

알루미늄합금 희생양극의 성능에 미치는 해수 오염도의 영향에 관한 연구

김 성 종¹⁾, 文 慶 萬²⁾

A Study on the Influence of Sea Water Contamination Degree Affecting to the Property of Aluminum Alloy Sacrificial Anode

Seong-Jong Kim, Kyeong-Man Mun

ABSTRACT

On-and off-shore structures, which are situated in severe marine environment, should be protected in appropriate way to reduce the corrosion problem. Cathodic protection(CP), one of the protection methods has been widely adopted as the most effective protection method in terms of practical and economical method. Especially sacrificial anode(SA) method, one of the CP methods, is being popularly used in the marine industrial structures and there are Zn, Al alloy and Mg alloy as the materials of SA, however Al alloy anode is mostly used for protecting marine structures such as pier steel piles while Zn anode is used for protecting of ship's body surface and heat exchangers.

Recently it has been reported that the life of Al alloy anode has been shortened significantly than the original design life. It is suggested that the

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 재료공학 전공
2) 한국해양대학교 재료공학과 교수

suspected reasons for this problem mentioned above seems to be the improper alloy of anode on sea water environmental factors such as flow rate, temperature, contamination degree etc.

However there is few paper about to the sea water contamination degree, which is one of the environmental factors affecting to property of alloy anode. In this study, the property of Al alloy anode has been investigated as a parameter of sea water contamination degree such as variation of pH 2, 4, 6, 8, 10 and each sea port's contaminated waters.

1. 서론

최근 산업의 급격한 발전으로 인해 점점 활발해지는 무역에 따른 물동량 증가 및 육상으로부터 해안으로 유입되는 하천수, 공장폐수, 생활폐수 등으로 인한 해양오염이 날로 심각해 지고 있는 즈음에 항만부두방식용 알루미늄양극의 수명이 단축되는 현상이 발견된 점에 착안하여 오염의 주요인자중 하나인 pH 변화 및 각 부두의 오염해수의 정도차이에 대하여 알루미늄 합금 양극이 전기화학적으로 어떠한 특성변화를 나타내며 효율에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 양극 전류효율 시험

자연해수의 오염에 따른 Al합금양극의 전기화학적 특성 및 전류효율 등에 미치는 영향을 조사하기 위하여 양극 성능시험을 실시하였으며, 시험용액의 pH를 조절함으로써 pH변화에 따른 성능을 조사하였다. 양극성능시험방법으로는 일본학술진흥회 및 미국 NACE 유전양극시험법에 따라 실시하였으며, 시험기간동안 균일한 pH를 일정한 유지하기 위해서 해수순환장치를 채용하였다.

1) 정전류 시험

정전류 시험은 전류밀도 0.5, 1.0 그리고 2.0mA/cm²에서 각각 10일 (240시간)

간 실시하였다. 시험편을 시험액에 넣고 음극과 회로를 연결한 상태에서 외부저항을 조절하여 각각의 전류(0.5, 1.0 또는 2.0mA/cm²)를 유지하도록 하였으며, 일정 시간 간격으로 전위차계(Fluke 87)에 의해 전위변화를 측정하였다. 또한 10일(240시간)간의 정전류시험이 끝난후 전류밀도를 정해진 범위에서 일정간격으로 변화시켜 가면서 양극표면의 분극특성(전위와 전류밀도의 관계)을 조사하였다.

2) 기포발생량 측정

상기의 정전류시험 기간(240시간)동안 양극상부에 설치된 깔대기모양의 기포포집기(Bubble Collector)를 이용하여 알루미늄양극 자체에서 발생하는 기포량을 측정하였다. 눈금이 매겨진 끝이 막힌 깔대기 모양의 기포포집기는 주문 제작하였으며 시험초기 내부에 해수를 미리 채워 놓고 발생된 기포가 내부에 포집됨에 따라 내려가는 수위를 계측함으로써 발생기포량을 측정하였다. 1일 1회 기포량을 측정하였으며, 발생량이 많은 양극에 대해서는 기포포집기를 재충전하여 측정한 다음 시험후 전체량을 합산하였다.

3) 전류 효율

240시간의 정전류시험과 이어지는 분극특성시험이 모두 끝난후 각 양극시험편은 물로 씻고 80℃의 4% 무수크롬산과 10% 인산의 1:1혼합액중에서 1분간 담그어 표면 부착물을 제거하였으며, 다시 물로 씻고 건조한 다음 중량변화를 측정하였다. 이와 동시에 동전량계의 음극과 양극도 알코올로 세척하고 건조한 후 중량을 측정하여 전류효율 산출자료로 사용하였다. 시험양극과 전량계에 무게변화에 의한 전류효율의 계산내용은 Cu⁺²와 Al⁺³의 전기화학당량이 각각 1.185g/Ah와 0.3356g/Ah이므로 동전량계로 구해지는 전기량은 음극판 동(銅)부착량(g)/1.185(g/Ah)이고, 알루미늄양극의 이론적 발생전기량은 전기화학당량의 역수인 2.980Ah/g이므로 전류효율은 다음과 같다.

