

工學博士學位 論文

海水 環境 및 被 防蝕體 表面狀態의 變化에
따른 港灣 鋼 파일 最適 陰極防蝕 設計

**On the Optimum Cathodic Protection Design
of Harbor Steel Piles in Terms of Sea Water
Environment Factors and Steel Pile Surface
Condition**

指導教授 文 慶 萬

2004年 8月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

材 料 工 學 科

鄭 景 水

< 목 차 >

< 목 차 >.....	i
< List of Figures >	iii
<List of Tables>.....	viii
< List of Photographs >	x
1. 서 론	1
2. 이론적 배경.....	4
2.1 부식의 기본이론	4
2.2 해수중 강 구조물의 부식특성과 방식법	19
2.2.1 해수의 성질	19
2.2.2 강구조물의 해양 부식특성	23
2.2.3 해수중 철강구조물의 부식에 미치는 영향 인자.....	26
2.2.4 해수중 강 파일의 방식법	31
2.3 강구조물 희생양극 방식설계상의 문제점.....	41
2.3.1 양극 전류효율의 문제점	41
2.3.2 양극발생전류 계산의 문제점	43
2.3.3 방식전류밀도 값의 문제점	44
2.3.4 설계 양극개수 산출의 문제점.....	47
2.3.5 등가직경(D) 계산의 문제점	47
2.3.6 방식설계에서 수질의 문제점	49
2.3.7 해양 강구조물 효율적인 방식설계 적용을 위한 시뮬레이션 연구	54
3. 연구결과 및 고찰	74
3.1 음극방식의 설계에 미치는 해수 환경인자 및 피 방식체 표면 상태의 영향	74
3.1.1 연구 배경 및 목적	74
3.1.2 시험편 제작 및 실험방법	74

3.1.3 실험결과 및 고찰.....	79
3.1.4 결과 요약.....	124
3.2 강 파일의 표면상태에 따른 희생양극소모량과 방식 전류밀도변 화.....	125
3.2.1 연구배경 및 목적.....	125
3.2.2 대형 실험조 제작 및 해상 실험장 제작.....	125
3.2.3 실험방법.....	127
3.2.4 실험결과 및 고찰.....	133
3.2.5 결과 요약.....	141
3.3 음극방식에 의해 강 파일에 유입한 방식전류가 인접한 강 파일 에 미치는 영향.....	142
3.3.1 연구배경 및 목적.....	142
3.3.2 실험 방법.....	142
3.3.3 실험 결과 및 고찰.....	148
3.3.4 결과 요약.....	159
4. 총괄 결론.....	160
참 고 문 헌.....	163

< List of Figures >

Fig. 2.1 Schematic diagram for corrosion reactions of metal in electrolyte.....	5
Fig. 2.2 Anodic and cathodic reactions by potential difference of two metals in sea water.....	7
Fig. 2.3 E-pH diagram of Fe-H ₂ O (298K, ion activity: 10 ⁻⁶ (mol/l)	12
Fig. 2.4 Polarization curve for Stern-Geary's equation.	17
Fig. 2.5 Polarization curve for Tafel's extrapolation method.....	18
Fig. 2.6 Relationship between salt concentration and dissolved oxygen affecting to corrosion rate of steel.	22
Fig. 2.7 Variation of corrosion rate for steel pile with depth of sea water.	24
Fig. 2.8 Impressed current cathodic protection method for steel pile in sea water.	35
Fig. 2.9 Polarization diagram of impressed current method.	36
Fig. 2.10 Sacrificial anode cathodic protection method for steel pile in sea water.	38
Fig. 2.11 Polarization diagram of sacrificial anode cathodic protection method.	39
Fig. 2.12 Shape of sacrificial anode.	48
Fig. 2.13 Relationship between grounding resistance and resistivity.	59
Fig. 2.14 Relationship between anode number, producing current and resistivity.....	60
Fig. 2.15 Relationship between anode number, producing current and resistivity.	61
Fig. 2.16 Relationship between anode life time and resistivity with variation of anode current efficiency.....	62

Fig. 2.17 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter	65
Fig. 2.18 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter	66
Fig. 2.19 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter	67
Fig. 2.20 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of resistivity.	68
Fig. 2.21 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of resistivity.	70
Fig. 2.22 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of anode length.	71
Fig. 2.23 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of anode length.	72
Fig. 3.1 Flow velocity of specimen surfaces in beaker (2ℓ) measured by P.I.V.	77
Fig. 3.2 Variation of corrosion potential of specimens (Fe, rusted Fe, Al) as a function of no stirring and stirring (3 cm/s) in sea water.	80
Fig. 3.3 Schematic diagram of experimental apparatus.....	82
Fig. 3.4 Cathodic and anodic polarization curves of specimens (Fe, rusted Fe, Al) in no stirring sea water.	83
Fig. 3.5 Cathodic and anodic polarization curves of specimens (Fe, rusted Fe, Al) in stirring sea water.	87
Fig. 3.6 Variation of cathodic polarization potential of Fe as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).	89

Fig. 3.7 Variation of anodic polarization potential of Al anode Fe as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).....	90
Fig. 3.8 Schematic diagram for potential difference ΔV and flowing current between Al anode and Fe cathode.	91
Fig. 3.9 Variation of flowing current between Fe and Al anodes as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).	93
Fig. 3.10 Variation of cathodic polarization potential of rusted Fe as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).	94
Fig. 3.11 Variation of anodic polarization potential of Al anode as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).	95
Fig. 3.12 Variation of flowing current between rusted Fe and Al anode as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).	97
Fig. 3.13 Weight loss rate of Al anode as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).....	99
Fig. 3.14 Variation of cathodic polarization potential as a function of specimens' surface conditions and no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).....	102
Fig. 3.15 Variation of anodic polarization potential as a function of specimens' surface conditions and no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).....	103

Fig. 3.16 Variation of flowing current between Fe (rusted Fe) and Al anode as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).	104
Fig. 3.17 Weight loss rate of Al anode as a function of specimen surfaces conditions and no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).	108
Fig. 3.18 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) with supplied current density of 100 mA/m ²	111
Fig. 3.19 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) with supplied current density of 50 mA/m ²	112
Fig. 3.20 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) with supplied current density of 200 mA/m ²	113
Fig. 3.21 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) with supplied current density of 250 mA/m ²	114
Fig. 3.22 Variation of supplied current density of Fe (rusted Fe) specimen at a constant cathodic polarization potential in no stirring sea water.	122
Fig. 3.23 Variation of supplied current density of Fe (rusted Fe) specimen at a constant cathodic polarization potential in stirring sea water.	123
Fig. 3.24 Schematic diagram of experimental apparatus with sea water vessel.	126
Fig. 3.25 Variation of cathodic polarization potential with rusted steel pile and steel pile specimen in case of cathodic protection by Al anode in natural sea water for 10 days.	134

Fig. 3.26 Variation of anodic polarization potential of Al anode used with sacrificial anode in natural sea water vessel for 10 days.....	135
Fig. 3.27 Variation of generating current density between Al anode and rusted steel pile and steel pile specimen in natural sea water for 10 days..	136
Fig. 3.28 Weight loss rate of Al anode used with sacrificial anode for rusted steel pile and steel pile specimen in natural sea water vessel for 10 days.	137
Fig. 3.29 Schematic diagram of experimental equipment for measuring the protection current density at sea.....	139
Fig. 3.30 Variation of corrosion protection current density of rusted steel pile and steel pile specimen immersed in sea for 100days.....	140
Fig. 3.31 The size of cathode, anode and reference electrode.....	145
Fig. 3.32 Schematic diagram of steel pile, Al-anode and reference electrode.	146
Fig. 3.33 Test rack of steel piles (cathode) test rack with ID number and dimension.....	147
Fig. 3.34 Variation of cathodic polarization potential for various steel piles with increasing of submerged day.	147
Fig. 3.35 Variation of anode producing current with increasing of measured day.....	147
Fig. 3. 36 Variation of cathodic polarization potential for nine steel piles with time	156
Fig. 3. 37 Variation of cathodic polarization potential for nine steel piles with time	157
Fig. 3. 38 Variation of anodic current with time for CA1 and CA9	158

<List of Tables>

Table 2.1 Standard potentials for various metal-ion, gas or redox electrodes vs SHE at 25 °C	10
Table 2.2 The main ions in sea water	20
Table 2.3 Electric resistance of sea water	21
Table 2.4 Example of analysis of sea water quality with contamination degree	21
Table 2.5 Criterion for contamination of sea water	22
Table 2.6 Variation of corrosion rate for carbon steel in various environments (mm/yr)	24
Table 2.7 Character of environment & corrosion in 6 zones of steel pile in sea water	25
Table 2.8 The corrosion factors for carbon steel in sea water.	28
Table 2.9 Change of water quality by pollution in natural sea.....	30
Table 2.10 Coating protection method.	32
Table 2.11 Comparison between sacrificial anode method and impressed current method.	40
Table 2.12 The data of protection current density and characteristics of Al sacrificial anode	42
Table 2.13 Protection current densities for cathodic protection of steel pile in worldwide ports	46
Table 2.14 Analysis of sea water quality in two piers of Japan	51
Table 2.15 Comparison of design factors for cathodic protection	52
Table 2.16 Equations for cathodic protection design	56

Table 2.17 The data obtained from simulation by using equation of protection design for various type of anode	58
Table 2.18 The data obtained from simulation by using equation of protection design with variation of anode size and resistivity	64
Table 3.1 Composition of aluminium alloy anode specimen	78
Table 3.2 The analyses of sea water used in this study	78
Table 3.3 I_{corr} and R_p of Fe, rusted Fe and Al alloy anodes.....	86
Table 3.4 Cathodic polarization potential of various steel piles and anodic producing current between CA1, CA9 and Al anode	149
Table 3.5 The cathodic polarization potentials for nine steel piles and the anodic current for CA1 and CA9.....	155

< List of Photographs >

Photo. 3.1 Photographs of specimen surfaces.	75
Photo. 3.2 Photographs of rusted Fe specimen surfaces as a function of flow velocity.	98
Photo. 3.3 Photographs of sacrificial anode protection method experimental apparatus.	101
Photo. 3.4 Photographs of Fe (rusted Fe) specimen surfaces as a function of nonstirring (stirring) with Al anode in BUSAN sea water.	106
Photo. 3.5 Photographs of Al anode specimen surfaces as a function of nonstirring (stirring) in case of galvanic cell with Fe (rusted Fe) in BUSAN sea water.	107
Photo. 3.6 Photographs of experimental apparatus supplying the cathodic current.	110
Photo. 3.7 Photographs of Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.	115
Photo. 3.8 Photographs of Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.	116
Photo. 3.9 Photographs of rusted Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.	118
Photo. 3.10 Photographs of rusted Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.	119
Photo. 3.11 Photographs of Fe (rusted Fe) specimen surfaces and cross section.	129
Photo. 3.12 Photographs of Al anode specimen surfaces after used for 10 days with sacrificial anode.	131

Abstract

With the rapid development of industry corrosion of steel structures exposed to the severe environment has generated numerous social and economical problems in the economical point of view. Furthermore, it has been revealed that the economical loss by corrosion of steel structures was approximately 2~4% of GNP in the U.S. in 1998. Although in Korea, the percentage of the economical loss by the corrosion was not clearly verified, it was assumed that the loss would be much greater than the U.S'. Therefore a corrosion control is being generally accepted as important issue not only in economical point of view but also in safety reason and those steel structures should be protected by an optimum protection method. And there are many protection methods for steel structure; one of them is a cathodic protection including both impressed current method and sacrificial anode method, which are being mainly used for steel structures in marine environment.

Recently, the corrosion property of sea water was being changed the increase of environmental contamination, so the optimum protection design should be changed corresponding to some parameters such as degree of contamination, temperature, velocity (flow rate) of sea water and surface condition of steel structure.

In this study, the optimum protection design for steel structures in marine environment was investigated with some parameters such as variation of supplied cathodic current density, surface condition of cleaned or rusted and solution state of stirring or no stirring through the simulation technology, followed by both laboratory and field experiment.

Chapter. 3.1 is to investigate the optimum protection potential and protection current density with some parameters such as variation of supplied cathodic current density, surface condition of cleaned or rusted and solution state of stirring or no stirring.

The corrosion current density of the rusted surface was considerably small compared to the cleaned one and the cathodic polarization potential of cleaned specimen was more negative than that of the rusted one at the same applied cathodic current density.

However the protection potential of cleaned specimen was below -770 mV (SCE), on the other hand its potential of the rusted one was lower than -700 mV (SCE) irrespective of solution stirring condition and in the case of no stirring condition, the protection current density was 100 mA/m² at both cleaned and rusted specimens, however, it was revealed that the protection current density in stirring condition was about 200 mA/m² due to increasing of oxygen diffusion on the cathode surface. It is suggested that the optimum protection potential and current density should be controlled by the surface condition of structures as well as solution stirring condition.

Chapter 3.2 is to reconfirm the experimental results of chapter 3.1 by field experiment. As the results of chapter 3.2, the consumption rate and producing current of anode in the case of rusted steel pile was much greater than the cleaned steel pile and the applied current density for protection potential (-770 mV (SCE)) was also much larger compared to the cleaned steel pile.

Chapter 3.3 is to investigate the variation of anode producing current and cathodic polarization potential of some steel piles in case of their steel piles was protected by sacrificial anode in field experiment. When some steel piles electrically connected with the other adjacent piles which was protected or not by sacrificial anode was being also cathodically protected by sacrificial anode, anode producing current between sacrificial anode and their steel piles was varied with corresponding to whether the other adjacent piles were cathodically protected because anode producing current was consumed to the other adjacent piles for protection or saved due to their steel piles were protected slightly by other anode producing current between sacrificial anode and the other adjacent piles for protection. Therefore it is suggested that life time of sacrificial anode for some steel

piles protection can be also varied with increasing or decreasing of anode producing current according to the other adjacent piles' protection or not.

Consequently it is concluded that for the optimum protection design, the surface condition as well as the contamination degree of sea water should be considered to determine some factors such as life time, current efficiency and protection current density.

1. 서 론

지금 21C 인류의 마지막 프론티어인 해양개발에 대한 세계 각 국의 경쟁이 심화되고 있는 가운데, 주요 연안국은 자국 해양관할권을 강화하고 있으며, 대형 항만을 중심으로한 국제물류체제가 정착되고 해운기업의 전 세계에 걸친 경영이 보편화 되는 등 세계화, 개방화는 이미 거스를 수 없는 시대적 대세를 형성하고 있다.

초기의 항만시설은 석조물(石造物)이 대부분이었으나, 시멘트의 출현으로 철근과 콘크리트를 이용한 항만시설이 많이 건설되었고, 최근에는 강관 Pile을 사용한 항만시설이 주로 건설되고 있다. 강관 Pile은 시공이 간편하고 강도 면에서 많은 장점이 있는 반면, 염분이 많은 해수 중에서의 큰 부식성(腐蝕性)이 단점으로 지적되어 왔다. 특히 항만 구조물은 해양, 담수, 토양 등의 pH가 거의 중성인 환경에 노출되어 있으며 더욱이 염분 량이 부식 속도의 최대치를 기록하는 3% 내외에 있으므로 언제나 가혹한 부식 환경에 노출된 상태에 놓여져 있다. 따라서 이러한 항만 구조물은 적절한 방법으로 방식 하지 않으면 안 되는 불가피한 상황에 놓여 있다.

또한 산업사회의 급격한 발전과 함께 가혹한 육상과 해상의 부식환경에 노출되어 있는 철강 구조물들의 부식문제는 심각한 사회문제로 대두되어 이미 선진국인 미국, 일본 등의 경우에는 GNP의 2~4%의 경제적 손실을 가져오고 있는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 우리 나라의 경우도 예외 일 수 없으며 산업사회의 양적인 팽창 후에 일어난 성수대교 붕괴(1994년), 당산철교 철거(1997년), 가스누출 및 폭발사고, 노후수도관의 누수현상, 노후 저유 탱크의 누유로 인한 심각한 환경오염, 노후 빌딩의 부식으로 인한 붕괴위험 등 일련의 안전사고도 모두 부식에 의한 국내 피해사례로 커다란 경제적 손실이 아닐 수 없다.

이러한 부식문제의 해결 방법으로는 대기 중에서는 도장, 도금, Taping, Sealing 등의 피복방식 법에 의존하고 있으며, 해수 중에는 이 피복방식법과

함께 전기방식법이 병용되고 있다. 전기방식법에는 외부전원법과 희생양극법이 있으며 각각의 장단점이 있으므로 방식대상물의 주위 환경여건에 따라서 적절한 방식법을 결정하고 있다.^{3~13)}

우리 나라는 1978년 여천 삼일항 부두를 시작으로 외국의 문헌과 기술 협조를 얻어 항만 구조물에 음극방식 공법을 적용해 왔다. 한편 근년 들어 대기오염에 의한 산성비와 환경오염에 의한 해수의 부식 특성이 많이 달라졌음에도 불구하고 아직도 20~30년 전부터 적용해 오던 음극방식 설계법을 상기한 항만의 특수한 부식환경을 고려하지 않은 채 지금도 같은 원리를 적용하고 있는 것이 사실이다. 최근 조사한 보고에 의하면 우리 나라에도 전국 각 항만 해수 오염도의 차이가 나고 있고 특히 울산항의 경우 희생양극의 실제 수명이 설계수명 보다 훨씬 단축되는 사례가 발생하고 있는 실정이다.²⁶⁾ 그러나 일본에서는 1984년부터 5년간에 걸쳐서 전국 항만 부두의 부식 실태를 조사하고 방식 설계에 대한 새로운 수정 보완책을 제시하고 있다.¹⁾ 이것은 각 항만마다 해수 유속의 세기가 틀리고 육상으로부터 해안으로 유입되는 하천수 및 공장 폐수 등의 영향으로 오염되어 항만 주위의 해수가 전국 항만마다 각각의 다른 부식 특성을 나타내고 있기 때문이다. 또한 미국이나 영국, 노르웨이와 같은 선진국의 경우에 있어서도 실제 방식대상 환경 중 부식특성에 영향을 주는 해수 용해 성분이나 유속 등의 변화를 측정하고 그 지역 특성에 따른 방식전류밀도 등을 산정하여 음극방식 설계를 진행하는 상황에 있다. 한편, 이상에서 언급한 선진국들 경우의 음극방식 설계에 관한 설정기준의 근거를 살펴 보면, 주로 직접적으로 방식대상 지역을 중심으로 얻어낸 현장 데이터 혹은 장기간에 걸친 경험적인 노하우를 바탕으로 음극방식 설계에 있어서 기본적으로 중요한 방식전류 밀도나 양극전류 효율 등이 산출되는 것으로 보고되고 있다.

국내의 경우에 있어서는 효율적인 음극방식 설계에 관한 연구가 부분적으로 진행된 것도 보고되고 있으나 최적 음극방식 설계를 위한 전반적인 검토 연구는 거의 없는 상태로써 이에 대한 연구가 시급히 요구되고 있는 상태이다.

본 연구에서는 해양 강구조물의 최적 음극방식 설계를 위하여 현행 국내에서 적용하고 있는 음극방식 설계공식 및 절차에 관한 검토 시뮬레이션은 물론 환경오염도, 유속 및 피 방식체 표면상태 등의 제반 인자가 방식전류 밀도나 희생양극 효율 등의 전반적인 음극방식 설계에 미치는 관계를 해명하고자 하였다.

즉 본 연구는 실험실 실험과 현장실험을 구분하여 다음과 같이 진행하였다. 우선 실험실 실험의 제1단계로 양극의 형상과 비 저항 및 양극효율의 변수에 따른 접지저항과 양극발생전류 및 예상수명의 변화에 대해서 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 또한 제2단계에서는 피 방식 체의 표면상태를 달리하였을 경우, 유속의 변화와 공급 전류밀도 변화에 따른 양극 소모량의 변화 그리고 최적 방식전위와 방식 전류밀도 변화 등을 고찰하였다. 그리고 제3단계에서는 제1,2단계의 내용을 근거로 하여 현장실험 위주로 진행하였다. 즉 강 파일의 표면상태를 달리하여 희생양극에 의해 음극방식을 하였을 경우 양극과 음극의 분극전위 변화와 양극 소모량 변화 등에 대해서 고찰 하였다.

따라서 본 연구의 결과는 희생양극법에 의해서 항만 구조물을 음극방식 할 경우 유속과 강의 표면상태에 따라 양극 소모량, 예상수명 최적 방식전위와 방식전류밀도 등을 결정하는 방식설계에 유익한 실용지침을 제공할 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

2.1 부식의 기본이론

금속재료는 인위적으로 가공 에너지를 공급하여 만든 재료이기 때문에 금속 구조물로 형태를 유지하고 있으나 원래의 안정한 상태 즉, 금속산화물로 되돌아가려는 본능을 가지고 있다. 그러나 금속이 주위 환경과 반응하여 초기의 산화물상태로 회귀하기 위해서는 외부환경과 반응하여야만 하는데 이때 환경과 금속간에 다음과 같은 조건이 충족될 때 산화물 즉 부식이 발생한다.^{14,15)}

첫째, 양극과 음극이 존재하여 전지(corrosion cell)를 형성해야 한다.

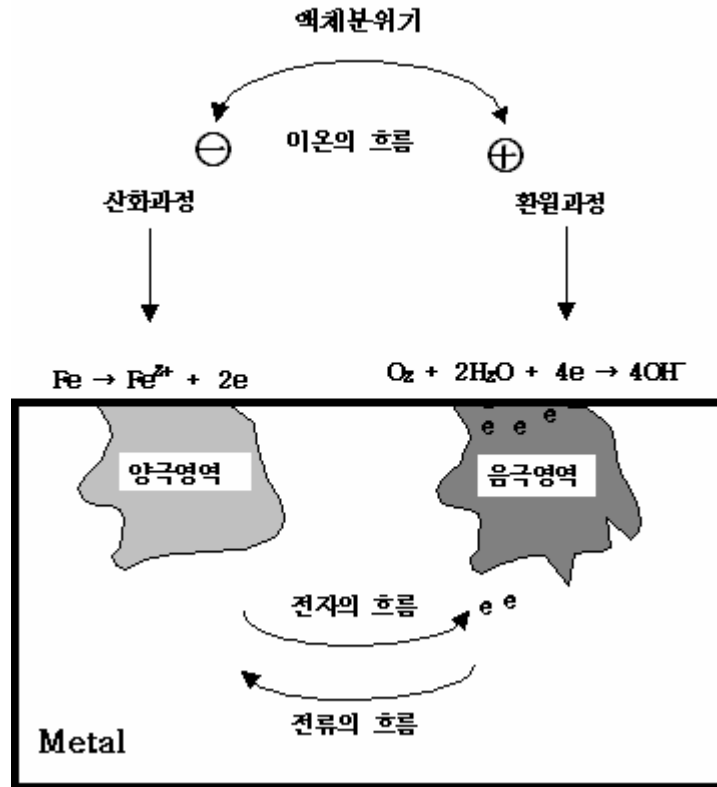
둘째, 양극과 음극이 전기적으로 접촉하여 전자의 이동이 있어야 한다.

셋째, 전해질이 존재하여 양극과 음극 사이에서 이온의 이동에 의한 전하의 운송이 있어야 한다.

위 조건들을 그림으로 나타내면 Fig. 2.1과 같다. Fig. 2.1에서 알 수 있듯이 부식이 일어나기 위해서는 상기의 모든 조건이 모두 충족되어야만 하는데 여기에서 양극(Anode)이란 이온화 경향이 커 전류를 금속에서 용액으로 유출하는 전극을 말하며, 음극(Cathode)이란 상대적으로 이온화 경향이 작고 안정하여 용액 측으로부터 금속 측으로 전류가 유입되는 전극을 말한다.

즉, 양극이란 식 2.1과 같이 금속(M)의 용해반응에 의해 이온화되는 전극(산화하는 전극)을 말하며, 음극이란 식 2.2와 같이 양극으로부터 용해된 이온이나 전해질 내에 있던 양이온이 전자와 반응하여 환원 석출하는 전극을 말한다.





※부식의 발생 조건

1. 양극(Anode)
2. 음극(Cathode)
3. 전해질(Electrolyte)
4. 전자전도체(Electric conductor)
5. 폐쇄회로(Closed circuit)

Fig. 2.1 Schematic diagram for corrosion reactions of metal in electrolyte.

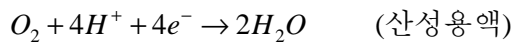
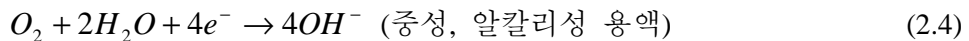


일례로 해수 중에 침지된 강의 표면에서 일어나는 부식현상을 살펴보면 다음과 같다. 전해질로 작용하는 해수는 다량의 이온과 약 8 ppm의 산소를 포함하는 전해질로서 작용한다. 이때 강구조물의 표면에서는 금속재질의 불 균일(동일상이 아닌 2상이 존재)이나 표면 거칠기의 차이, 금속응력의 불 균일, 표면의 오염도 등과 같은 금속학적인 원인으로 전위차가 생기게 되며, 양극(낮은 이온화 에너지 상태, 이온화 경향이 큼)과 음극(상대적으로 이온화 에너지가 높은 곳)으로 나누어지게 된다.

양극에서는



의 산화반응이 일어나고 음극에서는 식 2.4와 같이 중성 및 알칼리성 용액에서는 용존산소의 환원반응이 발생하며 산성용액의 경우에는 수소가 발생되면서, 양극부위에서는 계속적으로 부식이 발생하게 된다.



이와 같이 해수에 침지된 강이 부식되는 현상은 양극과 음극의 에너지 차(전위 차)가 원인이 되며 에너지 차가 줄어드는 안정한 상태로 회귀하기 위하여 끊임없이 위의 두 반응이 진행하게 됨으로써 부식이 일어나게 된다. 여기에서 중요한 사실은 산화와 환원반응이 두 극에서 안정한 상태로 진행해 갈 동안 양극반응과 음극반응이 평형에 도달하여 부식이 발생되지 않을 듯이 보

이나 양극과 음극의 전위차는 반드시 존재하게 되므로 부식은 끊임없이 일어나게 된다. 한편 종류가 다른 두 종류의 금속, 즉 이종금속간의 접촉이 있을 때는 Fig. 2.2와 같이 높은 이온화에너지 상태의 금속이 음극이 되고 상대적으로 낮은 에너지상태의 금속이 양극이 되어 부식전지가 형성되고 양극에서 부식이 발생한다.

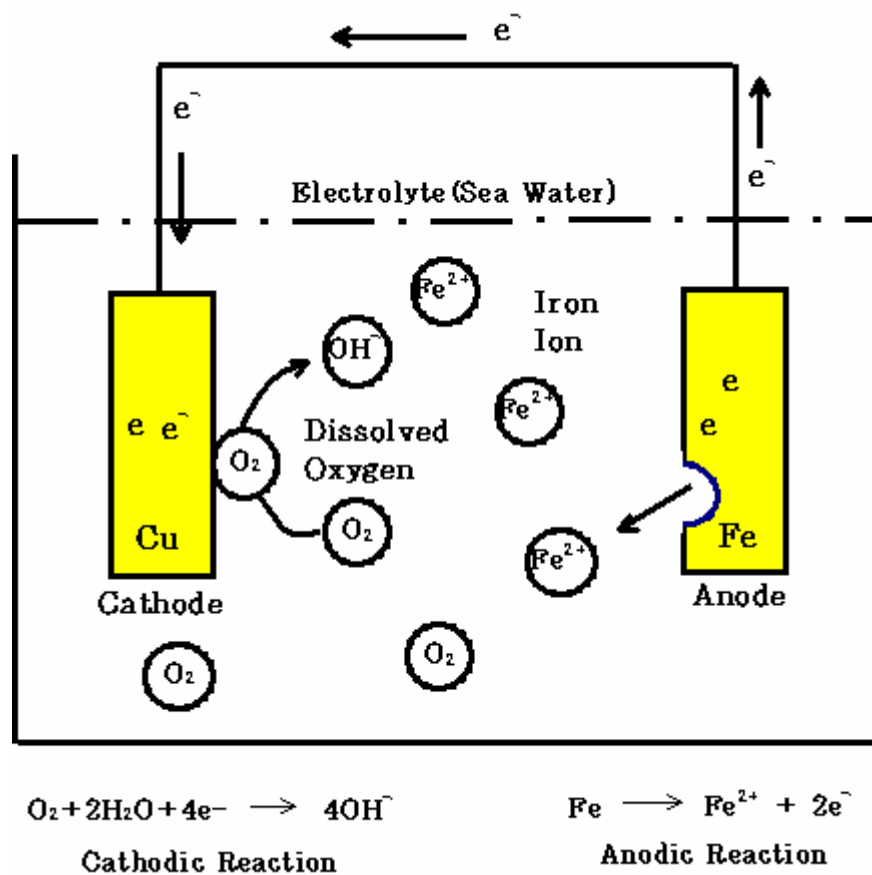


Fig. 2.2 Anodic and cathodic reactions by potential difference of two metals in sea water.

2.1.1 전위(Potential)

물질을 이루는 원자들이 고유한 에너지를 갖고 서로 결합하고 있다. 금속이 물질로 존재하는 이유나 산화, 환원반응이 일어나는 이유도 이 에너지가 다른 형태로 변하는 에너지의 변동에 기인한다고 사료된다.¹⁶⁾

금속이 주위 환경과 반응하여 부식되는 현상은 이러한 에너지개념을 전극전위로 나타냄으로써 이해되고 있다.



$$\Delta G = -nF\Delta E \quad (2.6)$$

즉, 금속 M의 상태에서 금속이온(M^{n+})의 상태로 변할 때의 에너지변화 ΔG 와 에너지상태의 변화를 유발하는 구동력 ΔE (이 경우 통상 E로 표기한다.)의 상관관계로 나타낸다. 식(2.5)와 같이 금속이 수용액에서 반응하고 있을 때 전극반응의 전위를 Nernst식으로 표시하면 다음과 같다. 금속이온이 포함된 수용액에서 금속이온의 농도가 변하면 농도의 변화만큼 그 금속의 전위 또한 달라지게 되는데, 이온의 경우 화학포텐셜은

$$\mu = \mu^0 + RT \ln a \quad (2.7)$$

이다. 수용액 계면에서의 금속과 금속이온의 전체 에너지변환을 고려해야 하기 때문에 위의 식(2.5) 반응의 경우는

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[M^{n+}][e^{-}]^n}{[M]} \quad (2.8)$$

으로 나타낼 수 있으며, $[e^{-}]$ 와 $[M]$ 은 규약에 의해 unity로 간주하게 된다. 그러므로 상기 식은

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln[M^{n+}] \quad (2.9)$$

이 된다. 여기에 $E = -\frac{\Delta G}{nF}$ 를 대입하면

$$\begin{aligned} E &= E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \left\{ \frac{\text{산화형의 활동도}}{\text{환원형의 활동도}} \right\} \\ &= E^0 + \frac{0.0591}{n} \log \left\{ \frac{\text{반응물의 활동도}}{\text{생성물의 활동도}} \right\} \\ &= E^0 + \frac{0.0591}{n} \log \frac{[M^{n+}]}{[M]} \end{aligned} \quad (2.10)$$

n: 반응에 관여한 전자의 수

F: 패러데이상수 (96,487 C/mol),

R: 기체상수 (8.314 J/mol K)

T: 절대온도

와 같은 에너지 차를 전위 값으로 나타내는 Nernst식을 얻을 수 있다. Nernst식에서 구한 금속의 반응구동력인 전위(E)는 평형전위라고 하는데 식 (2.10)에서 1 atm, 25 °C, 금속이온 1 mol 상태에서 구한 전위를 표준전극전위(E^0)로 나타내고 있다. 일례로 Fe의 표준전극전위를 구해보면 다음과 같다.

$$\mu_{Fe^{++}}^0 \text{ (Standard chemical potential)} = 20,300cal \quad (2.11)$$

$$E = -20,300cal / nF \quad (2.12)$$

$$(n = 2), (1F = 96,484coulombs)$$

$$E = \frac{-20300 \times 4.2 J}{2 \times 96500 C} = -0.44$$

이와 같이 구한 각종전극의 표준전위를 Table 2.1에 나타내었다.¹⁷⁾

Table 2.1 Standard potentials for various metal-ion, gas or redox electrodes vs SHE at 25 °C ¹⁷⁾

전극 계	전극 반응	E°/V
Au ³⁺ /Au	Au ³⁺ +3e ⇌ Au	+ 1.50
Cl ⁻ /Cl ₂	Cl ₂ +2e ⇌ 2Cl ⁻	+ 1.3595
O ₂ /H ₂ O	O ₂ +4H ⁺ +4e ⇌ 2H ₂ O	+ 1.229
O ₂ /OH ⁻	O ₂ +2H ₂ O+4e ⇌ 4OH ⁻	+ 0.401
Pt ²⁺ /Pt	Pt ²⁺ +2e ⇌ Pt	+ 1.20
Pd ²⁺ /Pd	Pd ²⁺ +2e ⇌ Pd	+ 0.987
Ag ⁺ /Ag	Ag ⁺ +e ⇌ Ag	+ 0.799
PbO ₂ /PbSO ₄	PbO ₂ +SO ₄ ²⁻ +2H ⁺ +2e ⇌ PbSO ₄ +2H ₂ O	+ 1.685
Hg ₂ ²⁺ /Hg	Hg ₂ ²⁺ +2e ⇌ 2Hg	+ 0.789
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	Fe ³⁺ +e ⇌ Fe ²⁺	+ 0.77
Cu ⁺ /Cu	Cu ⁺ +e ⇌ Cu	+ 0.521
Cu ²⁺ /Cu	Cu ²⁺ +2e ⇌ Cu	+ 0.337
Sn ⁴⁺ /Sn ²⁺	Sn ⁴⁺ +2e ⇌ Sn ²⁺	+ 0.15
Pt/H₂/H⁺	2H⁺+2e ⇌ H₂	0.0
Pb ²⁺ /Pb	Pb ²⁺ +2e ⇌ Pb	- 0.126
Sn ²⁺ /Sn	Sn ²⁺ +2e ⇌ Sn	- 0.136
Ni ²⁺ /Ni	Ni ²⁺ +2e ⇌ Ni	- 0.250
Co ²⁺ /Co	Co ²⁺ +2e ⇌ Co	- 0.277
Cd ²⁺ /Cd	Cd ²⁺ +2e ⇌ Cd	- 0.403
Fe ²⁺ /Fe	Fe ²⁺ +2e ⇌ Fe	- 0.44
Cr ³⁺ /Cr	Cr ³⁺ +3e ⇌ Cr	- 0.74
Zn ²⁺ /Zn	Zn ²⁺ +2e ⇌ Zn	- 0.76
Nb ³⁺ /Nb	Nb ³⁺ +3e ⇌ Nb	- 1.10
Ti ²⁺ /Ti	Ti ²⁺ +2e ⇌ Ti	- 1.63
Al ³⁺ /Al	Al ³⁺ +3e ⇌ Al	- 1.662
Mg ²⁺ /Mg	Mg ²⁺ +2e ⇌ Mg	- 2.363
Na ⁺ /Na	Na ⁺ +e ⇌ Na	- 2.714
Ca ²⁺ /Ca	Ca ²⁺ +2e ⇌ Ca	- 2.870
K ⁺ /K	K ⁺ +e ⇌ K	- 2.925
Li ⁺ /Li	Li ⁺ +e ⇌ Li	- 3.045

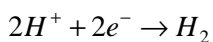
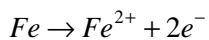
2.1.2 전위-pH도

어떤 일정한 온도에서 금속, 금속이온 및 금속화합물이 안정하게 존재하는 전위와 pH 영역을 나타낸 상태도를 전위-pH도라고 한다.¹⁸⁾ 일반적인 철의 전위-pH도를 나타내면 Fig. 2.3과 같다.

