

## 해수중 유속과 pH 변화가 알루미늄 희생양극의 소모율과 성능에 미치는 영향

김도형·김성종·문경만\*·이명훈\*\*·김기준\*\*

한국해양대학교대학원 · \*한국해양대학교 기계소재공학부 · \*\*한국해양대학교 기관시스템공학부

### Influence on Consumption Rate and Performance of Aluminum Sacrificial Anode due to Seawater Velocity and pH Variations

Do-Hyeong Kim, Seong-Jong Kim, Kyung-Man Moon\*, Myung-Hoon Lee\*\*, Ki-Joon Kim\*\*

Graduate School of Korea Maritime University

\*Dept. of Engineering and Material Science of Korea Maritime University

\*\*Dept. of Marine System Engineering of Korea Maritime University

One of the most useful and effective protection methods for steels is the cathodic protection(CP) which is widely adopted in marine and soil. Especially, sacrificial anode for the cathodic protection is popularly applied to protect the steel piles of marine piers, various industrial structures and other hostile offshore structures against corrosion.

Recently, it was reported that the life of Al sacrificial anode used in port piers has been significantly shortened, compared to the original design life (e.g. average life shortened from 20 years to 13~15 years). The relevant factors in this problem seem to be a quality of anode material and/or various environmental factors, such as flow rates, temperature and sea water contaminations(pH, dissolved oxygen and bacteria).

In this study, the electrochemical characteristics of Al sacrificial anode have been investigated in terms of seawater velocity and pH variations. The corrosion rate of Al sacrificial anode with sea water velocity was effected by mechanical erosion at 0~0.5 mA/cm<sup>2</sup> of current density. However, it was influenced by an electrochemical interaction at above 1 mA/cm<sup>2</sup>. Current efficiency at pH 2 was the lowest among five pH conditions in the galvanostatic test at 0.5 mA/cm<sup>2</sup>, and it became nearly constant at higher than pH 4. However, in the galvanostatic test at pH 6, the current efficiency was the highest at 1.0 and 2.0 mA/cm<sup>2</sup>.

*Keywords : Cathodic Protection, Al Sacrificial Anode, Seawater Velocity, Current Efficiency, Current Density*

#### 1. 서 론

선박, 항만 및 해양구조물, 지하매설물 및 각종

기계류 등 금속을 사용하는 대부분의 분야에서 부식의 영향은 상당히 크며, 그 밖의 분야에도 정도의 차는 있지만 부식으로 인한 직·간접 영향을 받지

않는 경우가 거의 없다.<sup>1)~3)</sup> 해수중 철강의 방식에는 피복과 함께 전기화학적 방식법으로 잘 알려진 음극방식법<sup>4)</sup>이 널리 사용되고 있다. 이 중에서도 상대적으로 부식성이 더 큰 아연과 알루미늄 합금<sup>5)~7)</sup> 등을 연결하여 철강대신 희생양극으로써 방식하는 희생양극법은 방식시설이 간단하고 운용상 위험이 적기 때문에 전원을 얻기 어려운 장소나 소형시설 등에 유리하여 지금까지 선박이나 해양 및 연안구조물 등에 많이 이용되어 왔다.

그런데 최근에 실시된 국내 항만의 방식실태 조사<sup>8)</sup>에서 희생양극으로 사용된 알루미늄합금 양극이 설계시 예상수명(10년 또는 20년형)보다 현저히 단축되는 이상소모현상이 보고되었으며, 다각도로 원인 규명을 시도하고 있지만 아직도 이에 대해 상세한 원인은 밝히지 못한 상태이다.<sup>9)</sup>

본 연구에서는 희생양극재료로 사용되는 알루미늄합금 양극의 이상 소모 현상에 대해서 해양의 여러가지 환경인자 중 해수 간만의 차 또는 항만의 지리적 형상으로 발생할 수 있는 유속의 영향과 해양오염으로부터 유발될 수 있는 pH에 대한 알루미늄양극의 부식속도와 발생전류의 관계를 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편

실험에 사용된 재료는 현재 우리나라에서 항만구조물 방식으로 가장 널리 사용되고 있는 Al-Zn-In계 합금양극으로, 알루미늄의 표면에 발생하는 부동태화를 억제하고 양극용해를 활성화하기 위해 Zn과 In이 첨가된 것이며, 그 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of Al alloy material (wt%)

Fe	Si	Cu	Zn	In	Al
0.0684	0.0402	0.0082	4.294	0.0196	Bal.