전류효율(%)

$$= \frac{[\text{동전량계에 의한 전기량(Ah)} \times 100]}{[\text{알루미늄 합금양극 감소량(g)} \times \text{알루미늄 이론적 발생전기량(Ah/g)}]}$$

$$= 28.32 \times \frac{[\text{동전량계 음극 증가량(g)}]}{[\text{알루미늄 합금양극 감소량(g)}]}$$

4) 동전위 분극시험

환경변화에 대한 알루미늄양극 계면에서의 근본적인 분극특성을 비교하기 위해 컴퓨터에 의해 구동되는 양분극시험을 실시하였다. 여기에 사용된 분극시험 시스템은 CMS100(Gamry Co., USA)이었으며 시험기간의 단축을 위해 동전위분극시험(Potentiodynamic Polarization Test)을 주사율(Scan Rate) 5mV/sec로 하여 개로전위에서 $-0.05V(50mV)$ 아래로부터 분극전위 1.0(V/SSCE)까지 양분극시험을 하였으며, 각 환경별로 얻어진 양분극시험결과를 비교하였다. 기타 시험절차는 ASTM규정을 참조하여 실시하였다.

5) 공급전류밀도에 따른 양극 전류효율 및 발생기포량 비교

Fig. 2.1은 pH변화별 각 공급전류밀도차에 의한 양극의 무게 감소량을 비교한 그래프이다. 여기에서 알 수 있듯이 공급전류밀도가 증가할 수록 무게감소량이 커짐을 알 수 있다. 특히 pH 2에서는 $2.0mA/cm^2$ 에서 무게 감소량이 현저하게 컸으며, pH 4이상에서는 거의 비슷한 감소량이 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 2.2는 일정 공급전류밀도에서 pH와 양극전류효율과의 관계를 나타낸 그래프이다. pH 2에서는 pH 4이상에 비해 공급전류밀도와 무관하게 효율이 낮음을 알 수 있다. 공급전류밀도가 1.0, $2.0mA/cm^2$ 인 경우에 pH 6에서 가장 높은 양극 전류효율을 나타내고 있음을 알 수 있으나 이는 pH 8, 10의 알카리에 의한 자기부식이나 pH 2, 4의 산에 의한 자기부식보다 상대적으로 부식이 적어서 효율이 높은 것으로 사료되며, pH 2에서는 공급전류밀도가 증가할수록 수소 발생에 의한 자기부식량이 감소되며 양극전류효율이 상대적으로 증대하고 있다고 사료된다.

Fig. 2.3은 Fig. 2.2에서 알 수 있듯이 공급전류밀도의 증가에 따른 양극전류효율의 증가에 대한 이론적설명을 위한 전위변화의 개략도이다. pH 2용액에서 Al 합금양극은 수소의 발생과 함께 Al양극이 용해되어 자기부식 속도가 크다. 그러므로 외부로부터 양극공급전류밀도를 i_{p1} 에서 i_{p3} 로 점진적으로 증대시키면 외부공급전류에 의한 양극용해속도는 증대되고 상대적으로 수소발생전류밀도는 감소하게 된다. 수소발생속도가 감소한다는 것은 자기부식속도 즉 자기부식에 의한 양극용해량도 감소하게 됨을 의미하는 것이다. 그림에서 외부공급전류가 i_{p1} 의 경우, 수소발생전류 i_{c1} 은 외부공급전류 i_{p2} 경우의 수소발생전류 i_{c2} 보다 크다. 즉 외부공급전류 $i_{p2} > i_{p1}$ 인 경우 $i_{c2} < i_{c1}$ 의 관계가 성립한다. 외부공급전류 i_{p3} 에서는 $i_c=0$,

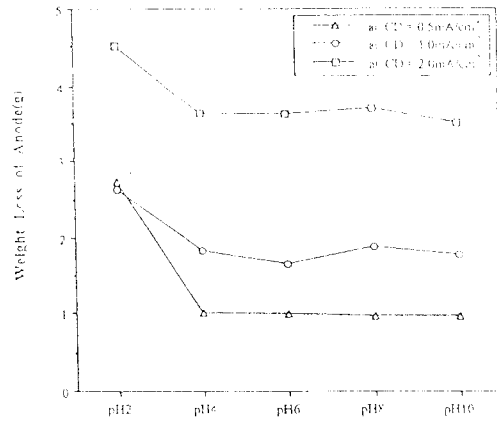


Fig. 2.1 Relationship of pH and Weight Loss of Anode at Three Different Current Density