실선(이하 경계선)은 상하, 좌우로 표시되어 있는 화학종간의 평형전위와 pH를 나타낸 선이다. 경계선으로 구별되는 각 영역은 대응하는 화학종의 존재 상태에 따라 불활성역(Immunity), 부식역(Corrosion), 부동태역(Passivity)으로 분류된다. Fig. 2.3의 Fe로 표시된 영역은 철이 금속상태에서 안정하다는 뜻으로 부식이 일어나지 않는 불활성역이며, Fe^{2+} , Fe^{3+} , $HFeO_2^-$ 로 표시된 영역은 철이 가용성 이온상태에서 안정한, 즉 부식이 일어나는 부식역을 뜻한다. 반면에 산화물이나 수산화물 등 난용성(難溶性) 금속화합물이 안정한 영역을 부동태역이라고 하는데 그림의 Fe_2O_3 , Fe_3O_4 로 표시한 부분에 해당된다. 점선 ㉠과 ㉡는 각각 수소발생반응의 평형전위와 산소발생반응의 평형전위를 뜻한다.



임의의 pH에서 침지된 철의 전위가 점선 ㉠보다 낮으면 수소가스가 발생하고, 점선 ㉡보다 높으면 산소가스가 발생한다. 임계선 ㉠은 pH와는 관계없이 점선 ㉠보다 비(卑)한 전위 값을 나타낸다. 그것은 수소발생반응과 철의 용해반응이 동일한 전위(Half cell에서)에서 일어나는 것을 의미하며 용존산소 등의 산화제나 안정한 착화제가 없는 산성수용액에 침지 될 경우, 식(2.14)와 같이 수소가스가 발생되면서 용해하는 것을 의미하게 된다.



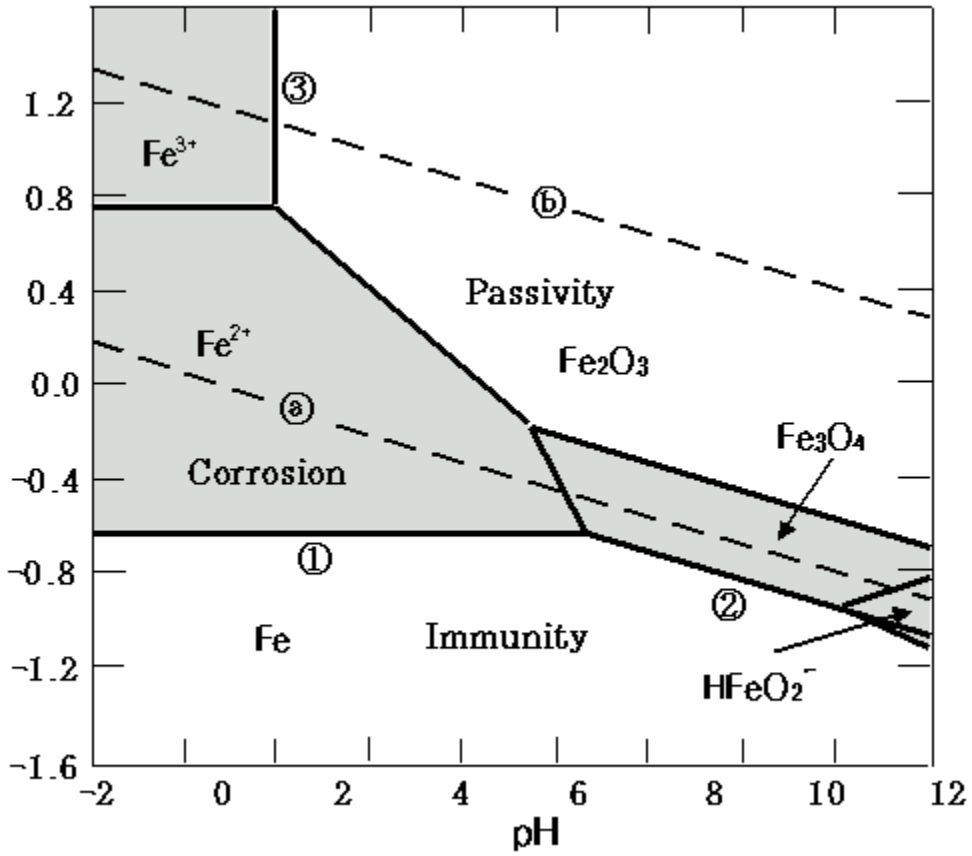
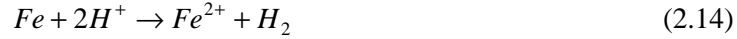
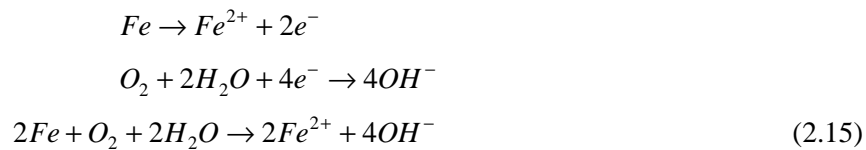


Fig. 2.3 E-pH diagram of Fe-H₂O (298K, ion activity: 10⁻⁶ (mol/l)).¹⁸⁾



그러나 산성수용액 중에 어떤 일정한 농도 이상의 산소가 용존한다면 철의 전위는 점선 ㉠보다도 높게 되어 식(2.14)와는 달리 식(2.15)과 같은 철의 산화반응과 용존산소의 환원반응으로 일어나게 된다.



이와는 비교되어 구리와 같이 어떤 pH에서의 부식전위가 수소발생반응의 평형전위보다 높은 금속은 용액 중에 산화제나 착화제가 존재하지 않는 한 수소발생형 부식은 일어나지 않는다. 그러나 금속의 전기화학반응은 임계선(Fig. 2.3의 line ①과 같은)을 중심으로 어떤 영역에서 일어나는 반응으로서 그 순간에 측정되는 전위는 전기화학반응의 상태인, 즉 부동태 영역 반응, 활성화 영역 반응, 그리고 불활성 영역의 반응인지를 확인할 수 있는 데이터가 된다.

그러므로 그림에서 철의 용해반응과 수소의 발생반응이 동일 전극에서 진행된다면 반쪽전극 반응(half cell reaction) 들의 복합전극반응인 혼성전위(부식전위)로서 나타나게 된다. 분극곡선도 상에서 말하는 분극전위도 동일한 개념의 전위이다.

2.1.3 분극(polarization)

평형상태에 있는 전극의 전위(가역전위)에서나 혹은 비 평형상태에 있는 전극의 전위인 부식전위(비 가역전위)에서 외부로부터 인위적으로 전류를 공급받게 되면 전위는 귀 방향(전극이 양극으로 작용할 때) 혹은 비 방향(전극이 음극으로 작용할 때)으로 변하게 된다. 이렇게 인위적으로 전극의 에너지상태를 변화시킬 때 전위가 변하는 현상을 분극(polarization)이라고 하고 변한 전위

를 분극전위(polarization potential), 변한 전위량($E - E_0$)을 과전압(over potential, over voltage, η)이라고 한다. 분극전위와 부식전위가 다른 점은 분극전위에서는 외부에서 인위적으로 전류를 공급 받았기 때문에 공급된 양만큼 양극전류(i_a)와 음극전류(i_c)의 크기 차가 발생하는데 비해, 부식전위에서는 양극전류와 음극전류의 크기가 서로 같은 값을 나타낸다. 즉 분극전위는 외부에서 전류를 공급하여 인위적으로 금속의 에너지를 변화시킨 상태이며 부식전류는 수용액 상태에서 자연적으로 일어나는 전기화학반응에 의해 양극과 음극의 에너지 상태가 같은 다시 말해서 반응속도가 동일한 상태이다.

따라서 인위적으로 부식 계에 에너지를 공급하여 일어나는 분극(polarization) 현상은 부식 계에서 장시간에 걸쳐 발생할 수 있는 반응들에 대한 정보를 단시간에 얻게 해 주는 일련의 과정으로서 현재로서는 대단히 유용한 분석방법이 되고 있다. 즉, 부식반응이 진행되고 있는 활성화 단계에서는 활성화분극(activation polarization)을 측정하여 부식진행 속도를 알아낼 수 있고, 금속/전해질 계면에서의 농도 차로 인하여 발생하는 농도분극(concentration polarization)을 고찰함으로써 물질의 이동과 저항성을 알 수가 있다. 또한 인위적으로 에너지를 가하여 금속표면을 산화시킬 경우(양극분극시킬 경우)에는 산화피막이 부식에 대한 저항성을 어느 정도 나타내는지를 저항분극(resistance polarization)으로 추정할 수가 있다.

분극현상을 통해 부식 계의 정보를 얻는 방법은 1905년에 들어 Tafel에 의해서 금속의 용해반응과 수소발생반응이 활성화분극에 지배 받는다는 것이 확인되면서부터였다. 비록 당시에는 실험에 의해 고찰된 실험식이었을 뿐이었으나 그 후 Butler와 Volmer, 두 학자에 의해 이론적으로 정립이 되어 현재에 이르고 있다. 위의 분극거동에 대한 대표적인 이론 식을 아래에 나타내면 다음과 같다.¹⁸⁾

1) Butler- Volmer 식

$$i = i_{cor} \left(\exp \frac{-\alpha n F \eta_c}{RT} - \exp \frac{-(1-\alpha)n F \eta_c}{RT} \right) \quad (2.16)$$

$$(\eta_c = E - E_{cor})$$

만약 과전압이 -10mV이하일 경우에는 ($e^x = 1 + x$) 이므로

$$\begin{aligned} i &= i_{cor} \left(\left(1 - \frac{\alpha n F \eta_c}{RT} \right) - \left(1 + \frac{(1-\alpha)n F \eta_c}{RT} \right) \right) \\ &= i_{cor} \frac{-n F \eta_c}{RT} \end{aligned}$$

$$\therefore i_{cor} = \frac{RTi}{nF\eta_c}, \left(R_p = \frac{\eta_c}{i} = \frac{RT}{nFi_{cor}} \right) \quad (2.17)$$

2) Stern-Geary 식

A. 과전압이 -20mV ~ -50mV 일 경우

$$i = i_{cor} \left(\exp \frac{-\alpha n F \eta_c}{RT} - \exp \frac{-(1-\alpha)n F \eta_c}{RT} \right)$$

$$= i_{cor} \left(10^{\frac{-\alpha n F \eta_c}{2.3RT}} - 10^{\frac{(1-\alpha)n F \eta_c}{2.3RT}} \right)$$

$$= i_{cor} \left(10^{\frac{-\eta_c}{\beta_c}} - 10^{\frac{-\eta_c}{\beta_a}} \right)$$

$$\left(\beta_c = \frac{2.3RT}{\alpha n F}, \beta_a = \frac{2.3RT}{(1-\alpha)n F}, 10^x = 1 + 2.3x \right)$$

$$= i_{cor} \left(\left(1 - \frac{2.3\eta_c}{\beta_c} \right) - \left(1 + \frac{2.3\eta_c}{\beta_a} \right) \right)$$

$$= 2.3\eta_c \cdot i_{cor} \cdot \left(\frac{\beta_c + \beta_a}{\beta_c \cdot \beta_a} \right) \quad (2.18)$$

$$\therefore i_{cor} = \frac{1}{2.3} \cdot \frac{i}{\eta_c} \left(\frac{\beta_c + \beta_a}{\beta_a \cdot \beta_c} \right)$$

B. 음분극에 농도분극이 일어날 경우 가 대단히 크므로

$$i_{cor} = \frac{\beta_a}{2.3} \cdot \frac{i}{\eta_c} \quad (2.19)$$

Stern -Geary 식의 개략도를 Fig. 2.4에 나타내었다.

3) Tafel 식

$$i = i_{cor} \left(\exp \frac{-\alpha n F \eta_c}{RT} - \exp \frac{-(1-\alpha)n F \eta_c}{RT} \right) \quad \text{에서}$$

과전압이 -50mV이상의 경우는 2차항을 무시할 수 있기 때문에

$$i = i_{cor} \left(\exp \frac{-\alpha n F \eta_c}{RT} \right)$$

이 된다. 여기서 양변을 log로 취하면

$$\begin{aligned} \log i &= \log i_{cor} - \frac{2.3RT}{\alpha n F} \log i \\ \eta_c &= \frac{2.3RT}{\alpha n F} \log i_{cor} - \frac{2.3RT}{\alpha n F} \log i \\ &= a + b \log i \\ a &= \frac{2.3RT}{\alpha n F} \log i_{cor}, \quad a = \frac{-2.3RT}{\alpha n F} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\therefore i_{cor} = i$$

상기한 Tafel 외삽법을 Fig. 2.5에 나타내었다.

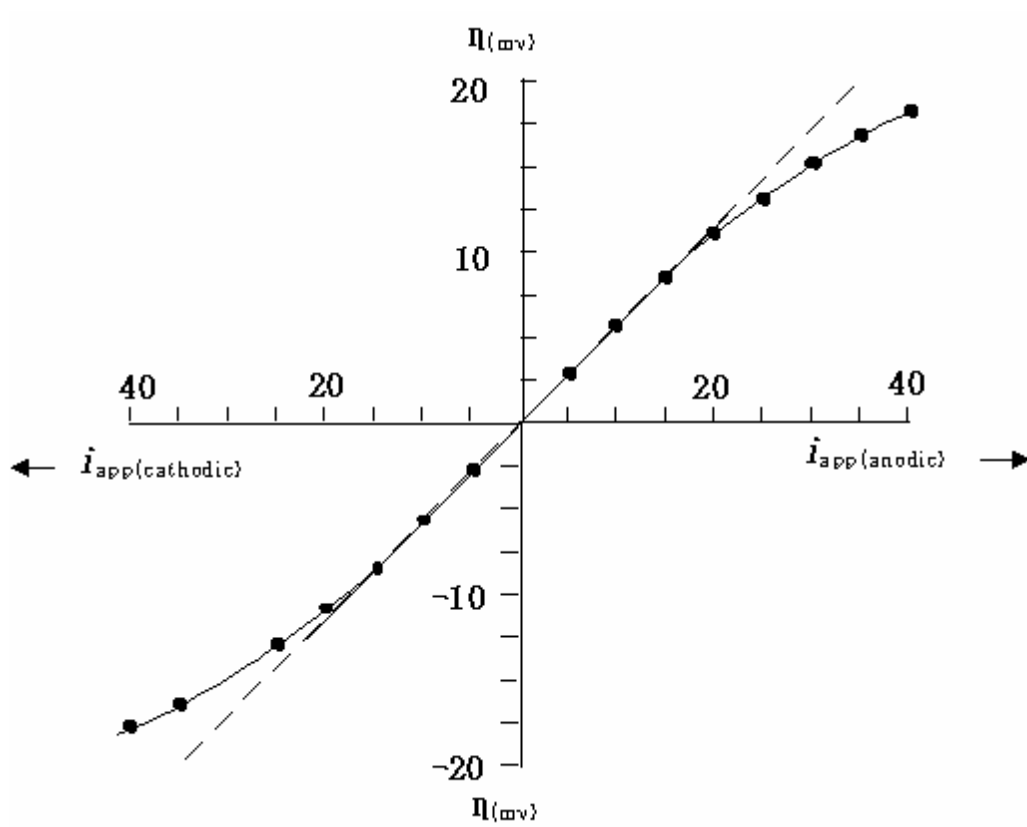


Fig. 2.4 Polarization curve for Stern-Geary's equation.¹⁸⁾

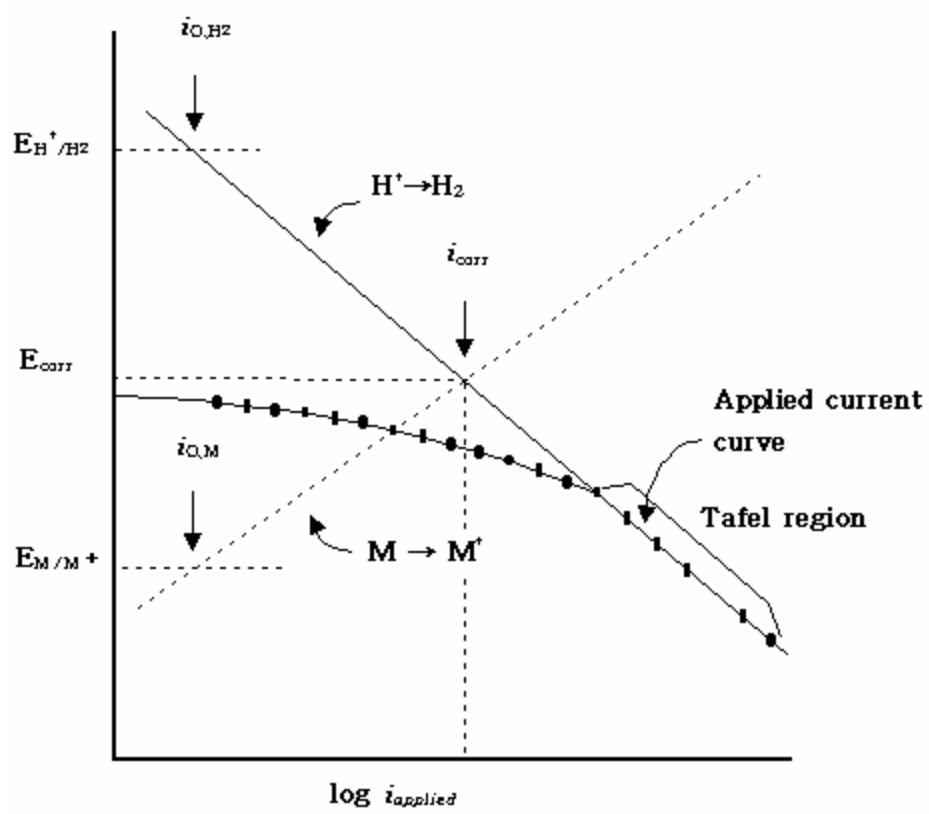


Fig. 2.5 Polarization curve for Tafel's extrapolation method.¹⁸⁾

2.2 해수중 강 구조물의 부식특성과 방지법

2.2.1 해수의 성질^{20, 21)}

해수는 10여 개의 주요 원소로 구성되어 있으며, 그 밖의 원소는 대단히 극소량 존재하는 것으로 알려져 있다. 그리고 해수 중에 용해되어 있는 물질의 약 99.9%를 차지하는 주요 성분을 Table 2.2²⁰⁾에 나타내었다. 이들 주요성분들은 대부분 수화된 자유이온의 형태로 존재하며 해수 중 구조물의 부식을 동반하는 산화환원반응에 동참하게 된다.

그리고 부식반응에 큰 영향을 미치는 전기전도도와 관련된 해수의 비저항은 Table 2.3에 나타낸 것과 같이 20~30Ω·cm이다. 또한 같은 중성수라도 염분농도가 낮은 수도물의 비저항은 약 5,000Ω·cm이므로 해수는 담수보다 부식전지를 형성하기 쉬운 가혹한 부식환경의 전해질이며 상온의 해수는 8~13ppm의 용존산소를 포함하고 있다. 해수의 포화 용존산소의 농도는 온도가 상승함에 따라 감소한다. 해수의 pH는 청정해역에서 약 8.1~8.3이다.

해수는 강재 부식경향의 차에 따라 청정해수, 오염해수, 하해수 등으로 구별하여 부르기도 한다. 하해수란 강의 하구에서 해수와 강물이 서로 섞여 있는 것을 말한다. Table 2.4²¹⁾는 이들 해수의 수질분석 예이며, Table 2.5²²⁾는 청정해수와 오염해수를 구분할 때 기준이 되는 수질의 분석범위를 보이고 있다. 여기에서는 해수 중 염분이 하천수에 의해 희석되므로, 하해수에 포함되는 Cl⁻ 농도는 해수와 하천수의 중간치를 나타낸다.

강의 부식속도는 Fig. 2.6에서와 같이 용존산소농도와 염의 농도에 의해 변화한다. 이때 용존산소의 용해 농도는 염분농도의 증가와 함께 감소한다. 따라서 하천수의 용존산소농도는 해수보다 크다. 오염해수의 특징은 유화수소 등을 포함하기 때문에 청정해수에 비해 pH가 낮고, 유기물 오염의 정도를 나타내는 지수인 COD 값이 높다. COD는 화학적 산소요구량 (Chemical Oxygen Demand)이다. 오염해수에 포함되는 용존산소농도는 청정해역에서 보다 낮은

경우가 많다. 따라서 오염해역에서는 혐기성 황산염 환원박테리아가 번식해 있는 경우도 적지 않다. 황산염 환원박테리아는 해수 중 보다도 해저의 뿔 등에 많이 서식한다.

Table 2.2 The main ions in sea water²⁰⁾

* : 추산됨

구 분	이 온	기 호	자유 이온(%)	전체 주요성분에 대한 중량비
양 이 온 (Cations)	나트륨(Sodium)	Na ⁺	99	30.62
	마그네슘(Magnesium)	Mg ²⁺	87	3.68
	칼슘(Calcium)	Ca ²⁺	91	1.18
	칼륨(Potassium)	K ⁺	99	1.10
	스트론튬(Strontium)	Sr ⁺	90	0.02
음 이 온 (Anions)	염소(Chloride)	Cl ⁻	100	55.07
	황산염(Sulfate)	SO ₄ ²⁻	50	7.72
	중탄산염(Bicarbonate)	HCO ₃ ⁻	67	0.40
	부로마이드(Bromide)	Br ⁻	100*	0.19
	바륨산(Borate)	H ₂ BO ₃ ⁻	10*	0.01
	불소(Fluoride)	F ⁻	100*	0.01
계				100.00

Table 2.3 Electric resistance of sea water

온도(°C)	10	15	20	25
전도율 [$\times 10^{-3} \Omega/\text{cm}(\text{S}/\text{cm})$]	37.4	42.2	47.1	52.1
비저항(Ωcm)	26.8	23.7	21.2	19.2

Table 2.4 Example of analysis of sea water quality with contamination degree²¹⁾

구분	청정해수	오염해수	하해수
pH	8.35	8.02	7.60
저항율($\Omega \cdot \text{cm}$)	20.60	20.8	50.0
전경도(mg/ℓ)	5969	5771	3532
용존산소(mg/ℓ)	5.85	1.31	(7.8 ~ 8.3)
NH_4^+ (mg/ℓ)	0.8	3.20	4.50
Cl^- (mg/ℓ)	17964	17392	10527
COD(mg/ℓ)	2.00	4.00	4.50
S^{2-} (mg/ℓ)	< 0.02	0.12	0.09
투시도(cm)	> 30	< 30	30.0

Table 2.5 Criterion for contamination of sea water²²⁾

수질인자	청정해수	오염해수
pH	7.5 ~ 8.5	6.5 ~ 7.5
COD(mg/l)	< 4	> 4
용존산소(mg/l)	> 4(통상 5 ~ 7)	< 4
NH ₄ ⁺ (mg/l)	< 0.05	> 2
S ²⁻ (mg/l)	검출되지 않음	검출되는 경우 있음

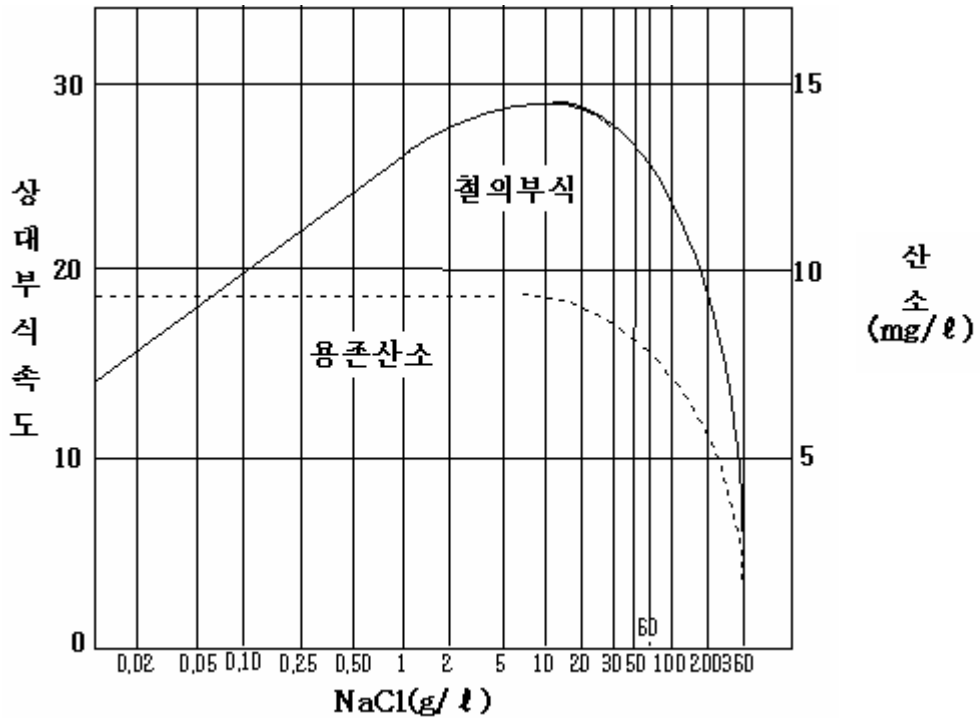


Fig. 2.6 Relationship between salt concentration and dissolved oxygen affecting to corrosion rate of steel.

2.2.2 강구조물의 해양 부식특성

해양구조물은 종래까지는 계선이나 방파제시설 등의 항만구조물만을 생각하였다. 요즘은 이들 외에도 해양개발용 플랫폼, 부선(Barge), 석유비축시설, 해상 위락시설 등의 대형 철강 또는 콘크리트 구조물이 많이 등장하였다. 이러한 해양구조물은 항상 부식성이 강한 해수 중이나 해양환경 분위기에 놓여 있으므로 Table 2.6과 같이 부식이 매우 심하다. 해수중의 철강 부식속도는 해면부터의 수심에 따라 현저한 차이가 있다. 또한 같은 해역이라도 대기에 접한 부분도 해수면 상의 높이에 따라 부식 정도의 차가 있다. 항만 강 파일과 같이 대기에서부터 해저토중까지 연결되어 있는 구조물의 경우를 보면 해양의 부식환경은 대기에서 수직방향으로 해상대기부, 비말대, 간만대, 해중부, 해저토부의 다섯 종류로 구분하는 것이 보통이다.

Fig. 2.7²³⁾은 이들 5개소에 대한 해양환경에서 강재의 부식속도를 개념적으로 비교한 것이다. 여기에서 강관파일이나 시트파일(Sheet Pile)은 항만구조물로서 해상대기 부로부터 해저토부까지 연결되어 있기 때문에 전기적으로 일체이다. 이러한 구조물의 부식속도는 Fig. 2.7과 Table 2.7에서 보는 바와 같이 비말대(Splash Zone)가 가장 크고, 다음은 간조의 바로 밑부분, 해중부, 간만대, 해상대기부 순으로 감소한다. 해수 중 부유물의 경우에도 마찬가지로 부식은 비말대와 수면 바로 아래 부분이 상대적으로 크다. 따라서 이 부분의 방식이 매우 중요하며, 선박이나 바지선과 같은 부유구조물의 경우 비말대의 방식에 중방식도장과 병용하여 음극방식법을 적용하는 것이 일반적이다.

Table 2.6 Variation of corrosion rate for carbon steel in various environments (mm/yr)²³⁾

대 기 중		수 중		지 중		해 수 간만조부
항만	0.05~0.15	해 수	0.1~0.2	해저토양	0.02~0.03	
도시	0.09	오염해수	0.2~1.2	매립토양	0.01~0.1	
내륙	0.025	공업용수	0.01~0.05	일반토양	0.001~0.05	

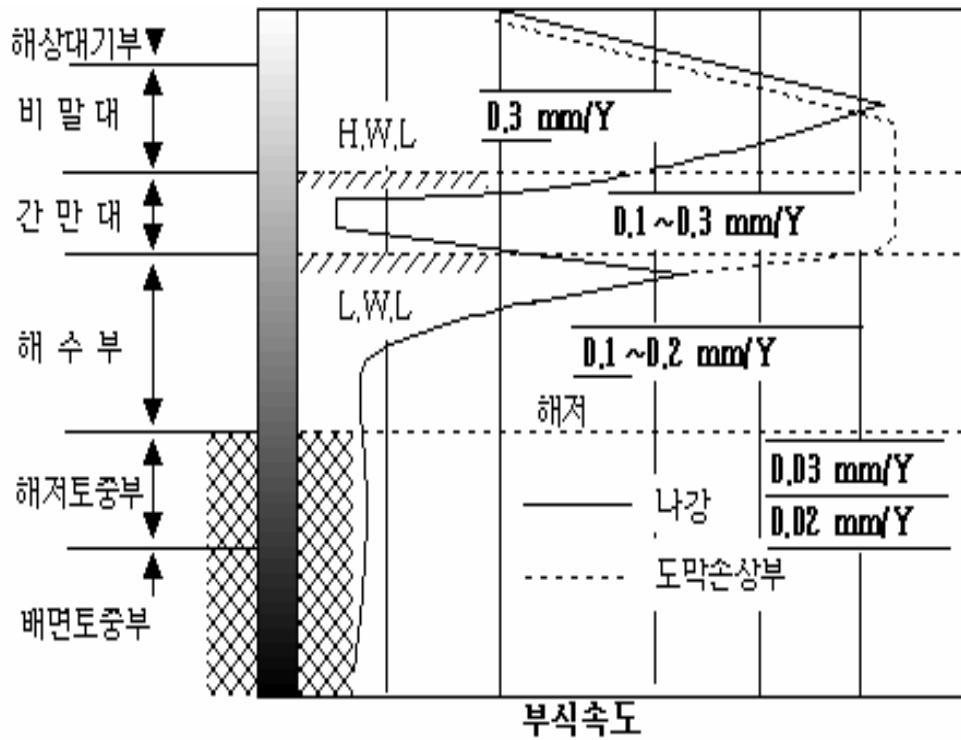


Fig. 2.7 Variation of corrosion rate for steel pile with depth of sea water.²³⁾

Table 2.7 Character of environment & corrosion in 6 zones of steel pile in sea water

영역	환경특성	부식특성	
해상 대기부	부식속도는 비말하는 해염입자와 미스트(Mist) 양에 따라 현저하게 변화한다. 해면으로부터의 거리에 따라서 부식속도는 차이가 있으며 파랑, 풍속, 풍향, 강우량, 기온, 습도, 일사량, 계절, 공해, 오염 정도 등에 따라 달라진다.	그늘진 곳에서 비바람이 부딪히는 부위가 비바람이 부딪히지 않는 부위보다 부식속도가 빠르다	
비 말 대	강 표면은 충분한 산소를 포함한 수막에 항상 젖어 있어 부식이 가장 심한 부위이다. 생물 부착은 없다.	강의 부식속도는 가장 빠르다.	
간 만 대	해수면의 조석간만에 의해서 건습이 반복된다. 해역에 따라 서식하는 생물의 종류나 밀도가 다르며 해양생물의 부착량도 차이가 크다. 방식피복에 파도가 충돌하거나 유출기름 등 예기치 못한 원인에 의해 열화 되기도 한다.	간만대로부터 해중부에 연속으로 접하고 있는 구조물에서는 산소농담전지가 형성되어 표면의 손상부에서의 부식속도는 빠르다.	
해 중 부	수심이 얇은 지역	용존산소농도는 포화상태이다. 생물부착, 유속 등이 부식인자로서 작용한다.	해상 대기부보다 부식속도는 빠르다.
	대륙붕	해조류의 부착은 없음, 용존산소농도는 점차 감소한다.	해상 대기부보다 부식속도는 빠르다.
	수심이 깊은 지역	용존산소농도는 적고 수온은 낮다. 유속은 적은 경우가 많다.	강의 부식속도는 수심이 얇은 지역보다 느리다. 희생양극의 소모는 많다.
해저 토중부	황산염 환원 박테리아가 존재하는 경우가 있다.	황화물은 강의 부식/전기방식 특성에 영향을 미친다. 황화수소 발생	
배면 토중부	수상부의 경우 토양환경과 거의 같다.	토양 환경에 유사함.	
배면 토중부	수중부에서는 해저토중부와 거의 같다.	해저토중부에 유사함.	

2.2.3 해수중 철강구조물의 부식에 미치는 영향 인자

해수 중에서 강재의 부식속도는 여러 가지 인자들에 의해 영향을 받는다. Table 2.8²⁴⁾은 탄소강에 대해 해수 중에서 부식에 영향을 미치는 인자들을 정리한 것이다. 이와 같은 여러 가지 인자들 중 부식에 미치는 영향이 큰 순서대로 살펴보면 다음과 같다.