### 2.2 유속 및 전류밀도 변화에 따른

#### 알루미늄합금 침식량 시험

유속 및 양극전류밀도(희생양극의 전류밀도) 변화에 따른 알루미늄합금 양극의 전기화학적 특성

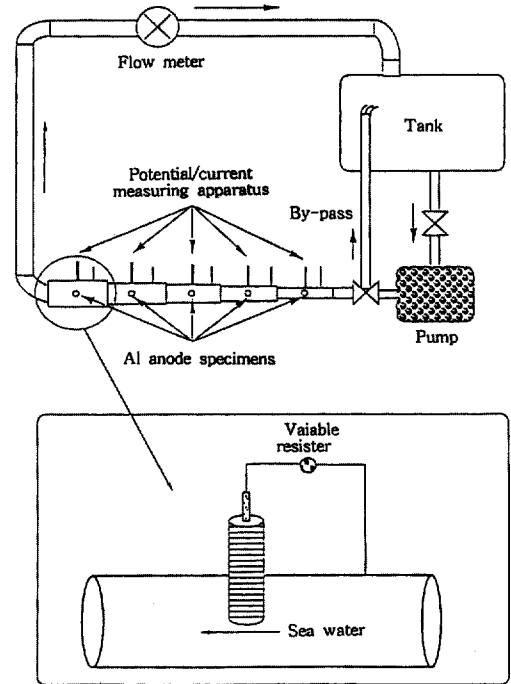


Fig. 1. Seawater circulating system for flow test

및 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 본 실험에서는 Fig. 1과 같은 해수순환장치를 제작하였다.

그림에서 보는 바와 같이 유속은 5단계(0.7, 1.6, 2.5, 3.4 및 5.9 m/s)로 조절하였으며 양극전류밀도도 6개 레벨(0, 0.01, 0.5, 1, 2 및 3 mA/cm<sup>2</sup>)에서 240시간 실험하였다. 그리고, 시험전후의 양극시편 무게를 측정하여 유속 및 시간에 따른 양극부식속도를 산출하였다. 본 양극성능시험<sup>10-11)</sup>은 일본학술진흥회(JSCE) 및 NACE<sup>12)</sup>의 유전양극시험법에 준하여 실시하였으며, 양극(알루미늄합금 양극)과 음극(강파이프) 사이에 가변저항(1 M $\Omega$ )을 설치하여 상기의 일정 공급전류밀도를 유지하도록 조정하였고, 시험기간 동안 일정시간(1일2회) 간격으로 전위차계(Fluke 87)를 이용하여 전위변화를 측정하였으며, 최종적으로 표면 용해상태를 관찰하였다.

### 2.3 양극발생전류 시험

알루미늄합금 양극의 수명을 결정하는 중요 요소 중 하나인 양극발생전류(I)를 측정하기 위해 알루미늄합금 양극을 철판(음극)과 연결하여 시험회로를

설치하였으며, 시간에 따라 양극과 음극 사이에 흐르는 발생전류를 측정하였다. 이때의 알루미늄합금 양극과 철판의 노출면적은 실험의 편의성을 고려하여 각각 1.767cm<sup>2</sup>와 32cm<sup>2</sup>으로 하였다. 시험용액으로는 실험실 시험에 자연해수의 pH를 황산과 가성 소오다로 조절하여 만든 pH2~10까지의 용액을 사용하였으며, 현장 시뮬레이션 실험을 위해 대표적으로 선정된 4개 항구의 항만해수를 운반하여 사용하였으며, 시간에 따른 양극과 음극사이의 발생전류 조사후 대응전극과 전위차계를 이용하여 음분극시험을 실시하였다.

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 전류밀도 변화에 의한 부식시험 결과

Fig. 2는 전류밀도 0, 0.01 및 0.5 mA/cm<sup>2</sup>에서 240시간동안 유속별 증량감소에 의해 산출된 부식속도(mm/yr)를 비교한 그래프이다.

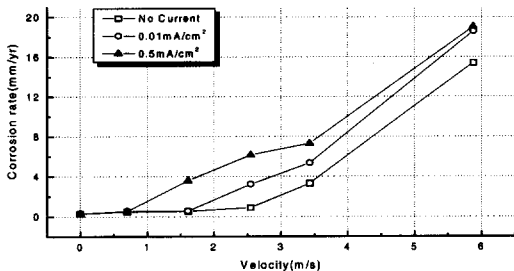


Fig. 2. Corrosion rates determined by weight loss as a function of velocity at relatively low current density(0, 0.01 and 0.5 mA/cm<sup>2</sup>)

상대적으로 낮은 유속(0~2.5 m/s) 부근에서는 부식속도가 완만하게 증가하였으며, 유속이 약 2.5 m/s 이상에서부터 부식속도가 다소 증가되었고, 최고 유속인 약 6 m/s에서는 18 mm/yr의 높은 부식속도를 나타내었다. 이상의 결과로 알루미늄양극의 부식속도에 미치는 유속의 경우 낮은 유속에서는 상대적으로 부식속도가 적으나, 고유속이 되면서 자기부식량의 증가 및 물리적 침식의 증가가 가세되어 부식속도는 증가하게 되는 것으로 사료된다.

Fig. 3은 전류밀도가 비교적 큰 1, 2 및 3 mA/

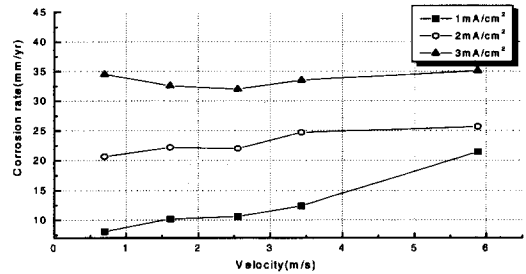


Fig. 3. Corrosion rates determined by weight loss as a function of velocity at relatively high current density(1, 2 and 3 mA/cm<sup>2</sup>)

cm<sup>2</sup>에서 유속의 영향을 나타낸 그래프이다.