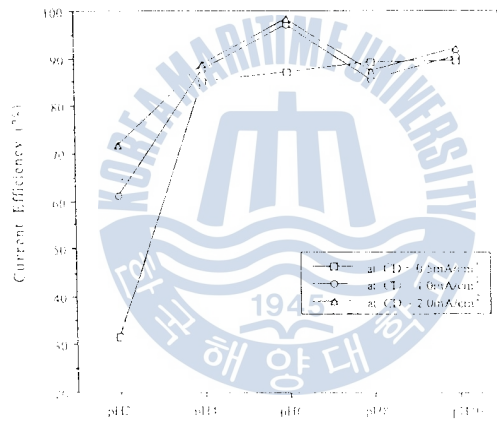


Fig. 2.2 Relationship of pH and Current Efficiency at Three Different Current Density

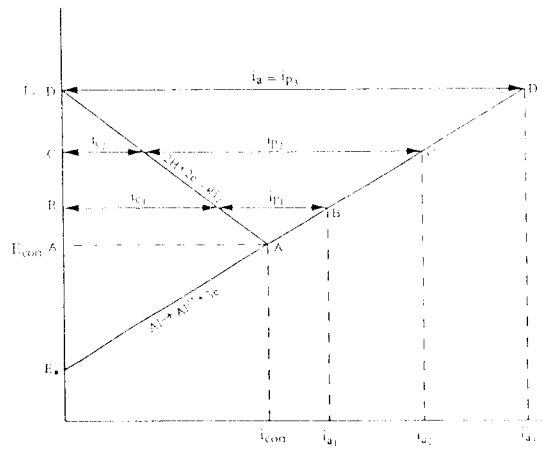


Fig. 2.3 Variation of Polarization Diagram as a Function of Current Supply

$i_a = i_{ps}$ 가 되어 자기부식량은 없어지게 된다. 결국 자기부식량이 많을수록 양극 전류효율은 감소하고 자기 부식량이 적을수록 즉 외부전류가 클수록 양극전류효율은 증대하게 됨을 알 수 있다. 외부공급전류는 바로 동전량계에서 구리의 석출에 이용된 전기량으로 계산된다.

6) pH변화와 오염해수에 따른 양분극시험 결과

양극의 전기화학적 거동을 시험하는 또 하나의 방법으로 컴퓨터에 의해서 자동 제어되는 동전위시험법에 의한 알루미늄양극의 분극시험이 실시되었다. 이 시험에는 전기화학적 시험에서 주로 사용되고 있는 일반적인 양극시험편과 방법이 이용되었다. 시험편으로는 노출면적 약 1.8cm^2 의 에폭시 피복된 시험편이 사용되었다. Fig. 2.4는 Tafel 외삽법을 그어보면 pH 2일 때 10^{-3}A/cm^2 정도의 부식 전류밀도(Tafel의 교점)를 나타내고 있으며, pH 4이상에서는 10^{-5}A/cm^2 정도의 부식 전류밀도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 pH 2에서의 양극용해속도가 빠르며 이것은 곧 양극의 소모율이 증가하여 양극수명이 단축될 수 있음을 설명하는 것이다. Fig. 2.5는 5개 항만에서 채취한 해수에서 실시된 양분극시험 결과이다. 자연전위부근에서 해수간 약간의 차는 있지만 전체적으로 거의 유사한 경향을 보이고 있으나, 이 중 오염이 가장 심한 여천항과 가장 청정한 한국해양대학교(K.M.U.)의 해수를 Tafel 외삽법으로 비교해보면 전류밀도의 차에서 알 수 있다.

7) 대표적 항만해수에서의 정전류시험 결과

우리나라의 대표적 4항구(울산, 부산, 광양, 여천) 항만 해수와 한국해양대학교(KMU, 부산시 영도구 동삼동)부근의 외항쪽 청정해수를 채취하여 앞에서와 같은 방법으로 정전류시험을 실시하였다. 채취된 각 항만의 pH의 분포는 7.87~8.47정도였다. 여기에서 pH의 분포가 상대적으로 크지 않은 것은 시료해수 채취시 지리적으로 각 항구마다 가장 오염된 시기의 해수를 채취하지 못하고 한 번의 방문으로 채취했기 때문이며 보다 정확한 시험을 위하여는 항만마다 년중 해수 수질의 변화를 조사하고 상대적으로 오염이 심한 장소와 시기를 택하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. Fig. 2.6은 울산, 부산, 광양, 여천항의 대표적 항만해수와 한국해양대학교 근처 청정해수에 대해, 전류밀도 1.0mA/cm^2 에서 실시된 10일간의 양극전위변화이다. 초기 1일이 경과한 후 여천항 해수에서의 전위변화가 약간 상승하는 경향을 보였으나 10일후 전위-전류밀도의 변화에서는 5종류의 해수에서 거의