1. 유속에 의한 영향

일반적으로 유체의 흐름이 있으면 용존산소의 확산층 두께가 감소하여 산소 공급량이 증가하므로 부식속도는 유속 증가에 따라 증대한다. 따라서 해양환경에서 작게는 조석 차에 의한 해수의 흐름이나 지형적인 영향에 따라 발생하는 해류의 흐름 등에 의해서 해상구조물의 부식과 방식에 영향을 받을 수 있으며, 크게는 해상의 일기에 따른 저기압, 폭풍 또는 태풍 등의 영향으로 해상의 철강구조물 표면상태에 영향을 미치므로 부식이 증가하거나 방식 시 방식 전류가 증가하는 경우가 발생할 수 있다. 해수가 아닌 일반 부식환경에서 유속이 증가해 산소과잉으로 부식이 가속화되면 강 표면은 생성된 산화물로 덮이거나 부동태피막을 형성하여 부식반응을 방해하므로 오히려 부식은 감소될 수 있다. 그러나 해수는 전기전도도가 높아 부식전류의 흐름이 크고, 또한 공식을 일으키기 쉬운 다량의 Cl^- 이온을 함유하고 있어 강재의 부동태화를 방해하므로 유속이 증가해도 강은 부동태화 되기 어렵다. 또한 해양환경 중 빠른 유속이나 풍랑은 표면부착물을 제거할 수 있으므로 부식가속의 원인이 되기도 한다. 따라서 해수에 잠긴 강재의 부식속도는 유속의 증가와 함께 계속적으로 증대된다.²⁴⁾

2. 해수오염에 의한 영향

근간 국내의 산업발달에 따라 연안 부근에 많은 산업 시설물 등이 건설되었고 또한 대도시 부근은 해양으로 흘러 들어오는 생활폐수에 의해 해양환경이

급격하게 오염되어 가고 있다. 이러한 해수의 오염은 대도시 부근의 항구에 더욱 심한데 이러한 피해는 항구의 외곽에 대형 방파제 등의 건설에 따라 외항의 청정해수가 항 내부로 순환되기 어려워지면 더욱 가속화된다. Table 2.9²³⁾는 해수오염에 의한 수질변화를 보여준다. 해수오염을 변화하는 인자로서는 pH, 비저항, 용존산소를 포함한 여러 가지가 있다.

Table 2.8 The corrosion factors for carbon steel in sea water²⁴⁾

Factor in sea water	Effect on iron and steel
Chloride ion	Highly corrosive to ferrous metals. Carbon steel and common ferrous metals cannot be passivated.(Sea salt is about 55% chloride)
Electrical conductivity	High conductivity makes it possible for anodes and cathodes to operate over long distances; thus corrosion possibilities are increased and the total attack may be much greater than that for the same structure in fresh water.
Oxygen	Steel corrosion, for the most part, is cathodically controlled. Oxygen, by depolarizing the cathode, facilitates the attack: thus a high oxygen content increases corrosivity
Velocity	Corrosion rate is increased, especially in turbulent flow. Moving sea water may : (1)destroy rust barrier, and (2) provide more oxygen. Impingement attack tends to promote rapid penetration. Cavitations damage exposes the fresh steel surface to further corrosion.
Temperature	Increasing ambient temperature tends to accelerates attack. Heated sea water may deposit protective scale or lose its oxygen: either or both actions tend to reduce attack.
Befouling	Hard-shell animal fouling tends to reduce attack by restricting access of oxygen. Bacteria can take part in the corrosion reaction in some cases.
Stress	Cyclic stress something accelerates failure of a corroding steel member. Tensile stresses near yield also promote failure in special situations.
Pollution	Sulfides, which normally are present in polluted sea water, greatly accelerate attack on steel. However, the low oxygen content of polluted waters could favor reduced corrosion.
Silt and suspended sediment	Erosion of the steel surface by suspended matter in the flowing sea water greatly increases the tendency to corrode.
Film formation	A coating of rust, or rust and mineral scale(calcium and magnesium salts), will interfere with the diffusion of oxygen to the cathode surface, thus slowing the attack.

3. 기타 영향 인자

기타 해수의 여러 가지 특성 중 강구조물의 부식과 방식에 영향을 미치는 인자로는 지역에 따른 전기전도도(염분농도), 온도, 강구조물의 표면상태 등 여러 가지가 있는데 이들에 대해 정성적인 경향은 알려져 있으나 각각의 영향인자에 대한 정량적인 값은 밝혀져 있지 못한 실정이다. 그리고 각 인자들이 독립적으로 영향을 주기보다는 복합적으로 작용하여 이에 따른 상승작용이나, 상쇄작용을 일으키기도 하므로 분석에 어려움이 있다. 일반적으로 알려진 경향으로는 염분농도와 온도가 높을수록 철강의 부식은 증가하며, 금속의 표면상태는 표면에 초기의 녹 층 유무에 따라 영향을 받는데 녹 층이 전혀 없을 때 부식속도가 상당히 빠르나, 점차 녹 층이 형성됨에 따라 이 녹 층이 부식을 방해하는 역할을 하여 부식속도가 점차 저하하는 것으로 알려져 있다. 그러나 이러한 여러 가지 영향인자들을 각각 고려한 방식설계를 하기란 거의 불가능하며, 따라서 제 해양환경에서의 영향인자들을 종합적으로 고려한 설계방안이 개발되어야 할 것으로 기대된다.

Table 2.9 Change of water quality by pollution in natural sea water²³⁾

항 목	천 연 해 수	오염된 물이 유입된 해수
pH	증가	→ 감소
산소환원전위	증가	→ 감소
비저항	감소	→ 증가
염소이온	증가	→ 감소
용존산소	증가	→ 감소
COD	감소	→ 증가
암모늄 이온	감소	→ 증가
유황염 환원 박테리아 이온	감소	→ 증가
Suspend solid	감소	→ 증가

2.2.4 해수중 강 파일의 방식법

1. 해수 중 강 파일의 수상부 방식

항만구조물의 방식 법에는 여러 가지가 있으며 이들을 방식하는 데는 수상부와 수중부로 대별할 수 있으며 수상부에는 주로 피복방식법을, 수중부에는 음극방식 법을 적용하는 것이 일반적이다. 수상부의 방식은 피복방식 법으로 물과 산소의 공급을 차단하여 방식하게 된다. 그리고 그 종류와 특징 및 평가는 Table 2.10²⁶⁾과 같다.

Table 2.10 Coating protection method²⁶⁾

종 류	특 징	평 가
모르타르 라이닝법	시멘트 모르타르나 콘크리트에 의한 피복을 말한다. 즉 거푸집 내부에 모르타르 또는 콘크리트를 타설하고 양생 후 거푸집을 떼어 내는 방법이다. 강 표면에 고알카리성을 유지하고 산소와 물의 침입을 막아서 방식 작용을 하게 된다. 일종의 콘크리트 자켓 방법이다.	부식성이 가혹한 해양환경에서는 장기간의 세월이 지남에 따라 콘크리트의 물리적 및 화학적 열화에 의해서 균열, 침식, 부식하게 된다. 따라서 항만 구조물의 방식법으로서 적절치 못하다고 사료된다.
금 속 라이닝법	강 파일 주위에 철판을 라이닝하는 방법이다. 철판의 종류에는 내식성강인 모넬강, 스테인레스강 등이다. 내식성, 내충격성이 좋고 수명이 긴 장점이 있다. 대신에 이종금속에 의한 접촉부식이 문제가 되며 재료가 비싸므로 경제성에도 문제가 있다.	부식성이 강한 해양구조물에서 이종금속 접촉부식이 발생할 우려가 크다. 따라서 경제적인 측면에서나 실용적인 측면에서 적절치 못하다고 사료된다.
알 미 늬 용 사 법	알미늬를 표면에 용사하여 희생양극법으로 방식하는 방법이다. 그러나 해수중에 있을 경우 강 파일에 의해 소모가 촉진되어 보수 유지에 어려움이 있다.	해양 분위기에서는 경제적인 측면에서 유리하나 보수관리 및 방식상태를 계속 유지하는데 어려움이 있다.
유기 라이닝법 ① 폴리에틸렌 라이닝법 ② 레진 모르타르 라이닝법 ③ FRP라이닝 ④ 수중경화형 라이닝법 ⑤ 방식 테이프 라이닝법	유기 라이닝법은 도장에 비해서 두께가 2~10mm로 두껍고 방식성, 내충격성, 내마모성이 우수하다. 그리고 보호코바를 필요로 하지 않는 특징이 있으며 전기방식과 병용할 수 있는 특징이 있다. 이 중에서도 해양구조물의 경우 후막 무용재형 라이닝법 중에서 에폭시 수지계용제가 실용적인 것으로 정평이 나 있다. 방식테이프 라이닝법은 시공은 간편하나 내구성에 문제가 있다.	유기 라이닝법은 일반적으로 항만구조물의 적용에 용이하고 시공성이 좋은 것으로 평가하고 있으나 항상 해수와 접촉하고 있는 가혹한 부식환경에서 선박이나 표류물의 충돌에 의해서 이들의 보호막이 균열 및 파손되면 파손된 부분이 양극이 되어 극심한 부식을 일으킬 수 있다.

<p>페트로라텀 라이닝공법</p> <p>◎보호카바의 종류</p> <p>① FRP ② FRV ③ FRE ④ FRPP ⑤ RM-PO ⑥ HDPE</p>	<p>페트로라텀을 주성분으로 하는 부식억제제를 첨가한 테이프 혹은 시트상의 것이 있으며, 전처리제로서 페이스트가 있다. 페트로라텀 방식재료는 점착성, 유연성이 풍부하고 강재표면에 잘 밀착한다. 장기간에 걸쳐서 경화나 증발하지 않고 점성을 유지한다. 전처리 후에 페이스트를 도포하고 페트로라텀 테이프를 감는다. 그 위에 보호 카바를 장착한다.</p>	<p>페트로라텀 라이닝공법은 방식 테이프의 우수성과 파랑과 선박 표류물 등에 의한 충돌 등의 외력을 막는 보호 커버가 설치되어 완벽한 방식법이라 할 수 있다. 특히 이 방법은 항만 구조물의 신설이나 기존 시설물에 구애 받지 않고 적용 가능하며, 수중에서 시공도 가능하다. 그리고 하지 처리가 비교적 간단하고 시공 후의 양생 기간도 필요하지 않다. 따라서 해양구조물이 피복방식법으로서 경제적인 측면에서나 실용적인 측면에서 이 방법이 가장 양호하다고 사료된다.</p>
<p>특수 모르타르 라이닝법</p>	<p>아크릴계, 라텍스계, 에폭시계 및 폴리마 그리고 특수 수중용 혼화제 등을 모르타르에 함침시켜 라이닝 하는 공법이다. 점착력, 중성화 기밀, 수밀성이 있는 효과가 있다. 가격이 비싼 결점이 있다.</p>	<p>기존 구조물의 보수용으로 주로 사용되는, 특수 모르타르를 주입하는 라이닝 공법으로 콘크리트의 균열을 일시적으로 막을 수 있으나 완벽한 보수 공법은 아니라고 사료된다. 내구성 보장이 안 된다.</p>
<p>거푸집 모르타르 라이닝법</p>	<p>모르타르를 거푸집에 타설 후 거푸집을 떼어내지 않고 그대로 보호카바 역할을 하도록 한 방법 보호카바는 FRP, FRV, GFRC등이다. 보호카바 때문에 해수나 파도의 충격을 억제하여 내구성이 우수하리라 사료됨.</p>	<p>모르타르를 타설하고 거푸집을 보호카바로서 그대로 보존하여 내구성에 효과가 있다고 사료된다. 그러나 해수가 밀부분에서 모세관 현상으로 콘크리트 위쪽으로 올라오는 경우가 있으나 보호카바를 수중부 밀 파일에 밀착하도록 한다면 경제적 측면에서 의미가 있다고 사료된다. 그러나 타설된 모르타르의 동결융해작용에 의한 균열발생에 의해서 내구성 문제가 있으리라 사료된다.</p>
<p>도장법 -에폭시계 도료 -타르에폭시 계 도료 -유리혼입 에폭시계 도료</p>	<p>일반적으로 중방식도장이 채용되며 다른 피복 방식법에 비해서 시공성이 좋고 가격이 저렴하다. 그리고 복잡한 형태의 구조물도 시공이 가능하며 보수도 용이한 이점이 있다. 그러나 도장 전처리가 방식효과에 영향을 미치므로 전처리가 중요하다.</p>	<p>해양 분위기에서 도막이 파손되어 박리되면 오히려 공식이 발생될 염려가 있다. 일본의 경우 해양구조물에 많이 이용되고 있으며 국내에서도 피복방식법으로 적용해 볼 가치가 있다고 사료된다. 그러나 수중의 구조물에서는 전처리가 문제가 되고, 수중시공이 불가능하다.</p>

2. 해수 중 강 파일의 수중부 방식

강 파일의 수중부는 음극방식법으로 주로 방식하게 되는데 음극방식법은 해수중과 해저토에 대해 방식효과가 크고 경제성도 좋으며, 대상시설의 신설 기준에 관계없이 방식이 가능한 이점이 있다. 그리고 방식시스템의 수명을 폭넓게 선택할 수 있어 종합적으로 신뢰성 있는 유리한 공법이라고 할 수 있다. 이에 대해 상세히 살펴보면 다음과 같다.

1) 외부전원법

Fig. 2.8에서 보는 바와 같이 연결된 교류전원은 정류기에서 직류전원으로 변환되어 불용성 양극에 의해 방식 대상물(강 파일)에 방식전류를 공급한다. 불용성 양극으로는 실험실용으로 백금(Pt)이 많이 쓰이나 고가이므로 보통 해수 중 강의 방식에는 백금 피복된 티타늄(Ti), 납(Pb), 나이오비움(Nb) 등이 합금 형태로 주로 사용되고 있다.²⁷⁾

외부전원법에 의한 음극방식의 원리를 분극도에 의해 설명하면 Fig. 2.9와 같다. 방식하기 전 강 파일은 해수 중에서 국부전지를 형성하면서 국부적 음극부에서 용존산소의 환원반응이 일어나며, 양극으로 작용하는 강 파일에서는 철의 용해반응, 즉 산화반응이 일어나 부식된다. 즉 부식도의 산소환원반응에 의한 음극분극이 분극도의 A점에서 C점까지 분극되고, 강 파일(Fe)은 B점에서 양분극되어 C점까지 이르러, 같은 부식전위(E_{Corr})와 부식전류밀도(i_{Corr})를 형성하면서 부식이 진행된다. 방식을 위해 정류기와 불용성양극을 통하여 외부전류를 흘려주면 양극분극은 C점에서 B'을 지나 B점까지 줄어들게 되고(부식전류 감소), 음극에서는 C점에서 C'점을 지나 D점에 이르며 음분극에 의한 전류는 증가하게 된다. 이때 B'C'전위에서 $i_{C'} - i_B = \Delta i'$ 만큼의 외부전류가 흐르게 되며, BD전위에 이르게 되면 $i_D - i_B = \Delta i$ 만큼의 전류가 외부로부터 공급되면서 양극(강파일)의 부식전류가 최소가 되면서 방식된다

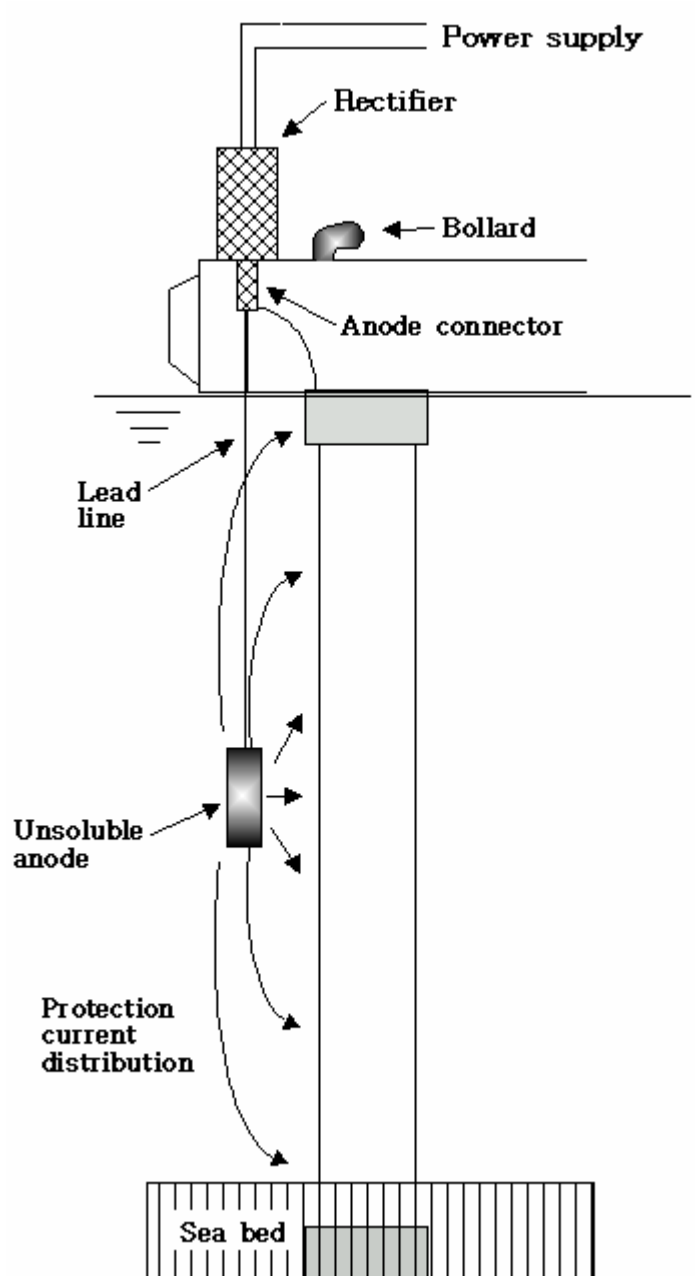


Fig. 2.8 Impressed current cathodic protection method for steel pile in sea water.²⁷⁾

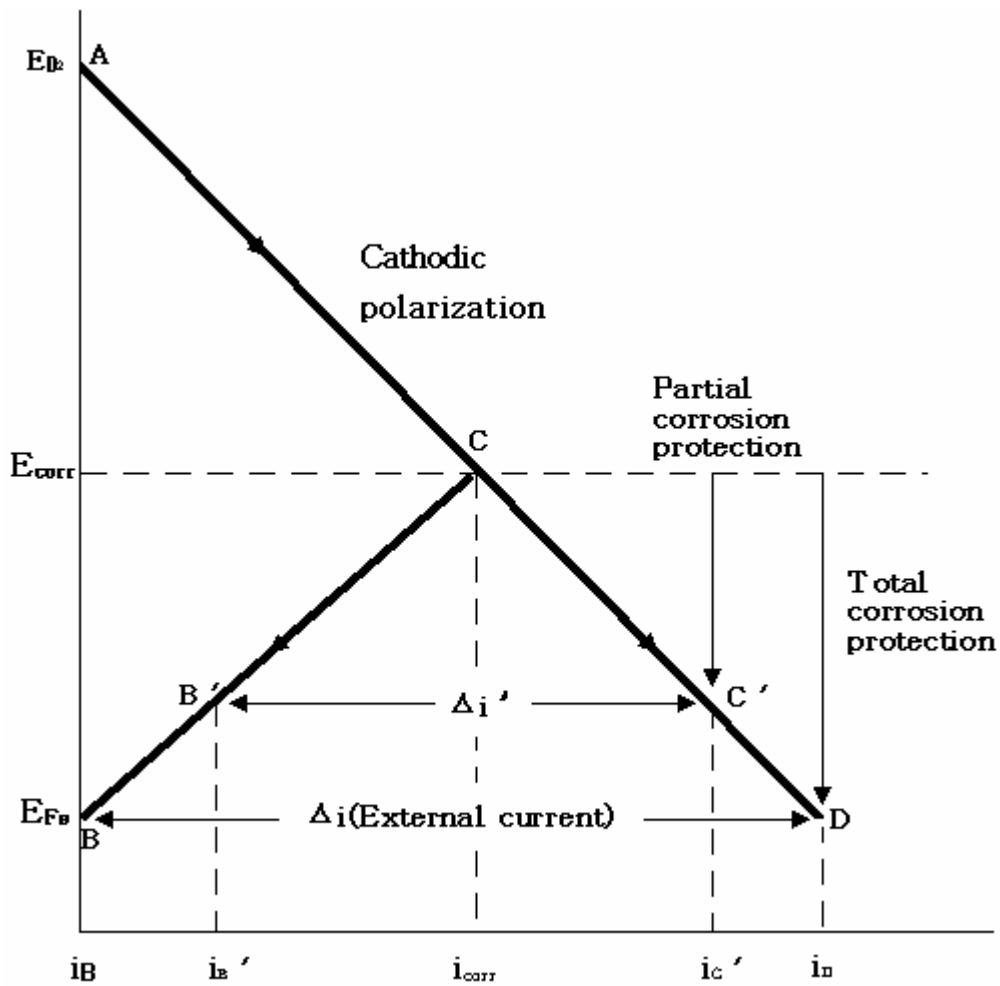


Fig. 2.9 Polarization diagram of impressed current method.²⁷⁾

2) 희생양극법

희생양극법(또는 희생양극법)은 Fig. 2.10과 같이 피 방식체(강 파이프)보다 전위가 상대적으로 낮은 금속을 연결하여 부식시킴으로써 피 방식체를 보호하는 방식법이다.^{27,28)} 이때 희생양극으로부터 공급되는 방식전류는 Fig. 2.10 상의 화살표와 같은 분포를 나타내며 흐르게 된다. 희생양극의 재료는 앞서 설명한 바와 같이 주로 3가지 금속(아연, 알루미늄, 마그네슘 합금)이 사용되고 있으며 해수 중 방식에는 발생전기량과 경제성 등, 종합적 이유에서 알루미늄 합금양극이 선호되고 있다. 분극도에 의한 해수 중 강 파이프(Fe)의 방식원리를 살펴보면, Fig. 2.11과 같다. 희생양극(Al)이 없을 때는 강 파이프가 B점에서 양분극되어 C점에 이르게 되고 강 파이프 내의 국부적으로 작용하는 음극에서는 음분극에 의해 A점에서 C점에 이르러 철의 부식전위($E_{\text{Corr,Fe}}$)와 부식전류밀도($i_{\text{Corr,Fe}}$)를 형성하고 있다. Al 합금양극을 설치하게 되면, Al 합금양극표면은 E점으로부터 양분극되어 D점에 이르게 되고, C점이었던 부식전위는 D점까지 낮아지게 되어 Al 표면에서는 $i_{\text{Corr,Al}}$ 의 강한 부식전류가 흐르는 반면, 강 표면에서는 C점에서 B점으로 양극은 복극(depolarization: 분극이 회복됨)된다. 동시에 강 표면의 양극과 음극은 모두가 음극이 되어 환원반응만 발생하게 되어 부식전류가 감소하면서 방식 된다. 이와 같은 방식상태는 Al 합금양극의 성능, 면적 및 주위의 여러 가지 환경적인 요인에 의해 영향을 받는다.

지금까지의 희생양극법과 외부전원법의 방식에 대한 특성을 비교하여 보았다. 이를 종합적으로 정리하면 Table 2.11과 같다.

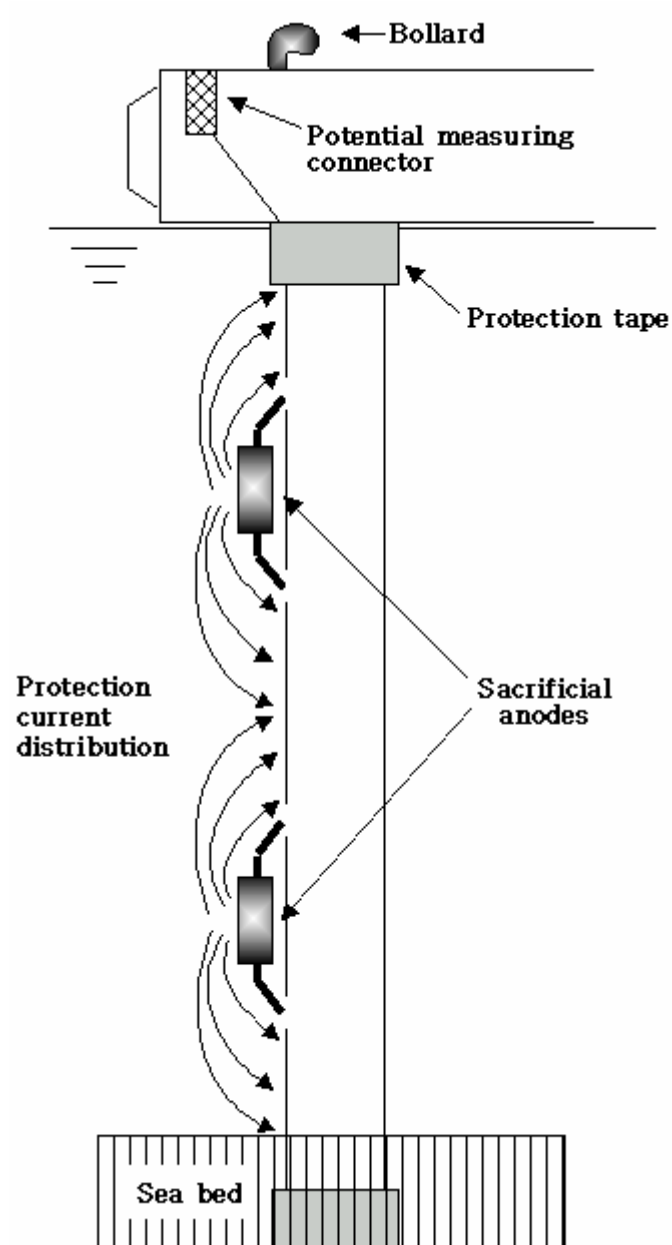


Fig. 2.10 Sacrificial anode cathodic protection method for steel pile in sea water.^{27,28)}

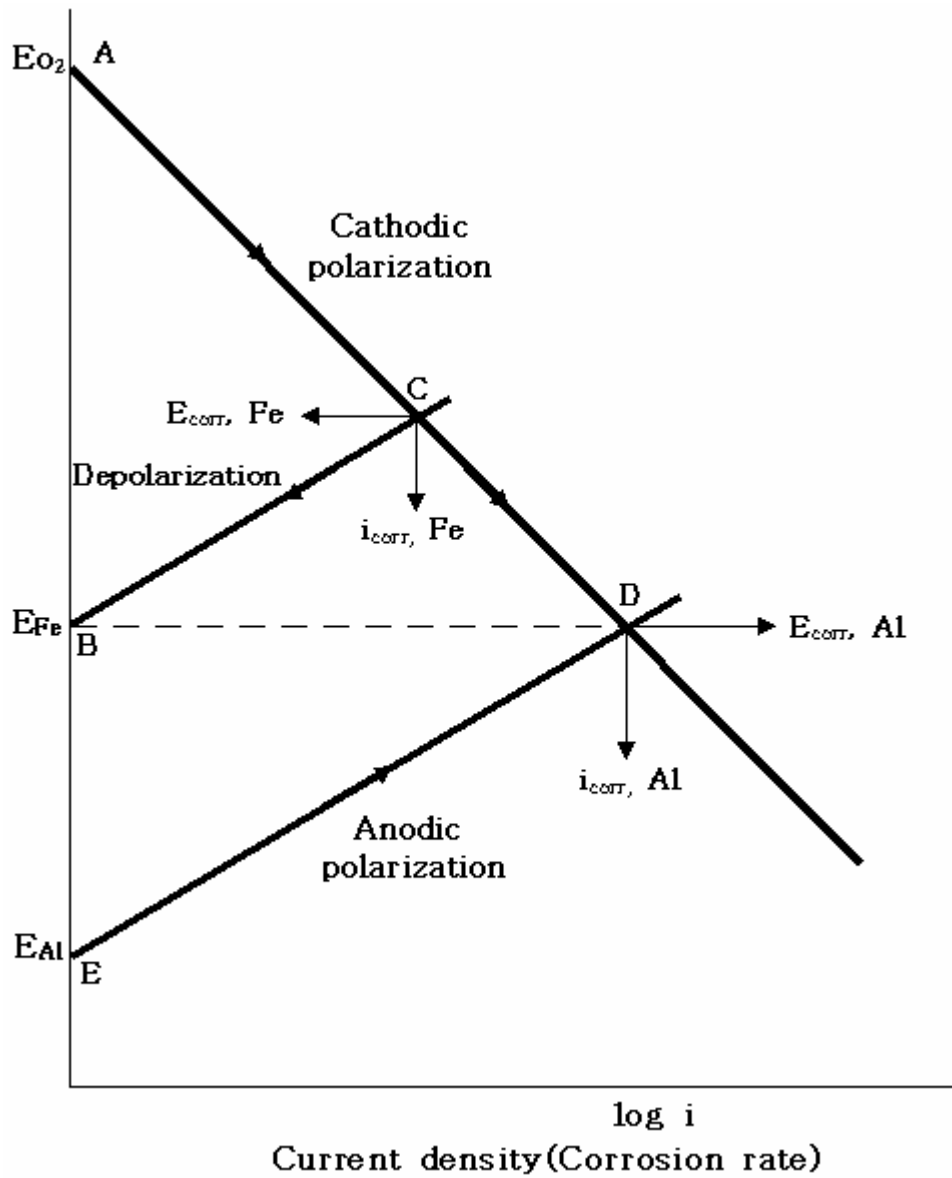


Fig. 2.11 Polarization diagram of sacrificial anode cathodic protection method. ^{27,28)}

Table 2.11 Comparison between sacrificial anode method and impressed current method

종 류	특 징	평 가
희 생 양 극 방식법	<ul style="list-style-type: none"> ①유지 관리가 용이하다. ②소규모의 독립된 시설에도 적용이 가능하다. ③시공이 용이하다. ④양극수명을 자유롭게 설정 할 수 있다. ⑤전원이 없는 장소에도 가능하다. 	<p>해양 구조물의 수중부에서는 비저항이 낮아 전류가 균일하게 분포되므로 희생양극방식법이 용이하다. 현재 특수한 경우를 제외하고는 해양구조물의 수중부 방식에는 희생양극방식 법이 채택되고 있으며 이때 사용되는 양극은 알루미늄합금양극이다. 희생양극 방식법의 채택은 전 세계적으로 일반화되어 있다.</p>
외 부 전 원 방식법	<ul style="list-style-type: none"> ①출력 전압을 자유롭게 조절 할 수 있다. ②고유속하, 하천수 혼입 등의 고비저항지역 등 특수한 환경에서 유리하다. 	<p>국내의 경우 수년 전까지 외부전원방식법이 해양구조물의수중부에 일부 적용되었으나, 전원 조절장치의 유지·관리에 어려움이 야기되어 점차 희생양극방식 법으로 교체되고 있다. 외부전원법은 육상의 지하매설관 등 비저항이 큰 지역에 주로 사용되고 있다.</p>
<p>※ 총괄 평가</p> <p>해양구조물의 수중부 방식법은 희생양극방식 법을 적용하는 것이 경제성, 실용성 면에서 타당하다고 사료됨. 그러나 최근 해수의 오염도가 증대되면서 방식설계 시 개선할 점이 지적되고 있다. 즉 양극수명, 양극전류효율, 양극발생전류, 방식전류밀도 등의 정확한 수치가 부식환경의 특성에 적합한 값으로 적용되어 방식설계가 되어야 할 것으로 사료된다. 만약 이들의 수치가 부적절하게 적용되어 방식설계 되면 실지 양극 수명이 예상 설계수명보다 짧아지거나, 이와 반대로 과다 설계되어 경제적인 측면에서나 안전성의 측면에서 어려움이 야기될 것이다.</p>		

2.3 강구조물 희생양극 방식설계상의 문제점

1970년대 국내에 방식법이 도입되면서부터 사용해 온 설계시의 여러 가지 계산식 및 설계 값에 대하여 외국에서는 계속적인 연구, 검토에 의해 수정해 온 반면 우리나라에서는 그렇지 못해 왔다. 따라서 국내외의 설계 세부항목들을 비교하고 이에 대해 검토하였다.

2.3.1 양극 전류효율의 문제점

희생양극의 전류효율은 양극의 수명에 직접적인 영향을 미친다. 아래 식은 양극의 수명을 구하는 공식이다²⁶⁾.

$$Y = 0.85 \frac{W}{I \cdot S} \quad (2.21)$$

여기서 Y: 양극수명(Yr) 0.85: 사용가능계수(효율)
W: 양극중량(kg) I : 양극평균발생전류(A)
S: 양극소모율(kg/A·Y)이다.

그리고 알루미늄합금 양극의 이론발생전기량을 2,850 A·h/kg이라 할 경우, 전류효율을 곱하면 실제의 단위 kg당 발생 전기량이 산출된다. 예를 들어, 국내에서 대부분 적용되고 있는 92%의 전류효율을 적용할 경우 2,850 A·h/kg × 0.92 = 2,622 A·h/kg이고, 이것을 소모율로 환산하면 1/2,622 kg/A·h가 되는데 1년간의 소모율을 계산하기 위해 365일×24시간=8,760h를 곱하면 연간 소모율은 3.34 kg/A·Y이다.

국내 설계에 적용하고 있는 양극의 효율을 일본의 경우와 비교해 보면 다음과 같다. 일본은 1982년경에 Table 2.12²⁶⁾의 하반부에서 보는 바와 같이 알루미늄합금양극의 전류효율을 80%로 하여 오오사카항의 방식설계를 하였으며

Table 2.12 The data of protection current density and characteristics of Al sacrificial anode²⁶⁾

구 분		오오사카 항		청정해수
		~1976	1977~	
전류밀도	해수중(mA/m ²)	100	130	100
	사석부(mA/m ²)	50	65	50
	해토중(mA/m ²)	20	25	20
양 극	양극의 종류	알루미늄합금		
	전류효율(%)	80	80	80
	비 중	2.7~2.8	2.7~2.8	2.7~2.8
	해수 비저항(Ω cm)	30~35	35	30
	발생전류(A)	1.15~2.3	3.5	1.5~3.5
	수 명(Yr)	20	20	10~30

그 후 1990년에 들어서면서부터 방식설계지침서에 전류효율이 90%이상의 성능 좋은 양극을 제작, 공급하도록 규정하고 있어 현재에는 거의 90%이상의 양극이 보급되고 있다.

