, 테두리 부분은 중앙부위에 비해 소공은 적으나 평탄하게 면적이 침식되었다.

180분이 경과된 사진에서는 pH2가 pH6.7과 pH4에 비해 소공이 적게 생성된 것을 볼 수 있는데 이것은 초기에 생성된 소공 내부에 수소가스가 발생하여 캐비테이션에 의해 발생된 기포붕괴의 입자에 따른 충격작용이 완화됨으로써 다른 두 환경에 비해 소공이 적게 생성된 것으로 사료된다⁽³³⁾.

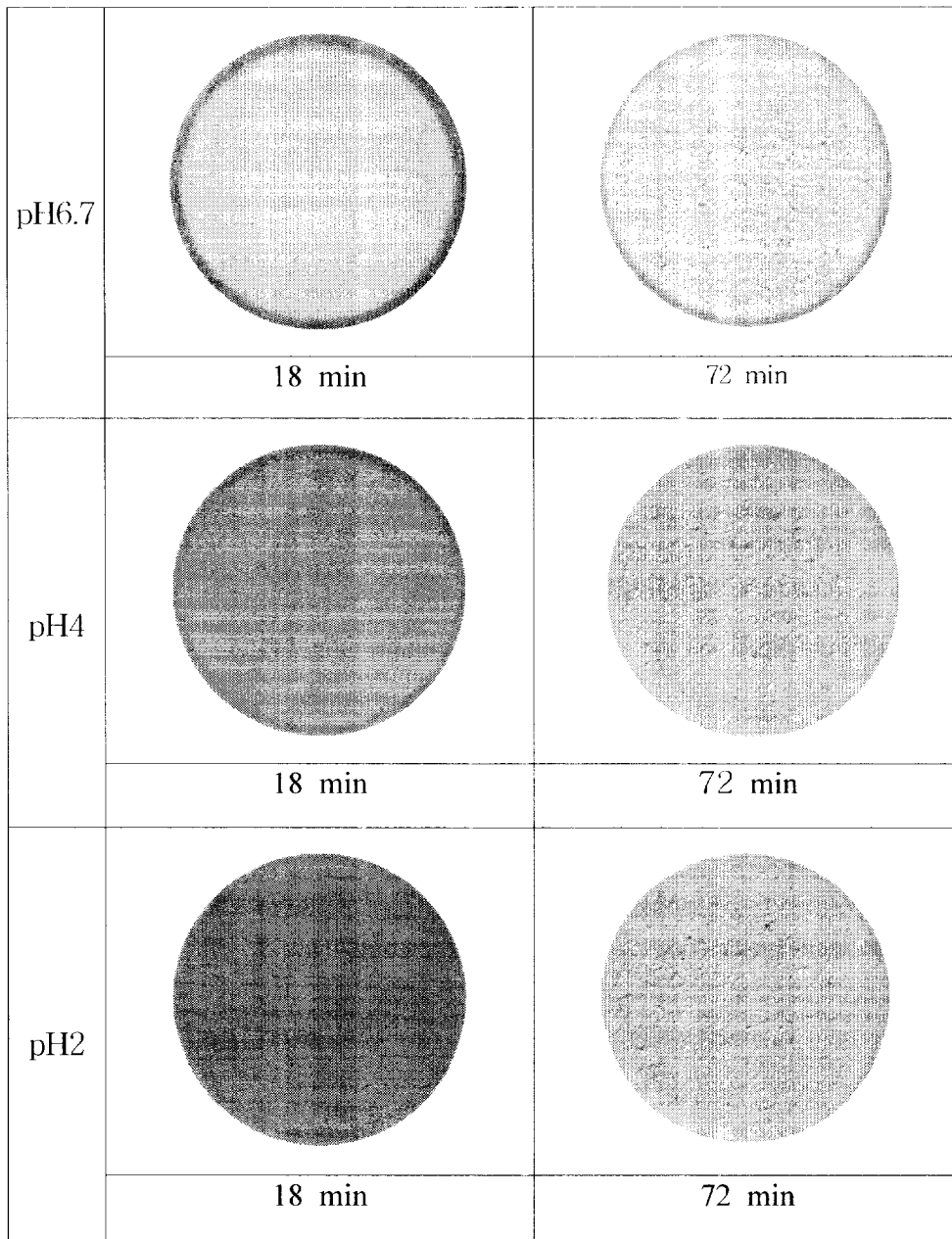


Fig. 15 Appearance of damaged surface by cavitation erosion-corrosion in sea water in various pH until 72min

