

항만 강관 구조물의 음극방식설계 개선방안에 관한 연구

김 성 종*

A Study on Improvement of Cathodic Protection Design of Harbour Marine Steel Structure

S. J. Kim

Key words : Harbour Marine Steel Structures(해양강구조물), Cathodic Protection(음극방식),
Al Alloy Anode(알루미늄합금양극), Sacrificial Anode(희생양극).

Abstract

Harbour marine steel structures, which are served in severe marine environment, should be protected in appropriate method to reduce corrosion problems. Cathodic protection, one of the protection methods in terms of practical and economical point of view is being widely used to marine steel structures mentioned above. Recently it has been reported that the life of Al alloy anode with sacrificial anode for protection of harbour marine steel structures was shortened significantly than the original design life. In this study, the optimum cathodic protection design of harbour marine steel structures was investigated with parameter of sea water pollution degree.

1. 서 론

근년, 점점 활발해지는 무역에 따른 물동량 증가 및 해양개발에 따라 항만과 해양 중에는 철강 구조물의 시설이 수와 규모가 확대되고 있는 추세이다.

한편, 이러한 철강구조물은 일반 육상 구조물과는 달리 대기중, 비말대(Splash Zone), 간만조대

(Tidal Zone), 해수중, 해토중 등의 사용환경에 따라 다른 부식 특성을 가지고 있기 때문에 오래전 부터 이에 대한 부식메커니즘의 해명 및 여러 가지 방식 대책이 검토되어 왔다. 특히, 이들 환경 가운데 해수 중에 적용되는 강구조물의 방식에는 음극방식법이 가장 효과적이며 경제적이라 알려져 있으며 우리나라에서도 1970년대 이 기술을 도입·적용하기 시작하였다. 음극 방식법은 피방식

* 한국해양대학교 해사대학 (원고접수일 : 97년 10월)

체를 음극으로 해서 그 전위를 낮추어 방지하는 방법으로서 유전양극법(Galvanic Anode Method)과 외부전원법(Im-pressed Current Method)의 두 종류가 있다.¹⁾ 전자는 피방식체에 상대적으로 전위가 낮은 Al, Zn, Mg 등의 합금을 유전양극(희생양극, Sacrificial Anode)으로 취부해서 그 사이에 흐르는 전류를 방식전류로 이용하는 방법이며, 후자는 교류전원으로부터 얻은 직류를 백금이나 산화납 등의 불용성 양극을 통하여 피방식체에 공급하는 방식법이다. 현재 우리나라의 항만 구조물에는 주로 유전양극방식법을 사용하고 있다. 방식효과 측면에서 본다면 두 방식 모두 유사하나 시공성 및 보수 관리가 간단하고 방식효과의 지속성이 좋다는 이유로 최근의 항만 시설에는 알루미늄합금 양극에 의한 유전양극방식이 선호되고 있다.^{2), 3)} 또한 유전양극을 이용한 음극방식 설계시에는 일반적으로 ①양극의 형상을 정하는 경우와 ②양극의 형상을 정하지 않고 양극 수명을 먼저 결정하는 경우 중 하나를 선택하여

실시하고 있으며 Table 1의 유전양극에 의한 강파일의 음극방식 설계식을 이용하여 설계한다. 반면, 지금까지 항만 강구조물의 방식설계는 각 항만의 특성을 충분히 고려하지 않고 획일적으로 외국기술을 그대로 적용함으로써 안전 또는 경제적 측면의 신뢰성 확보에 많은 문제점이 드러나고 있다. 즉, 최근의 조사에 의하면 각 항만마다 해수의 유속세기 와 육상으로부터 해안에 유입되는 하천수 및 공장폐수등의 오염으로 인한 환경영향에 의해 음극방식용 유전양극의 수명이 현저히 단축되는 사례가 보고되었다.⁴⁾

따라서 본 연구에서는 ① 환경조건이 다른 국내 각 항만의 수질분석 비교 및 양극실험을 통한 최적전류효율의 산출, ② 강구조물의 부식상태에 따른 분극특성 비교와 최적방식전류밀도의 산출등을 통하여 환경조건변화에 따른 유전양극의 최적 음극방식기준에 필요한 기초자료를 제시함으로써 안전하고 경제적인 방식설계 및 효율적인 관리시스템 구축에 그 목표를 두었다.