전류밀도 1~3 mA/cm<sup>2</sup>에서 전류밀도 증가에 따라 부식속도는 증가하였으나 유속의 상승에 따른 부식속도의 증가는 전류밀도가 높아질수록 둔화되는 경향을 보였으며, 전류밀도 3 mA/cm<sup>2</sup>에서는 부식속도는 유속의 증가에 거의 영향을 받지 않는 경향을 알 수 있었다. 저전류밀도에서는 알루미늄양극의 부식속도에 미치는 유속의 영향이 상대적으로 큰데 비해 전류밀도가 증가할수록 절대적인 부식속도는 현저히 증가하는 반면 유속에 의한 영향은 상대적으로 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 전류밀도가 적은 경우에는 유속의 증가와 함께 공급된 양극전류에 의한 양극의 부식속도와 유속이 증가함에 따라 양극의 자기소모량의 증대(양극의 자기소모량은 표면에 수소발생과 함께 발생하는 경우가 많으며, 유속이 증가되면 수소발생 과전압이 감소되어 양극의 자기부식이 증가하게 된다)에 따라 부식속도는 증가하게 된다. 그리고 양극전류밀도가 증가되면 양분극의 증가에 의해서 수소발생의 억제와 함께 양극의 자기부식이 감소되어 유속의 영향을 거의 받지 않는 것으로 사료된다. 그리고 공급전류밀도의 증가에 따른 양분극의 증가에 의한 전위변화와 수소발생전류의 관계에 대한 분석도를 Fig. 4에 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 외부로부터 양극공급전류밀도를 ip<sub>1</sub>(1mA/cm<sup>2</sup>)에서 ip<sub>3</sub>(3mA/cm<sup>2</sup>)로 점진적으로 증대시키면 외부공급전류밀도에 의한 양극부식속도는 증대(i<sub>a</sub> = i<sub>p</sub> + i<sub>c</sub>)되고 상대적으로 수소발생전류밀도는 감소하게 된다. 수소발생속도가 감소한다는 것은 자기부식속도 즉 자기부식에 의한

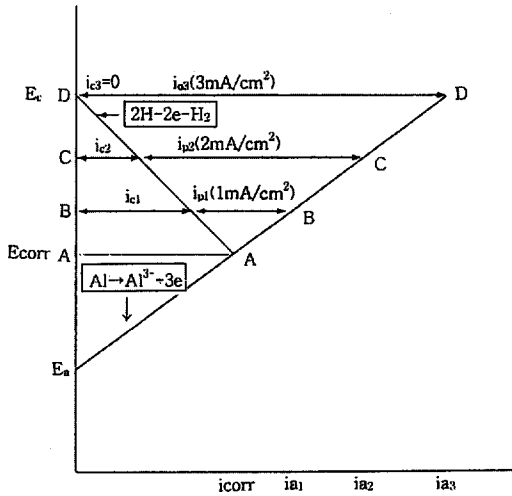


Fig. 4. Variation of polarization diagram as a function of supply current

양극부식량도 감소하게 됨을 의미하는 것이다. 그림에서 외부공급전류가  $i_{p1}$ 의 경우 수소발생전류는  $i_{c1}$ 이 되며, 이 값은 외부공급전류가  $i_{p2}$  경우 ( $2\text{mA}/\text{cm}^2$ )의 수소발생전류  $i_{c2}$ 보다 크다. 즉 외부공급전류  $i_p \gg i_{p1}$ 인 경우  $i_{c2} < i_{c1}$ 의 관계가 성립한다. 외부공급전류  $i_{p3}$ 에서는  $i_c = 0$ 이 되어 자기부식량은 없어지게 된다. 결국 공급전류밀도가 적을수록 자기부식량은 증가하며, 또한 양극전류효율은 감소하게 되며 자기부식량이 적을수록 즉 외부공급전류가 클수록 양극전류효율은 증대하게 됨을 알 수 있다.

3.2 pH에 따른 양극발생전류와 음분극전위

Fig. 5는 60시간 동안의 pH와 양극발생전류의 관계를 나타낸 그래프이다.

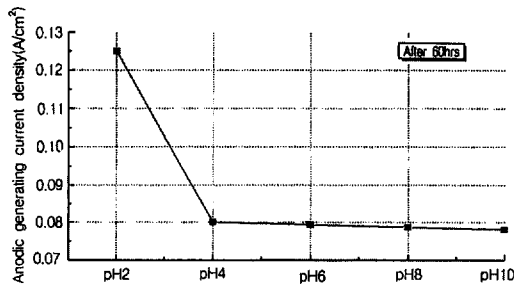


Fig. 5. Relationship between anodic generating current density and various pH solutions

pH 2에서 양극발생전류가 약  $0.125\text{A}/\text{cm}^2$ 이었으나, pH 4 이상에서는  $0.08\text{A}/\text{cm}^2$  정도로 거의 일정하였다. Fig. 6은 60시간의 pH변화에 따른 음극분극전위를 나타낸 것이다.