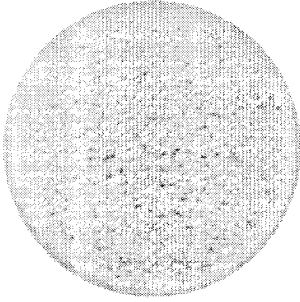
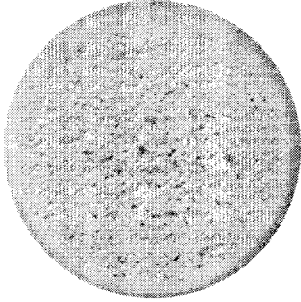
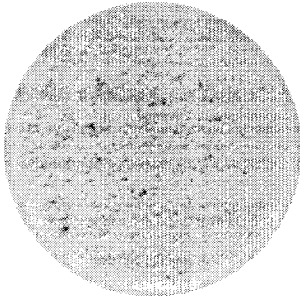
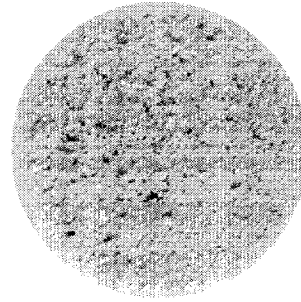
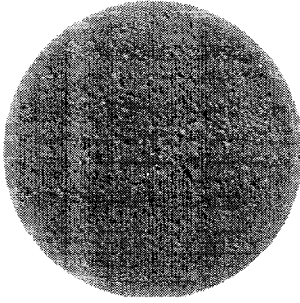
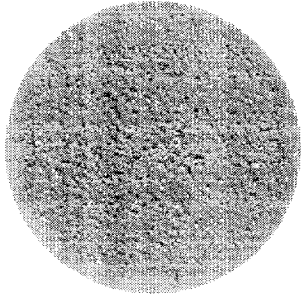
pH6.7		
	126 min	180 min
pH4		
	126 min	180 min
pH2		
	126 min	180 min

Fig. 16 Appearance of damaged surface by cavitation erosion-corrosion in sea water in various pH until 180min

이와 같이 평탄화된 침식양상이 발생하는 원인이 되는 캐비테이션 손상의 부식 가속화 기구를 Fig. 17에 나타내었다.

캐비테이션 침식-부식이 초기에 테두리부분에 발생된 pit가 갈바닉 전지(galvanic cell)를 형성하면서 울트라 젯(ultra jet)에 의해 마이크로 피트(micropit)를 형성시킨다. 캐비테이션 침식-부식이 진행되면서 초기에 발생된 pit는 마이크로 피트 손상(micropit damage)에 의해 결과적으로 평탄화(smoothing down)가 되기 때문에 감쇠기에 도달하면 결국 pit의 수는 줄어들고 전체면적의 침식현상이 나타난 것으로 사료된다⁽³⁴⁾.