Table 1 유전양극에 의한 강파일의 음극방식 설계 공식

<p>(1) 소요 방식전류 밀도(i) 해수중 : 0.1 A/m^2 해토중 : 0.02 A/m^2</p> <p>(2) 양극의 접지저항(R)식 * R. Rope식 : $R_1 = \rho / 2\pi L \{2.3 \log(8L/D) - 1\}$ * E. Hukudan : $R_2 = 0.263\rho \cdot L^{0.75} \cdot D^{-0.25}$ (ρ : 비저항($\Omega \cdot \text{cm}$), L : 전극길이(cm), D : 등가직경(cm))</p> <p>(3) 양극의 발생전류(I)와 유효전위차(ΔE) $I = \Delta E / R$ ΔE : 해수중 : 0.25V, 해토중 : 0.30V</p> <p>(4) 방식면적 : 전체방식에 필요한 면적을 해수중 과 해토중으로 나누어 계산함</p> <p>(5) 소요양극 갯수(n)에 대하여 $n = 4.74 / I$ * 방식면적중 해수부가 35m^2, 해토부가 62m^2인 경우 I_1 (해수부) = $0.1 \times 35 = 3.5\text{A}$,</p>	<p>I_2 (해토부) = $0.02 \times 62 = 1.24\text{A}$ \therefore 소요방식전류 $I = I_1 + I_2 = 4.74\text{A}$</p> <p>(6) 양극수명 ($Y$) $Y = 0.85 W / I \cdot S$ (W : 중량 (kg), I : 양극발생전류(A), 0.85 : 사용가능계수, S : 양극의 소모율) $S_1 = 3.41$ (전류효율:90%) $S_2 = 3.61$ (전류효율:85%), $S_2 = 3.84$ (전류효율:80%) * $S_1 = 8760\text{h} / (2850\text{A} \cdot \text{h} \times 0.9)$ $= 3.41(\text{kg/A} \cdot \text{Y})$ ◎ 이론발생전기량 : $2850\text{A} \cdot \text{h/kg}$</p> <p>(7) 강파일의 수명 ($T$) $T = (\text{강파일의 허용침식량}) / (\text{침식도 부식율})$ * 해수중 구조용강의 무방식 침식도 = 0.2mm/yr * 해수중 구조용강의 방식시 부식율 = 30% (방식율 70%) 예) 강파일의 허용침식량 = 4mm (현 10mm의 강파일에 대하여) $Y = 4\text{mm} / 0.2(\text{mm/yr}) \times 0.3 \approx 67\text{년}$</p>
---	---

2. 실험방법

실험은 일본학술진흥회에서 제정한 유전양극시험방법⁹⁾에 의해서 실험하여 전류효율을 구했다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 국내 5개 항만에서 직접 채취한 해수를 각각 비이커 500ml에 채우고 알루미늄 합금양극은 직경 15mm에 노출면적을 20cm²로 하였으며 음극은 동판을 이용하여 직경 50mm, 길이 7cm의 원통형으로 제작하였다. 그리고 양극전류밀도를 1mA/cm²로 하여 240시간 동안 정전류 부식시험을 행하였다. 또 이 시험후 각 항만별로 양극 소모량을 측정, 비교했으며 또 해수 중 포함된 pH, Chloride, Specific Resistance 그리고 Redox Potential 차이에 따른 양극 소모량과의 관계를 상기와 같은 방법으로 실험했으며, 해수를 채운 500ml 비이커에 노출면적이 1cm²인 Al 합금양극과 노출면적이 18cm²인 Fe음극을 넣고, 양극과 음극을 연결하여 Al 합금양극에서 발생하는 전류밀도와 Fe음극에서 발생하는 전류밀도를 하루에 한번씩 전위를 측정하여 7일 동안 실시하고, 여기서 음극은 녹슨 정도에 따라 3가지로 분류하여 실험하였다.