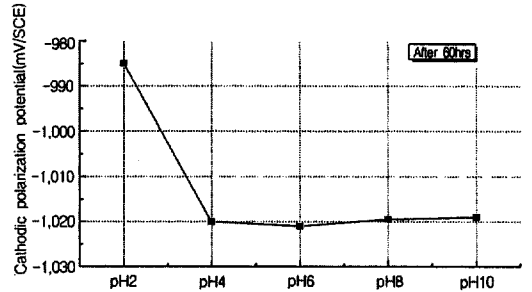


Fig. 6. Relationship between cathodic polarization potential and various pH solutions

음극분극전위 변화도 앞의 양극발생전류 변화와 같이 pH 2에서 전위가 가장 높았으나 pH 4 이상에서는  $-1,020\text{mV}$  부근에서 일정하였다. 이것은 pH 2에서는 분극이 적으나 pH 4 이상에서는 분극이 증가하여 전기화학적 환경이 유사해지는 것으로 보인다.

다음은 환경조건에서 알루미늄합금양극의 분극시험을 실시하여, Fig. 7에 나타내었다.

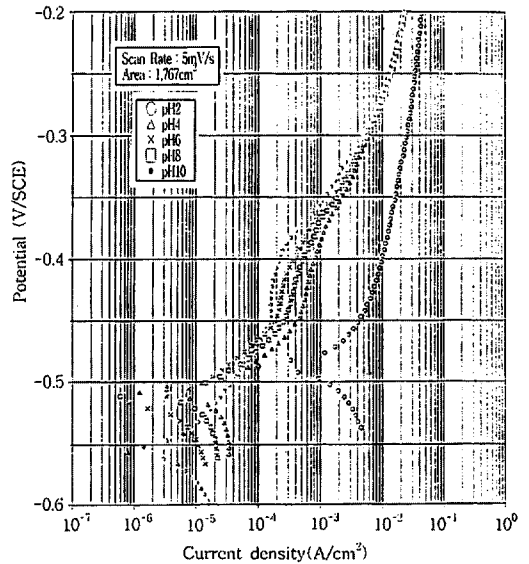


Fig. 7. Polarization curves of Al alloy cathodic material at five different pH conditions

Tafel 외삽법에 의한 분극전류밀도를 측정하여 보면 pH 2일 때  $10^{-3} \text{A/cm}^2$  정도의 부식 전류밀도를 나타내고 있으며, pH 4이상에서는  $10^{-5} \text{A/cm}^2$  정도 전후의 부식 전류밀도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 pH 2에서의 양극용해속도가 빠르며 이것은 곧 양극의 소모율이 증가하여 양극수명이 단축될 수 있음을 나타내는 것으로 사료된다.

### 3.3 대표적인 항만해수에서의 양극발생전류와 음분극전위

Table 2는 각 항만해수의 정량적인 분석치를 나타내고 있다.

Table 2. Qualities of five piers sea water used the experiments

	Temp' (°C)	Resistivity ( $\Omega\text{cm}$ )	pH	Chlorine ion (ppm)	Dissolved oxygen (ppm)	Redox potential (mV)
Yeochen	19.5	21.75	6.22	16197	3.9	+214
Ulsan	19.5	21.46	6.58	16318	6.1	+207
Goangyang	23.5	21.51	7.57	16075	7.4	+188
Busan	23.7	22.55	7.71	15893	7.6	+189
K.M.Univ.	23	21.46	8.0	16197	7.7	+210

상기 Table에서 오염정도 기준중 가장 크게 영향을 미치는 용존산소와 pH는 여천이 가장 낮게 나타났다.

Fig. 8은 대표적인 4개 항만해수에 대해 60시간 동안 양극발생 전류밀도를 측정된 시험결과이다.

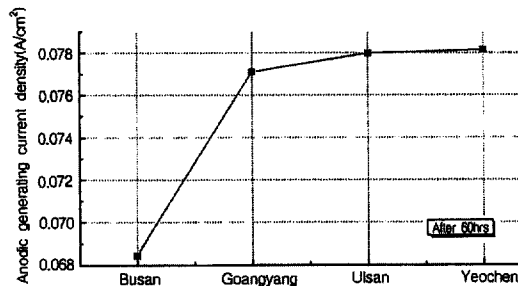


Fig. 8. Relationship between anodic generating current density and four different seawater conditions

오염이 가장 심한 여천과 울산항 해수에서  $0.078 \text{A/cm}^2$  정도를 나타내었으며, 광양, 부산항 순으로 적

어졌다.

그리고 Fig. 9는 4군데의 항만해수에 대한 60시간 동안의 양극발생전류시험후 음극분극전위를 나타낸 것이다.

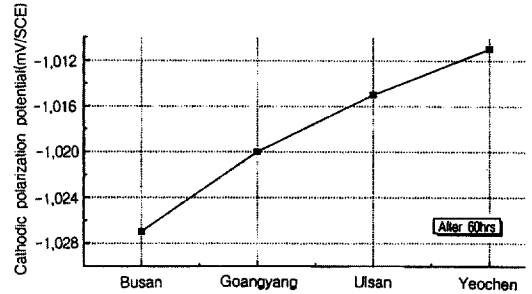


Fig. 9. Relationship between cathodic polarization potential and four different seawater conditions

오염이 심한 항만의 해수일수록 음분극이 적게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이 결과를 확인하기 위해 Fig. 10에서와 같이 철의 음극·양극분극곡선을 비교해 보았다.