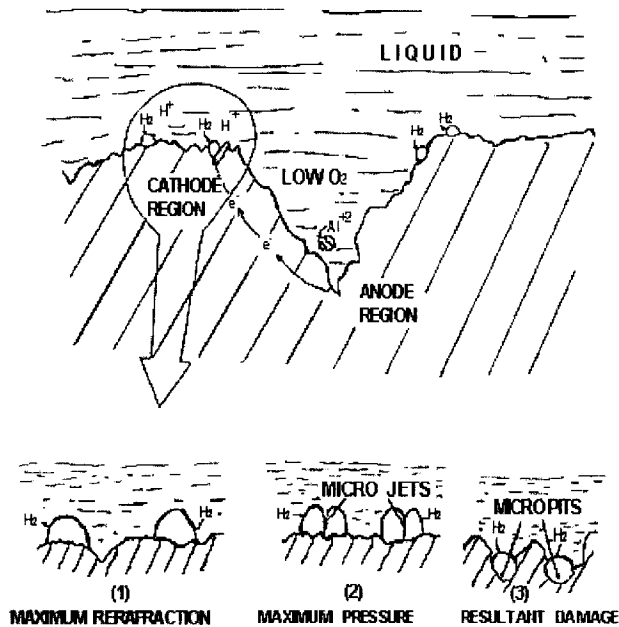


Fig. 17 Mechanism of corrosion-accelerated cavitation damage

캐비테이션 침식-부식의 영향을 좀 더 미시적으로 고찰하고자 SEM(Scanning Electro Microscope)을 이용하여 혼의 테두리부분을 각 환경별로 찍어보았다.

Photo. 2에서는 pH6.7의 환경에서 캐비테이션 침식-부식 실험 후 테두리부분의 표면양상이다. 중앙부위를 중심으로 명확한 테두리 경계선이 나타난다. 테두리 경계선을 중심으로 좌측은 캐비테이션 침식-부식의 영향을 받지 않은 모재부분이며 우측이 캐비테이션 침식-부식에 의해 영향을 받은 부분이다. Fig. 16에서 본 소공이 크게 형성되어 있음을 보여주고 있다. 반면에 모재부분에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

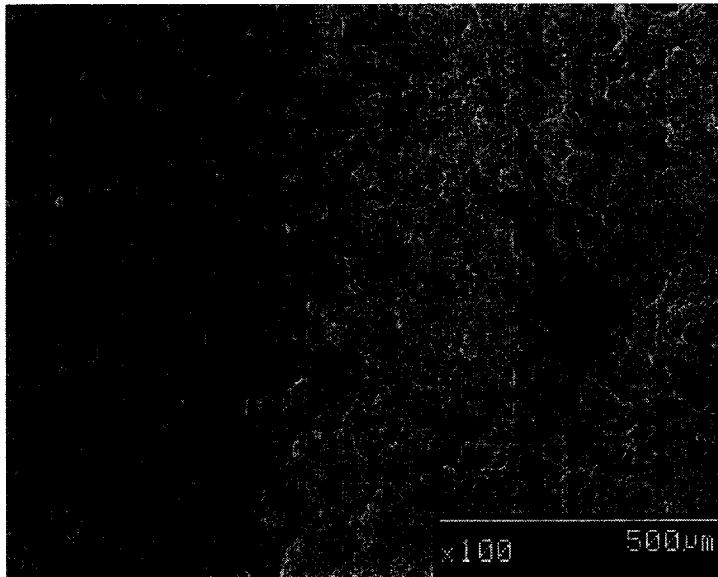


Photo. 2 SEM of cavitation corrosion-erosion surface of Al-Mg alloy in sea water of pH6.7

Photo. 3은 pH4의 환경에서의 표면양상이다. Photo. 2와는 달리 중앙 부근의 테두리 경계선이 pH6.7에 비해 명확하게 드러나지 않는다. 좌측의 모재는 산성용액의 의해 상당히 부식이 진행되었으며, 우측 캐비테이션 침식-부식의 영향을 받은 부분은 pH6.7에 비해 소공은 적으나 상당히 많은 부분의 면적이 부식되어 있음을 알 수 있다.