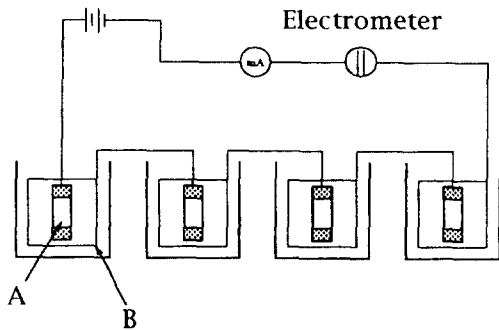


Fig.1 Schematic Diagram of Sacrificial Anode Experiment
 (A : Al Alloy, Anode,
 B : Copper Plate, Cathode)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 국내 각 항만의 수질 분석 비교와 양극 부식 실험을 통한 최적 전류 효율의 산출

방식 설계를 하기전 국내에서 해양환경의 수질 분석을 하는 것은 주로 비저항을 측정하는 정도이나 최근 외국의 경우에는 비저항 이외에도 부식에 영향을 줄 수 있는 여러 인자를 분석, 조사하여 이를 설계에 반영하고 있다. 이는 근년 들어 해수 오염도 등에 따른 각 항만의 수질 변화가 유전양극의 예상수명에 현격한 단축을 가져오는 등 종래 방식설계로는 신뢰도상에 많은 문제가 있다는 판단 때문이다. Table. 2는 우리나라 각 항만과 일본 항만의 수질 분석 비교를 나타낸 것이다. 울산 제2부두가 가장 오염도가 높았고, pH가 낮을수록 용존산소량도 낮은 값을 나타냈다. 또한, 본 연구를 위해 조사한 국내 각 항만의 경우는 일본의 한 항만보다도 현저하게 해수 오염도가 높은 경향을 나타냈다.

Table 2 Comparison of Water Analysis at each Pier Sea Water.

항만명	수온 (°C)	비저항 (Ωcm)	pH	염소 이온 (PPM)(*103)	산소 환원 전위 (mV)	수온 (°C)
A: 울산 2부두	19.5	21.75	6.22	16.297	3.9	+214
B: 부산 2부두	23.0	21.46	7.51	16.197	7.7	+210
C: 광양 LPG 부두	21.8	21.32	7.74	16.257	7.2	+186
D: 광양 포스코 제품 부두	23.5	21.42	7.65	16.136	7.3	+190
E: 목포 석탄양곡 부두	23.4	39.60	7.44	9.210	7.6	+196
F: 일본 島港	23.5	22.40	8.20	18.000	7.5	+417

Table 3 Difference of Anode Weight Loss at each Pier Sea Water(1mA/cm² · 240h)

항만명	양극소모량 (mg)
A : 울산 제2부두	208.3
B : 부산 제2부두	169.1
C : 광양 LPG부두	186.4
D : 광양 포스코 제품 부두	177.9
E : 목포 석탄 양곡 부두	172.3

따라서 해수 오염도 등 각 항만의 수질 차이가 전류 효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각 항만별 해수를 채취하여 그 수질에 따른 양극 소모량을 비교 실험하였다. Table 3은 그 결과를 나타내는데 양극소모에 따른 무게 감량이 울산 제2부두가 가장 컸고, 부산 제2부두가 가장 적었다. 이 표에서 보이는 바와 같이 울산 제2부두가 가장 오염도가 높았고, pH가 낮을수록 용존산소량도 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한, 본 연구를 위해 조사한 국내 항만의 경우 일본의 한 항만보다 현저하게 해수 오염도가 높은 경향을 나타냈다. Table 2의 수질분석결과와 비교하여 보면 역시 오염도가 심한 울산 제2부두가 양극소모량이 크다는 사실을 알 수 있다.