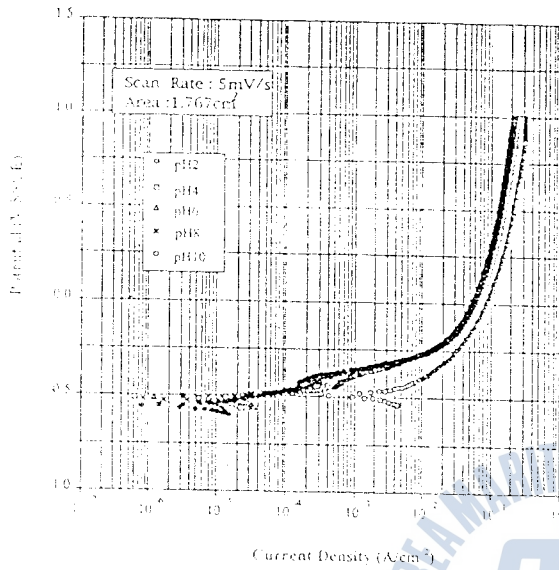


Fig. 24 Polarization Curves for Al Alloy Anode at Five Different pH's

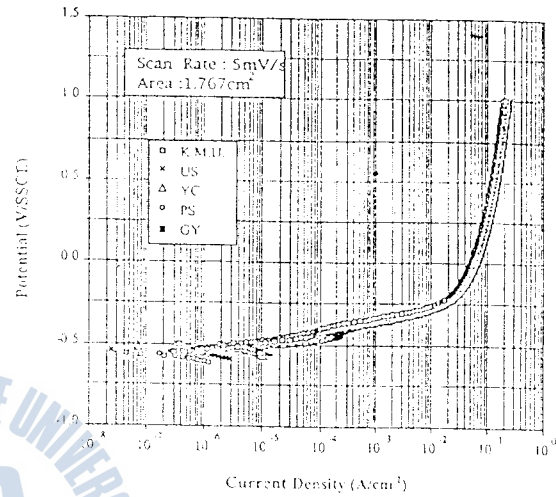


Fig. 25 Polarization Curves for Al Alloy Anode at Five Different Sea Water

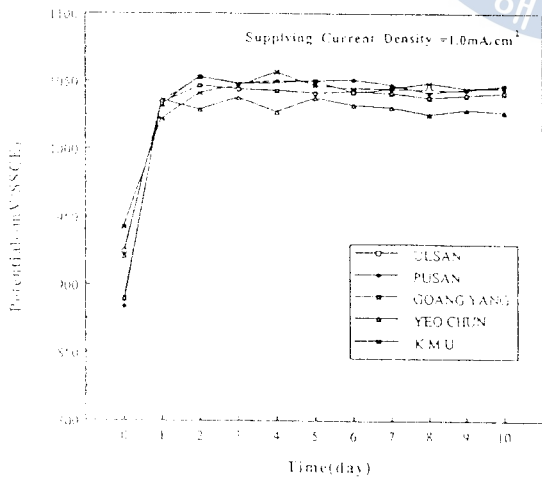


Fig. 26 Potential Variation for Al Alloy Anodes at Supplying Current Density 1.0 mA/cm² in Five Different Sea Water

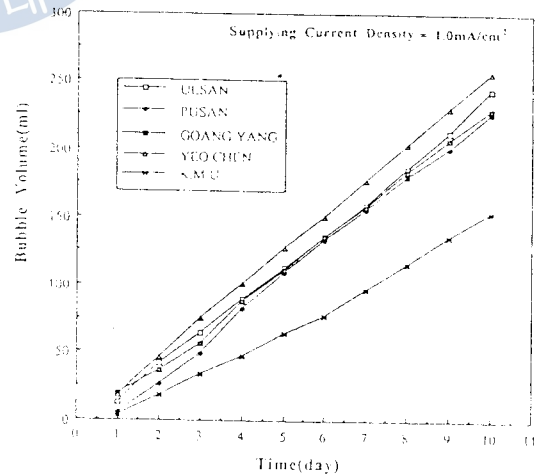


Fig. 27 Relationship between Bubble Volume and Time Variation at pH Differential

차가 없이 유사하였다. 다만 10일간의 정전류시험동안 발생한 양극에서의 기포량 비교에서 Fig. 2.7에서 보는 바와 같이 한국해양대학교 근처 청정해수에서 발생기포량이 가장 적었으며 다른 4개 항내의 해수에서는 거의 같은 발생량을 보였다. 대양쪽의 오염되지 않은 해수(한국해양대학교)와 다른 항내의 오염된 해수사이의 수질차가 발생기포량에 차이를 가져온 것으로 판단되며, 오염된 해수에서 양극의 자기부식(Self-Corrosion)이 증가한다는 문헌의 결과와 일치한다는 사실을 알 수 있었다.