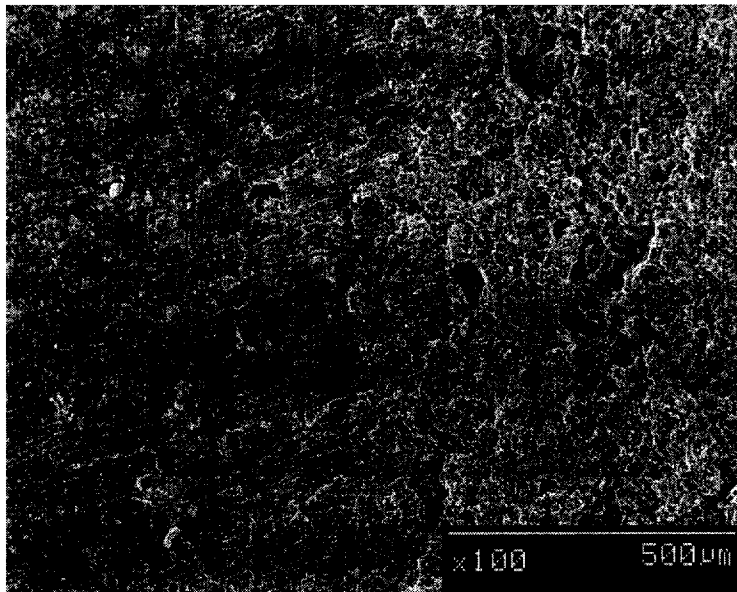


Photo. 3 SEM of cavitation corrosion-erosion surface of Al-Mg alloy in sea water of pH4

Photo. 4는 pH2의 환경에서의 표면양상이다. Photo. 3에 비해 더욱 심한 부식손상양상을 보여주고 있다. 특히, 좌측의 모재부분에서는 캐비테이션에 의한 영향은 없었으나 강산성환경에 의한 영향으로 부동태산화피막이 파괴되어 테두리경계부분의 구분이 어려울 정도로 심한 부식양상을 보여주고 있다. 우측의 캐비테이션 침식-부식은 깊이 방향으로 많이 진전되었음을 알 수 있다.

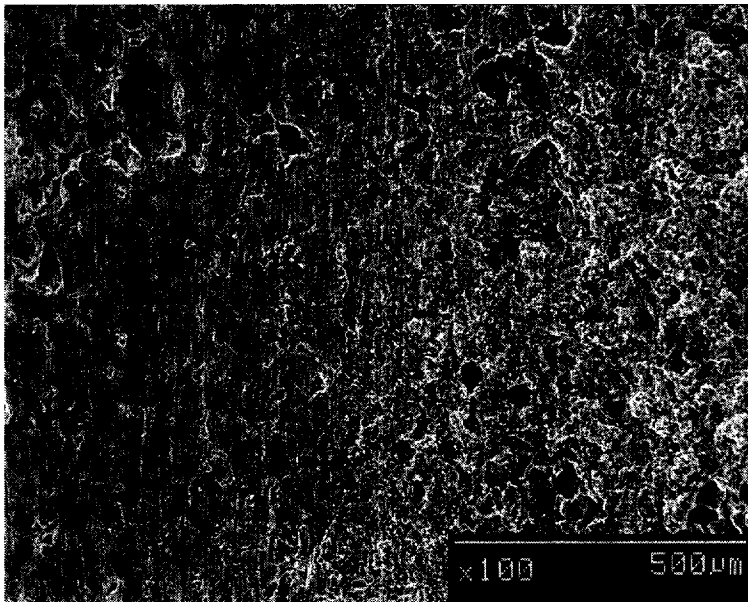


Photo. 4 SEM of cavitation corrosion-erosion surface of Al-Mg alloy in sea water of pH2

4.4 오염된 해수 중에서 Tafel 분극 및 분극저항 거동

Fig. 18은 오염된 해수($\rho=25\Omega \cdot \text{cm}$)가 중성에서 산성으로 변화함(H_2SO_4 의 첨가로 인한 pH변화)에 따른 Al-Mg합금재의 Tafel 분극곡선을 정리하여 나타낸 것이다.

해수가 중성인 pH6.7에서 pH2로 산성화됨으로써 개로전위(open circuit potential)는 귀전위화되는 경향을 나타내고, 분극거동은 산성화될수록 전류밀도가 큰 방향인 우측으로 이동함을 알 수 있다.