국내의 방식설계 시방서에서는 일본과 마찬가지로 전류효율을 90%이상으로 규정하고 있는데, 문제로 지적되는 것은 방식회사에서 방식설계 시 일률적으로 전류효율을 92%로 산정하고 있다는 것이다. 제작사가 다른 양극의 경우도 모두 전류효율을 똑같은 92%로 보고하고 있다는 것은 현실적으로 인정하기 어려우며 최근에 보고된 바 있는 국내 일부 부두의 양극수명 단축현상의 원인도 전류효율과 무관하지 않다고 사료된다. 따라서 희생양극시험에 관한 국내의 독자적인 시험규정이 정립되어야 할 필요가 있다고 사료되며, 이렇게 새로이 정립된 규정에 따라 신뢰할 만한 기관의 전문가들에 의해 평가된다면 그 근본적인 문제가 해결될 수 있을 것이다.

2.3.2 양극발생전류 계산의 문제점

양극발생전류는 초기발생전류와 최종발생전류(안정된 상태에서의 발생전류)로 나누어진다. 그리고 발생전류를 구하는 공식^{29,30)}은 다음과 같다.

$$I = \Delta E / R \quad (\Delta E : 0.25V) \quad (2.22)$$

여기서 ΔE 는 양극(알루미늄 합금)과 음극(강구조물)과의 전위차이며, 통상 0.25V로 하고 있다. 또 접지저항 R 은 항만구조물에 사용되는 양극의 경우 다음 공식에 의해서 구해진다.

$$\textcircled{1} \quad \frac{L}{r} > 4.375 \text{ 인 경우} \\ R_1 = \frac{\rho}{2\pi L} (2.3 \log \frac{8L}{D} - 1) \quad (2.23)$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{L}{r} < 4.375 \text{ 인 경우} \\ R_2 = 0.2639 \rho L^{-0.75} \cdot D^{-0.28} \quad (2.24)$$

여기서 ρ : 비저항, L : 양극길이, D : 등가직경, r : 반경이다.

양극발생전류는 접지저항의 대소에 따라서 달라진다. 즉, 비저항(ρ)과 양극 길이(L) 및 등가직경(D)의 변화에 의해 R 값이 달라지며 동시에 발생전류가 변하게 된다. 양극치수가 일정할 경우, 해수 비저항이 접지저항에 직접적인 영향을 미치게 되므로 방식설계를 하고자 하는 항만 해수의 비저항을 정확하게 측정해야 한다. 그런데 상기한 공식은 실험식이기 때문에 그대로 적용할 수는 없다. 즉 희생양극과 강 파일 사이에 존재하는 저항에는 비저항 뿐만 아니라, 강 파일 자체의 표면상태에 의한 회로저항도 무시할 수 없기 때문이다. 뿐만 아니라 해수의 유속, 오염도 등에 따라서도 저항이 변할 수 있으며 그렇게 되면 발생전류도 변하게 된다. 예를 들면 1930년에 설치된 부산항 2부두는 강봉으로 되어 있으며, 56년간 무방식 상태에 있었는데 방식공사를 실시한 1986년 이후에도 방식전위가 나오지 않아 문제가 된 바 있었다. 이에 대한 원인을 규명해 본 결과 장기간 표면에 두꺼운 녹 층이 형성되어 회로저항이 증대되었기 때문에 실제의 발생전류가 이론치의 70%정도밖에 되지 않는 것이 밝혀졌다. 그러나 양극의 발생전류가 이론치보다 적은 값을 나타낸다고 해서 최종치도 적은 값, 즉 관례적으로 초기 발생전류의 1/2이 된다고 할 수 없다. 이 경우에는 오히려 녹 층이 음분극으로 많이 변하지 않기 때문에 최종 전류 값이 초기치의 1/2보다 큰 값을 유지 할 수 있다. 따라서 부산항 2부두의 경우 양극의 평균발생전류 값이 초기발생전류의 1/2로 줄어들지 않고 큰 값을 유지하였기 때문에 양극수명이 단축된 것으로 판단된다. 그러므로 이러한 문제를 해결하기 위해서는 양극수명과 회로저항의 계산에 있어서 다음과 같은 실험이 병행되어 충분한 자료가 확보되어야 정확한 설계를 할 수 있을 것이다.

2.3.3 방식전류밀도 값의 문제점

우리 나라는 항만 구조물의 전기방식이 도입될 때, 일본에서 사용하고 있던 설계 법을 그대로 채용하였기 때문에 현재 여러 가지 현실과 맞지 않는 문제점이 제기되고 있다. 일본에서는 1990년에 지난 20년간 사용해 왔던 방식설계상의 방식전류밀도 값을 실험결과를 토대로 수정하여 현재는 전국 주요 항만에 걸쳐서 그 값을 각각 달리 적용하고 있다.

Table 2.13³¹⁾은 미국 등 외국의 주요한 항만에 대한 방식전류밀도를 보여주고 있다. 해수 비저항과 수온 그리고 조류와 파도 등의 변수에 의해서 각 해역 및 항만의 방식전류밀도는 큰 차이를 나타내고 있다. 특히 공해가 우리 나라 보다 적은 일본에서도 전국 항만의 해수가 여러 가지 원인, 즉 오염 및 유속변화 등에 의해서 각각 그 부식특성을 달리하고 있음은 주목할 만한 사실이다. 이러한 점을 감안할 때, 우리 나라에서도 전국 항만의 해수에 대하여 그 부식특성을 규명하고 적절한 방식전류밀도 값이 정리되어야 할 것이다. 현재 우리 나라에서 방식설계에 적용하고 있는 방식전류밀도의 초기치는 다음과 같다.³¹⁾

- ① 해수중 방식전류밀도 초기치 : 100 mA/m²
- ② 사석부 방식전류밀도 초기치 : 50 mA/m²
- ③ 해토중 방식전류밀도 초기치 : 20 mA/m²

그러나 초기 방식전류밀도를 정상 전류밀도, 즉 최종치의 2배로 할 경우 초기 방식전류 밀도가 100mA/m²보다 크게 되는 항만도 상당수 있다. 아래와 같이 일본 오오사카항에서는 변화된 해양환경을 고려한 방식전류밀도치를 1977년도부터 설계에 적용해 오고 있다.

- ① 해수중 방식전류밀도 초기치 : 130 mA/m²
- ② 사석부 방식전류밀도 초기치 : 65 mA/m²
- ③ 해토중 방식전류밀도 초기치 : 25 mA/m²

Table 2.13 Protection current densities for cathodic protection of steel pile in worldwide ports³¹⁾

해역	환경인자				방식전류밀도 (mA/m ²)
	비저항	수온	파랑	조류	
멕시코만	20	22	보통	보통	54 - 64.8
서해안(미국)	24	15	보통	저	75.6 - 86.4
쿡만(뉴질랜드)	50	2	저	고	378 - 432
북해	25	12	저	고	86.4 - 162
페르시아만	15	30	보통	저	75.6 - 108
동인도제도	19	24	보통	보통	54 - 64.8

※ 비저항(比抵抗) : ohm-cm, 수온(水溫) : °C, (NACE Standard, BP-76)

상기의 전류밀도는 최종전류밀도

※ NACE의 규정에는 전류밀도를 초기(i_0), 중기(i_m), 말기 전류밀도(i_p)로 나누어 적용하고 있음.

2.3.4 설계 양극개수 산출의 문제점

상기한 양극 한 개당 초기 발생전류와 방식에 필요한 방식전류 값을 계산하면 다음과 같다.²⁰⁾

$$n = \frac{I_{Fe}}{I_{Al}} \quad (2.25)$$

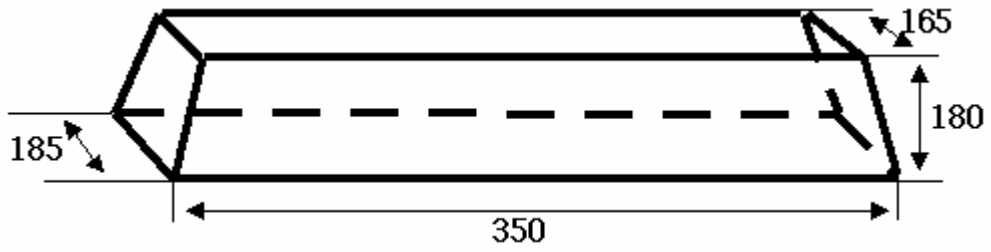
I_{Fe} : 전체 방식에 필요한 초기 방식전류 값,

I_{Al} : 양극 한 개당 초기 방식전류 값

상기 식에서 양극의 발생전류가 크면 소요개수는 적어진다. 그리고 방식전류가 크면 개수는 많아진다. 그러므로 담수에서는 발생전류가 적으므로 소요 양극 개수는 많아지며, 대신 그 양극수명은 길어진다. 일반적으로 해수가 오염되면 전류효율 감소에 의한 소모율 증가 및 평균 발생전류의 증가로 인하여 양극수명은 더욱 짧아 지는 것으로 조사 되었다.

2.3.5 등가직경(D) 계산의 문제점

양극의 발생전류를 구하기 위해서는 양극의 접지저항을 구해야 하고 접지저항을 구하기 위해서는 비저항 뿐만 아니라 양극의 치수를 적용해야 하는데 이 경우 등가직경(D)을 계산해야 한다. 항만 구조물에 사용되는 양극의 단면은 Fig. 2.12와 같이 대부분 사다리꼴을 하고 있는 경우가 많다. 이 경우 정확한 등가직경을 구하기 위해서는 사다리꼴의 면적을 원의 면적과 일치시켜서 원의 직경을 구한다. 그런데 현재 국내의 모든 방식설계에는 사다리꼴의 면적 대신 둘레를 구하고 이것을 원주의 길이로 간주하여 등가직경을 구하고 있다. 양극 단면도를 중심으로 우리 나라와 일본의 등가직경을 구하는 방법 차이를 비교하면 다음과 같다.



예) 표준형 B1 TYPE : $(165+185) \times 180 \times 350$

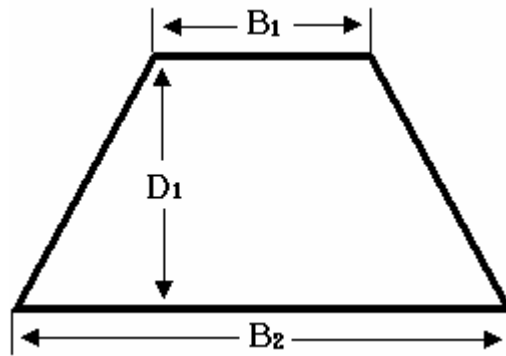


Fig. 2.12 Shape of sacrificial anode.

국내의 경우, 식 2.26과 같고,

$$(B_1 + B_2 + 2 \times D_1) = \pi D$$

$$D = B_1 + B_2 + 2 \times \frac{D_1}{\pi} \quad (2.26)$$

그리고 일본 방식 지침서의 경우는 식 2.27과 같다.

$$(B_1 + B_2) \times D_1 \div 2 = \pi D^2 / 4$$

$$\pi D^2 = 2D_1(B_1 + B_2)$$

$$D^2 = 2D_1(B_1 + B_2) / \pi$$

$$D = \sqrt{\frac{2D_1(B_1 + B_2)}{\pi}} \quad (2.27)$$

또한 등가직경(D)의 계산에 있어서 국내 방식회사에서 채용하고 있는 사다리꼴의 둘레길이 계산시 $2 \times D_1$ 은 정확한 빗변의 길이가 아니다. 따라서 등가직경 계산은 일본의 방식지침서에서 제시하고 있는 방법이 정확하며 이 방법으로 수정되는 것이 타당하다고 판단된다. 정확한 등가직경이 계산되지 않으면 양극발생전류, 양극수명 계산에 오차가 발생하기 때문이다.

2.3.6 방식설계에서 수질의 문제점

해수 수질의 문제는 앞부분에서도 언급하였기 때문에 이 문제점에 대해서 간단히 살펴본다. 방식설계에 있어서 지금까지 국내외를 통틀어 해수의 비저항을 측정하고 이 비저항에 의한 접지저항을 계산해서 양극의 발생전류를 구하였으며, 동시에 양극수명계산에도 적용하여 왔다. 그런데 최근 미국과 일본에서는 방식대상 해안의 비저항만으로는 완전한 방식설계가 되지 못함을 인식하고 비저항은 물론 pH, 염소이온, 황산이온, 암모늄이온, 용존산소농도, 화학적 산소요구량, 산화환원전위, 황산염 환원박테리아 등을 정밀 분석하고 이들의 데이터를 바탕으로 부식실험을 거쳐 최적방식 설계치를 구하고 있다. Table

2.14는 일본 부두의 수질분석결과이다. 이들의 결과를 국내 주요 부두의 수질 분석 치와 비교함으로써 국내의 각 항만 별 해수오염 정도를 알 수 있을 것이며, 또한 최적방식설계를 위해 중요한 참고 데이터로 활용할 수 있을 것이다.

그러나 수질분석 치 만으로는 완전한 방식설계가 되지 못하는 경우가 있다. 예를 들면, 보통 용존산소농도가 많으면, 부식속도가 증가하는 경향이 있다. 그리고 해수의 오염도가 크면 오히려 용존산소가 줄어들게 되어 부식속도가 감소할 것으로 예상되는데, 오히려 부식속도는 증가하게 되는 경우도 있다. 왜냐하면 해수가 오염되어 용존 산소농도가 적어도 황산염 환원박테리아가 증가되어 부식을 촉진시킬 수 있으며, 산소 농담전지의 형성에 의한 국부부식의 촉진 및 음분극의 감소로 인해 방식전류밀도 및 양극 발생전류밀도도 증가할 수 있기 때문이다. 따라서 각 부두 별 해수의 유속 크기는 부식속도의 큰 변수가 될 수 있기 때문이다. 그리고 염분농도와 용존산소도 부식속도에 영향을 미친다. 염분농도는 5~10g/l일 때 부식속도가 최대가 되며, 그 이상에서는 오히려 감소한다. 유속과 용존산소의 관계를 보면, 일정한 용존산소농도에서 유속의 증가와 함께 방식전류밀도는 증가하는 것을 알 수 있다.

지금까지 언급한 국내·외의 접지저항과 방식전류밀도, 양극소모율과 발생전류 등에 대한 종합적 비교를 Table 2.15에 정리하였다.

Table 2.14 Analysis of sea water quality in two piers of Japan

구 분	단 위	청정해수(G항)		오염해수(J항)	
		표층수	해저수	표층수	해저수
수 온	℃	23.5	22.0	26.0	25.5
비 저항	Ω·cm	22.4	22.5	105	29.0
수소 이온 농도	-	8.2	8.3	7.3	7.7
염소 이온 농도	ppm	18,000	19,000	3,800	15,000
황산 이온 농도	ppm	~ 0	~ 0	2.0	0.8
암모늄 이온 농도	ppm	~ 0	~ 0	7.0	2.0
용존산소농도	ppm	7.5	8.2	0.3	0
화학적산소요구량	ppm	23	20	37	25
산화환원전위	mV	429	417	56	71
황산염환원 박테리아 수	수/ml	3	7	1.1×10 ⁵	4.5×10 ⁴

Table 2.15 Comparison of design factors for cathodic protection

설계 세부 항목	국 내 (A)	국 외 (B)	고 찰
등가 직경 계산	$(B_1+B_2+2\times D_1)=\pi D$ $D = B_1 + B_2 + 2 \times \frac{D_1}{\pi}$	$(B_1+B_2)\times D_1 \div 2 = \pi D^2 / 4$ $\pi D^2 = 2D_1(B_1+B_2)$ $D^2 = 2D_1(B_1+B_2) / \pi$ $D = \sqrt{\frac{2D_1(B_1+B_2)}{\pi}}$	<p>·국외의 등가직경계산이 정확하므로 향후 방식설계 시(B)의 공식을 이용함이 타당하다고 사료됨.</p> <p>·국내식으로 계산시 D가 크게 나와 접지저항이 적어지고 발생전류가 커져서 수명이 짧아진다.</p>
접지 저항 공식	$R_1 = \frac{\rho}{2\pi L} (2.3 \log \frac{8L}{D} - 1)$ $R_2 = 0.2639 \rho L^{-0.75} \cdot D^{-0.28}$ <p>ρ:비저항, L:양극길이 D: 등가직경, r: 반경</p>	$R_1 = \frac{\rho}{2\pi L} (2.3 \log \frac{8L}{D} - 1)$ $R_2 = 0.2639 \rho L^{-0.75} \cdot D^{-0.28}$ <p>ρ:비저항, L:양극길이 D: 등가직경, r: 반경</p>	<p>·접지저항을 구할 때 양극의 형상에 따라서 R₁식과 R₂식을 구별해서 사용함이 적절하다고 사료됨. 지금까지 뚜렷한 구별이 없었음</p> <p>·R₁공식 적용 :</p> $\frac{L}{r} > 4.375$ <p>·R₂공식 적용 :</p> $\frac{L}{r} < 4.375$
방식 전류 밀도	<p>·해수중 : 100mA/m²</p> <p>·사석부 : 50mA/m²</p> <p>·해토중 : 20mA/m²</p>	<p>※ 일본의 경우</p> <p>①1976년까지</p> <p>·해수중 : 100mA/m²</p> <p>·사석부 : 50mA/m²</p> <p>·해토중 : 20mA/m²</p> <p>②1977년 이후</p> <p>·해수중 : 130mA/m²</p> <p>·사석부 : 65mA/m²</p> <p>·해토중 : 25mA/m²</p>	<p>·국내에서는 20년 전의 일본에서 적용한 수치를 그대로 적용하고 있음. 특히 해수의 오염이 일본보다 심한 국내의 경우 1977년 이후의 일본에서 적용하는 수치보다 높은 경우도 배제하지 못한다고 사료됨. 따라서 국내의 경우 적어도 1977년 이후의 일본의 수치 이상을 적용함이 타당하다고 사료됨. 수질분석결과에 따라 더 높은 수치 적용도 고려되어야 함</p>

설계 세부 항목	국 내(A)	국 외(B)	고 찰
양극수명 계산시의 양 극 소 모 율	$Y = 0.85 \frac{W}{I \cdot S}$ <p>S: 양극 소모율 Y: 양극 수명 W: 양극 중량 I: 양극 평균발생전류</p>	$Y = 0.85 \frac{W}{I \cdot S}$ <p>Y: 양극 수명 W: 양극 중량 S: 양극 소모율 I: 양극 평균발생전류</p>	·해수의 오염도에 따라 양극 전류 효율이 달라지고 양극소모율도 달라지게 됨. 현재 국내의 경우 양극 전류 효율을 92%로 계산하고 있으나 해수의 오염을 고려할 때 적어도 85% 전후로 계산함이 타당하다고 사료됨. 일본의 경우 1977년 이후 80%의 전류효율로 계산하다가 최근 양극성능의 개선으로 90%까지 접근하고 있음.
양극수명 계산시의 양극평균 발생전류	$Y = 0.85 \frac{W}{I \cdot S}$ <p>Y: 양극수명 W: 양극 중량 S: 양극 소모율 I: 양극 평균발생전류 I = A×0.5</p>	$Y = 0.85 \frac{W}{I \cdot S}$ <p>Y: 양극수명 W: 양극 중량 S: 양극 소모율 I: 양극평균발생전류 I = A×(0.5, 0.52, 0.55)</p>	·양극 평균 발생전류는 통상방식 기간을 5년의 경우 : 초기발생전류의 0.55배 10년의 경우 : 0.52배 15년의 경우 : 0.5배로 규정하고 있으나 국내의 경우, 무조건 0.5배로 하고 있음. 따라서 해수의 오염도를 고려할 때 0.55배 이상을 적용해야 된다고 사료됨.
소요양극 개 수	<p>A. 양극의 형상이 정해진 경우</p> <p>① I(양극 초기발생전류) $I = \frac{\Delta E}{R} (R: \text{접지저항})$</p> <p>②A(방식전류= 방식전류밀도×방식면적)</p> <p>③ n(양극개수) $n = \frac{A}{I}$</p> <p>④ 변수 : 비저항, 양극형상, 방식전류밀도</p> <p>⑤특징:비저항 감소→양극수 및 수명 감소</p> <p>◆ 고 찰 현재 국내, 국외에서 설계시에 이용하고 있는 방법임.</p>	<p>B. 양극의 형상을 정하지 않고 양극수명만 정할 경우</p> <p>① Q(전류량 = A×양극수명)</p> <p>②W(방식에 필요한 양극중량) $W = \frac{Q}{S}$ (S:양극 단위중량당 발생전류량)</p> <p>③ n(양극개수) $n = \frac{W}{W_1}$ (W₁: 양극 한 개당의 중량)</p> <p>④ 변수:전류효율,방식전류밀도</p> <p>⑤ 특징:전류효율이 적을수록 소요개수 증가, (A)식에비해서 소요개수가 많음</p>	

2.3.7 해양 강구조물 효율적인 방식설계 적용을 위한 시뮬레이션 연구

1. 연구 방법

희생 양극 방식 설계에는 전술한 바와 같이 방식면적, 방식 전류밀도, 양극의 발생전류, 소요개수, 수명 등이 검토되어야 한다. 현재 동양방식이라는 회사에서 생산하고 있는 항만 구조물용 표준형 양극 중에서 10종(DPA-10-1~5, DPA-20-1~5, DPA : Dongyang Protection Anode)을 선택하여 각각의 양극에 대해서 비저항을 변수로 하였을 때 접지저항과 발생전류, 소요개수 및 전류효율이 달라졌을 때의 수명 등을 시뮬레이션 하였다³²⁾. 현재 외국의 경우 해수의 오염도에 따라 비저항이 달라지고 전류효율 역시 변화하고 있음을 고려하여 일차적으로 비저항을 변수로 하고 2차적으로 전류효율을 변수로 하였다. 그리고 Table 2.16에서 알 수 있듯이 방식전류밀도는 초기 방식전류밀도이며 해수중에서 $0.1A/m^2$, 해토중에서 $0.02A/m^2$ 로 해수가 오염되지 않은 청정 해수중에서 방식할 경우를 전제로 하고 있다. 그러나 현재 국내외를 막론하고 해수가 오염되고 있는 시점에서 초기 방식전류밀도는 청정 해수보다 큰 값이 요구되고 있음을 주목하고 방식설계 시에 방식하고자 하는 해수의 방식전류밀도를 구하여 설계하는 것이 타당하다고 사료된다.

그리고 양극의 수명을 계산할 경우에도 Table 2.16에서는 초기발생전류를 적용하였지만 실제의 양극수명계산에 있어서는 최종 발생전류를 적용하는 것이 상례이다. 최종 발생 전류는 초기 발생전류의 0.55배(방식기간 5년), 0.52배(방식기간 10년), 및 0.5배(방식기간 15년)로 산정하고 있다. 그런데 국내의 방식회사에서는 양극 수명 계산시에 초기발생 전류의 0.5배를 적용하고 있다. 이 경우에는 15년 방식을 무조건 전제로 하고 있다. 그러나 해수의 부식특성에 따라서 초기 발생전류의 0.5배로 산정하는 것은 모순이며 양극전류효율에 따라 양극수명이 단축되므로 0.5배의 계산은 검토의 필요성이 있다고 사료된다. 그리고 접지저항의 공식에 있어서 현재 국내의 모든 방식회사에서 주로 사용하고 있는 공식이 Table 2.16에 있는 R_1 과 R_2 식이다. R_1 의 식을 주로 적용하고

있는 경우는 양극의 길이(L)와 양극의 반경(r)의 비 즉 L/r 가 큰 경우이며, R_2 의 식은 L/r 가 적은 경우에 적용한다.

Table 2.16 Equations for cathodic protection design

구 분	공 식	비 고
양극 저항 (R)	$R_1 = \frac{\rho}{2\pi L} \left(2.3 \log \frac{8L}{D} - 1 \right)$ $R_2 = 0.263 \rho L^{-0.75} \cdot D^{-0.28}$	<p>ρ: 해수의 비저항($\Omega \cdot \text{cm}$)</p> <p>L: 양극 길이 (cm)</p> <p>D: 등가 직경 (cm)</p>
발생 전류 (A)	$I = \frac{\Delta E}{R}$	$\Delta E : 0.25 \nabla$
소요 양극개수(n)	$n = 4.74 / I$	<p>방식면적 (97m²)</p> <p>-해수부:35m², 방식전류밀도:0.1A/m²</p> <p style="text-align: center;">$I_1 = 0.1 \times 35 = 3.5 \text{ A}$</p> <p>-해토부:62m², 방식전류밀도:0.02A/m²</p> <p style="text-align: center;">$I_2 = 0.12 \times 62 = 1.24 \text{ A}$</p> <p>-소요방식전류 $I = I_1 + I_2 = 4.74$</p>
양극 수명 (Y)	$Y = 0.85W / I \cdot S$	<p>W: 중량(kg)</p> <p>I: 양극 발생 전류(A)</p> <p>0.85: 사용 가능 계수</p> <p>S: 양극의 소모율</p> <p>S₁: 3.41 (전류 효율 : 90%)</p> <p>S₂: 3.61 (전류 효율 : 85%)</p> <p>S₃: 3.84 (전류 효율 : 80%)</p> <p>$\therefore S_1 = 8,760\text{h} / (2,850\text{A} \cdot \text{h} \times 0.9)$</p> <p style="text-align: center;">$= 3.41(\text{kg}/\text{A} \cdot \text{Y})$</p> <p>$\therefore$ 이론발생전기량: 2,850A·h/kg</p>

2. 연구결과 및 고찰

Table 2.17에서 DPA-20-1의 양극($L=35\text{Cm}$, $r=10\text{Cm}$)에서는 L/r 가 3.5로 가장 작은 값을 나타내고 있으며 이 경우 R_2 값이 R_1 보다 큰 값을 나타내었다. 그런데 나머지 9종의 양극은 모두 R_1 이 R_2 보다 큰 값을 나타내었다. 따라서 접지저항의 R_1 과 R_2 공식에서 R_1 과 R_2 값을 구하여 큰 값을 나타내는 공식이 정확한 공식이라고 사료되며 대개의 경우 R_1 식을 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다. 그리고 Fig. 2.13은 DPA-20-1과 DPA-20-3의 양극을 R_1 과 R_2 식에 의해서 비저항을 변수로 접지저항을 구하였을 경우의 차이를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 DPA-20-1양극은 R_2 값이 R_1 보다 큰 값을 나타내며 DPA-20-3 양극은 R_1 값이 R_2 보다 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 그리고 비저항의 증가에 의해서 접지저항은 증가되며 비저항이 감소할수록 접지저항도 감소함을 알 수 있다.

Fig.2.14는 DPA-20-1 양극에서 비저항이 증가함에 따라 양극의 수명도 증가하게 됨을 보여주고 있다. 그리고 접지저항 공식 R_2 를 적용하였을 경우 양극 소요 개수(N_2)도 증가됨을 알 수 있다. 상대적으로 양극 초기 발생전류(I_2)는 I_1 보다 감소함을 알 수 있었다. Fig.2.15는 DPA-20-3 양극의 경우 비저항 변화에 따른 양극 소요개수와 양극 초기 발생전류의 관계를 보여주고 있다. DPA-20-3 양극은 오히려 양극소요 개수는 R_1 공식에 의해서 계산된 N_1 값이 N_2 보다 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 초기 발생전류는 I_1 이 I_2 보다 적은 값을 알 수 있었다. 결국 양극의 형상 즉 양극 길이와 반경에 따라서 접지저항, 양극 초기 발생전류, 양극 소요 개수가 달라지고 있음을 알 수 있다.

Fig.2.16는 양극의 전류효율을 변수로 했을 경우 DPA-20-1 양극의 수명 관계를 나타내고 있다. 비저항이 증가할수록 양극 수명은 증가됨을 알 수 있다. 그리고 양극의 전류효율이 큰 값을 가질수록 양극 수명도 증가됨을 알 수 있다. R_2 공식을 적용하여 구한 양극수명(Y_2)이 R_1 공식을 적용하여 구한 수명(Y_1)보다

Table 2.17 The data obtained from simulation by using equation of protection design for various type of anode

TYPE : DPA-20-1

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R ₁	R ₂	I ₁	I ₂	N ₁	N ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂		
38	0.28	0.30	0.88	0.83	5.4	5.7	9.0	9.6	8.5	9.0	8.0	8.5		치수:(185+165)× 180×350 mm 중량:32 kg, L:350 mm 등가직경(D) :20.0 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.26	0.28	0.96	0.90	4.9	5.2	8.3	8.8	7.9	8.3	7.4	7.8		
30	0.22	0.24	1.12	1.05	4.2	4.5	7.1	7.6	6.7	7.1	6.3	6.7		
25	0.19	0.20	1.34	1.27	3.5	3.7	5.9	6.3	5.6	6.0	5.3	5.6		
24	0.18	0.20	1.40	1.32	3.4	3.6	5.7	6.0	5.4	5.7	5.1	5.4		

TYPE : DPA-20-2

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R ₁	R ₂	I ₁	I ₂	N ₁	N ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂		
38	0.23	0.20	1.11	1.23	4.3	3.9	10.8	9.7	10.2	9.2	9.6	8.7		치수:(175+155)× 170×600 mm 중량:48 kg, L:600 mm 등가직경(D) :18.9 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.21	0.19	1.20	1.33	3.9	3.6	9.9	9.0	9.4	8.5	8.8	8.0		
30	0.18	0.16	1.41	1.56	3.4	3.0	8.5	7.7	8.0	7.3	7.5	6.8		
25	0.15	0.13	1.09	1.87	2.8	2.5	7.1	6.4	6.7	6.1	6.3	5.7		
24	0.14	0.13	1.76	1.94	2.7	2.4	6.8	6.2	6.4	5.8	6.0	5.5		

TYPE : DPA-20-3

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R ₁	R ₂	I ₁	I ₂	N ₁	N ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂		
38	0.18	0.15	1.38	1.63	3.4	2.9	11.4	9.6	10.8	9.1	10.1	8.5		치수:(165+145)× 160×900 mm 중량:63 kg, L:900 mm 등가직경(D) :17.7 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.17	0.14	1.49	1.77	3.2	2.7	10.5	8.9	9.9	8.4	9.3	7.9		
30	0.12	0.12	1.74	2.07	2.7	2.3	9.0	7.6	8.5	7.2	8.0	6.7		
25	0.12	0.10	2.09	2.48	2.3	1.9	7.5	6.3	7.1	6.0	6.7	5.6		
24	0.11	0.10	2.18	2.59	2.2	1.8	7.2	6.1	6.8	5.7	6.4	5.4		

TYPE : DPA-20-1

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R ₁	R ₂	I ₁	I ₂	N ₁	N ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂		
38	0.28	0.30	0.88	0.83	5.4	5.7	9.0	9.6	8.5	9.0	8.0	8.5		치수:(185+165)× 180×350 mm 중량:32 kg, L:350 mm 등가직경(D) :20.0 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.26	0.28	0.96	0.90	4.9	5.2	8.3	8.8	7.9	8.3	7.4	7.8		
30	0.22	0.24	1.12	1.05	4.2	4.5	7.1	7.6	6.7	7.1	6.3	6.7		
25	0.19	0.20	1.34	1.27	3.5	3.7	5.9	6.3	5.6	6.0	5.3	5.6		
24	0.18	0.20	1.40	1.32	3.4	3.6	5.7	6.0	5.4	5.7	5.1	5.4		

TYPE : DPA-20-3

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R ₁	R ₂	I ₁	I ₂	N ₁	N ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₁	Y ₂		
38	0.18	0.15	1.38	1.63	3.4	2.9	11.4	9.6	10.8	9.1	10.1	8.5		치수:(165+145)× 160×900 mm 중량:63.0 kg, L:900 mm 등가직경(D) :17.7 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.17	0.14	1.49	1.77	3.2	2.7	10.5	8.9	9.9	8.4	9.3	7.9		
30	0.12	0.12	1.74	2.07	2.7	2.3	9.0	7.6	8.5	7.2	8.0	6.7		
25	0.12	0.10	2.09	2.48	2.3	1.9	7.5	6.3	7.1	6.0	6.7	5.6		
24	0.11	0.10	2.18	2.59	2.2	1.8	7.2	6.1	6.8	5.7	6.4	5.4		

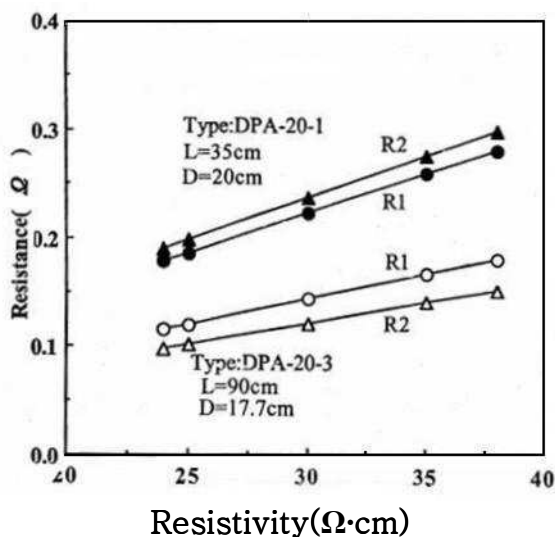


Fig. 2.13 Relationship between grounding resistance and resistivity.