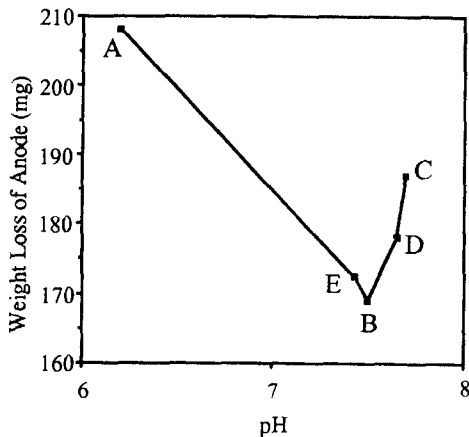


Fig. 2 Relationship between pH and Weight Loss of Anode at each Pier Sea Water
(A : Ulsan 2nd Pier, B : Pusan 2nd Pier, C : Goangyang LPG Pier, D : Goangyang POSCO Product Pier, E : Mokpo Coal, Grains Pier)

Fig. 2는 각 항만별 pH와 양극 소모량 관계를 보여주고 있다. pH가 낮을수록 부식감량은 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 pH가 7.5 이상에서는 오히려 양극 소모량이 증가되는 경향을 가졌다. 이것은 산소 농담 전지 효과에 의한 부식 소모량의 증가로 생각된다.

Fig. 3은 염분 농도와 양극 소모량의 관계를 보여주고 있다. 염분 농도가 16,000ppm부근에서 양극 소모량이 증가하고 있으며 9,000ppm에서는 양극 소모량이 적은 것으로 나타나 있다.

Fig. 4는 각 항만별 비저항과 양극 소모량과의 관계를 보여주고 있다. 비저항이 21Ω · cm 정도에서 양극 소모량이 증대하고 그 이상에서는 비교적 감소하는 경향은 있으나 현 측정치로서는 그 관계를 밝히기는 부족하다 하겠다.

Fig. 5는 각 항만별 산화 · 환원 전위와 양극 소모량과의 관계를 나타내고 있다. 산화 · 환원 전위와 양극 소모량과는 일정한 관계가 보이지 않고 있다.

이상의 결과를 통해서 각 항만별 해수 수질에 따른 부식 특성은 모두 다르다는 사실을 밝혀낼 수 있었다. 따라서 방식에 적용할 항만의 수질분석과 그 환경에서의 양극성능특성을 충분히 검토하지 않고 획일적인 양극전류효율 값으로 유전양극의

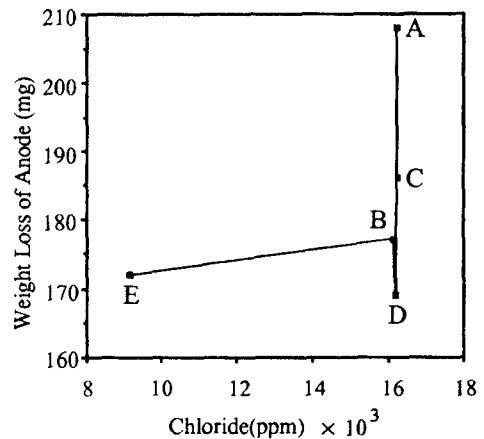


Fig.3 Relationship between Chloride and Weight Loss of Anode at each Pier Sea Water
(A : Ulsan 2nd Pier, B : Pusan 2nd Pier, C : Goangyang LPG Pier, D : Goangyang POSCO Product Pier, E : Mokpo Coal, Grains Pier)