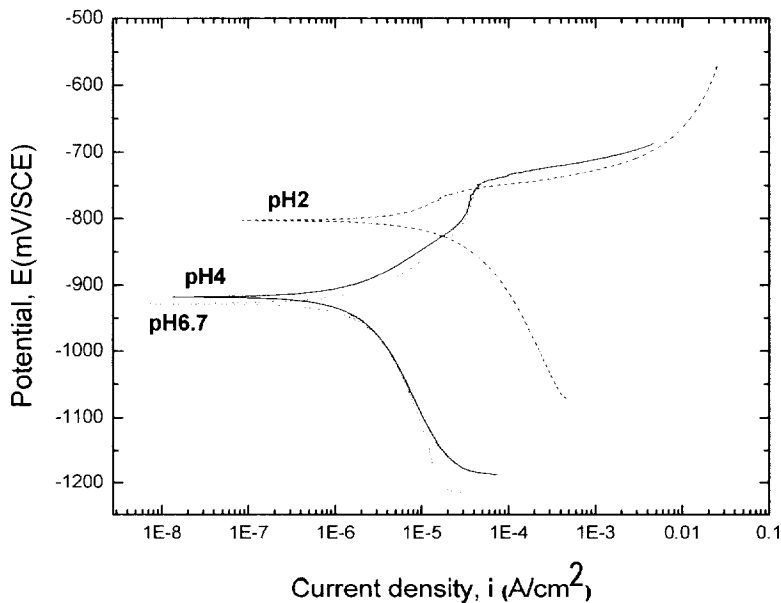


Fig. 18 Tafel polarization curves of Al-Mg alloy in various pH of $25\Omega \cdot \text{cm}$ solution at 25°C

Fig. 19는 오염된 비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 인 해수환경이 중성으로부터 산성으로 변화함에 따른 Al-Mg합금재의 분극저항 거동을 비교하여 나타내고 있다.

오염된 해수에서의 분극저항은 $\text{pH}4 < \text{pH}6.7 < \text{pH}2$ 의 순으로 분극저항을 보여주고 있다. 중성인 $\text{pH}6.7$ 의 해수에서 보다 약산성인 $\text{pH}4$ 의 분극저항이 높게 나타난 것을 보아 부식전류밀도는 $\text{pH}4$ 의 환경에서 $\text{pH}6.7$ 보다 적게 배류될 것으로 추정된다.

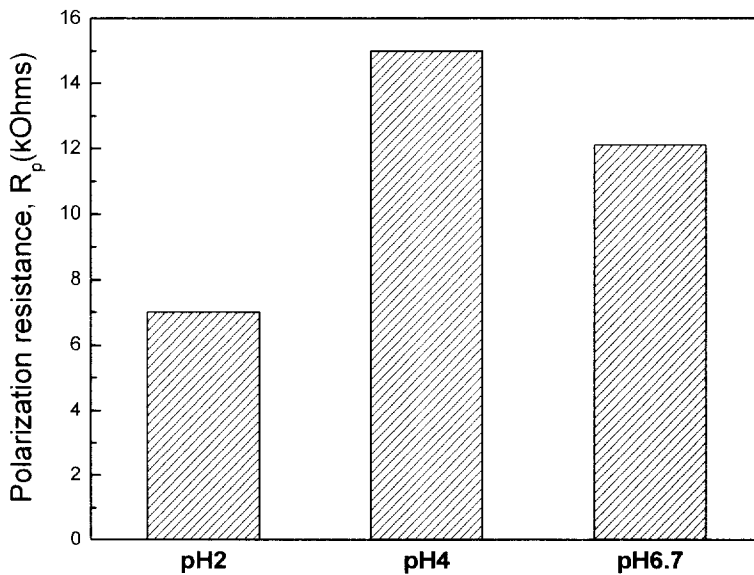


Fig. 19 Polarization resistance of Al-Mg alloy vs. various pH of $25\Omega \cdot \text{cm}$ solution at 25°C

Fig. 20은 오염된 비저항($\rho=25\Omega \cdot \text{cm}$)인 해수에서 중성으로부터 산성으로 변화함(H_2SO_4 의 첨가로 인한 pH변화)에 따른 Al-Mg합금재의 부식전류밀도 거동을 정리하여 나타낸 것이다.

부식전류밀도는 분극저항 거동에서 살펴본 것과 반대로 $\text{pH}2 > \text{pH}6.7 > \text{pH}4$ 의 순으로 크게 배류됨을 알 수 있다. 이와같이 pH4의 환경에서 pH6.7보다 부식전류밀도가 낮게 배류되는 이유는 pH4인 약산성인 해수환경에서 부동태산화피막(passive oxide film)이 형성되기 때문인 것으로 판단된다⁽³⁵⁾. pH2의 강산성의 환경에서는 다른 두 환경보다 낮은 분극저항을 보임으로써 부식전류밀도가 가장 높게 배류됨을 알 수 있다.