2.2 양극발생전류 시험

1) 실험장치

양극발생전류(I)를 측정하기 위한 실험장치는 양극과 음극을 pH 2~10까지의 용액과 대표적인 항만해수 용액에서 회로를 형성하여 시간에 따른 양극과 음극 사이의 발생전류를 측정했으며 기준전극과 전위차계를 이용하여 음분극시험을 실시하였다.

2) 시험결과

a) pH변화에 따른 양극발생전류와 음분극전위

Fig. 2.8 그래프는 60시간 동안 실시한 pH의 변화에 따른 양극발생전류시험 결과이다. pH 2인 경우는 양극발생전류가 약 4A이었으나 pH 4이상에서는 거의 차이가 없이 2.5A부근이었다. Fig. 2.9는 60시간의 pH변화에 따른 음극분극전위를 나타낸 것이다. 60시간의 양극발생전류시험후 pH 2에서는 pH 4이상에 비해 월등히 분극이 적게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 Fig. 2.10의 음극분극곡선을 측정, 비교하여 보았다. 예를 들면 Fig. 2.10에서 분극곡선상의 전류밀도가 $10^{-3}A/cm^2$ 에서 pH 2인 경우의 음분극치가 ①만큼되어 가장 적고, pH 4(②), pH 6(③)순으로 점차 분극치가 커지고 있음을 확인 할 수 있었다.

b) 대표적인 항만해수에서의 양극발생전류와 음분극전위

Fig. 2.11은 대표적인 4개 항만해수에 대해 60시간의 양극발생전류시험을 실시한 결과다. 그림에서 알 수 있듯이 오염이 가장 심한 여천항의 해수가 2.5A정도를

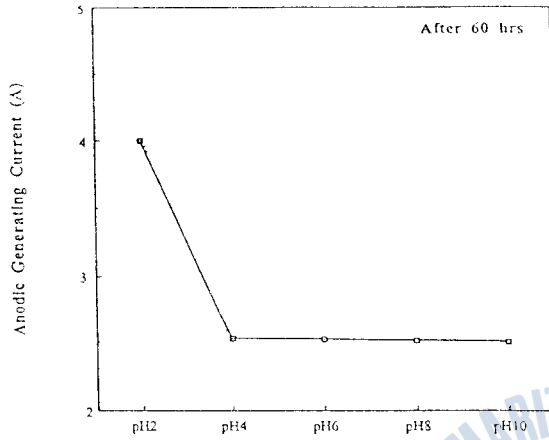


Fig. 2.8 Relationship between Anodic Generating Current and Various pH Solution

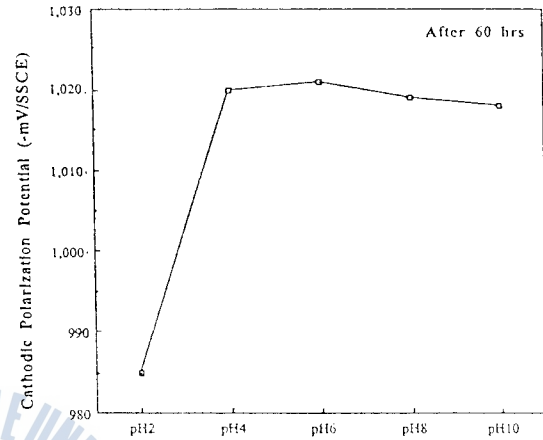


Fig. 2.9 Relationship between Cathodic Polarization Potential and Various pH Solution