TYPE : DPA-20-1

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R_1	R_2	I_1	I_2	N_1	N_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2		
38	0.28	0.30	0.88	0.83	5.4	5.7	9.0	9.6	8.5	9.0	8.0	8.5		치수:(185+165) \times 180 \times 350 mm 중량:32 kg L:350 mm 등가직경(D) :20.0 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.26	0.28	0.96	0.90	4.9	5.2	8.3	8.8	7.9	8.3	7.4	7.8		
30	0.22	0.24	1.12	1.05	4.2	4.5	7.1	7.6	6.7	7.1	6.3	6.7		
25	0.19	0.20	1.34	1.27	3.5	3.7	5.9	6.3	5.6	6.0	5.3	5.6		
24	0.18	0.20	1.40	1.32	3.4	3.6	5.7	6.0	5.4	5.7	5.1	5.4		

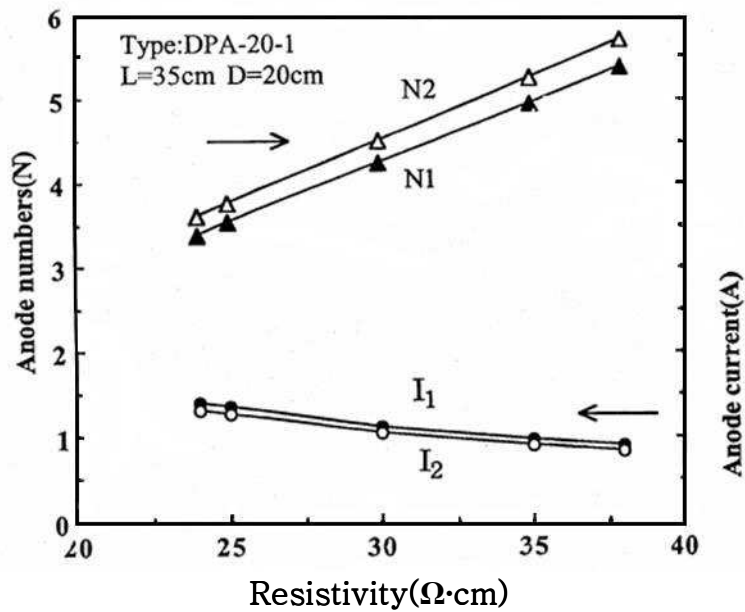


Fig. 2.14 Relationship between anode number, producing current and resistivity.

TYPE : DPA-20-3

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R_1	R_2	I_1	I_2	N_1	N_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2		
38	0.18	0.15	1.38	1.63	3.4	2.9	11.4	9.6	10.8	9.1	10.1	8.5		치수:(165+145) \times 160 \times 900 mm 중량:63.0 kg, L:900 mm 등가직경(D) :17.7 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.17	0.14	1.49	1.77	3.2	2.7	10.5	8.9	9.9	8.4	9.3	7.9		
30	0.12	0.12	1.74	2.07	2.7	2.3	9.0	7.6	8.5	7.2	8.0	6.7		
25	0.12	0.10	2.09	2.48	2.3	1.9	7.5	6.3	7.1	6.0	6.7	5.6		
24	0.11	0.10	2.18	2.59	2.2	1.8	7.2	6.1	6.8	5.7	6.4	5.4		

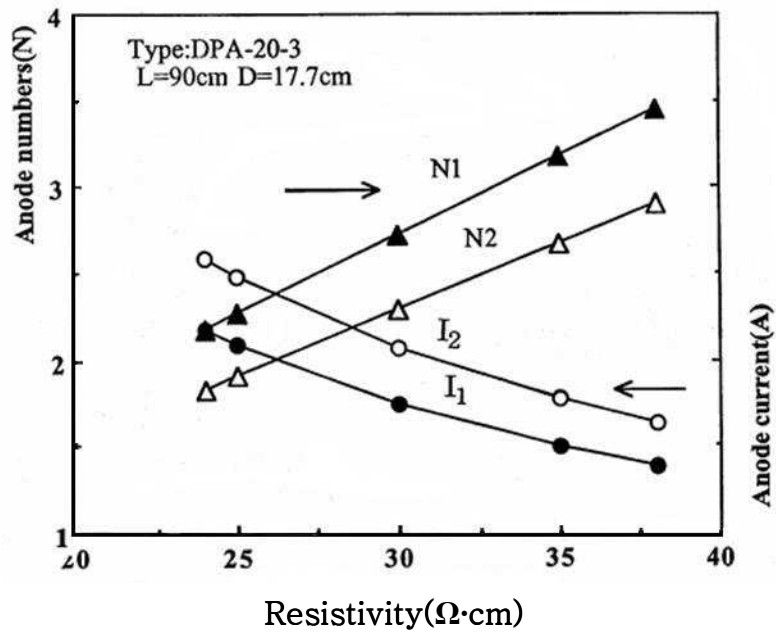


Fig. 2.15 Relationship between anode number, producing current and resistivity.

TYPE : DPA-20-1

비저항 (Ωcm)	접지저항		발생전류		소요갯수		90%		85%		80%		전류효율 수명	양극특성
	R_1	R_2	I_1	I_2	N_1	N_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2		
38	0.28	0.30	0.88	0.83	5.4	5.7	9.0	9.6	8.5	9.0	8.0	8.5		치수:(185+165) \times 180 \times 350 mm 중량:32 kg, L:350 mm 등가직경(D) :20.0 cm 이론발생전기량 :2850 A·h/kg
35	0.26	0.28	0.96	0.90	4.9	5.2	8.3	8.8	7.9	8.3	7.4	7.8		
30	0.22	0.24	1.12	1.05	4.2	4.5	7.1	7.6	6.7	7.1	6.3	6.7		
25	0.19	0.20	1.34	1.27	3.5	3.7	5.9	6.3	5.6	6.0	5.3	5.6		
24	0.18	0.20	1.40	1.32	3.4	3.6	5.7	6.0	5.4	5.7	5.1	5.4		

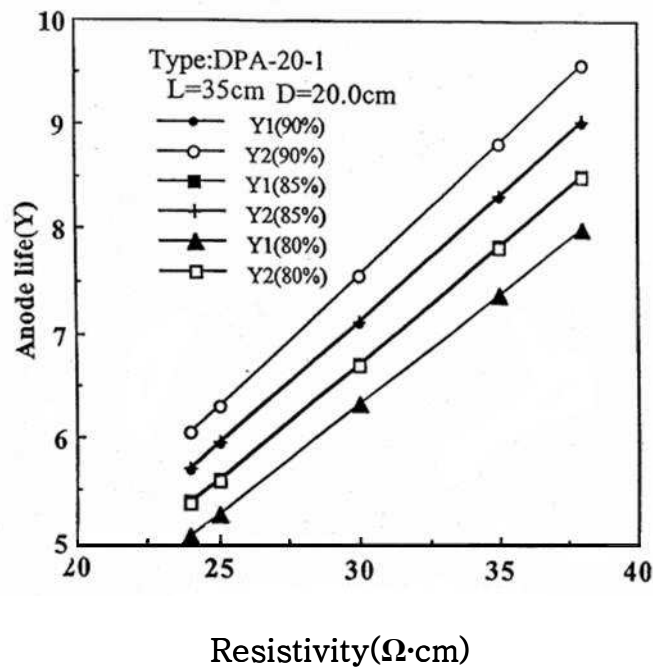


Fig. 2.16 Relationship between anode life time and resistivity with variation of anode current efficiency.

큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 국내의 방식회사에서 방식설계 시에 양극 전류효율을 92%로 하여 양극 수명을 20년 이상으로 계산하고 있는 경우가 많다. 그러나 실제의 양극 수명은 단축되고 있음은 전류효율이 92%보다 적은 값을 추정할 수 있으므로 연구 검토의 여지가 남는다.

Table 2.18은 비저항(ρ)과 양극길이(L)와 등가직경(D)의 변화에 따른 접지저항(R_1)의 변화를 시뮬레이션 한 결과이다. Fig. 2.17은 비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 양극길이와 등가직경 변수에 따른 접지저항의 변화를 보여주고 있다. 양극의 길이에 관계없이 등가직경이 크면 접지저항은 작아지고 있음을 알 수 있다. 그리고 양극길이가 길수록 같은 등가직경에서 접지저항은 작아짐을 알 수 있다. Fig. 2.18은 비저항이 $35\Omega \cdot \text{cm}$ 의 경우 양극 길이(L)와 등가직경(D)의 변화에 따른 접지저항(R_1)의 변화를 보여주고 있다. 양극길이가 길수록 접지저항은 적어지고 있음을 알 수 있다. 그리고 양극길이가 35cm의 경우 등가직경이 증가할수록 접지저항의 감소 경향이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 2.19는 비저항 $45\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 등가직경과 양극길이의 변화에 따른 접지저항 변화를 보여주고 있다. 접지저항의 변화경향은 Fig. 2.17, 2.18과 같은 양상을 보이고 있다. Fig. 2.20은 양극길이가 35cm의 경우 비저항 변화와 등가직경 변화에 따른 접지저항의 변화를 보여주고 있다. 비저항이 클수록 접지저항은 크며 등가직경이 클수록 접지저항은 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 2.21에서는 양극 길이 130cm에서 등가직경과 비저항 변화에 따른 접지저항 변화를 보여 주고 있다. Fig. 2.20과 같은 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 결국 등가직경이 클수록 양극 길이가 길수록 비저항이 적을수록 접지저항은 작아지는 경향이 있음을 알 수 있었다.

Table 2.18 The data obtained from simulation by using equation of protection design with variation of anode size and resistivity

※ ρ , D, L 의 변수에 따른 접지저항의 변화

ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	L (cm)	D (cm)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	L (cm)	D (cm)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	비 고
25	35	10	0.265	0.240	25	90	10	0.145	0.118	ρ : 비저항($\Omega \cdot \text{cm}$) D: 등가직경(cm) L: 양극길이(cm) R_1 : 접지저항 R_2 : 접지저항
		12	0.244	0.228			12	0.137	0.112	
		14	0.227	0.218			14	0.130	0.107	
		16	0.2114	0.210			16	0.124	0.104	
		18	0.1980	0.203			18	0.119	0.100	
		20	0.1861	0.197			20	0.114	0.097	
25	110	10	0.126	0.102	25	130	10	0.112	0.090	
		12	0.119	0.097			12	0.106	0.085	
		14	0.113	0.092			14	0.101	0.082	
		16	0.109	0.089			16	0.097	0.079	
		18	0.104	0.086			18	0.093	0.076	
		20	0.100	0.084			20	0.090	0.074	

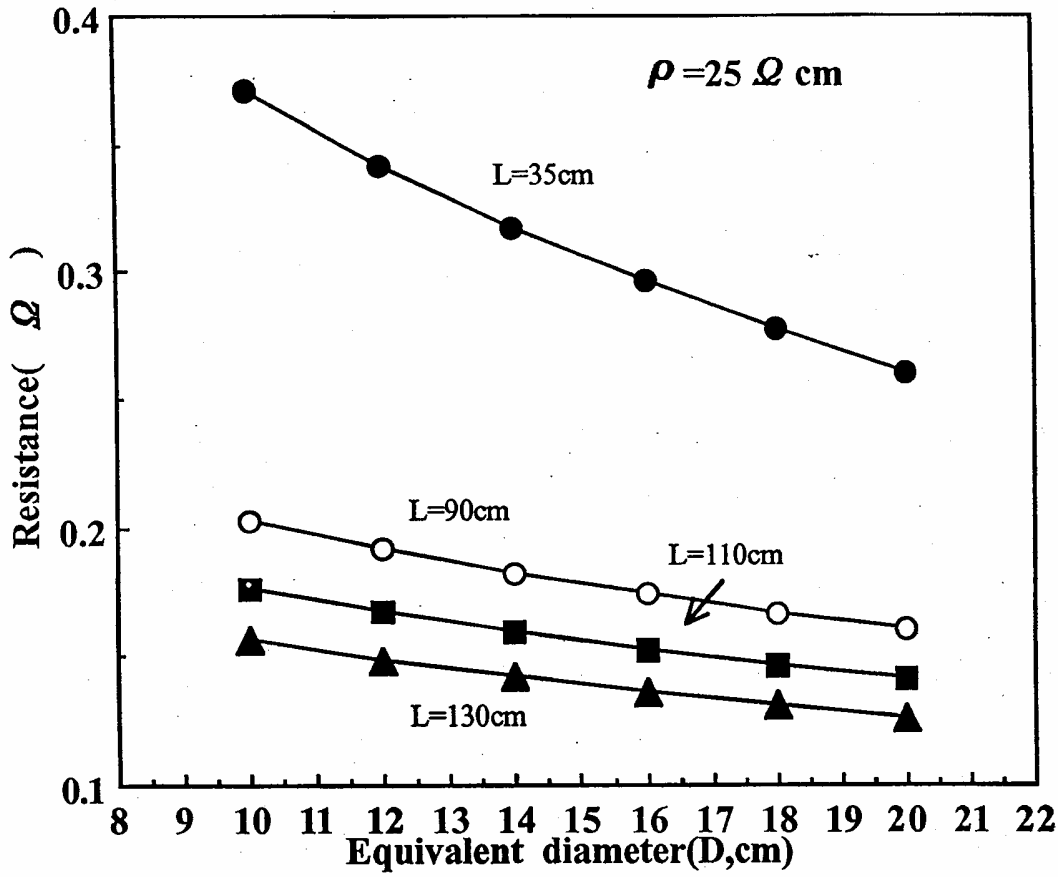


Fig. 2.17 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter.

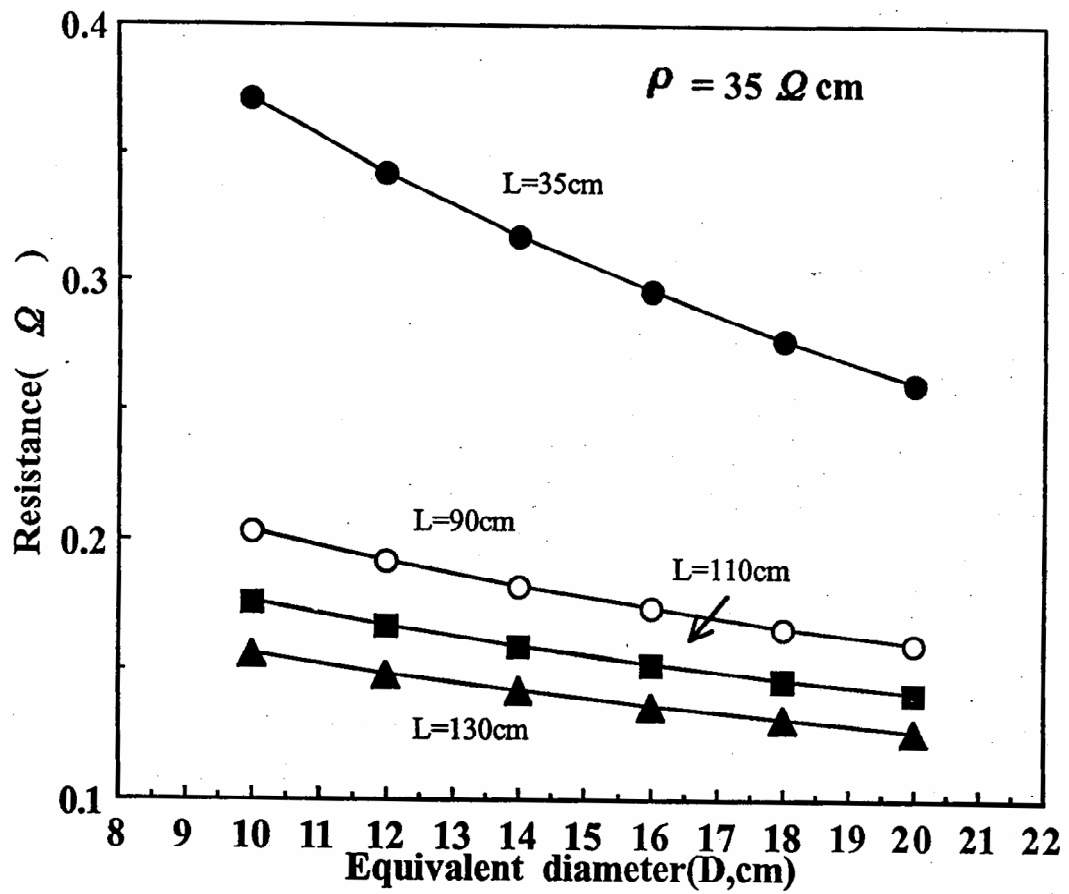


Fig. 2.18 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter.

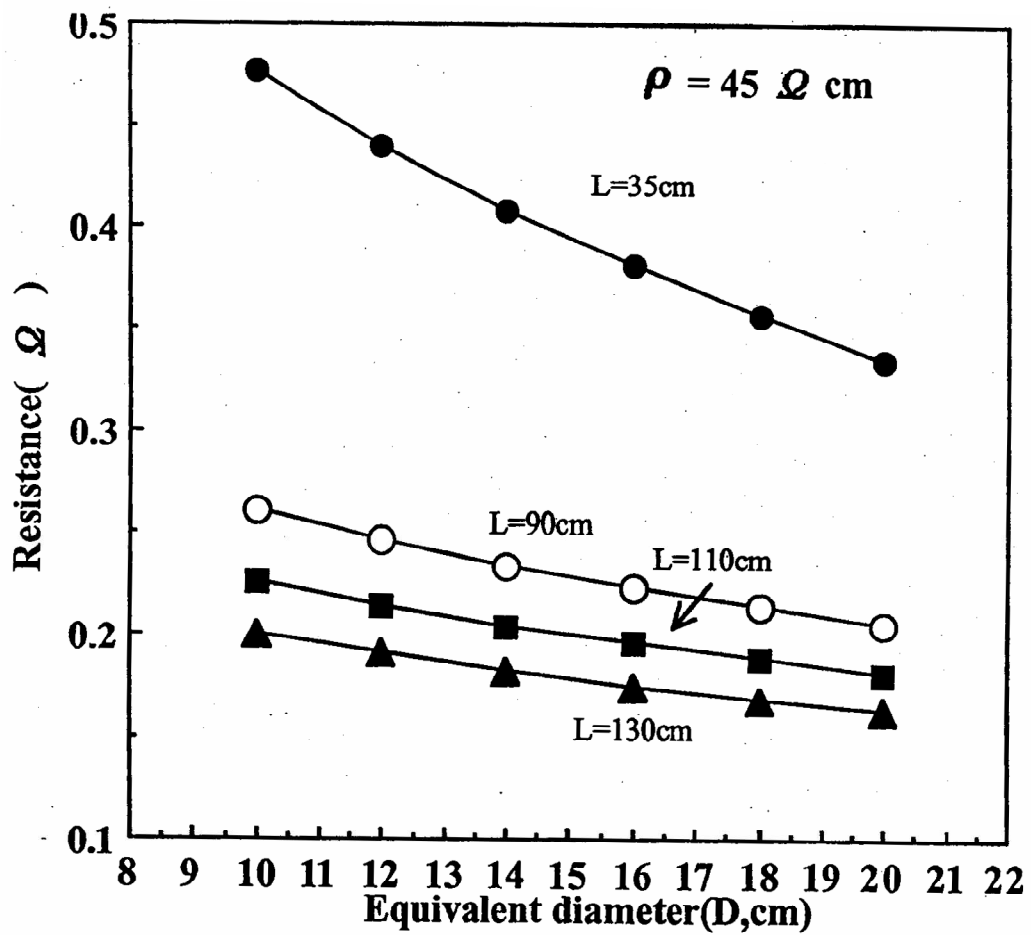


Fig. 2.19 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter.

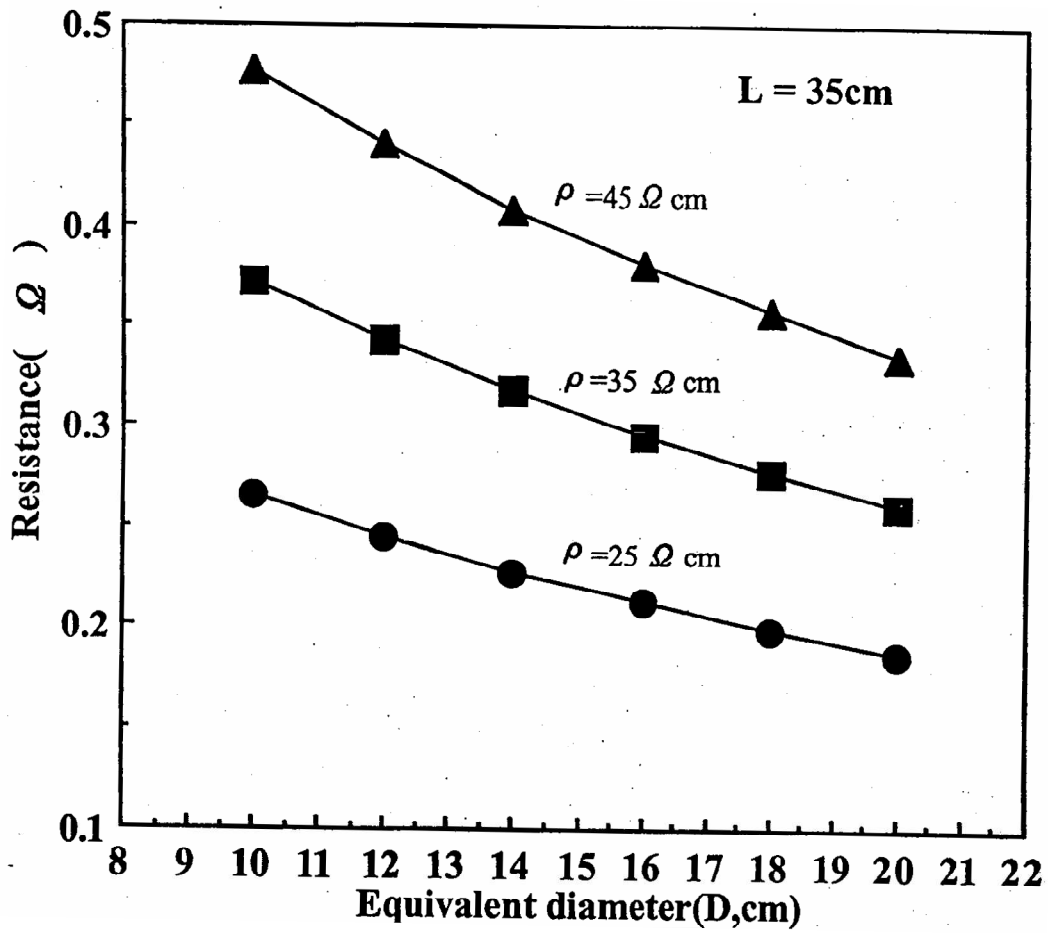


Fig. 2.20 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of resistivity.

Fig. 2.22는 비저항 $25\Omega \cdot \text{cm}$ 양극길이 35cm와 130cm의 경우 등가직경과 접지 저항의 관계를 나타내고 있다. 양극 길이가 35cm의 경우 등가직경 16cm이하에서는 R_1 이 R_2 보다 큰 값을 나타내며 16cm 이상에서는 R_2 가 R_1 보다 오히려 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 양극 길이 130cm에서는 등가직경 전체에서 R_1 이 R_2 보다 큰 값을 나타내었다.

Fig. 2.23은 비저항 $45\Omega \cdot \text{cm}$ 에서 양극 길이와 등가직경 변화에 따른 접지 저항의 변화를 보여주고 있다. 양극길이가 35cm에서 등가직경 16cm이하에서는 역시 R_1 이 큰 값을 나타내며 16cm이상에서는 R_2 가 오히려 큰 값을 나타내었다. 그러나 양극 길이 130cm에서는 등가직경 전체 값에 관계없이 R_1 이 R_2 보다 큰 값을 나타내었다. 이상의 결과에서 비저항의 값에 관계없이 양극길이 35cm에서 등가직경 16cm이상에서는 R_2 이 큰 값을 나타내므로 즉 L/r 의 값이 4.375 이하에서는 R_2 공식을 사용하고 L/r 의 값이 4.375 이상에서는 R_1 공식을 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

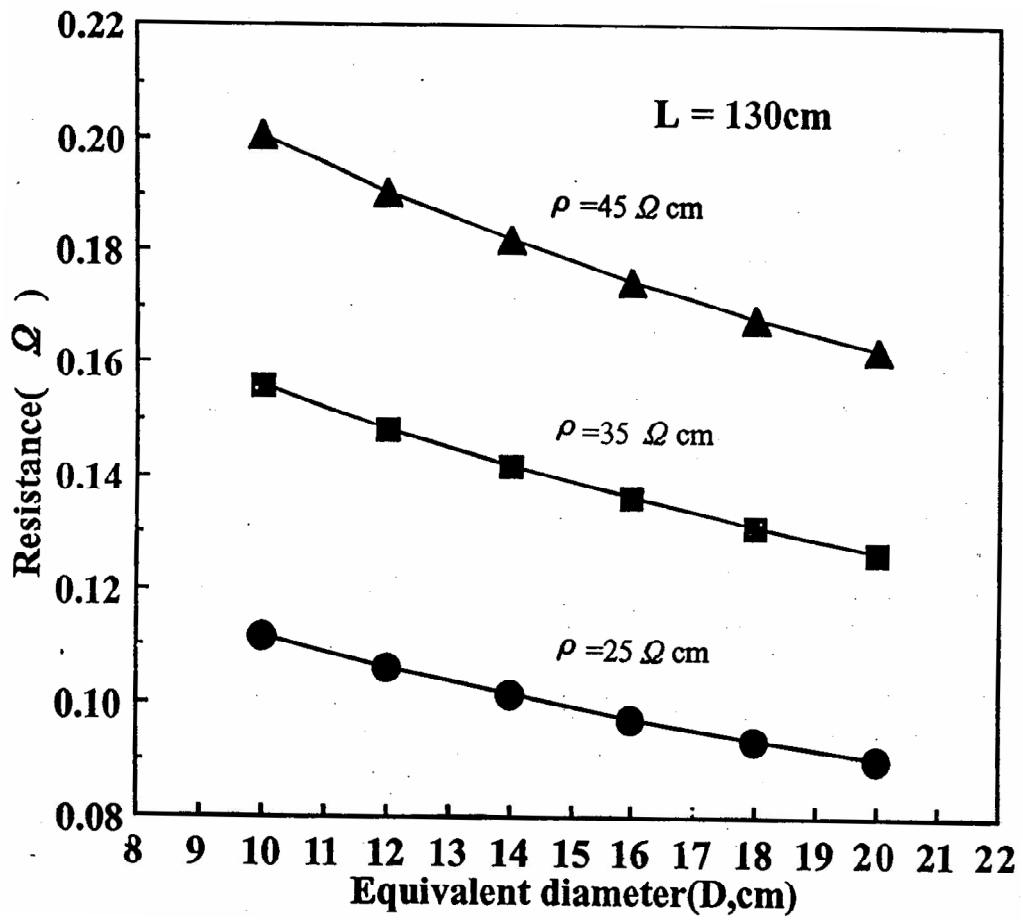


Fig. 2.21 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of resistivity.

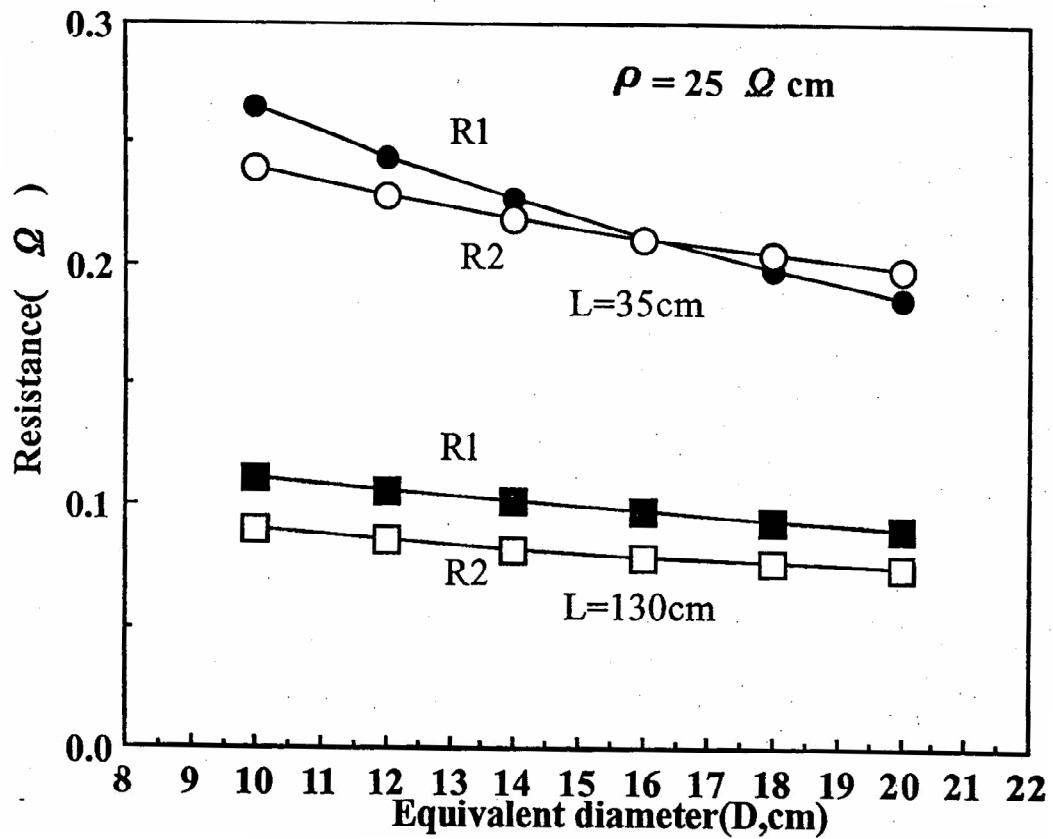


Fig. 2.22 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of anode length.

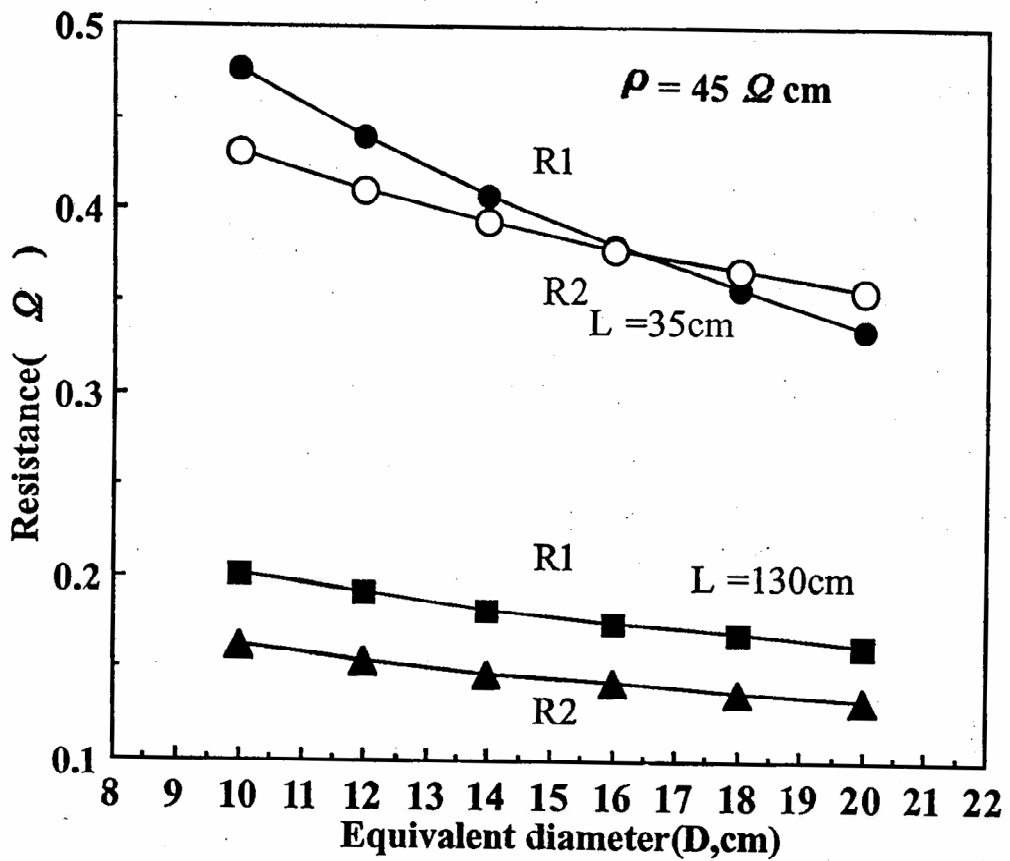


Fig. 2.23 Relationship between grounding resistance and equivalent diameter with variation of anode length.

3. 요약

- 1) DPA-20-1의 경우 접지저항은 R_2 공식을 이용한 경우가 접지저항이 크고 DPA-20-3의 경우에는 R_1 공식을 이용한 경우가 오히려 접지저항이 크다.
- 2) DPA-20-1의 경우 양극길이가 등가직경에 비해서 짧다. 그리고 DPA-20-3의 경우에는 양극길이가 등가직경에 비해서 길다. 따라서 양극의 형상에 따라서 접지저항의 공식을 달리해야 한다.
- 3) 접지저항공식 중 L/r 값이 4.375 이상에서는 R_1 공식, 그 이하에서는 R_2 공식을 적용하는 것이 적절하다고 사료된다. (L : 양극길이, r : 반경)
- 4) 상기의 시뮬레이션 데이터에서 구한 양극수명은 초기 발생전류 값으로 계산하였다. 그러나 실제의 양극수명은 방식 기간을 감안하여 초기 발생전류 \times (0.5(방식기간 15년), 0.52(방식기간 10년))로 해서 양극의 평균 발생전류를 구하여 계산하여야 된다.
- 5) 비저항이 증가하면 양극의 발생전류가 감소하고 수명이 증가되며 소요 개수도 증가됨을 알 수 있으며 양극 전류효율이 크면 예상 수명이 증가됨을 알 수 있었다. 따라서 해수의 오염도에 따라 양극 전류 효율이 달라지므로 모든 항만에서 일률적인 전류 효율적용은 문제가 있는 것으로 사료된다.
- 6) 일정한 양극길이에서 등가직경이 크면 접지저항은 적어지고, 등가직경이 일정한 경우 양극의 길이가 길수록 접지저항은 적어짐을 알 수 있다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 음극방식의 설계에 미치는 해수 환경인자 및 피 방식체 표면상태의 영향

3.1.1 연구 배경 및 목적

제2장에서는 부식에 관한 기본적인 이론과 국내 방식 설계상의 문제점과 이들 문제점에 대해 시뮬레이션을 통하여 양극의 접지저항과 발생전류 및 양극 수명 등에 대해서 고찰하여 보았다. 이 장에서는 실험실 실험을 통하여 피 방식체의 표면상태(부식정도)와 유속, 해수오염도가 양극 소모량 및 발생전류, 음극(피 방식체)의 분극전위 변화와 공급전류밀도변화 등에 미치는 영향에 대해서 고찰하여 본다. 그 동안 외부전원법에 대해서는 해수의 오염도 수온 유속 등³⁵⁻³⁷⁾에 관한 연구와 피 방식체의 표면상태 등을 고려한 종합적인 방식설계를 하고 있으나, 희생양극법의 경우에 대해서는 연구결과가 거의 없는 실정이다.