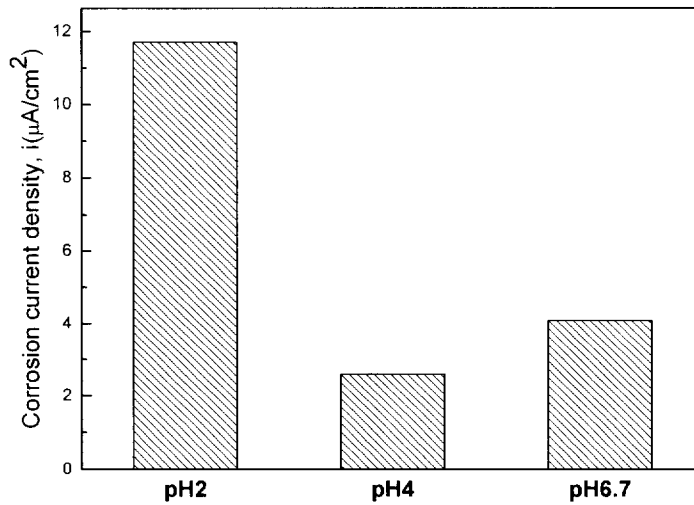


Fig. 20 Corrosion current density of Al-Mg alloy vs. various pH of $25\Omega \cdot \text{cm}$ solution at 25°C

4.5 연간부식율 평가

부식환경 중에서 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 걸친 부식 실험으로 부식속도를 결정할 수 있고 비파괴시험이므로 동일한 시험편으로 부식속도를 연속적으로 측정할 수 있기 때문에 최근 부식공학에 관한 연구 및 현장에서의 부식거동 관찰 등에 유용하게 이용된다⁽³⁶⁾.

이와같이 유용한 전기화학적 분극에 의한 부식속도 측정법은 타펠 외삽법(Tafel extrapolation method)과 분극저항법(polarization resistance method)이 있다⁽³⁷⁾.

본 연구에서는 전기화학적인 Tafel 분극실험을 실시하여, M352/252 corrosion software로부터 분석하여 구해진 부식전류밀도($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) 값으로부터 Al-Mg합금재의 연간부식율(corrosion rate, CR)을 다음 식(4-1)에 따라 계산할 수 있다⁽³⁸⁾.

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

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

EW = Equivalent of material (g)

d = Density of material (g/cm^3)이다.

Fig. 21은 오염된 비저항($\rho=25 \Omega \cdot \text{cm}$)인 해수에서 중성으로부터 산성으로 변화함(H_2SO_4 의 첨가로 인한 pH변화)에 따른 Al-Mg합금재의 연간부식율을 평가하기 위하여, Fig. 20의 부식전류밀도값($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)을 식 (4-1)에 대입하여 계산한 Al-Mg합금재의 연간부식율을 나타내고 있다.

앞 절에서 고찰된 바와 같이 Fig. 20에서 고찰된 바와 같이 부식전류밀도가 낮게 배류된 $\text{pH}4 < \text{pH}6.7 < \text{pH}2$ 의 순으로 연간부식율이 높게 나타나고 있다. 약산성인 $\text{pH}4$ 의 환경에서 연간부식율이 가장 낮게 나타나고 있으며 $\text{pH}2$ 로 산성화가 진행되면서 연간부식율은 증가하는 경향을 보이고 있다.