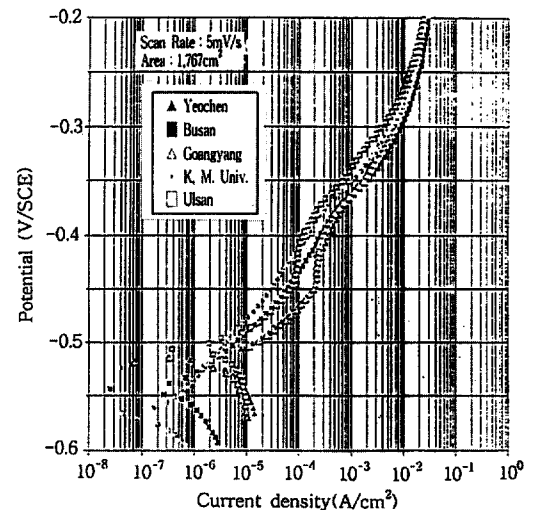


Fig. 10. Polarization curves of Fe cathodic material at five different seawater conditions

Fig. 10에서 알 수 있듯이 분극곡선 역시 전체적으로 거의 유사한 경향을 보이고 있으나, 이 중 오염이 가장 심한 여천항과 가장 청정한 한국해양대학교 근해(K.M.U.)의 해수에 대해서 분극저항법의

일종의 Stern-Geary의 식 즉,

$$i_{\text{corr}} = \frac{1}{2.3} \frac{I_{(\text{applied})}}{\Delta \psi} \left( \frac{\beta_c \beta_a}{\beta_c + \beta_a} \right)$$

으로 구한 부식전류밀도 값을 비교하여 보면 한국 해양대학교 근해의 해수가  $3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 로 여천항의  $9 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 에 비해서 훨씬 적은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이와같이 해수가 오염될수록 부식속도가 증가되는 이유는 pH의 저하와 함께 회생양극의 음극반응 즉,  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 와  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ 의 반응이 활발하게 일어나게 됨에 따라 양극의 산화반응 즉,  $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$ 의 반응도 증가되어 부식속도가 증가되는 것으로 사료된다.

이것을 Fig. 11과 같이 Evans 분극도로 나타내면, 양극의 수명단축은 오염된 해수에 의해서 양극의 자기부식이 증가하기 때문이며 이에 따라 양극 소모율과 양극의 발생전류가 증가한 것으로 판단된다.

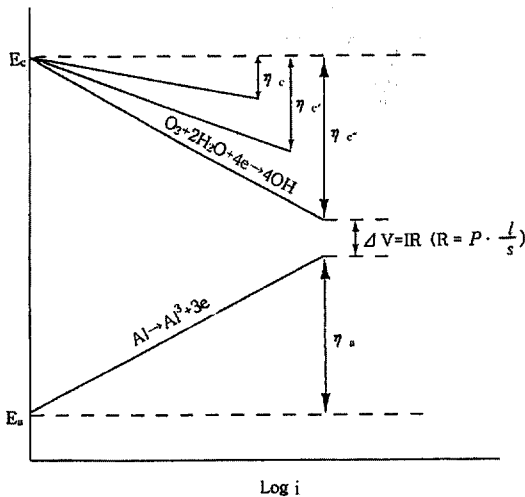


Fig. 11. Evans polarization diagram

여기에서 양극의 발생전류값은 양극과 음극의 전위차  $\Delta V$ 에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 즉, 해수가 오염될수록 음극 즉, 피방식체의 분극이 적어지게 되어  $\Delta V$ 는 증가되며, 따라서 양극발생전류도 증가하게 되어 양극수명을 단축한다. 그림에서

해수의 오염정도에 따라  $\eta_c$ ,  $\eta_c'$  및  $\eta_c''$ 와 같이 음극의 크기가 달라지는데, 오염이 심한 곳일수록 음극분극이 적게 일어나  $\eta_c$ 쪽으로 양극의 발생전류가 증가되므로  $\Delta V$ 가 커져 양극의 용해가 증가되었으며, 따라서 양극의 수명이 단축된 것으로 사료된다.

#### 3.4 유속시험 후 Al 양극 표면의 SEM사진 분석결과

해수중 음극방식을 할 경우 음극부는 전자소모를 동반하는 환원반응이 일어난다. 이 환원과정에서 해수중에 존재하는 Ca와 Mg성분에 의해 Calcareous deposit(또는 electro-coating)이라 알려져 있는  $\text{CaCO}_3$ 와  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 의 표면피막이 생성된다. 외부전원법에서는 이러한 생성물이 음극부인 강표면에서 주로 발생하나 회생양극법의 경우는 강표면 뿐만 아니라 회생양극의 성분이 불균일한 경우에는 회생양극 표면에서도 국부적으로 생성된다고 사료된다. 그리고 회생양극의 표면은 계속 용해 중이므로 양극용해와 국부적 표면피막의 생성 Mechanism에 대해서는 여러가지 이론이 있다.<sup>13-15)</sup> 즉, 해수중에서 2가지 지배적인 음극반응은 산소환원과 수소발생인데, 이들의 반응식은  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- = 4\text{OH}^-$ 와  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- = 2\text{OH}^- + \text{H}_2$ 이다. 이 과정에서 생성된 수산기 이온은  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{OH}^- = \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$  및  $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- = \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$ 의 반응과정을 거쳐 금속/전해질 경계(Metal/electrolyte interface)에서  $\text{CO}_2$  system의 불균형을 일으키고,  $\text{OH}^-$ 와  $\text{CO}_3^{2-}$  농도는  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 와  $\text{CaCO}_3$ 의 용해성 생성물 제한치를 초과해서 증가하므로, 이 두 성분은  $\text{Mg}^{2+} + 2\text{OH}^- = \text{Mg}(\text{OH})_2$ 와  $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} = \text{CaCO}_3$ 의 상태로 금속표면에 석출한다. 이와 같은 Calcareous deposit의 형성에 영향을 주는 일반적인 인자로는 여러 가지가 있으며, 이중 주요인자들은 노출 시간, 적용전위, 해수유속, 온도, 압력, 금속의 표면 상태 및 전해질의 종류 등인 것으로 사료된다.