본 연구결과는 국내에서도 선진국과 같이 희생양극법 및 외부전원법으로 강 구조물을 음극방식 할 경우 해수의 특성과 강 표면 상태에 따라 최적 방식설계를 하기 위한 참고자료가 되리라 기대된다.

3.1.2 시험편 제작 및 실험방법

1. 음극 시험편

음극 시험편은 실험실 실험과 현장 실험(대형 수조 및 해상 실험)용으로 구분하여 제작하였다.

Photo. 3.1은 실험실 실험 및 현장 실험에 사용된 음극 시험편의 표면사진이다. 실험실 실험에 사용된 시험편 재료는 SS400강판이었다. Fe 시험편은

크기 10×10cm로 절단 후 Sand paper #200에서 #1000번까지 순차적으로 polishing하여 시험편에 동선(ø2mm)을 연결하여 노출면적을 제외한 나머지 부분은 에폭시로 도포하였다. Rusted Fe 시험편은 동일한 강판을 부산 조도(해양대) 바닷가에서 해상으로부터 10m 이격시켜 대기 중에 노출시킨 상태에서 1개월에 1회 해수를 분사하여 약 10개월 동안 자연 부식시킨 시험편이다.

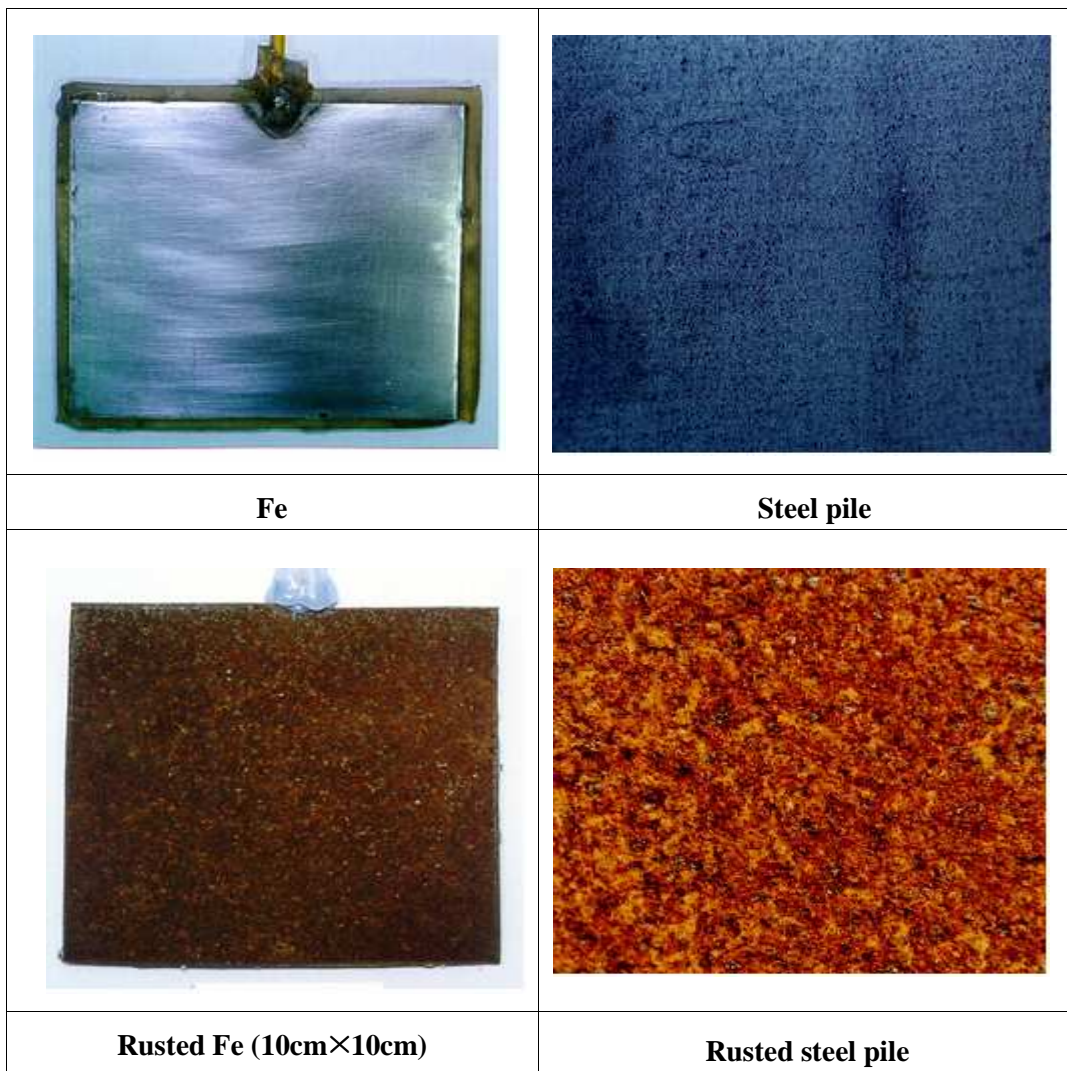


Photo. 3.1 Specimen surfaces.

2. 양극 시험편

외부전원법으로 사용된 불용성 양극은 실험실 실험에서는 직경 0.5cm의 탄소봉을 사용하였으며, 2ℓ비이커에 해수를 채우고 용액의 유동 유·무에 따른 부식전위 변화를 9일간 측정하였다. 해수는 부산 조도(해양대)의 천연해수를 사용하였으며, 부식전위 측정 중 매일 1회 해수를 40ml씩 교환하였다. 용액의 유동속도는 stirrer를 이용하여 비이커 내 시험편 표면 평균 유동속도가 3cm/s가 되도록 유동속도 조절 스위치를 이용하여 조정하였다. 한편 유동속도는 P.I.V. (Particle Image Velocimetry) 장비를 이용하였으며 Fig. 3.1은 시험편 표면의 유동의 흐름과 속도를 나타내고 있다. 이후 각 실험의 유속은 상기와 같은 방법으로 비이커 내의 유동속도를 측정하였다. 부식전위 측정용 기준전극은 포화 카로멜전극(Saturated Calomel Electrode : SCE)에 염 다리를 연결하여 사용하였다.

희생양극법에 의한 음극 강 파일의 분극거동을 고찰하기 위해 사용된 Al 합금 양극은 Al-Zn-In계를 사용하였으며 주요성분은 Table 3.1과 같다. 그리고 본 실험에 사용된 항만 해수의 수질분석 결과는 Table 3.2와 같다

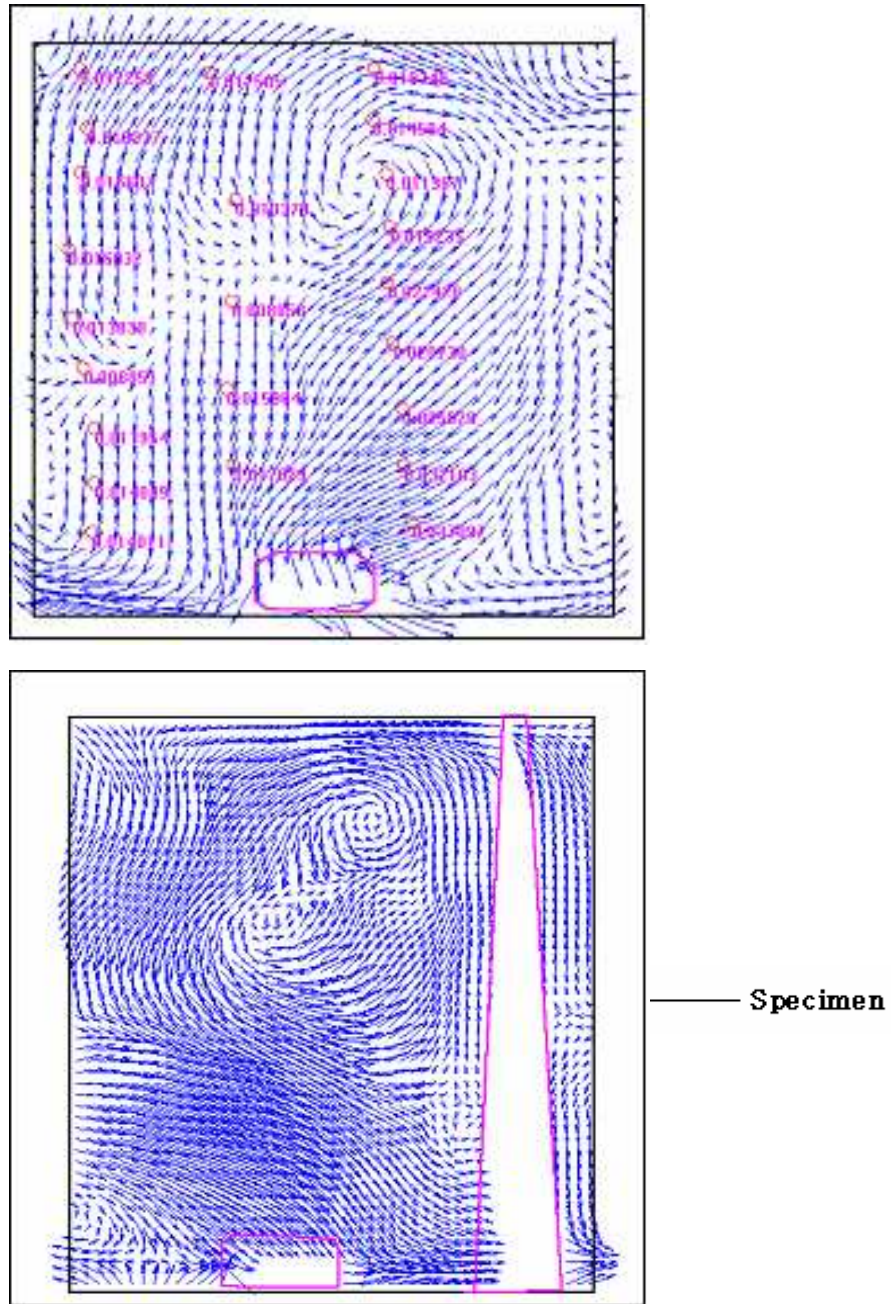


Fig. 3.1 Flow velocity of specimen surfaces in beaker (2ℓ) measured by P.I.V.

Table 3.1 Composition of aluminium alloy anode specimen

Comp.	Sn	Mg	Zn	In	Al	Remarks
wt.%	0.05~0.15	0.5~5.0	3.0~15.0	0.004~0.02	Remainder	specifications
wt.%	0.08	2.3	3.28	0.01	94.33	specimen

Table 3.2 The analyses of sea water used in this study

	수온(°C)	비저항 (Ω·cm)	pH	염소이온 (ppm)	용존산소 (ppm)	산화환원전위 (mV)
부산 (제2부두)	23	22.1	7.62	16197	7.72	+214
울산 (제2부두)	22	21.8	6.30	16192	3.85	+189
광양 (코스모스관리 부두)	21.5	22.0	7.58	16137	7.64	+210
해양대	22	23.3	7.8	-	-	-

3.1.3 실험결과 및 고찰

1. 부식전위 및 분극거동 고찰

Fig. 3.2는 용액의 유동 유무에 따른 각 시험편(Fe, rusted Fe, Al)의 시간변화에 따른 부식전위 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Al 합금의 전위가 가장 낮은 값을 나타내었으며, Fe 시험편은 Al 합금보다 높은 전위를 나타내었고, 가장 귀한 값을 나타내고 있는 시험편은 rusted Fe 시험편이었다. Fe의 평형전위가 -0.44V(NHE) 이고 Al의 평형전위가 -1.66V(NHE) 임을 감안할 때, 부식전위 역시 Fe의 경우가 Al 합금에 비해서 높은 전위 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 rusted Fe 시험편의 경우 표면에 Fe_2O_3 등의 산화막이 형성되어 양분극이 증대된 것에 기인하여 부식전위가 귀(貴)한 값을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

한편 용액이 유동하였을 경우가 유동하지 않는 경우에 비해서 부식전위는 다 같이 귀한 방향으로 이행하는 경향을 나타내었다. 그리고 중성 용액에서의 부식전위의 형성은 양극의 산화반응, 즉, Fe 시험편의 경우 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$ 와 Al 합금의 경우 $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}$ 의 반응과 음극의 경우 용존산소의 환원반응 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$ 에 의해서 형성된다. 따라서 용액의 유동에 의해서 부식전위가 귀(貴)한 값으로 변하는 것은 산소확산 한계전류밀도 $i_L = nFD C_0^* / \delta$ (n:이온가, F: Faraday 상수, D: 확산계수, C_0^* : 용액의 용존산소농도, δ : 확산 층 두께)가 증가하는데 그 원인이 있다고 사료된다.³⁹⁻⁴⁰⁾ 그리고 용액의 유동 유무에 따른 부식전위의 변화 폭은 Fe시험편의 경우 약 40mV로 가장 변화 폭이 컸음을 알 수 있었다. 그리고 Al 합금의 경우에는 20mV의 변화폭을 나타내었고 rusted Fe 시험편의 경우에는 5mV 전후의 가장 적은 전위 변화폭을 나타내었다. 따라서 Fe 시험편의 경우 용액이 유동하지 않을 때, 용존산소의 확산 한계전류밀도가 나타나는 음극분극전위 상태에서 부식전위가 형성되고 용액이 유동할수록 확산 한계전류밀도가 증대되면서 부식전위는 귀(貴)한 값으로 이행되고 동시에 부식속도 역시 증대된 것으로 사료된다.

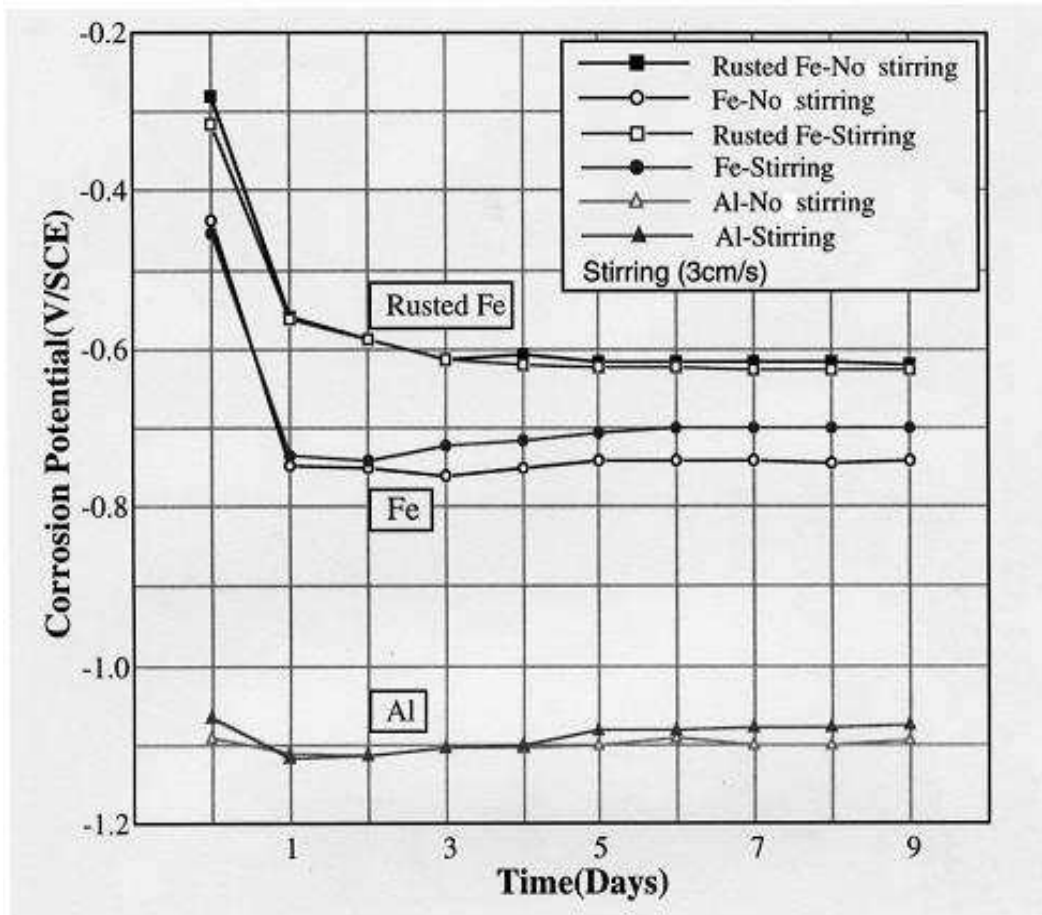


Fig. 3.2 Variation of corrosion potential of specimens (Fe, rusted Fe, Al) as a function of no stirring and stirring (3 cm/s) in sea water.

Rusted Fe 시험편의 경우에는 이미 용액이 유동하지 않는 시점에서 형성된 부식전위가 용존산소의 확산 한계전류밀도가 아닌 용존산소의 활성화 분극상태에서 부식전위가 형성되었으므로 용액이 유동하여 확산한계전류밀도가 증대되어도 부식전위의 변화에 크게 영향을 주지 않음을 알 수 있다.³⁴⁾

1) 분극실험

용액의 유동 유무에 따른 각 시험편의 양극 및 음극 분극곡선 변화를 조사하기 위해 각 시험편의 노출 면적을 1cm^2 로 하고 대극(Counter electrode, C.E)은 탄소봉, 기준전극(Reference electrode, R.E)은 SCE전극, 분극 장비는 미국 Gamry사의 CMS-100 시스템을 사용하였다. Fig. 3.3은 stirrer를 이용하여 비이커 내의 해수를 유동(1cm/s) 시킨 실험 장치도를 나타내고 있다.

Fig. 3.4는 용액이 유동하지 않는 경우에 대해서 각 시험편의 양극 및 음극 분극곡선 변화를 나타내고 있다. 시험편 모두 양극 분극곡선의 경우에는 산화반응에 따른 활성화분극이 일어나고 있으며 음극분극곡선의 경우에는 용존산소의 환원반응에 따른 활성화 분극과 농도분극이 함께 일어나고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 중성용액에서의 부식전위는 용존산소의 확산에 따른 농도분극과 양극의 산화반응에 따른 활성화분극에 의해서 형성되며 용존산소의 확산 한계전류밀도를 부식전류밀도로 가정하는 경우도 있다.⁴²⁾ 그러나 본 실험의 경우 rusted Fe 시험편의 경우 부식전위가 Fe 시험편에 비해서 부식전위 값이 최고 250mV 에서 최저 125mV 까지 귀한 전위 값을 나타내고 있으며 또한 용액의 유동에 의한 부식전위 변화 폭이 적다고 한 전술한 내용을 고려할 때 부식전위는 용존산소의 활성화분극상태에서 형성된다고 사료되며 따라서 산소 확산 한계전류밀도를 부식전류밀도로 가정한다는 것은 문제가 있다고 사료된다.

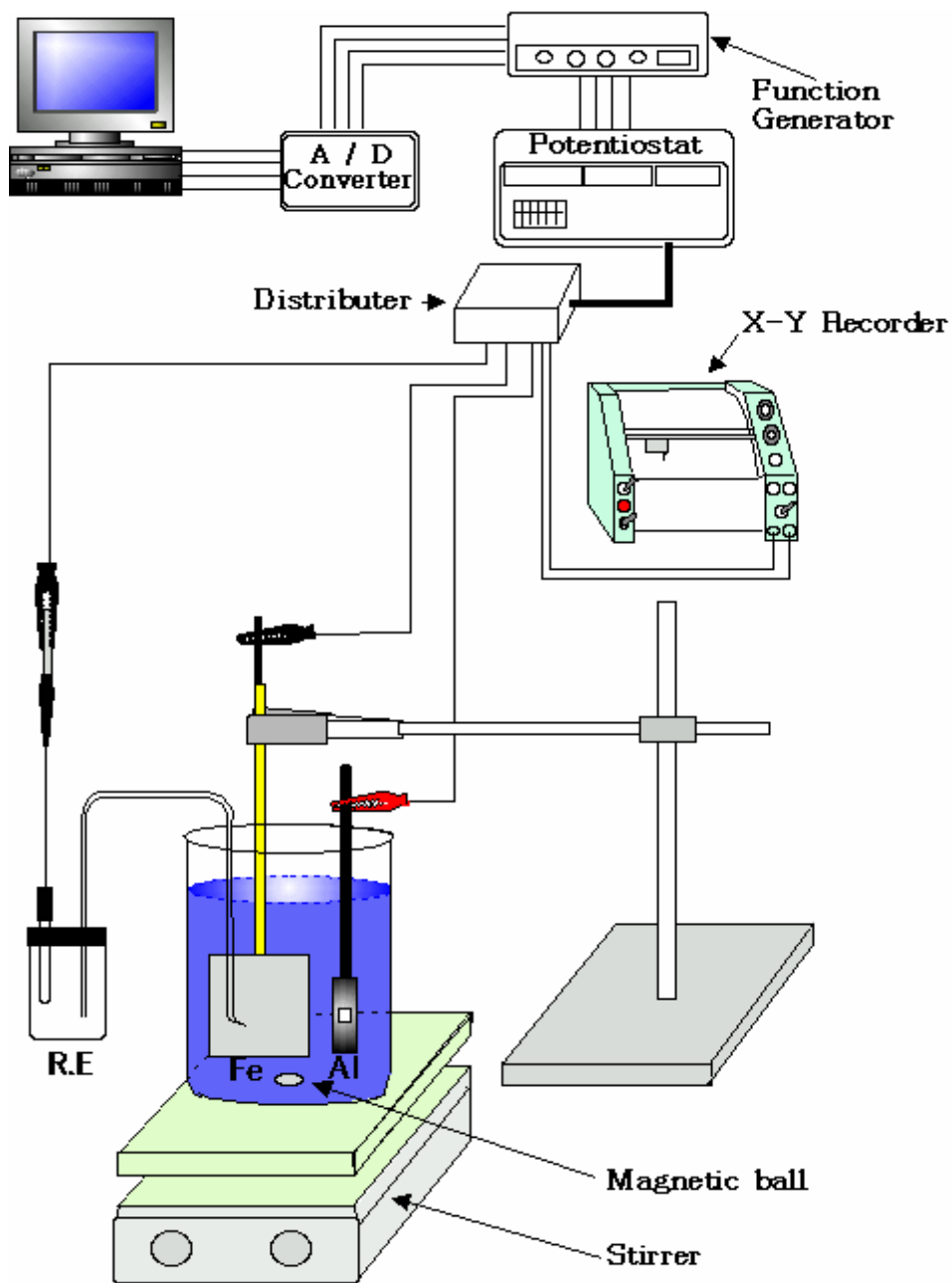


Fig. 3.3 Schematic diagram of experimental apparatus.

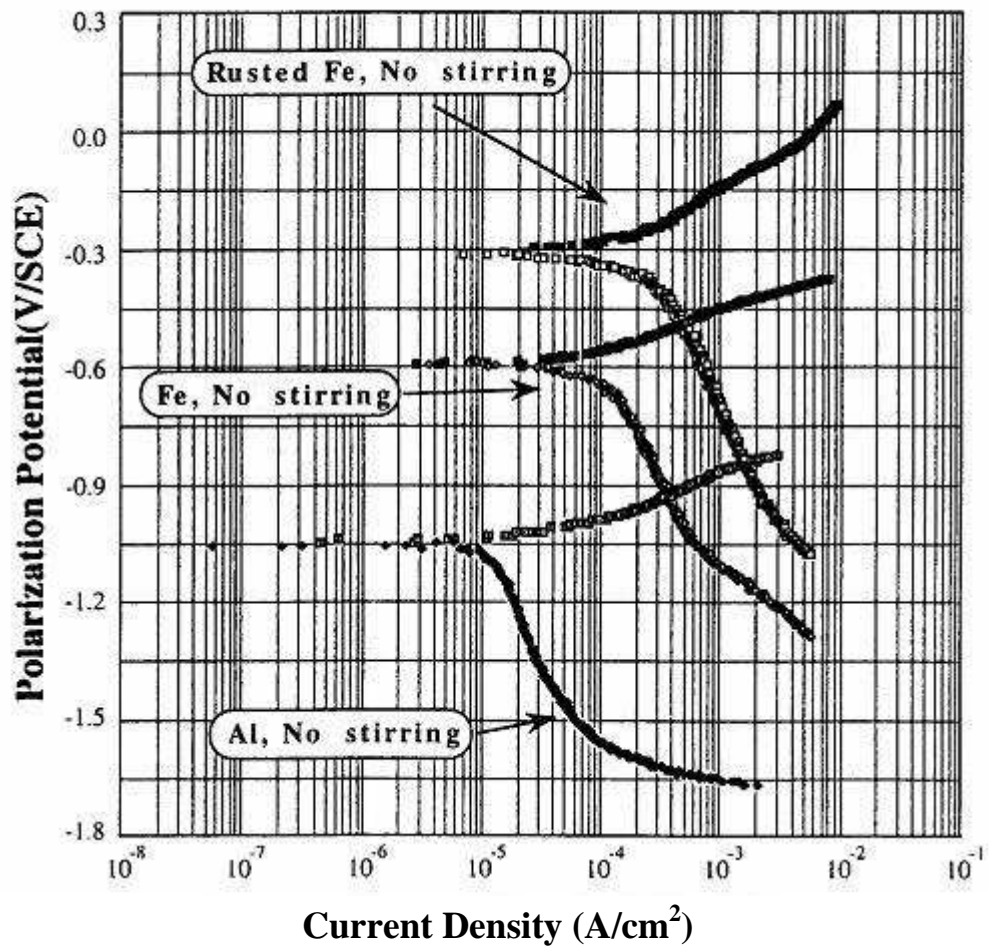
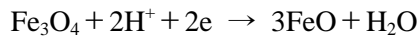
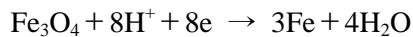
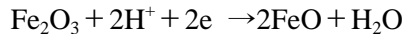
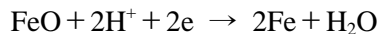
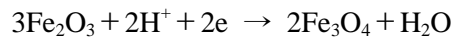


Fig. 3.4 Cathodic and anodic polarization curves of specimens (Fe, rusted Fe, Al) in no stirring sea water.

그리고 Al 합금의 경우에는 해수에서의 갈바닉 계열은 Fe에 비해서 낮으나 중성 용액에서는 표면에 산화피막($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)이 형성되어 내식성이 우수한 것으로 평가되고 있다.⁴³⁾ 그리고 Al 합금 양극의 부식전위가 이미 Fe보다 훨씬 낮은 $-1,050\text{mV}(\text{SCE})$ 전후에 있으므로, 자연부식 상태에서 양분극 시키면 초기에는 수소발생을 동반하게 된다. 즉 Al의 경우 $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}$ 의 평형전위가 $-1.66\text{V}(\text{NHE})$ 로 낮기 때문에 $2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}$ 에 의해서 산화피막의 형성과 함께 수소이온과 전자를 방출하게 되며³⁶⁾ 이들 수소이온과 전자가 환원반응에 의해서 수소가스를 발생하게 된다. 한편 rusted Fe시험편의 경우에는 표면에 Fe_2O_3 , Fe_3O_4 등의 산화막이 존재하고 있으므로 음극의 환원 반응에는 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$ 뿐만 아니라 다음의 환원 반응이 일어날 수 있다고 사료된다.⁴⁴⁾



그리고 양극분극의 경우에는 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$ 반응뿐만 아니라 상기 화학반응의 역 반응이 또한 일어날 수 있다고 사료된다. 따라서 rusted Fe 시험편의 경우에는 분극곡선상에서 부식전류밀도를 단순하게 타펠(Tafel) 외삽법에 의해서 구한다는 것은 정확한 측정방법이라고 할 수 없을 것이다. 이 경우 시험편의 부식전위 상태에서 미소전류에 의한 분극저항을 구하고 이 값을 이용하여 Stern-Geary식에 의해 비교·평가하는 것이 바람직하다고 사료된다. 따라서 세가지 시험편에 대해서 Gamry사의 CMS-100 분석 프로그램을 이용하여 Stern-

Geary 식, $\log i_{cor} = \frac{i}{\eta} \left(\frac{\beta_a \cdot \beta_c}{\beta_a + \beta_c} \right)$ 에 의한 부식전류밀도와 분극저항(R_p)을 구하여

비교하였고 Fe 시험편의 경우에는 부식전류밀도를 산소 확산한계전류밀도로

가정하여 함께 구하여 Table 3.3에 정리하였다.

Table 3.3에서 알 수 있듯이 Al의 경우가 분극저항이 가장 크고 부식전류밀도가 가장 적은 값을 나타내었다. Rusted Fe 시험편은 Fe 시험편에 비해서 분극저항 값이 적은 값을 나타냈으며 부식전류밀도도 또한 적은 값을 나타내었다. 이것은 전술한 바와 같이 rusted Fe 시험편의 경우에는 Fe 시험편의 산화반응($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$)과 환원반응($O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$) 외에 표면에 형성된 산화피막의 산화반응과 환원반응이 함께 일어나기 때문으로 사료된다.

Fig. 3.5는 용액이 1cm/s의 속도로 유동되고 있을 때 각 시험편의 양극 및 음극 분극곡선 변화를 나타내고 있다. 용액이 유동하고 있는 경우의 양극 및 음극 분극곡선의 변화 양상은 Fig. 3.5의 정지 용액 상태에서 구한 분극곡선과 거의 유사한 형태를 나타내고 있다. 그러나 음극 분극곡선상에서 산소 확산한계전류밀도는 용액이 유동하지 않는 경우 rusted Fe 시험편, Fe 시험편, 그리고 Al 합금의 경우 각각 $2 \times 10^{-4} A/cm^2$, $1 \times 10^{-4} A/cm^2$, $1 \times 10^{-5} A/cm^2$ 였으나, 용액이 유동한 경우에는 $3 \times 10^{-4} A/cm^2$, $2 \times 10^{-4} A/cm^2$, $3 \times 10^{-5} A/cm^2$ 로 분극곡선상의 확산한계 전류밀도는 증가하였음을 알 수 있다. 이것은 용액의 유동에 따른 용존산소의 농도 증가와 용존산소의 확산이 증가되었기 때문으로 사료된다.

Table 3.3 i_{corr} and R_p of Fe, rusted Fe and Al alloy anodes

	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Remark
Fe	13.3	16.5	2.93×10^2	10.91 ($i_L : 20$)	$E_{\text{corr}} : -0.698 \text{ V}$ Tafel region $-0.702 \text{ V} \sim -0.691 \text{ V}$
Rusted Fe	6.1	3.7	1.85×10^2	5.40	$E_{\text{corr}} : -0.410 \text{ V}$ Tafel region $-0.411 \text{ V} \sim -0.406 \text{ V}$
Al	13.3	16.5	3.15×10^3	1.01	$E_{\text{corr}} : -1.0523 \text{ V}$ Tafel region $-1.070 \text{ V} \sim -1.0299 \text{ V}$

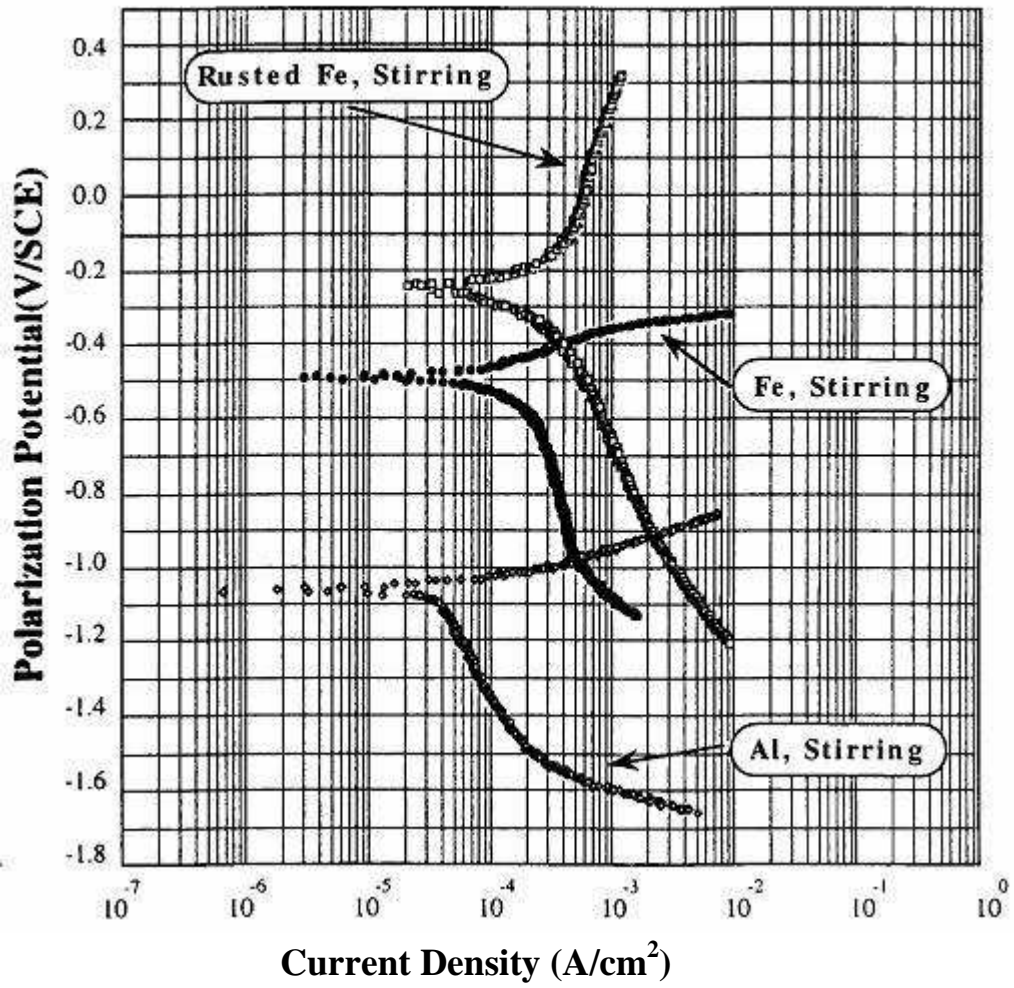


Fig. 3.5 Cathodic and anodic polarization curves of specimens (Fe, rusted Fe, Al) in stirring sea water.