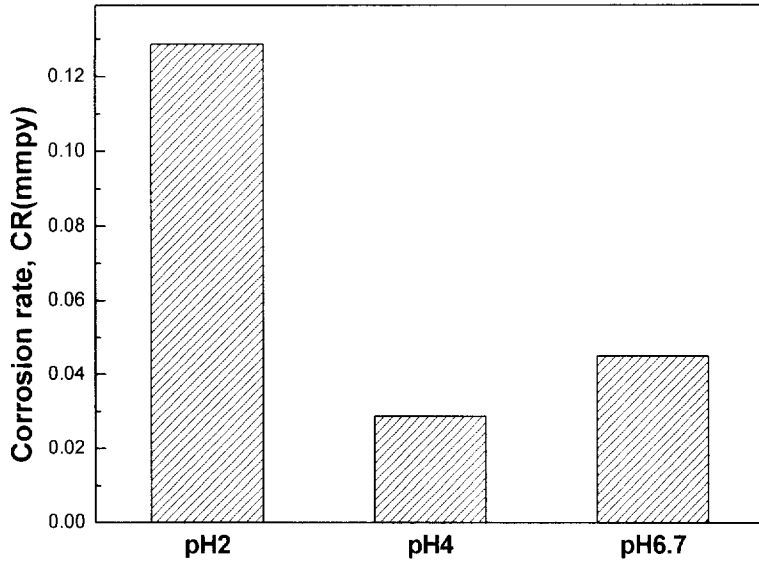


Fig. 21 Corrosion rate of Al-Mg alloy vs. various pH of $25\Omega \cdot \text{cm}$ solution at 25°C

5. 결 론

연안 오염해수 중에서 Al-Mg합금재의 분극거동, 분극저항, 부식전류밀도 및 캐비테이션 침식-부식 손상 특성에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 해수의 pH 변화에 따른 캐비테이션 침식-부식의 의한 무게감소량은 $\text{pH}6.7 < \text{pH}4 \leq \text{pH}2$ 순으로 높게 나타나고 있다.

2) 캐비테이션 침식-부식 손상에 의한 소공의 형성은 테두리 부위로부터 형성되어 중앙부위로 진전된다.

3) 캐비테이션 침식-부식에 의한 Al-Mg합금재의 소공의 성장은 기계적인 침식과 전기화학적인 부식의 상승작용이 부동태산화피막의 파괴를 가져온다.

4) 해수 중에서 캐비테이션 침식-부식 속도의 진행기구는 pH6.7의 환경에서는 잠복기, 증가기, 감쇠기 및 안정기의 4단계가 나타나지만, pH4의 환경에서는 잠복기를 보이며 증가기와 감쇠기의 단계가 길게 나타나며, pH2는 잠복기의 단계가 없이 증가기와 감쇠기만 나타난다.

5) 해수가 중성인 pH6.7에서 pH2로 산성화됨으로써 개로전위는 귀전위화되는 경향을 나타내고, 분극거동은 pH4 < pH6.7 < pH2의 순으로 부식전류밀도가 크게 나타났다.

6) Al-Mg합금재의 연간부식율은 pH4 < pH6.7 < pH2의 순으로 높게 나타나고 있으며, pH4에서 pH2로 산성화가 진행되면서 연간부식율은 증가하는 경향을 보이고 있다.

참고문헌

- 1) 이학열(1997) : 金屬腐蝕工學, 淵鏡文化社, pp. 262~263
- 2) 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
- 3) 전대회, “실용방식공학”, 태화출판사, pp. 150~154, 1989
- 4) J. R. Davis, "Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys", ASM International, pp. 1~10, 1999
- 5) 미국조선학회, “기본조선학”, p. 630, 1982
- 6) 임우조, 양학회, 인현만, 이진열(1994) : 부식과 방식, 원창출판사, pp. 301~303
- 7) American Society for Metals(1985) : Failure Analysis and Prevention, Metal Handbook, Vol. 10, pp. 445~456
- 8) J. F. Janowak and P. A. Morton(1984) : A Guide to Mechanical Properties Possible by Austempering 1.5% Ni-0.3% Mo Ductile Cast Iron, AFS Trans., 92, pp. 489~498
- 9) 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
- 10) Denny A. Jones(1991) : Principles and prevention of corrosion, Macmillan publishing company, pp. 398~401
- 11) 임우조, 정기철(2002) “공조설비의 부식과 방식”, 태훈출판사, pp. 1~5