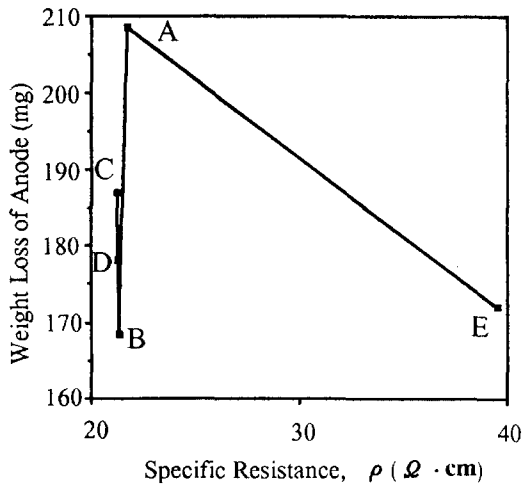


Fig. 4 Relationship between Specific Resistance and Weight Loss of Anode at each Pier Sea Water

(A : Ulsan 2nd Pier, B : Pusan 2nd Pier, C : Goangyang LPG Pier, D : Goangyang POSCO Product Pier, E : Mokpo Coal, Grains Pier)

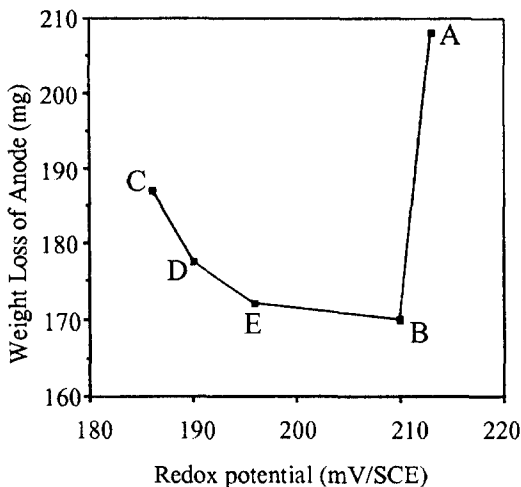


Fig. 5 Relationship between Redox Potential and Weight Loss of Anode at each Pier Sea Water.

(A : Ulsan 2nd Pier, B : Pusan 2nd Pier, C : Goangyang LPG Pier, D : Goangyang POSCO Product Pier, E : Mokpo Coal, Grains Pier)

갯수 및 수명들을 환산·설계하는 것은 커다란 모순과 오차를 가져오게 되며, 안전이나 경제적인 측면에 위험 및 과중부담을 초래 할 수 밖에 없다. 그러므로 음극방식 설계 시에는 이상의 내용을 충분히 고려해서 산출해야 할 것으로 생각된다.

3.2 강 구조물의 부식상태에 따른 분극 측정 비교 와 최적 방식전류밀도의 산출

최근 부식 방식에 대한 인식이 높아짐에 따라 신설구조물의 경우는 물론 초기 방식시설을 해 주지 않은 기존 구조물의 경우도 방식 설계 및 시공을 하는 경우가 증가하고 있는 추세이다. 반면, 대부분 상당히 부식이 진전되어 녹층이 두껍게 되어 있는 이들 구조물에 대한 방식을 신설구조물과 동일한 방법으로 설계하여 시공한 후 방식 전류 밀도를 확인하기 위해 측정하여 보면, 실제 필요한 방식전위값이 나오지 않아 곤란을 겪는 경우가 종종 있다. 따라서 이와 같은 문제점을 명확히 해석하고 방식설계에 필요한 최적의 방식 전류 밀도를 구하기 위해서 다음과 같은 실험을 실시하였다.

즉, 피방식체의 표면이 ①녹이 없이 깨끗한 상태, ②약간 녹이 슬어 있는 상태, ③두껍게 녹층이 형성되어 있는 상태의 3종류에 대해 분극 곡선을 측정하므로써 실제 방식전위를 유지하기 위한 그 방식전류밀도는 어떤 변화를 나타내는지 조사하였다.