본 연구에서는 대기압과 대기온도에서 240시간 동안 전류밀도와 유속변화에 따라 Al양극시편에 국부적으로 형성되는 생성물의 변화를 상대적으로 비교하였다.

Fig. 12는 240시간동안의 해수유속에 노출 시험

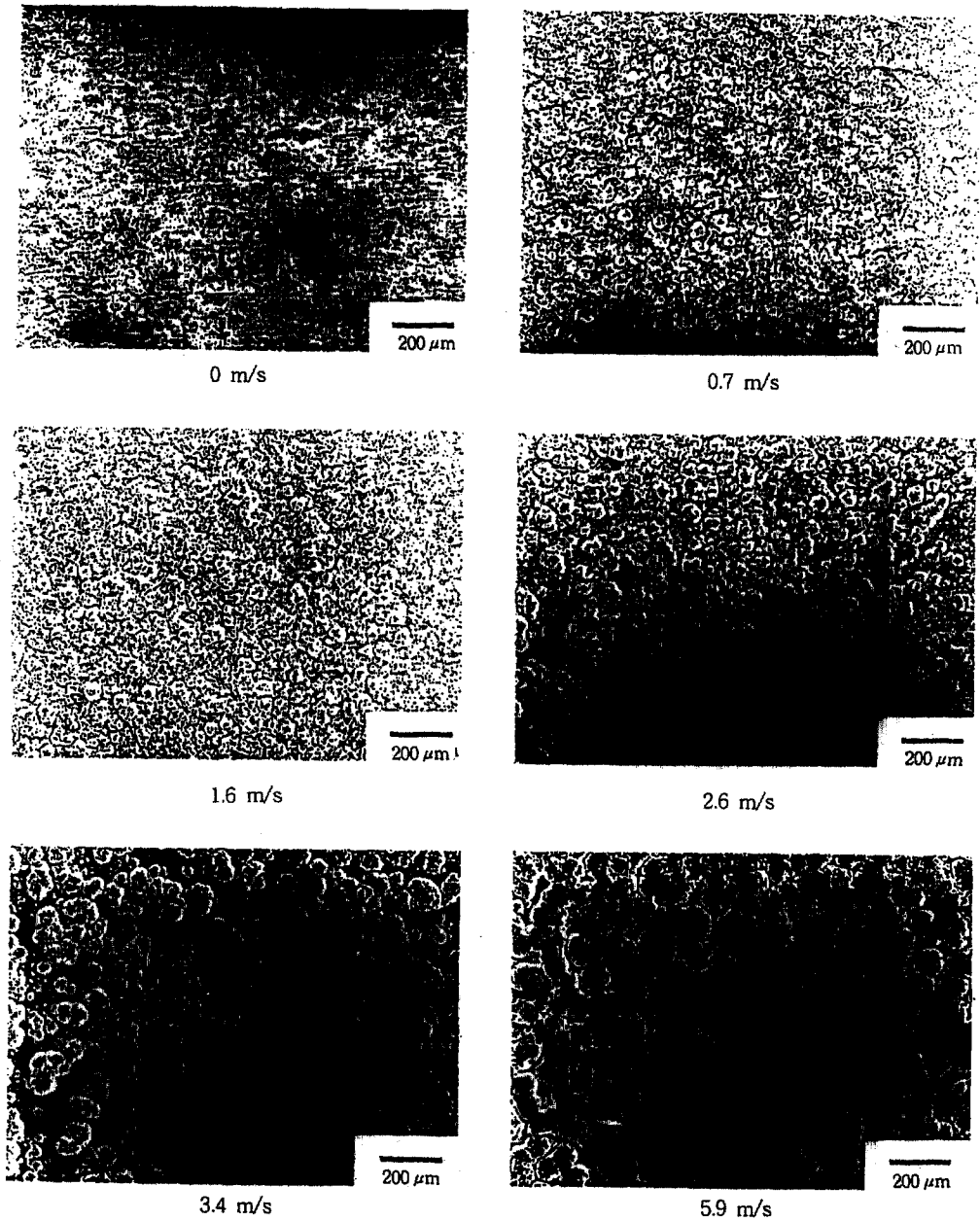


Fig. 12. SEM micrograph of Al anode specimens with velocity after 10 day exposed at current density, 0.01 mA/cm<sup>2</sup>

한 후 적용한 전류밀도와 유속에 따라 Al양극 표면에 국부적으로 생성된 Calcareous deposit의 형태를 SEM사진을 통해 비교한 것이다.