- 12) 吉澤四郎, 山川宏二, 片棟 晃(1990) : 金屬の腐食防食序論, 日本化學同人, pp. 115~118
- 13) Francis L. Laque(1991) : Marine corrosion causes and prevention, John Wiley & Sons, pp. 95~99
- 14) 임우조, 신종대 (1998) : 가스저장탱크의 부식피로균열특성에 관한 연구, 한국어업기술학회지, Vol. 34, No. 1, pp. 30~36
- 15) 横井 聰之(1989), 港灣構造物腐食の防蝕對策, 日本防食技術, Vol. 38, No. 7, pp. 390~395
- 16) Kenneth R. Tretheway and John Chamberlain(1995) : Corrosion for science and engineering, Longman Scientific & Technical 2nd edition, pp. 165~168
- 17) 前掲書(5) : p. 630
- 18) Terence McGuinness and A. Thiruvendgadam(1982) : Erosion, Wear, and Interfaces with corrosion, ASTM, p. 30
- 19) F. Ronald Young(1999) : Cavitation, McGraw-Hill, p. 5
- 20) 前掲書(10) : pp. 346~347
- 21) 前掲書(1) : pp. 131~132
- 22) Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie(1985) : Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, pp. 341~354
- 23) 前掲書(6), pp. 25~43
- 24) H. Miyakura, R. Oba, R. Ikeda and S. Igarashi(1987) : On the Mechanism of Dissolved Gas-Content Effects upon Cavitation, JSME(B), 54(504), pp. 1879~1883

- 25) Kornfeld, M. and Suvorov, L.(1944) : On the Destructive Action of Cavitation, J. Applied Physics, Vol. 15, pp. 495~506
- 26) H. Kimoto, A. Kamoto, T. Hirose, H. Yoshinobu and H. Ueki(1989) : A Study on the Impulsive Pressure of a Collapsing Cavitation Bubbles, JSME(B) 53(485), pp. 122~126
- 27) 前掲書(1) : pp.270~272
- 28) 前掲書(6) : pp. 182~184
- 29) 前掲書(1) : pp. 268
- 30) 前掲書(18) : pp. 32~33
- 31) 前掲書(1) : p. 268
- 32) 前掲書(6) : pp. 182~184
- 33) 前掲書(18) : pp. 47~48
- 34) V. Ashworth 1988 : corrosion, Pergamon Press., pp. 412 ~ 422
- 35) 前掲書(1), pp. 263~264
- 36) Masato Murata, Jin-bo Wang and Yoshiniko Mukai (1991) : "Evaluation of Hydrogen Embrittlement Type SCC in Duplex Stainless Steel Welded and It's Mecanism", Zairo-to-Kankyo, Vol. 40, No. 7 , pp. 461~469
- 37) Deny A Jones, pp. 74~77
- 38) 문경만(1990) : 실용전기화학, 효성출판사, pp. 183~184

감사의 글

본 논문을 완성하기까지 끊임없는 지도와 조언을 해주시고, 격려를 해주신 공학박사 임우조 지도교수님께 감사드리며, 바쁜 와중에도 지도와 심사를 해주신 이도형, 이연원 교수님께 감사드립니다.

학부와 대학원 과정을 거치면서 폭넓은 지식을 가르쳐주셨던 기계공학부 교수님들께 감사드립니다.

학부과정부터 대학원과정까지 많은 도움을 주셨던 방식연구회 회원님들과 실험과정에서 많은 도움을 주셨던 박희옥 교수님, 박동기 교수님, 정해규 선배님, 강성수, 김진배 선배님께도 감사드리며, 4년여 넘게 생활하면서 가장 가까운 곳에서 많은 도움을 주셨던 윤병두 선배님과 윤대영 선배님, 이은정님, 이상진님, 주형, 후배 정재학님에게도 감사드립니다.

학부생활과 학위과정 중 많은 도움을 준 기계공학과96학번 동기들과 소중한 친구들 재성, 진희, 규만, 규철, 민경이에게도 고마움을 전합니다.

지금까지 학위과정을 마칠 수 있도록 물심양면으로 지원해주시며 격려해주신 부모님과 옆에서 친구같던 동생 수진이와 이 작은 결실을 함께 하고자 합니다.

2004년 12월

심경태 拜上