Fig. 6은 각 시험편의 녹슨 면의 상태에 따른 분극 곡선의 변화를 나타내고 있다.

깨끗한 상태의 철 시험편은 전체적으로 용존산소의 활성화 분극에서 농도 분극으로 변화하여 급격하게 분극이 증대하는 반면에 녹슨 시험편과 두껍게 녹슨 시험편은 이미 형성된 녹층의 환원 반응과 용존산소의 활성화 분극이 함께 지속되어서 분극이 쉽게 증대하지 않는 현상을 나타내고 있다. 즉, -770mV/SCE 방식 전위에서 그 전류 밀도는 깨끗한 면이 $85\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 인데 비해서 두껍게 녹슨 시험편은 $1,000\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 높은 전류밀도 값을 보였다. Fig. 7은 각각의 녹면 상태에 따라 -770mV/SCE의 방식 전위를 유지하기 위한 음극 전류 밀도의 변화

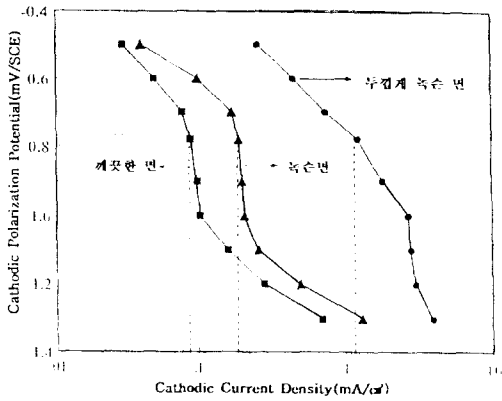


Fig. 6 Variation of Cathodic Polarization Curves for Rusted Specimens

- ① $2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH^-$
 $E = 1.229 + 0.015 \log P_{O_2} - 0.0591PH$
- ② $Fe^{2+} + 2e \rightarrow Fe$
 $E = -0.44 + 0.0295 \log [Fe^{2+}]$
- ③ $3Fe_2O_3 + 2H^+ + 2e \rightarrow 2Fe_3O_4 + H_2O$
 $E = 0.221 - 0.0591PH$

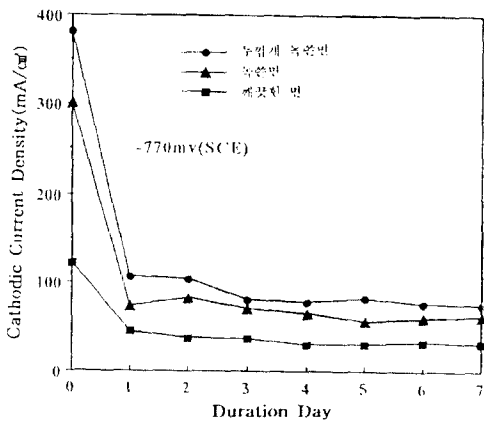


Fig. 7 Variation of Cathodic Current Density for Rusted Specimens as a function of Immersed days

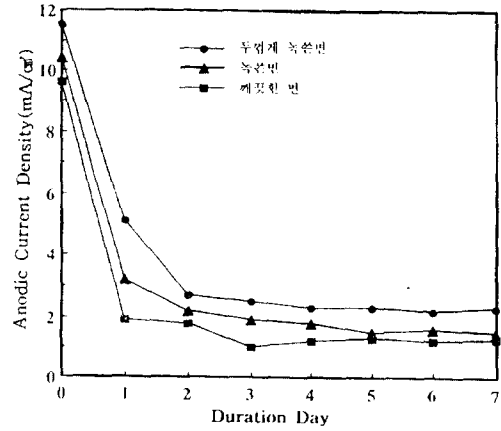


Fig. 8 Variation of Anodic Current Density for Rusted Specimens When Al Alloy Anode (Area : 1cm²) was Connected with Cathodic Specimens(Fe, Area : 18cm²)

를 측정 한 것이다. 전반적으로 시간이 경과됨에 따라 초기 전류보다 그 음극 전류는 급격하게 떨어지고 있음을 보이고 있다. 그러나 두껍게 녹슨 시험편은 깨끗한 시험편에 비해서 음극 전류가 높게 나타내고 있었다.