Fig. 12의 전류밀도가 0.01 mA/cm<sup>2</sup>인 경우 유속별 표면사진을 보면 유속이 증가함에 따라 꽃송

이 모양의 Calcareous deposit 밀도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 유속의 증가로 국부적 음극부가 해수중 Ca 및 Mg과의 접촉이 활발해져 생성물 형성이 용이해지기 때문으로 사료된다. 전류 밀도가 0.01 mA/cm<sup>2</sup>인 경우, 전류밀도가 해수중

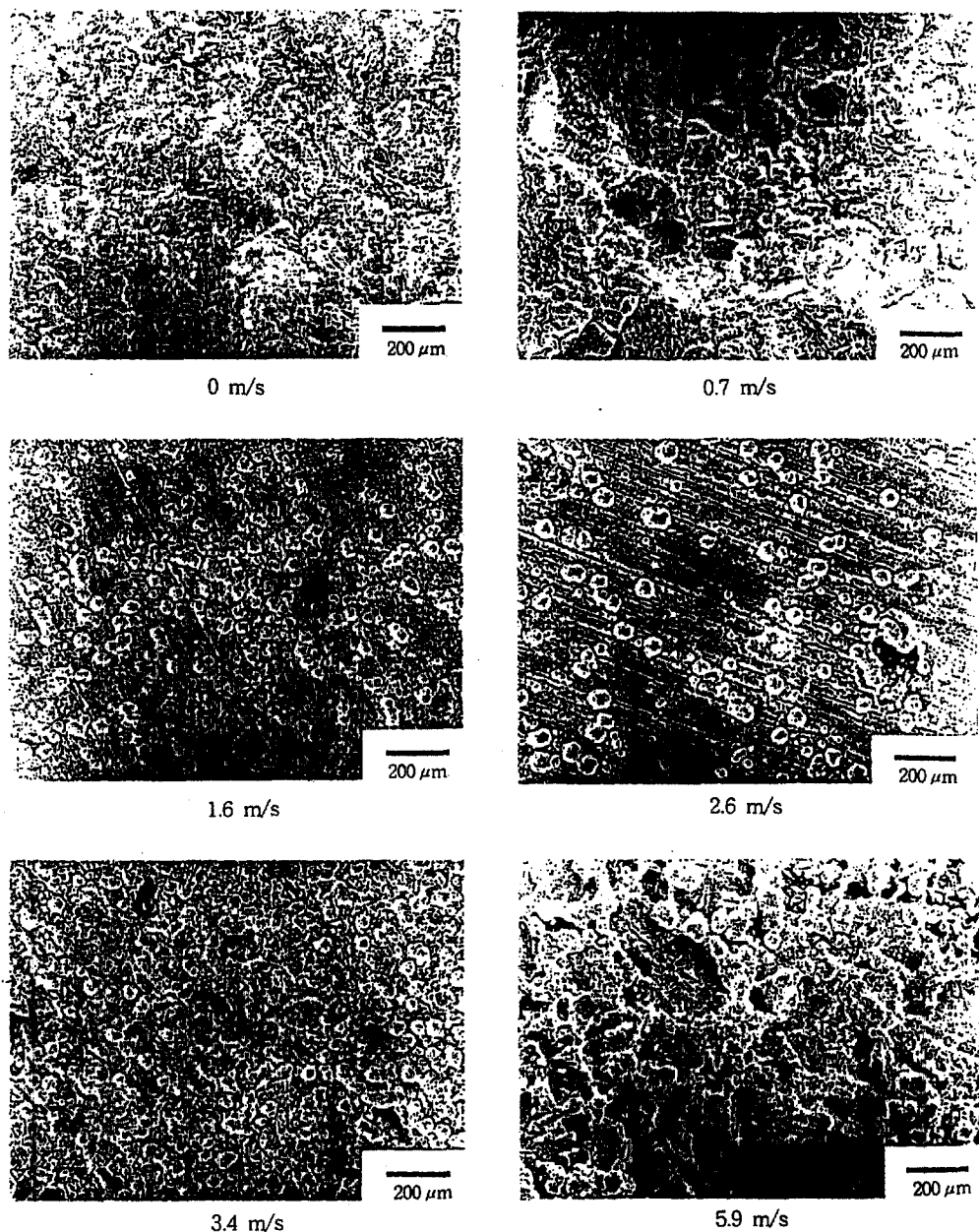


Fig. 13. SEM micrograph of Al anode specimens with velocity after 10 day exposed at current density, 0.5 mA/cm<sup>2</sup>

철강의 적정 방식전류밀도인 점을 고려해보면 Calcareous deposit의 형성이 상대적으로 용이하다고 판단되며, 유속의 증가는 Ca 및 Mg의 생성반응을 더욱 활성화하는 것으로 사료된다. 이와 같은 경향은 전류밀도가 0인 경우에도 같은 경향을 보였다.