2. 유속의 증가에 따른 Al 희생양극의 소모량 고찰

희생양극법에 의해 유동속도 증가에 따른 Al 희생양극의 소모량을 조사하기 위한 실험으로 양극과 음극(rusted Fe, Fe)의 면적비를 1 : 400 비율로 제작 후 동선($\phi 2\text{mm}$)으로 연결하여 시간변화에 따른 음분극 및 양분극, 양단간에 흐르는 전류 그리고 최종적으로 양극의 소모량을 조사하였다. 유동속도는 0, 1, 3, 5 cm/s로 이전과 같이 P.I.V로 시험편 표면의 평균유속을 측정하여 각 유동속도를 부여하였다. 해수 또한 1일 40ml씩 교환하였다.

Fig. 3.6은 Fe 시험편의 시간적 변화에 따른 분극전위를 나타내고 있다. 용액의 유동속도 증가에 따라 분극전위의 변화양상은 거의 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 즉, 침지 후 1일까지 분극전위는 급격하게 낮아졌으며 그 이후 미소한 전위변화를 나타내고 있다. 그리고 용액이 유동하지 않을 경우에는 침지 19일 후 $-1,010\text{mV}(\text{SCE})$ 였으나 용액의 유동속도가 증가할수록 분극전위는 귀(貴) 방향으로 이행하는 경향을 보였으며, 유동속도가 5cm/s의 경우에는 $-970\text{mV}(\text{SCE})$ 로 정지용액에 비해서 약 40mV의 상승폭을 나타내었다. 이처럼 용액이 유동함에 따라서 피 방식체의 분극전위가 상승하는 것은 분극전위 중의 농도분극이 용액의 유동과 함께 감소되기 때문으로 사료된다.

Fig. 3.7은 Al 양극과 Fe 시험편을 연결하였을 경우의 Al 양극의 분극전위 변화를 나타내고 있다. Al 양극의 경우에도 시간적 변화에 따른 분극전위 변화양상은 Fe 시험편과 거의 유사한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 용액이 유동하지 않는 경우의 Al 양극의 분극전위는 약 $-1030\text{mV}(\text{SCE})$ 이며 용액의 유동이 상대적으로 큰 5cm/s의 경우에는 약 $-990\text{mV}(\text{SCE})$ 로 40mV의 전위 변화폭이 있음을 알 수 있었다. Al 양극은 중성용액에서 단독으로 침지되어 있을 경우에는 Fig. 3.2에서와 같이 부식전위가 Fe 시험편에 비해서 낮은 전위 값을 보이나 Fig. 3.4 및 3.5의 분극곡선 및 Table 3.3에서와 같이 중성용액에서는 산화피막의 형성에 의해서 내식성이 비교적 우수하여 부식속도가 낮아진다. 그러나 해수에서의 갈바닉 계열상으로 보면 철보다 전위가 낮기 때문에 Fe 시험편과 전선으로 연결하면 Al은 희생양극으로 작용하므로 산화, 부식되며 Fe는 음극으로 작용하여 방식된다.

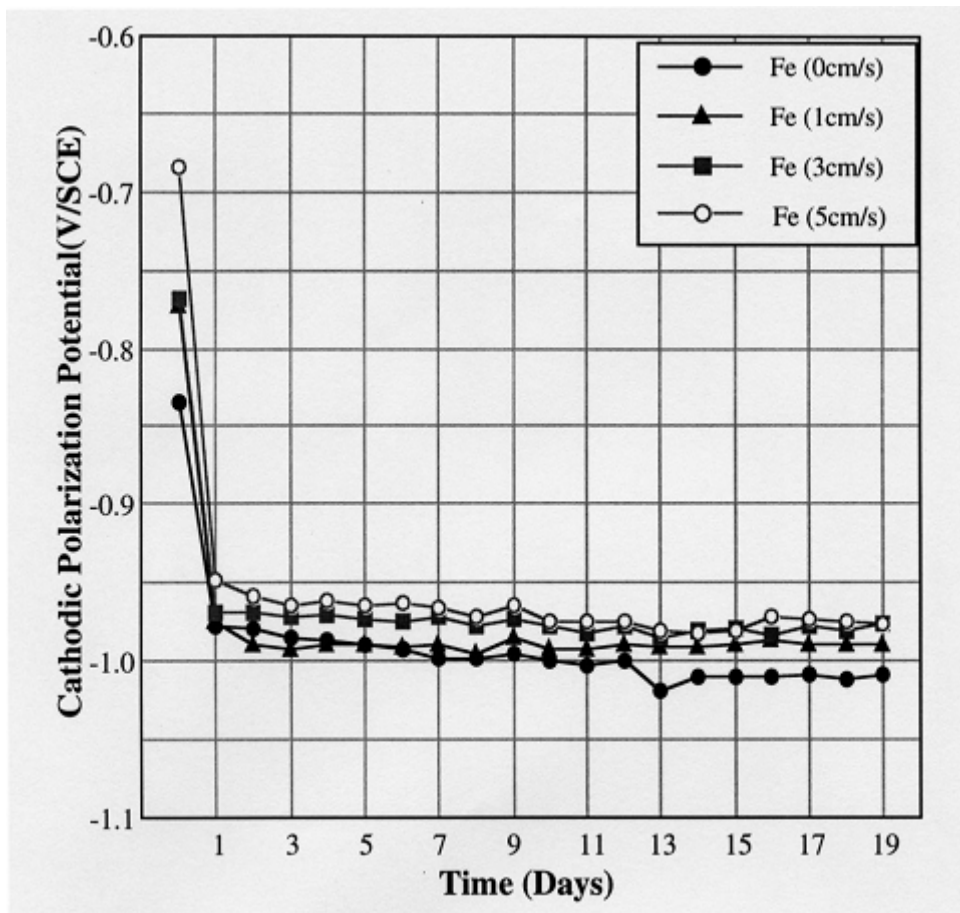


Fig. 3.6 Variation of cathodic polarization potential of Fe as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

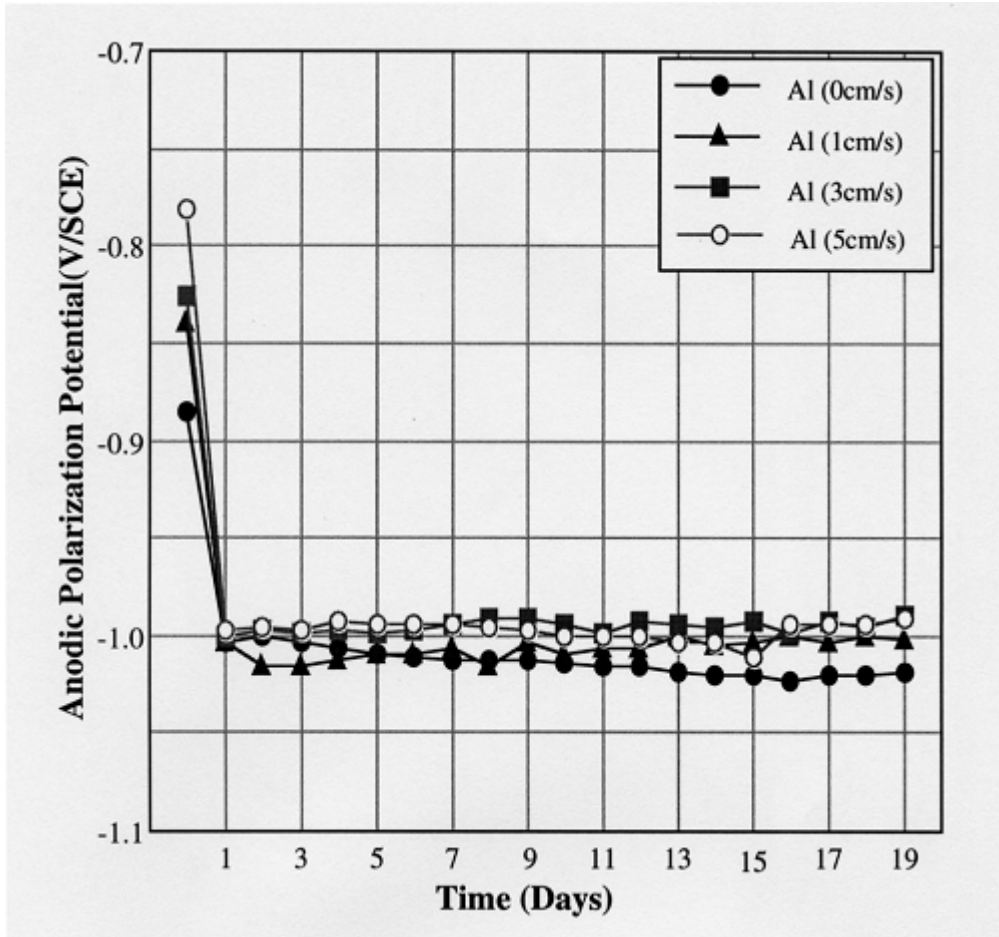


Fig. 3.7 Variation of anodic polarization potential of Al anode Fe as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

따라서 Fig. 3.7에서 Al 양극의 분극전위는 Al 양극의 산화반응에 의해서 형성된 양분극 전위이다. 그리고 용액의 유동에 의해서 분극전위가 귀한 방향으로 상승하는 것은 Fe 시험편의 농도분극의 감소에 의해서 Al 양극과 Fe 시험편 사이에 흐르는 전류가 증대되어 양분극도 증대되었기 때문으로 사료된다. 또한, Fig. 3.8에서 알 수 있듯이 용액이 정지 중에 있을 경우에는 두 극의 전위차(ΔV)가 적기 때문에 Al 양극에서 발생하는 전류(I)가 적다. 그러나 용액이 유동할수록 두 극의 전위차($\Delta V'$)가 커지게 되어 즉 $\Delta V' > \Delta V$ 가 되어 발생하는 전류 역시 $I' > I$ 가 되어 커지게 된다.

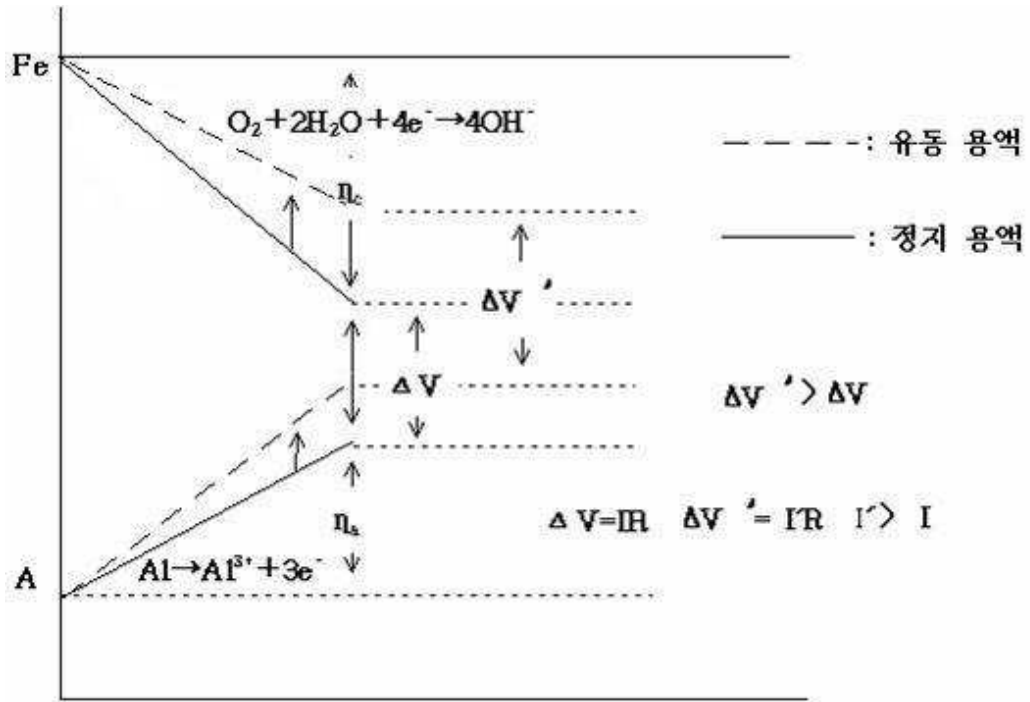


Fig. 3.8 Schematic diagram for potential difference ΔV and flowing current between Al anode and Fe cathode.

Fig. 3.9에서는 유동속도 증가에 따른 두 극의 전위차에 의해서 흐르는 전류의 변화를 나타내고 있다. 침지 초기에는 두 극의 전위 차가 크기 때문에 양극에서 발생하는 전류 역시 증가하였으나, 침지 시간이 길어짐에 따라 Al 양극은 양분극되고 Fe 시험편은 음분극되어 두 극의 전위 차는 적어져서 양극에서 발생하는 전류 역시 감소하게 된다. 그러나 용액이 정지되어 있는 경우 침지 19일 후의 양극에서 발생하는 전류는 약 1mA 일 때 비해서 용액이 유동하고 있는 경우 유동속도가 3cm/s의 경우 약 1.35mA로 정지 중에 비해서 많은 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 그런데 유동속도가 5cm/s로 더욱 증가되었을 경우에는 오히려 양극의 발생전류가 감소하는 경향을 보였다. 즉 Fig. 3.9에서 알 수 있듯이 침지 15일까지는 유동속도가 5cm/s인 경우의 발생전류가 가장 많았으나 15일 이후부터는 3cm/s의 유동속도에서의 발생전류가 가장 큰 역전현상이 일어나고 있음을 알 수 있다. 이것은 용액의 유동속도가 지나치게 증가하였을 경우 표면에 산화피막이 형성되어 양극의 발생전류가 오히려 억제되는 것으로 사료된다

Fig. 3.10은 rusted Fe 시험편과 Al 양극을 연결하였을 경우 유동속도 증가에 따른 rusted Fe 시험편의 시간변화에 대한 음분극 전위변화를 나타내고 있다. 용액의 유동증가에 따라 9일 까지는 전위변화 폭이 크나 이후에는 비교적 안정되었으며, Fe 시험편의 분극전위 변화에 비해 불규칙한 현상이 반복되는 경향을 나타내었다. 이는 rusted Fe 시험편 표면 부식층의 박리 또는 이전의 복합적인 반응 때문이라 사료된다. 19일 후 정지 중 용액과 5cm/s의 경우를 비교하면 정지 중 용액의 분극전위 값이 30mV 귀(貴)한 값을 나타내었다. 19일 후 Fe 시험편이 -975mV~-1,010mV, rusted Fe 시험편이 -815~-855mV로 Fe 시험편의 분극전위가 더 비(卑)한 값을 나타내었다.

Fig. 3.11는 rusted Fe 시험편과 연결된 Al 양극의 분극전위 변화를 나타내고 있다. Al 양극의 분극전위 변화도 rusted Fe 시험편과 유사한 경향을 나타내고 있다. 19일 후 정지 중 용액의 경우 Al 양극의 분극전위는 -910mV(SCE)이며, 유동속도가 5cm/s의 경우 -820mV(SCE)로 90mV정도 전위 차가 있으며, Fe 시험편과 연결된 Al 양극의 경우보다 전위차도 크고, 전반적으로 귀(貴)한 영역으로 이행하고 있음을 알 수 있었다.

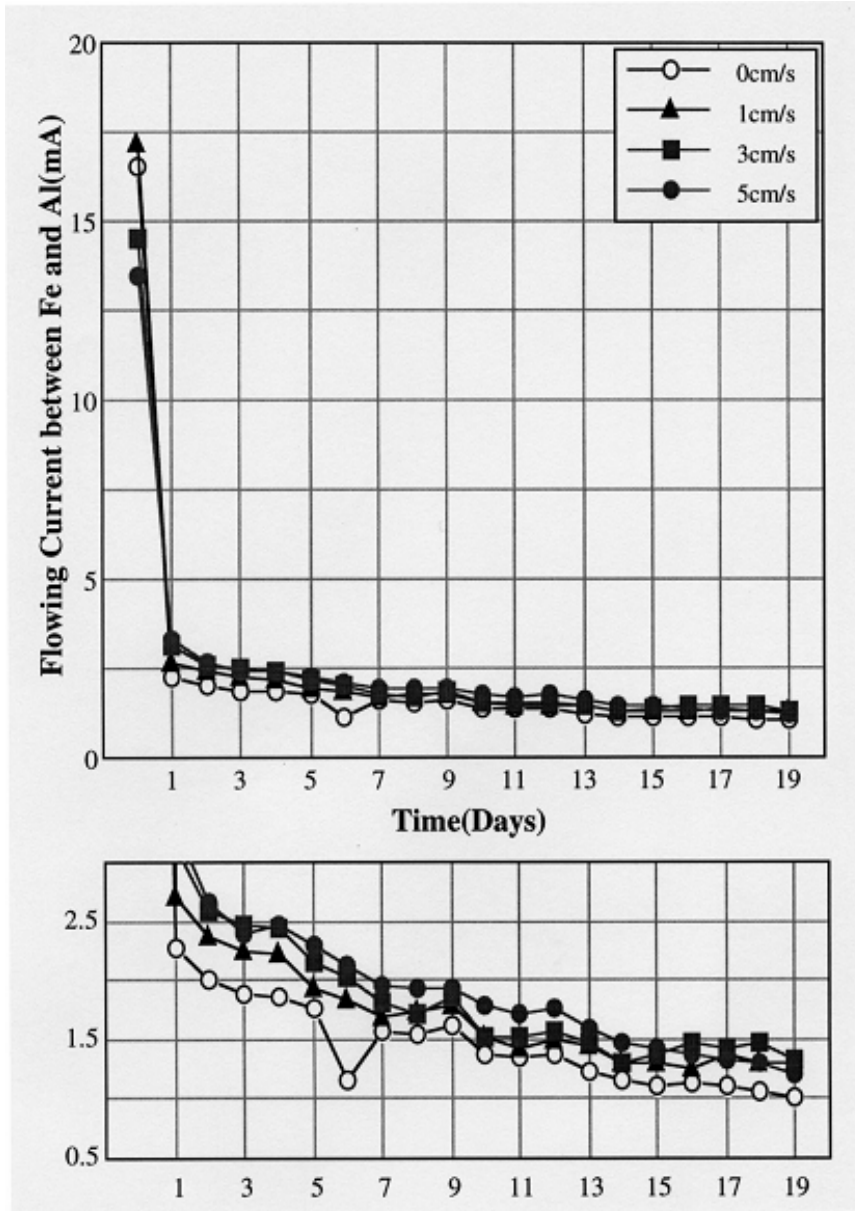


Fig. 3.9 Variation of flowing current between Fe and Al anodes as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

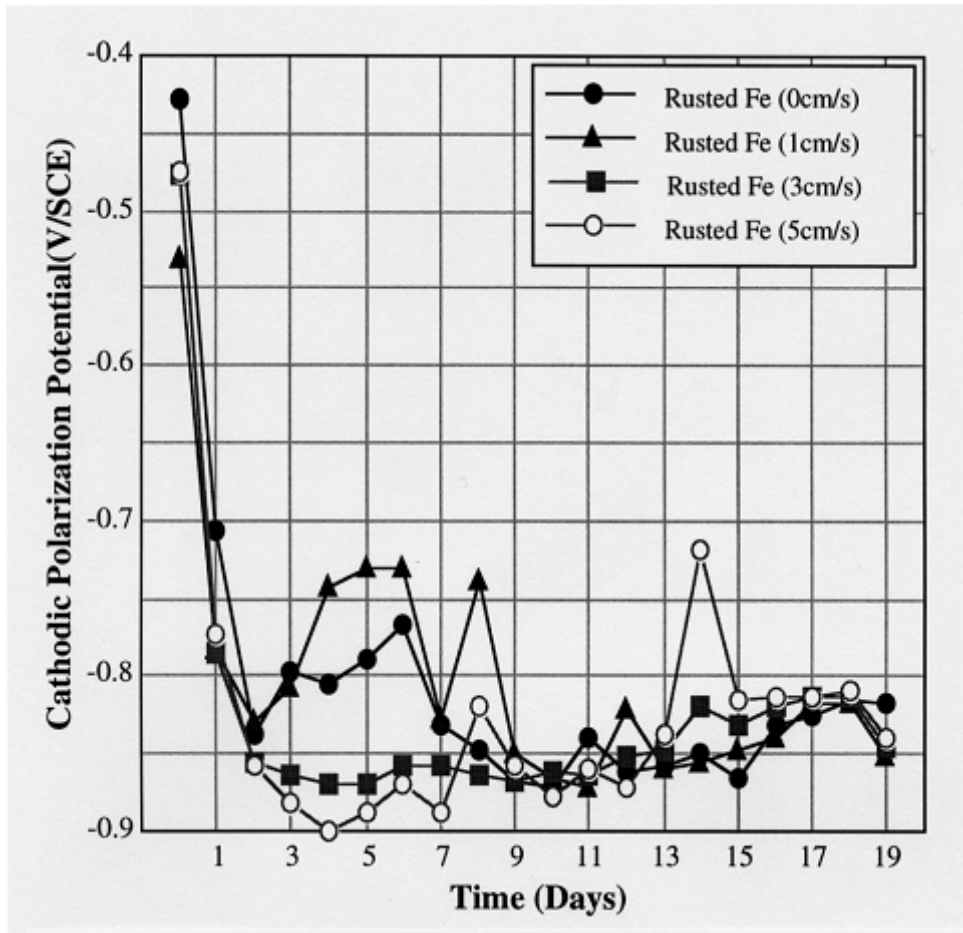


Fig. 3.10 Variation of cathodic polarization potential of rusted Fe as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

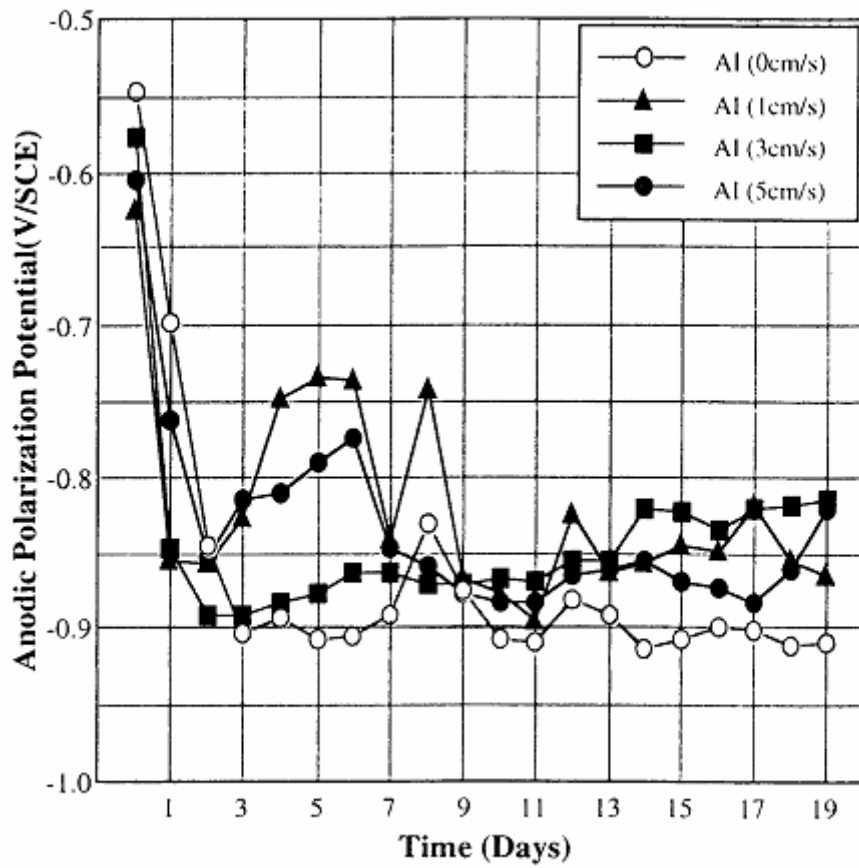


Fig. 3.11 Variation of anodic polarization potential of Al anode as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

Fig. 3.12는 rusted Fe 시험편과 Al 양극 사이의 흐르는 전류변화이다. 유동증가에 따라 두 극의 전위 차가 커지게 되어 흐르는 전류 역시 증대되는 경향을 나타내고 있다. 그 중 3cm/s의 경우가 전반적으로 흐르는 전류 값이 큼을 알 수 있고, 이는 Fe 시험편과 Al 양극 사이의 경우와 유사한 경향을 나타내었다. 결과적으로 양극소모율도 3cm/s의 경우가 증대되었다.

Photo. 3.2는 rusted Fe 시험편의 시험결과 표면사진이다. 표면의 흰색 부분은 Al 양극 산화부유물로 판단된다. 또한 Fig. 3.10에서 시험편 모두 방식전위 이하를 나타냈던 바와 같이 육안으로도 방식 되었음을 알 수 있었다.

Fig. 3.13은 Al 양극과 Fe 시험편(rusted Fe 시험편)을 연결하여 일정시간 경과 후 Al 양극의 소모율을 나타낸 것이다. $\text{소모율}(\%) = \frac{W-W'}{W} \times 100$ 여기서, W: 실험 전 양극 무게, W': 실험 후 양극 무게를 나타낸다.

용액이 정지 중에 있는 경우에 비해서 유동속도가 증가할 수록 양극 소모율은 증가하고 있음을 알 수 있으며, 또한 Fe 시험편의 경우 보다 rusted Fe 시험편과 연결된 Al 양극의 소모율이 전반적으로 증대되었다. 3cm/s의 경우 rusted Fe 시험편과 연결된 Al이 약 1.0% 정도 소모율이 증대되었다. 그리고 유동속도가 3cm/s에서 가장 양극 소모율이 크고, 5cm/s로 유동속도가 증가되면 오히려 양극 소모율은 감소하였다. 이러한 현상은 양극발생전류의 대소와도 결코 무관하지 않음을 알 수 있다. 그리고 유속 증가에 따른 자기 부식량의 증가도 전혀 배제할 수 없을 것으로 사료된다.

지금까지 Al 양극과 Fe 시험편(rusted Fe 시험편)을 연결하였을 경우 용액의 유동 증가에 따라서 양극과 음극의 분극전위가 변하고, 또한 양극과 음극의 전위차에 의해서 양극의 발생전류가 변하였으며 양극의 소모율 역시 변화하였다. 이러한 현상은 결국 해수중에서 Al 양극으로 강 파일 구조물을 음극방식할 경우 해수의 유속 증가와 피 방식체의 표면 부식상태에 의해 양극 소모율이 증대되고, 동시에 발생전류가 증대되어 양극의 실제 수명은 설계예상수명⁴⁵⁾

$(Y = \frac{0.85W}{I \cdot S})$, Y: 양극수명, 0.85: 사용가능 계수, W: 양극 중량(kg), S: 양극 소모율(kg/A·Y), I: 양극의 평균발생전류(A))보다 훨씬 단축될 수 있다는 사실을 본 실험을 통하여 알 수 있었다.

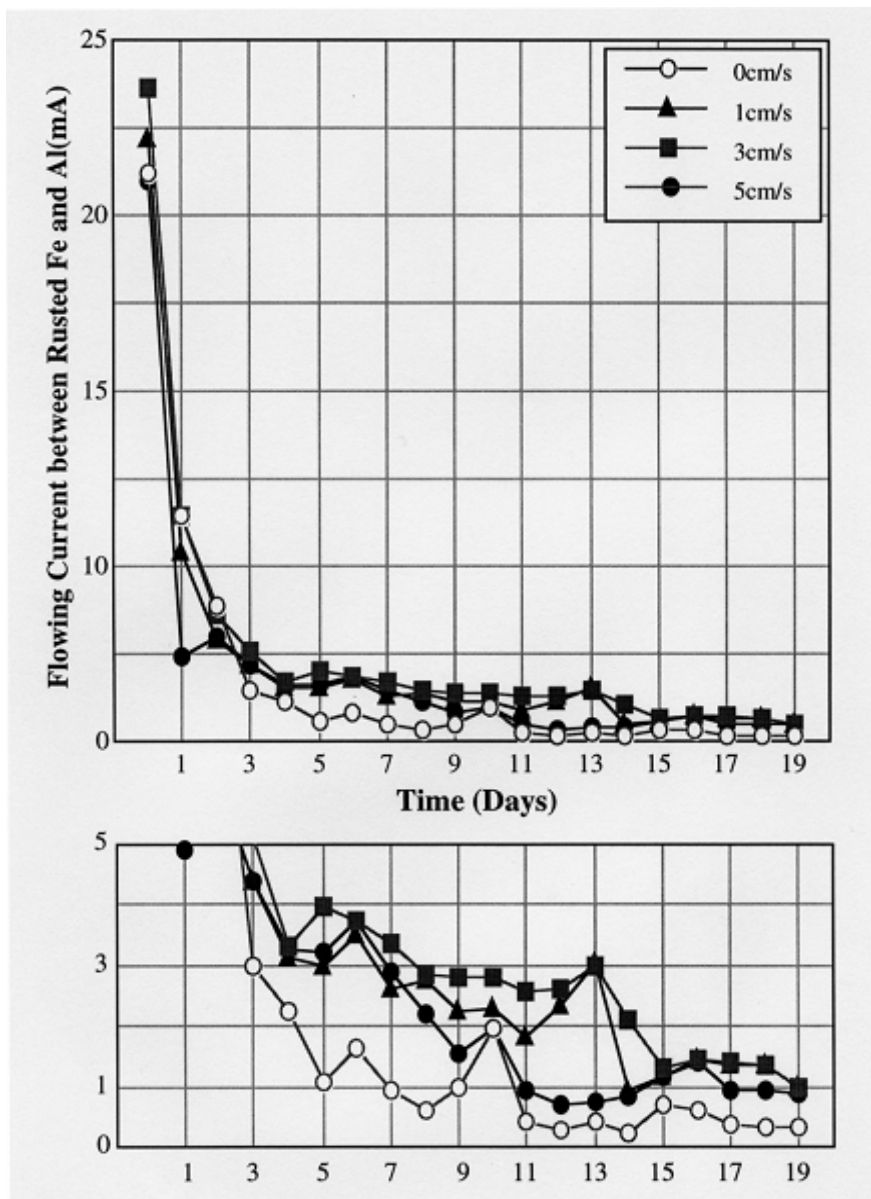


Fig. 3.12 Variation of flowing current between rusted Fe and Al anode as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

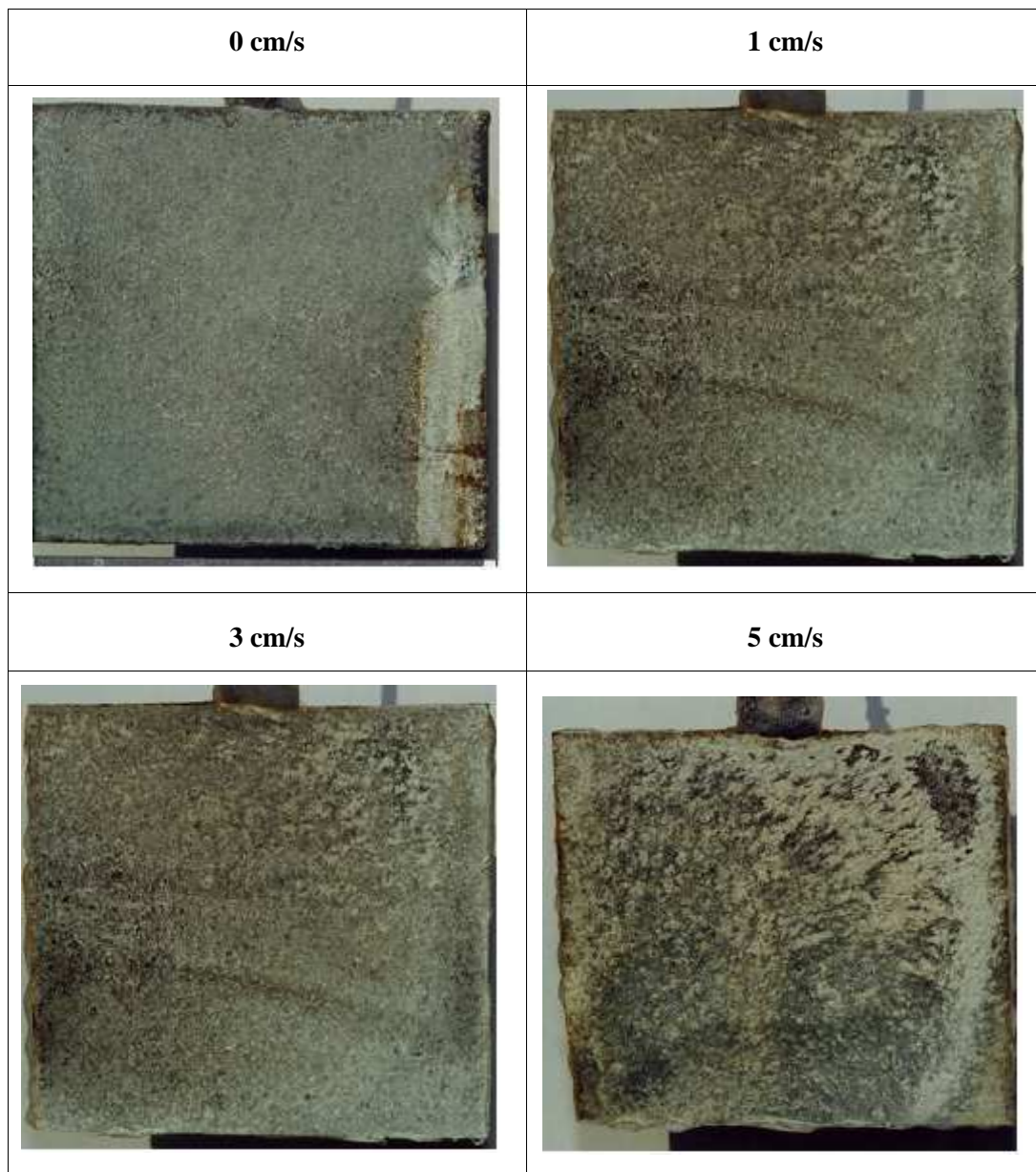


Photo. 3.2 Rusted Fe specimen surfaces as a function of flow velocity.