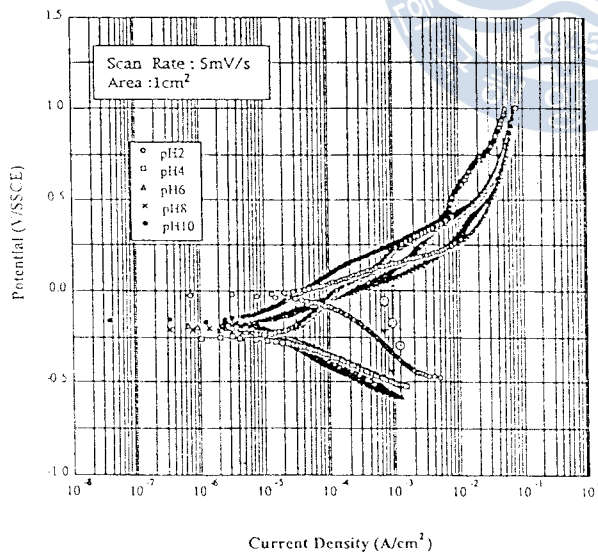


Fig. 2.10 Polarization Curves of Fe Cathode Material at Five Different pHs

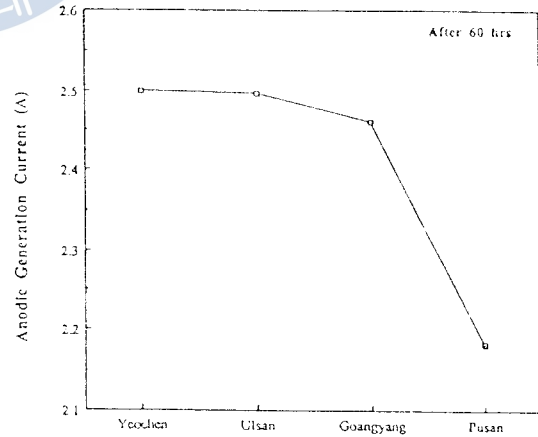


Fig. 2.11 Relationship between Anodic Generating Current and Different Four Piers Sea Water

나타냈으며 울산, 광양, 부산항 순으로 적은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 2.12는 4개 항만해수에 대한 60시간동안의 양극발생전류시험후 음극분극전위를 나타낸 그래프이다. 오염이 심한 항만의 해수일수록 음분극이 적게 일어나고 있음을 알 수 있다. 이 결과를 확인하기 위해 Fig. 2.13과 같이 철의 음극분극곡선을 측정하여비교해 보았다. 항만해수에 따라 큰 차는 없지만 가장 오염이 심한 여천과 가장 청정해역인 부산항의 경우를 전류밀도 10^{-5}A/cm^2 에서 비교해 보면 여천항의 해수가 부산항의 해수보다 음분극이 적게 일어났음을 확인할 수 있었다.

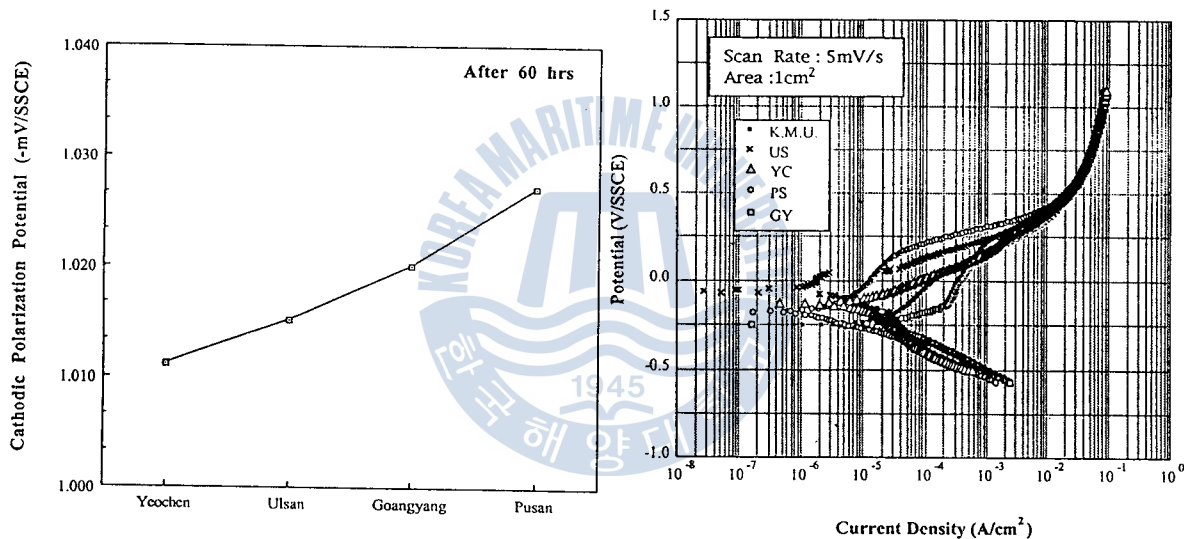


Fig. 2.12 Relationship between Cathodic Polarization Potential and Different Four Piers Sea Water

Fig. 2.13 Polarization Curve of Fe Cathodic Material at Five Different Sea Water

3) 고찰

지금까지의 실험결과를 더욱 알기 쉽게 설명하기 위해 Fig. 2.14가 Evans Polarization Diagram으로 나타냈다. 양극수명의 단축은 오염된 해수에 의해서 양극의 자기부식량 증가에 의해 양극소모율 증가와 양극의 발생전류증가에 그 원인이 있다. 따라서 Fig. 2.14에서 알 수 있듯이 양극의 발생전류는 양극과 음극의 전위차 ΔV 에 의해서 결정된다. ΔV 는 해수가 오염될수록 음극 즉 피방식판의 분극이 적게 되면 ΔV 는 증가되어 양극 발생전류는 증가하게 되어 양극수명은 단축된

다.