음극방식기준으로 과방식에 해당되는 Fig. 13에서 전류밀도가 0.5 mA/cm<sup>2</sup>인 경우에는 과잉전류밀도로 인해 표면형상이 달라진 양상을 보였다.

유속에 따라 증가하던 꽃송이 모양의 생성물은 최고유속 5.9 m/s에서 일그러진 형태를 보였으며,



전류밀도가 1.0 mA/cm<sup>2</sup>인 경우에는 그 경향이 가속화되어 3.4 m/s 이상에서 과전류밀도와 유속의 복합작용으로 손상된 생성물의 형상을 보였다.

Fig. 12와 Fig. 13의 표면생성물에 대한 SEM사진 분석을 종합해 보면, 저전류밀도에서는 양극의 자기부식에 의한 음극반응 즉 Ca와 Mg의 환원반응이 활발하게 일어나서 Calcareous deposit가 용이하며, 유속의 증가에 따라 자기부식은 더욱 가속되어 Calcareous deposit가 용이하게 되어 생성물의 밀도를 증가시킨 것으로 사료된다. 그러나, 고전류밀도에서는 양극의 자기부식이 일어나지 않기 때문에 Deposit의 생성이 어려우며, 일단 생성되었어도 빠른 유속에 의해 파괴되며, 이러한 유속에 의한 Deposit의 기계적 침식작용은 전류밀도가 높을수록 커지는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

지금까지 유속 및 pH 변화가 알루미늄합금 희생양극의 성능에 미치는 전기화학적 특성 변화에 관한 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유속에 따른 부식속도 및 정전류시험 결과에 의하면 저전류밀도(0, 0.01 및 0.5mA/cm<sup>2</sup>)에서 알루미늄합금의 부식속도에 미치는 영향은 유속에 의한 물리적 침식이 전기화학적 용해보다 컸으나, 상대적으로 고전류밀도(1, 2 및 3 mA/cm<sup>2</sup>)에서는 전기화학적 영향이 물리적 침식보다 더 컸다.
2. 주요 항만내의 해수별 양극발생전류시험에서 부산이 가장 낮았으며, 광양, 울산, 여천항 순으로 양극발생전류가 높았다. 따라서 양극의 수명이 항만의 유속과 오염정도 등 환경에 영향을 받음을 확인하였다.
3. 알루미늄 양극수명은 해수오염에 의해 자기부식량이 증가하여 양극수명이 단축된다. 또한 음극구조물의 분극감소에 의해 양극과 음극의 전위차가 커지며, 이 때문에 알루미늄 합금양극의 발생전류밀도가 증가하여 양극수명이 단축된다는 사실을 알 수 있었다.

4. 알루미늄합금 표면 생성물에 대한 SEM사진 분석을 종합하면, 낮은 전류밀도인 0 및 0.01mA/cm<sup>2</sup>에서 Calcareous deposit은 부분적으로 형성되며, 유속증가에 따라 Ca과 Mg의 공급이 활발해져 생성물의 밀도가 증가한다. 그리고, 전류밀도의 증가는 정상적인 Deposit의 생성을 어렵게 하며, 더욱이 유속 증가로 인해 이러한 불안정한 표면생성물이 침식, 파괴됨을 확인하였다.

#### References

1. D.H. Jeon, Practical corrosion protection engineering, *Taehoa publishing company*, 7(1988).
2. NACE International, "Cost of Corrosion : \$300 Billion a Year", *MP*, **34-6**, 5(1995).
3. Denny A. Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", *Maxwell Machullan International Editions*, 1(1996).
4. John Morgan, "Cathodic Protection", 2nd ed., *NACE*, 251(1987).
5. Nihon-Kakushutzu-Shinkokai, "Kinzoku Boshoku Kizutsu Binran", *Nikan Kogyo Shinbonsha*, 748(1972).
6. T. J. Lennox, Jr., M. H. Peterson & R. E. Groover, "A Study of Electrochemical Efficiencies of Aluminum Galvanic Anodes in Sea Water", *MP*, **7-2**, 33(1968).
7. K. J. Kim, "A study of performance of Al alloy anodes of Al-Zn-In system and Al-Zn-In-Sn system" which were made of the Koreamade Al ingot *KMU thesis*(1981).
8. K. M. Moon, Corrosion protection of on-shore structure, 313(1995).
9. J. Gaythwaite, "The Marine Environment and Structural Design", *Von Nostrand Reinhold Co.*, 1(1981).
10. S. L. Wolfson, "Operating Performance of Aluminum Anodes - Results from Laboratory and Field Tests", *MP*, **33-2**, 22(1994).
11. J. Britton, "Quality Assurance for Offshore Aluminum Sacrificial Anodes", *MP*, **32-10**,

- 22(1993).
12. NACE, "Standard Test Method Impressed Current Test Method for Laboratory Testing of Aluminum Anodes", *NACE Standard*, TM 0190-90, No. 53076(1990).
  13. Jiunn-shyong Luo, "Adhesion of calcareous deposits formed on steel surfaces under cathodic polarization", Ph. D. Thesis, F.A.U.(1991).
  14. William H. Hartt, Charles H. Culberson, and Samuel W. Smith, *Corrosion*, **40-11**, 609(1984).
  15. Keith Stowe, *Ocean science*, John Wiley & Sons, Inc, 300(1983).