또한 Fig. 8은 양극과 음극을 연결하였을 때 양극에서 발생하는 전류 밀도의 변화를 나타내고 있다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모두가 시간이 경과함에 따라서 양극의 발생 전류 밀도는 급격하게 감소하고 있었고, 두껍게 녹슨 시험편이 깨끗한 시험편에 비해서 양극의 발생전류값이 높게 나타나고 있다.

이상의 실험 결과를 통해서 “녹이 슨 금속은 녹이 슬지 않은 금속에 비해서 많은 방식전류가 소요되므로 이에 따라 유전양극 갯수의 산정을 고려해야 한다” 는 사실을 해명하게 되었다. 즉 현재 방식 설계시 이용하고 있는 Table 1 공식에서 해수 중의 방식전류밀도도 초기치를 100mA/m²로 하고 최종치를 초기치의 0.5배로 획일적으로 환산 적용하는 것은 경우에 따라 잘못 될 수 있음 알 수 있었고 차후 실제 적용할 항만의 수질특성(해수비저항, 조류, 오염도 등)이나 피방식체인 강관구조물의 부식상태 등의 인자를 충분히 분석, 고려해

서 방식 설계해야 할 것이며, 항만 강관구조물을 음극 방식시 사용되는 유전양극의 성능과 갯수 그리고 수명산출에 강구조물의 상태나 각 항만의 환경적특성을 충분히 고려해야함을 제시하였다. 이를 위해 분극 시험 및 분석을 통하여 실질적인 최적음극 방식설계를 위한 중요한 개선방향을 제시하였다. 따라서 본 연구결과는 그 동안 외국 기술에만 주로 의존해온 종래 방식 설계의 약점을 보강하고 안전하고 경제적인 방식설계 개발을 위한 국내자체의 기술 축적에 한 역할을 할 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구인 “항만 강관구조물의 음극 방식설계개선방안에 관한 연구” 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 실험 대상항만 중 양극용해율이 가장 높은 곳은 수질이 가장 안 좋은 울산 제2부두였으며, 양극 용해율에 현저한 영향을 미치는 수질인자로는 비저항 보다도 오히려 pH의 영향이 큰 것으로 나타났다.

(2) 녹이 쓴 정도가 심한 강관구조물일수록 음극 방식에 더 많은 방식전류밀도를 필요로 했다.

(3) 방식설계시에는 해당 항만의 해수에 의한 양극부식특성과 실제 적용할 피방식체의 부식정도 등의 모든 인자를 충분히 고려하여 최적방식설계가 되도록 해야 할 것이다.

참고문헌

1. John Morgan, "Cathodic Protection(Second Edition)," pp. 113-184, NACE(1987)
2. H. H. Uhlig, & R. W. Revie, "Cathodic Protection", Corrosion and Corrosion Control, 3rd ed, John Wiley & Sons, pp. 217-232 (1985)
3. 田大熙, "腐蝕과 防蝕의 管理(補訂版)版, pp. 311-401, --中社 (1985)
4. 문경만, 김기준, 이명훈 등, "강관구조물의 방식대책에 관한 연구 용역" 해운항만청, pp. 315-375 (1995)
5. 日本腐蝕防蝕協會, "流電陽極試驗法", J SCE S-9301, pp. 13-17 (1993)
6. 김성중, "알루미늄합금 희생양극의 성능에 미치는 해수오염도의 영향에 관한 연구" 한국해양대학교 공학 석사 학위논문, pp.31-67(1997)