즉 그림에서 η_c , η_c' , η_c'' 와 같이 해수의 오염도에 따라서 음분극의 크기가 달라진다는 것을 알 수 있다. 즉 오염도가 심한 곳일수록 음극분극이 적게 일어나므로 상대적으로 양극의 발생전류를 증가시켜서 음극을 방지해야 하므로 양극의 수명은 단축된다고 사료된다.

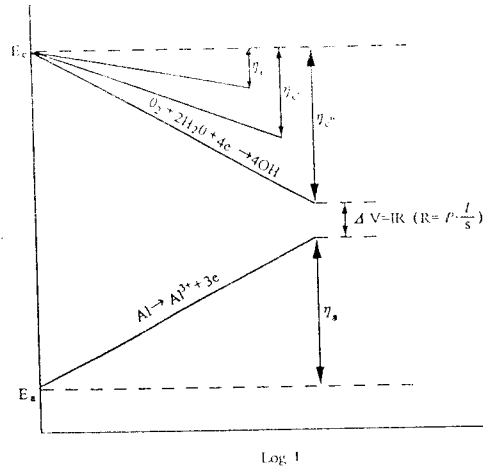


Fig. 2.14 Evans Polarization Diagram

3. 결 론

지금까지의 알루미늄 희생양극의 여러 가지 성능에 미치는 해수 오염도에 따른 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 정전류실험에 의한 알루미늄합금양극의 효율은 pH 2에서 가장 낮았으며 특히, 0.5mA/cm^2 정전류실험의 경우에 pH 4이상에서는 거의 같은 효율값을 나타냈으나, 1.0mA/cm^2 , 2.0mA/cm^2 에서는 pH 6에서 가장 높은 효율을 나타냈다.
2. PH 2용액에서는 0.5mA/cm^2 에서 1.0mA/cm^2 , 2.0mA/cm^2 로 갈수록 효율이 높았다. 이것은 양극의 공급전류가 증가할수록 수소발생에 의한 자기 부식량이 감소하고 공급된 양극전류는 방식전류(동전량계의 석출)로 이용되기 때문이다.
3. 우리나라의 대표적 4개 항만해수와 1개 청정해수(한국해양대학교)에서의 10일간 정전류시험결과 청정해수(한국해양대학교)가 가장 양극효율이 높았으며, 부산항, 광양항, 울산항, 여천항순으로 양극효율이 낮아졌다.
4. 양극평균발생전류실험에서도 부산, 광양, 울산, 여천항순으로 양극평균발생전류가 높았다.
5. 이상의 실험결과에 의하면 알루미늄양극수명은 해수오염에 의한 자기부식량 증가에 의한 양극소모량이 증가되면서 단축되며, 또한 음극 구조물의 분극감소에 의해 양극과 음극의 전위차가 커져서 알루미늄합금양극의 발생전류밀도 증가에 의해서도 단축된다는 사실을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 전대회, “실용방식공학”, 태화출판사, pp. 7-125 (1988)
2. NACE International, “Cost of Corrosion : \$ 300 Billion a Year”, MP, Vol 34, No 6, p. 5 (1995)
3. Denny A. Jones, “Principles and Prevention of Corrosion”, Maxwell Machillan International Editions, pp. 1-38 (1996)
4. J. Morgan, “Electrochemistry, Corrosion and Cathodic Protection”, Cathodic Protection, 2nd ed, NACE, pp. 1-26 (1987)
5. H. H. Uhlig, & R. W. Revie, “Cathodic Protection”, Corrosion and Corrosion Control, 3rd ed, John Wiley & Sons, pp. 217-232 (1985)
6. R. A. Hine & M. W. Wei, “How Effective are Aluminium Anode in Sea Water”, Materials Protection, Vol. 3, No. 11, pp. 49-52 (1964)
7. J. T. Reding & J. J. Newport, “The Influence of Alloying Elements on Aluminium Anodes in Sea Water”, Materials Protection, Vol. 5, No. 12, p.15 (1966)
8. 田大熙, “腐蝕과 防蝕의 管理(補訂版)”, pp. 311-401, 一中社 (1985)
9. 福谷英二, “金屬の防蝕規程, 防蝕基準ならびに 關連規格について”, 防蝕 技術, 28, pp. 503-511 (1979)
10. 日本學術振興會, “金屬防蝕 技術便覽”, 日刊工業新聞社, p. 748 (1972)
11. T. J. Lennox, Jr., M. H. Peterson and R. E. Groover, “A Study of Electrochemical Efficiencies of Aluminium Galvanic Anodes in Sea Water”, Materials Protection, Vol. 7, No. 2, pp. 33-37 (1968)
12. L. L. Shreir, “Corrosion, Vol. 2, Corrosion Control”, pp. 11-21, Newnes-Butterworths (1976).
13. T. Sakano, K. Toda & M. Hanada, “Test on the Effects of Indium for High Performance Aluminium Anodes”, Materials Protection, Vol. 5, No. 12, p. 45 (1966)
14. E. G. Haney & G. W. Kurr, “Sea Water Efficiency Tests on Aluminium Alloy Anodes Containing Zinc, Indium and Cadmium”, Material Performance, Vol. 15, No. 5, p. 27 (1976)

15. S. N. Smith, J. T. Reding and R. L. Riley, Jr., "Development of a Broad Application Saline Water Aluminum Anode-Galvalum III", *Materials Performance*, Vol. 3, No. 11, p. 32 (1978).
16. 電氣學會, 新版, "電蝕土壤腐蝕ハンドブック", コロナ社, p. 220 (1977)
17. 村井東助, 三浦國敏, 田村祐一, "アルミニウム流電陽極の研究", *防蝕技術*, Vol. 23, p. 191 (1974)
18. 田大熙, 金基俊, "國産 Al地金에 의한 Al-Zn-In係와 Al-Zn-In-Sn係의 Al合金陽極의 性能", 韓國海洋大學校 論文集, 제16輯, pp. 141-167 (1981)
19. 林炳鎰, 田重錫, "Al-Zn-In係 流電陽極의 性態에 미치는 Cd, Ca 및 Ca 添加와 熱處理의 影響", 韓國腐蝕學會, Vol. 11, No. 1 (1982).
20. 沿岸開發技術研究センター, "港灣鋼構造物 防蝕 マニュアル", pp. 1-1~1-29 (1986)
21. 문경단, 김기준, 이명훈 등, "강관구조물의 방식대책에 관한 연구 용역" 해운항만청, pp. 315-375 (1995)
22. H. P. Hack, "The Potentiostatic Technique for Corrosion Studies", *Electrochemical Techniques for Corrosion Engineering*, pp. 57-63 (1986)
23. F. Mansfeld, "Polarization Resistance Measurements - Today's Status", *Electrochemical Techniques for Corrosion Engineering*, pp. 67-71 (1986)
24. F. Mansfeld, "Polarization Resistance Measurements - Experimental Procedure and Evaluation of Test Data", *Electrochemical Techniques for Corrosion Engineering*, pp. 18-26 (1977)
25. S. W. Dean, Jr., "Electrochemical Methods of Corrosion Testing", *Electrochemical Techniques for Corrosion*, pp. 52-205 (1977)
26. F. Mansfeld, "Don't Be Afraid of Electrochemical Techniques - But Use Them with Care", *Corrosion*, Vol. 44, No. 12, pp. 856-868 (1988)
27. 日本腐蝕防蝕協會, 流電陽極試驗法, J SCE S-9301, pp. 13-17 (1993)
28. 이학렬, "금속부식공학", 연경문화사, pp. 270-271 (1995)
29. 김원녕, 김기준, 김영대, "低純度 Al地金을 使用한 Al-Zn-In-Mg계 Al合金 流電陽極의 特性에 관한 研究", 韓國船用機關學會誌, Vol. 9, No. 3, pp. 33-43 (1985)

30. T. J. Lennox, Jr, M. H. Peterson & R. E. Groover, "A Study of Electrochemical Efficiencies of Aluminum Galvanic Anodes in Sea Water", *Materials Performance*, Vol. 7, No. 2, pp. 33-37 (1968)
31. 村井東助, 三浦周敏, 田村祐一, "アルミニウム流電陽極の研究(제1報)", *防蝕技術*, Vol. 23, pp. 191-195 (1974)
32. 玉田明宏, 田村祐一, "低溫海水中における Al流電陽極の流電特性", *材料と環境*, Vol. 40, pp. 661-666 (1991)
33. R. N. Parkins, A. J. Markworth, J. H. Holbrook & R. R. Fessler, "Hydrogen Gas Evolution from Cathodically Protected Surfaces", *Corrosion*, Vol. 41, No. 7, pp. 389-397 (1985)
34. T. J. Lennox, Jr, M. H. Peterson & R. E. Grover, "A Study of Electrochemical Efficiencies of Aluminum Galvanic Anodes in Sea Water", *Naval Research Laboratory Washington, D.C.*, pp. 3-37(1968)
35. J. Britton, "Quality Assurance for Offshore Aluminum Sacrificial Anodes", *Deep Water Corrosion Services Inc., Materials Performance*, Vol. 32, No. 10, pp. 20-24 (1993)