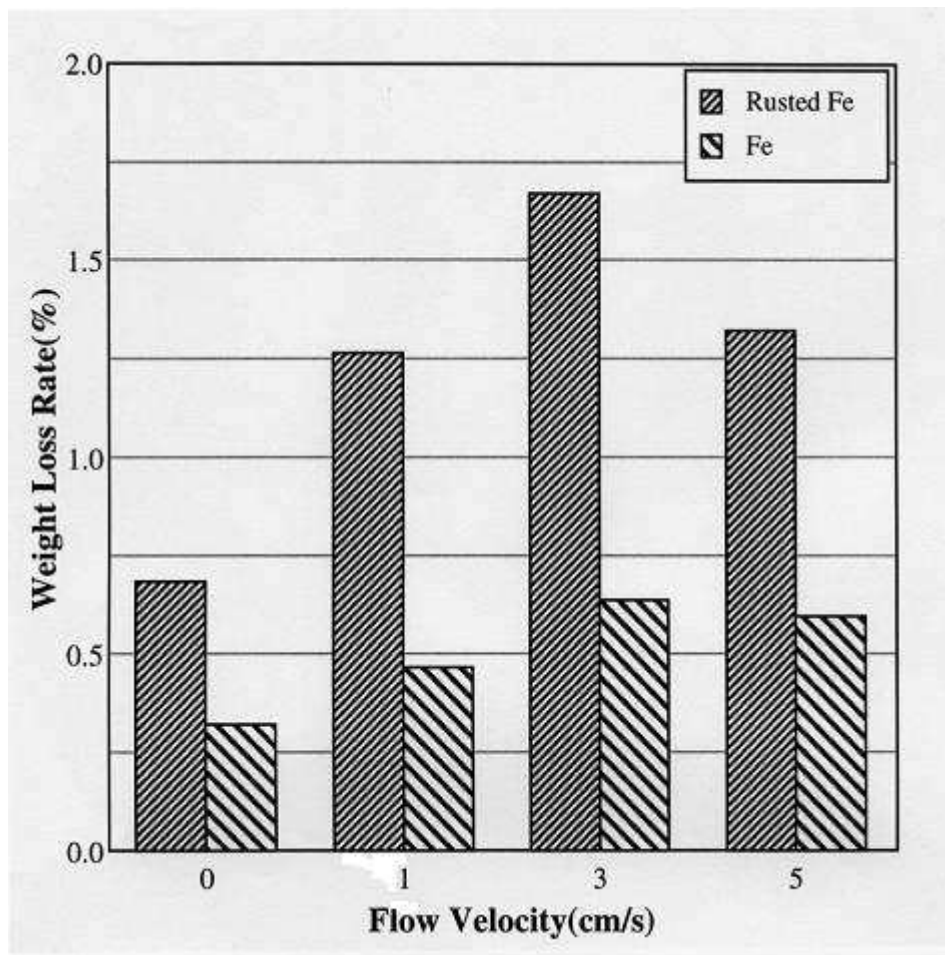


Fig. 3.13 Weight loss rate of Al anode as a function of flow velocity (1, 3, 5 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

Photo. 3.3은 각 항구(부산항(해양대 주변 해수), 울산항, 광양항)별 해수와 유동 유무에 따른 양극 소모율을 조사하기 위한 실험 장치도 이다. 전반적인 실험 방법은 유동속도 증가에 따른 양극 소모율 조사 실험과 동일하며 다만 이 전실험에서 3cm/s의 경우 양극 소모율이 가장 증대되었으므로 유동속도를 정지 중 용액과 3cm/s로 구분하여 Fe 시험편과 Al 양극을 연결하여 시간적 변화에 따른 분극전위 변화 및 Al 양극 소모율을 조사하였다.

Fig. 3.14는 부산항 해수(해양대 주변)의 유속 유무에 따른 Fe 시험편과 rusted Fe 시험편의 음극분극전위 변화를 나타내고 있다. Rusted Fe 시험편의 경우가 Fe 시험편에 비해서 음분극전위가 귀(貴)한 값을 나타내며, 동시에 용액의 유동이 있는 경우가 없는 경우에 비해서 귀한 값을 나타내었다.

Fig. 3.15는 이 경우의 Al 양극의 분극전위의 변화를 나타내고 있다. 양극분극전위 역시 rusted Fe 시험편과 연결된 Al 양극의 경우가 Fe 시험편과 연결된 Al 양극의 경우 보다 귀(貴)한 전위 값을 나타내었다.

Fig. 3.16은 rusted Fe 시험편과 Fe 시험편을 Al 양극과 연결하였을 경우 두 극 사이에 흐르는 양극의 발생전류변화를 나타내고 있다. Rusted Fe 시험편과 연결하여 용액이 유동되고 있을 때가 가장 양극의 발생전류가 크며 침지 12일 후의 양극발생전류가 약 1.75mA이고, Fe 시험편과 연결하여 용액이 정지 중에 있을 때 발생전류는 약 1.3mA로 가장 적은 값을 나타내었다. 결과적으로 양극 발생전류가 rusted Fe 시험편이 Fe 시험편에 비해서 양극의 발생전류가 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 rusted Fe 시험편의 경우가 Fig. 4.2(부식전위 변화)에서와 같이 Fe 시험편에 비해 부식전위가 높기 때문에 Al 양극과 연결하였을 경우 두 극의 전위 차가 Fe 시험편 보다 크며 따라서 양극의 발생전류 역시 증가하게 된다고 사료된다.

이상의 Fig. 3.14, 3.15, 3.16의 결과와 같이 rusted Fe 시험편은 Fe 시험편 보다 산화피막의 형성에 의해서 부식전위가 Fe 시험편 보다 높고, 또한 음분극시 rusted Fe 시험편의 경우 표면 산화피막의 환원작용에 의해 공급전류가 소모된

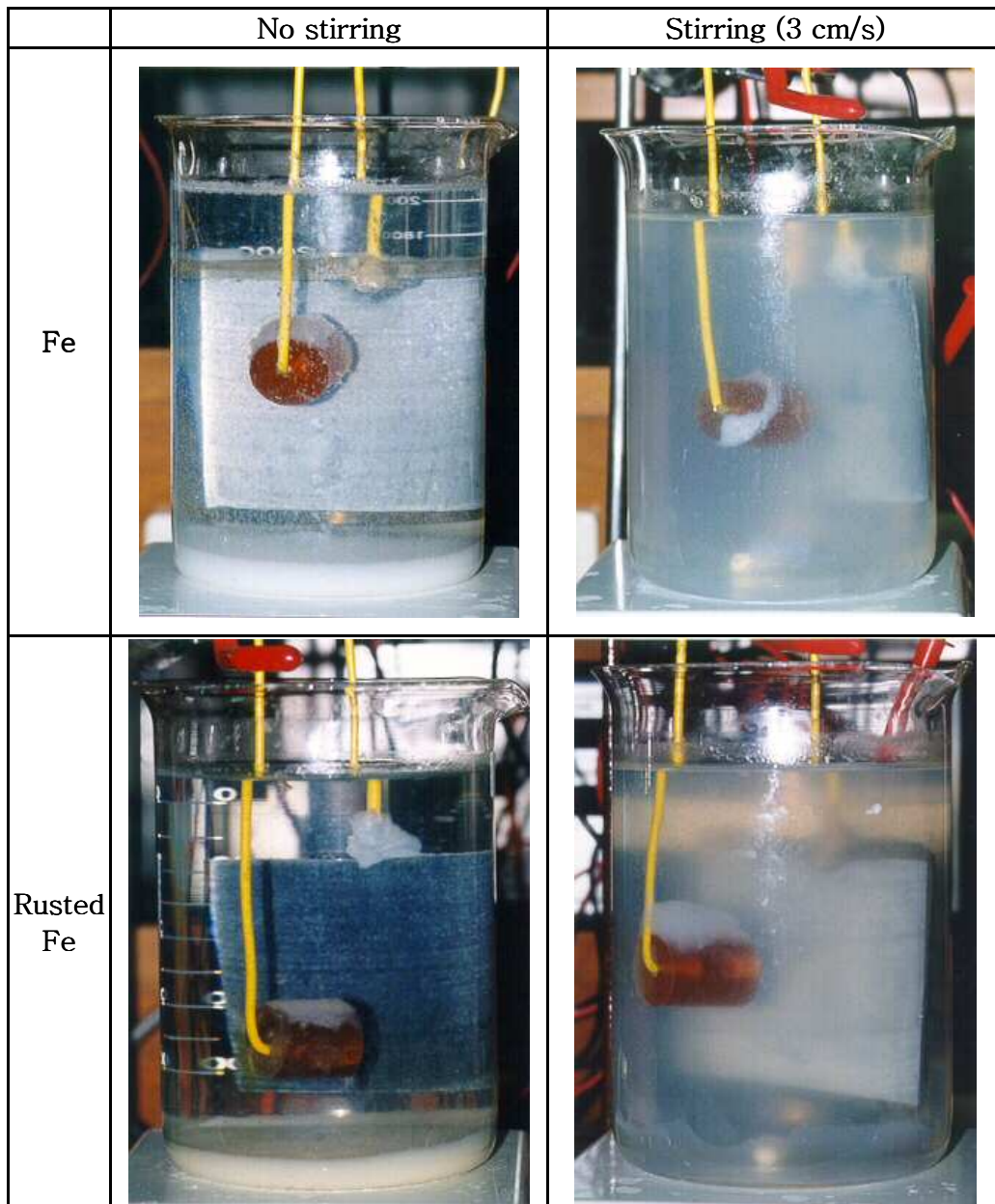


Photo. 3.3 Sacrificial anode protection method experimental apparatus.

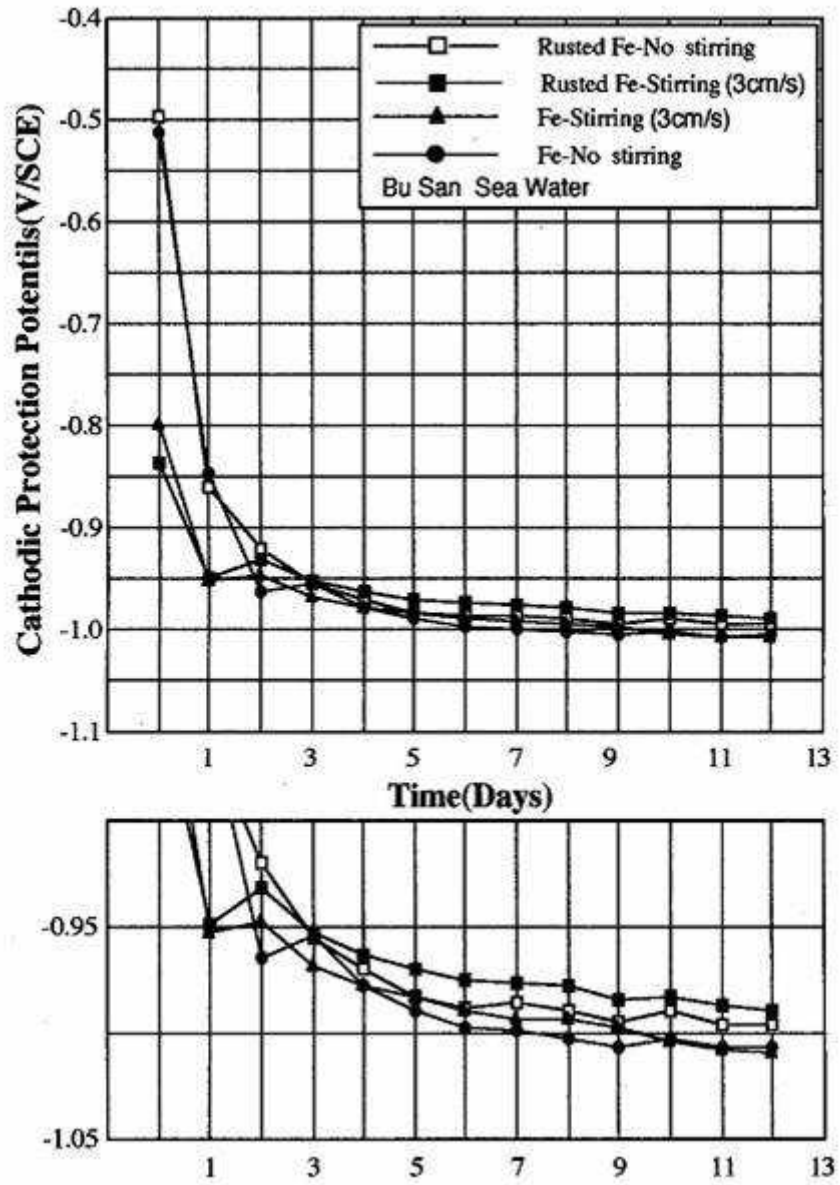


Fig. 3.14 Variation of cathodic polarization potential as a function of specimens' surface conditions and no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

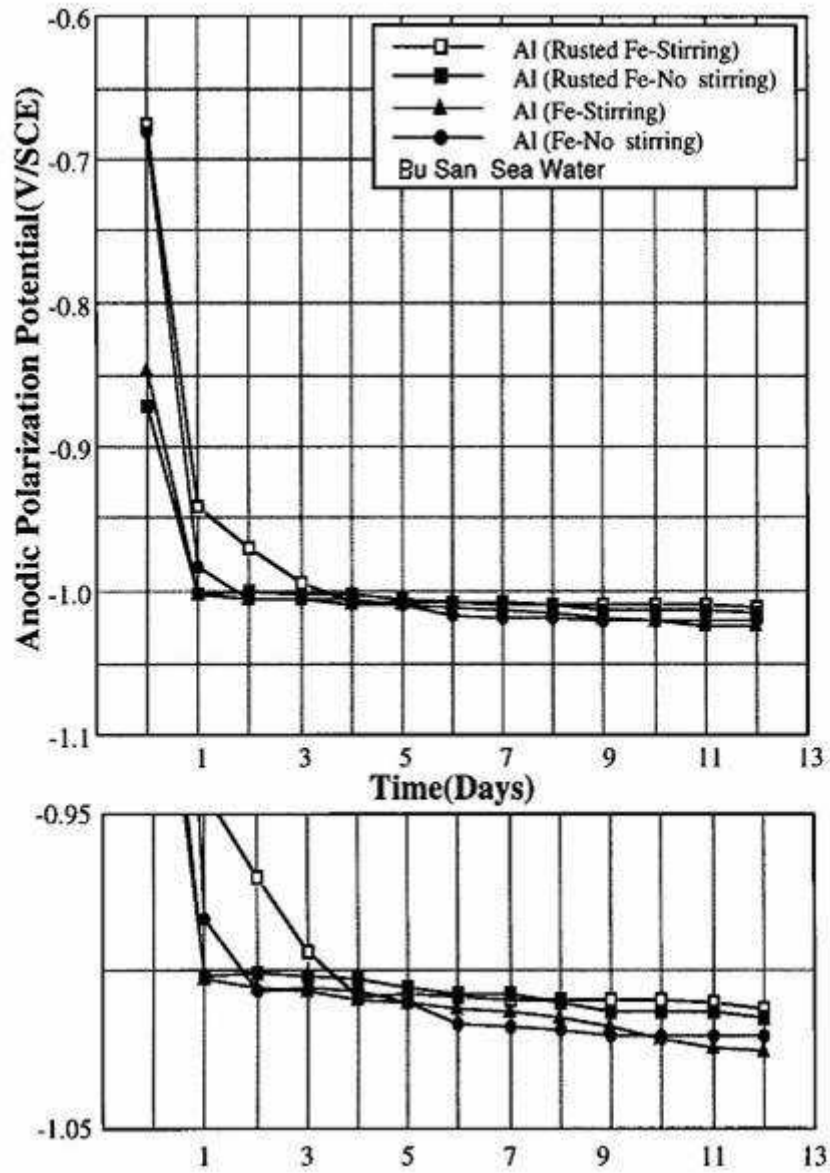


Fig. 3.15 Variation of anodic polarization potential as a function of specimens' surface conditions and no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

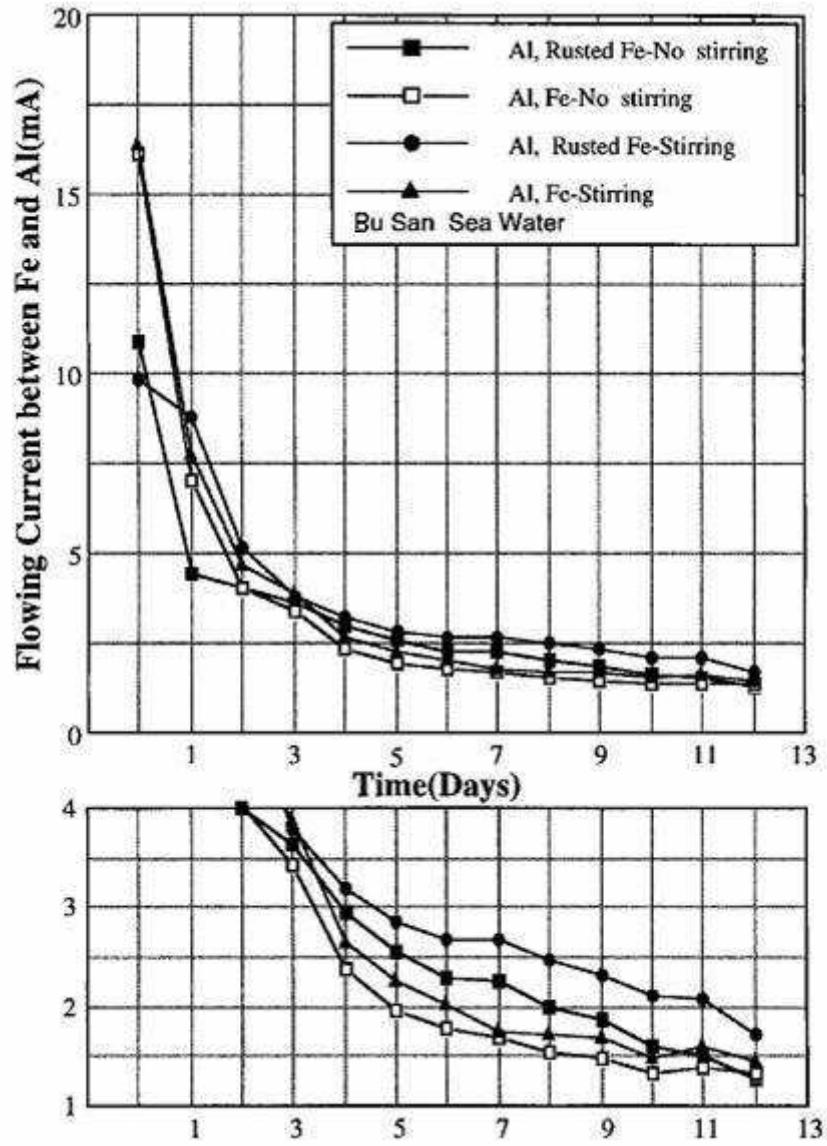


Fig. 3.16 Variation of flowing current between Fe (rusted Fe) and Al anode as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

다. 이것은 용존산소의 환원반응에 의한 농도분극보다 활성화 분극에 기인함으로써 음극 분극전위가 귀한 전위 값을 유지하는 것으로 사료되며, 이로 인해서 양단의 전위 차가 커지는 동시에 양극의 발생전류도 증가하게 되어 양극의 분극전위 역시 귀한 값을 나타내는 것으로 사료된다. Photo. 3.4는 양극의 시험편 모양 그리고 음극의 Fe 시험편 및 rusted Fe 시험편을 나타낸다. 음극시험편이 Fig. 3.15에서 알 수 있듯이 모두 방식전위 이하를 나타내므로 방식된 상태라고 할 수 있으며 녹슨 시험편의 경우 용액이 유동함에 따라 표면의 양극 산화물이 박리되고 있음을 알 수 있다. Photo. 3.5는 상기 실험에 사용된 Al 양극의 표면 사진이다.

Fig. 3.17은 해수의 부식특성이 서로 다른 부산(해양대 주변), 울산, 광양의 해수를 이용해서 상기 실험과 동일하게 rusted Fe 시험편과 Fe 시험편을 음극으로 하여 Al 양극과 연결하였을 경우에 용액의 유동 유무에 따른 희생양극의 소모율을 비교하여 나타낸 도표이다. Rusted Fe 시험편과 Fe 시험편의 경우 모두 울산항 해수의 경우가 가장 양극소모율이 높았으며 다음에 광양항이었고, 부산항이 가장 적었다. 그리고 용액의 유동이 있는 경우가 없는 경우에 비해서 양극 소모량이 높은 값을 나타내었으며, 3개항의 경우에 다 같은 경향을 나타내었다.

한편 Table 3.2(p.78)는 각 항구의 수질 분석표인데 울산항 제2부두의 pH와 용존산소농도가 가장 낮게 나타나는 것은 Table 2.4(p.21)의 청정해수와 오염해수의 구분과 비추어 볼 때 이 울산항 제2부두의 해수는 상당히 오염되어 있다고 판단된다. 그리고 Fig. 3.17에서 알 수 있듯이 rusted Fe 시험편과 Fe 시험편 모두 울산항 제2부두의 경우가 가장 양극 소모율이 크다는 사실을 알 수 있다. 결국 양극 발생전류와 양극 소모율은 용액의 유동과 피 방식체의 표면 상태 및 해수의 오염도 즉 부식특성에 따라서 달라지고 있다는 사실을 본 실험을 통하여 알 수 있다. 또한 양극의 예상설계수명은 단순히 설계 공식에만 의존할 것이 아니라 해수특성을 정밀 분석하여 방식설계 시공을 하는 것이 바람직하다고 사료된다.





	No stirring	Stirring (3 cm/s)
Fe		
Rusted Fe		

Photo. 3.4 Fe (rusted Fe) specimen surfaces as a function of no stirring (stirring) with Al anode in BUSAN sea water.

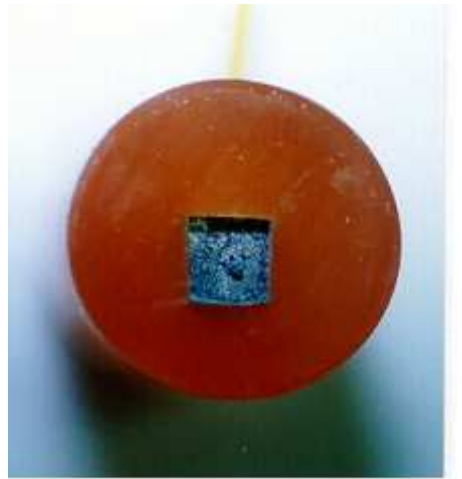
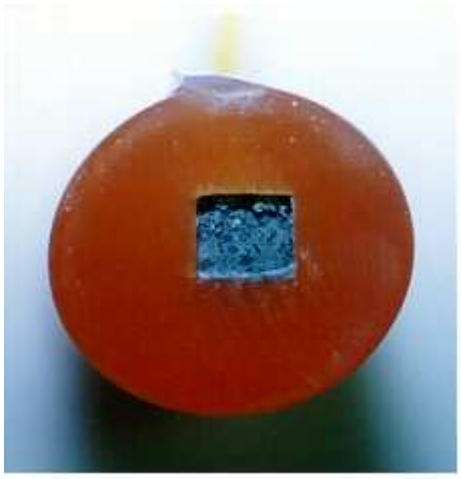
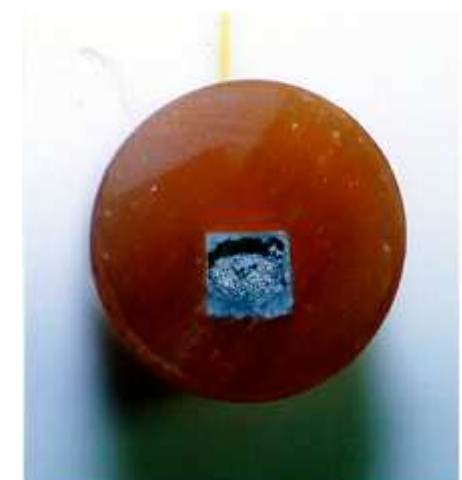

	No stirring	Stirring (3 cm/s)
Al with Fe		
Al with Rusted Fe		

Photo. 3.5 Al anode specimen surfaces as a function of no stirring and stirring in case of galvanic cell with Fe (rusted Fe) in BUSAN sea water.

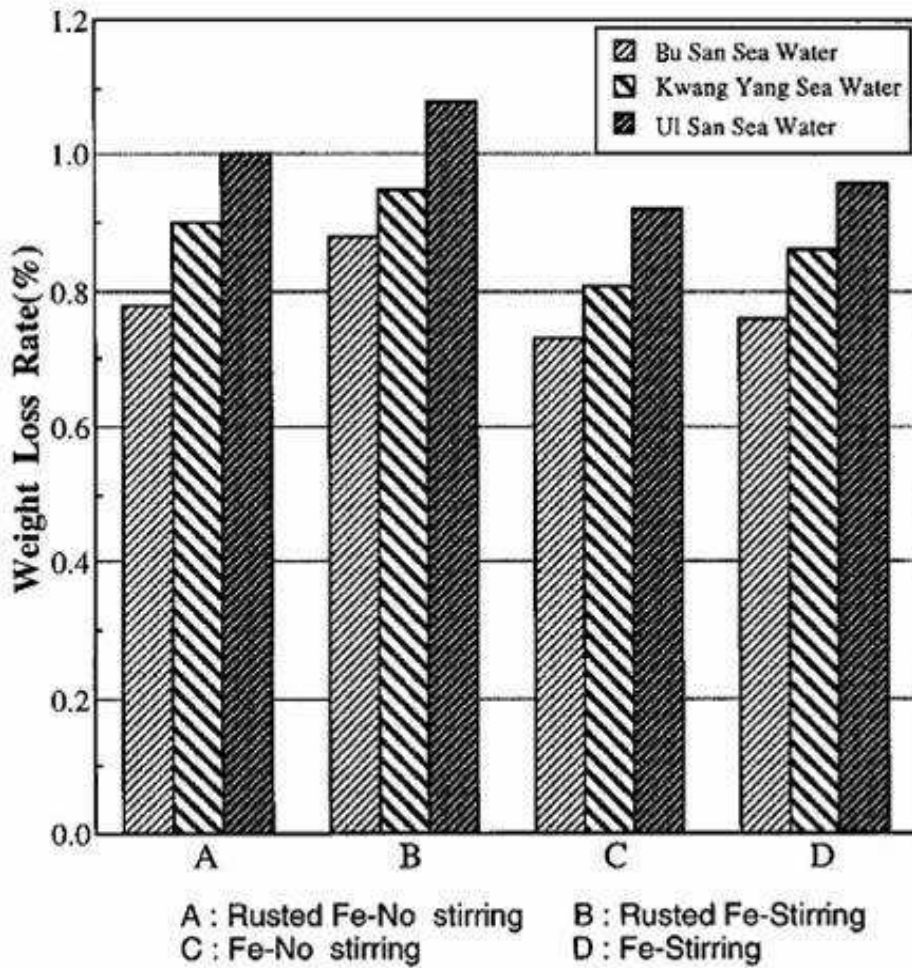


Fig. 3.17 Weight loss rate of Al anode as a function of specimen surfaces conditions and no stirring (stirring, 3 cm/s) in sea water (sacrificial anode method, area ratio Al : Fe = 1 : 400).

3. 용액의 유동유무와 공급 전류밀도변화에 따른 음극의 분극전위변화 및 방식상태 고찰

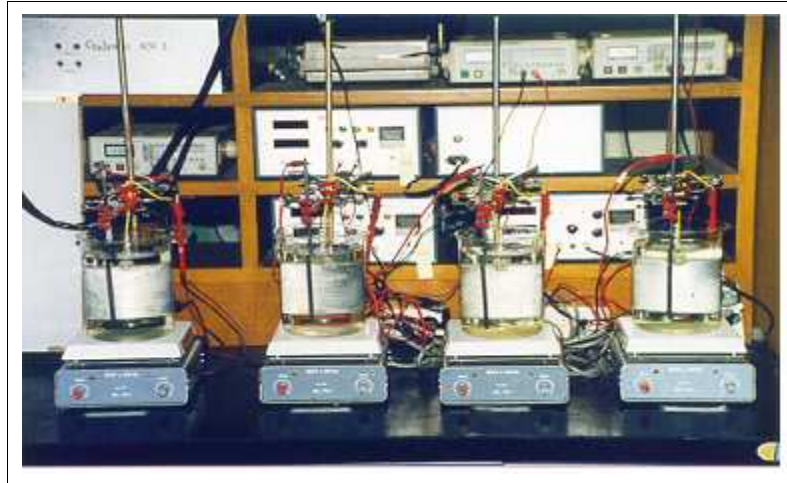
Photo. 3.6은 공급 전류밀도(100, 150, 200, 250mA/m²)의 변화와 유동 유무에 따른 음극의 전위변화와 음극의 방식상태를 조사하기 위한 실험장치도이다. DC power supply를 이용해 전류밀도를 달리하여 9일 동안 조사하였다. 실험에 사용된 양극은 탄소봉(d : 0.5cm)이며, 유동속도는 전 실험과 마찬가지로 3cm/s로 고정하였다. 해수는 1일 1회 전위 측정 후 교환하였다.

Fig. 3.18은 방식전류밀도 100mA/m²를 공급하였을 경우 rusted Fe 시험편과 Fe 시험편의 음극분극 전위변화를 나타내고 있다. 용액이 유동하지 않는 Fe 시험편의 경우가 음극의 분극전위가 가장 비(卑)한 전위 값을 나타내었으며, 유동이 있는 rusted Fe 시험편의 경우가 가장 귀(貴)한 값을 나타내었다. 그리고 Fe 시험편의 유동이 없는 경우를 제외하고는 모두 부식영역 즉 -770 mV(SCE) 이상에 있음을 알 수 있었다.

Fig. 3.19는 150mA/m²의 전류밀도를 공급했을 경우의 음극분극 전위변화이다. 100mA/m²의 경우와 비슷한 양상을 나타내고 있다. 정지 중 Fe 시험편의 경우만 방식영역 이하에 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.20은 200mA/m²의 전류밀도를 공급했을 경우의 음극분극 전위변화를 나타내고 있다. 정지 중 Fe 시험편에서는 1일 경과 후부터 방식영역 이하에 있음을 알 수 있고, 유동이 있는 경우는 약 6일 이후부터 방식영역 이하를 나타내었다. rusted Fe 시험편의 경우 8일째 방식영역 이하를 나타내었지만 다시 전위가 귀 방향으로 이행하는 경향을 나타내었다.

Fig. 3.21은 250mA/m²의 전류밀도를 공급했을 경우의 음극분극 전위변화를 나타내고 있다. rusted Fe 시험편의 유동 용액의 경우만 제외하고 모두 방식영역 이하가 됨을 알 수 있다. Photo. 3.7, 3.8은 전류밀도 100mA/m²에서 250 mA/m²까지 변화시켰을 경우의 Fe 시험편 표면의 방식상태를 나타내고 있다.



(a) No stirring & stirring, Fe specimen



(b) No stirring & stirring, rusted Fe specimen

100 mA/m²	150 mA/m²	200 mA/m²	250 mA/m²
-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-----------------------------

Photo. 3.6 Experimental apparatus supplying the cathodic current.

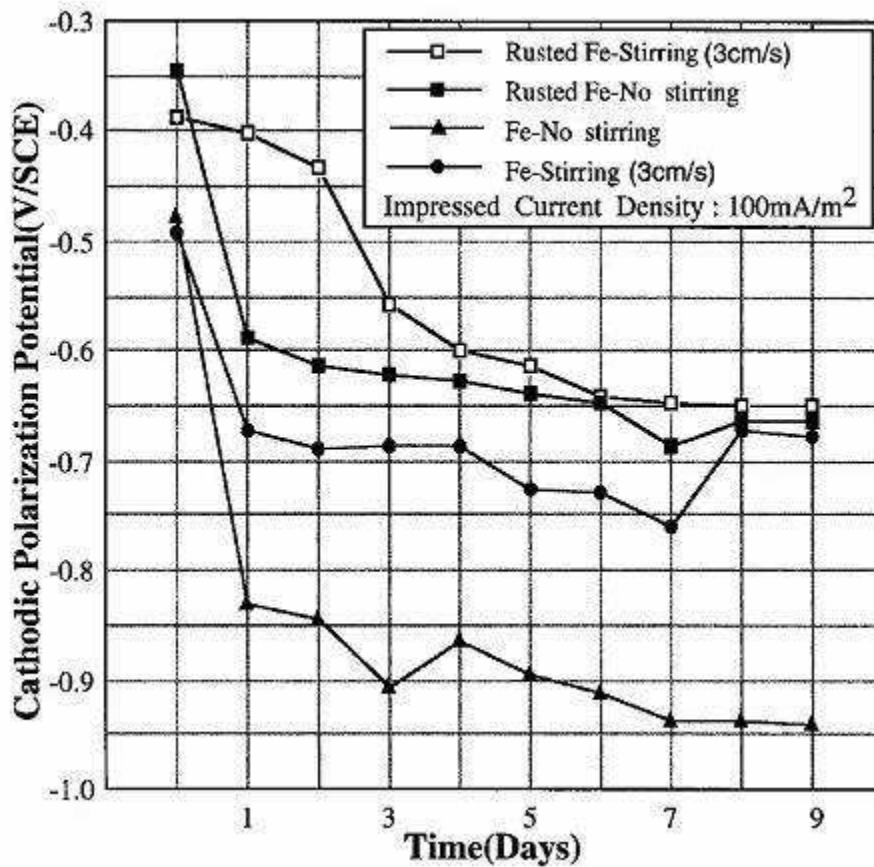


Fig. 3.18 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) with supplied current density of 100 mA/m².

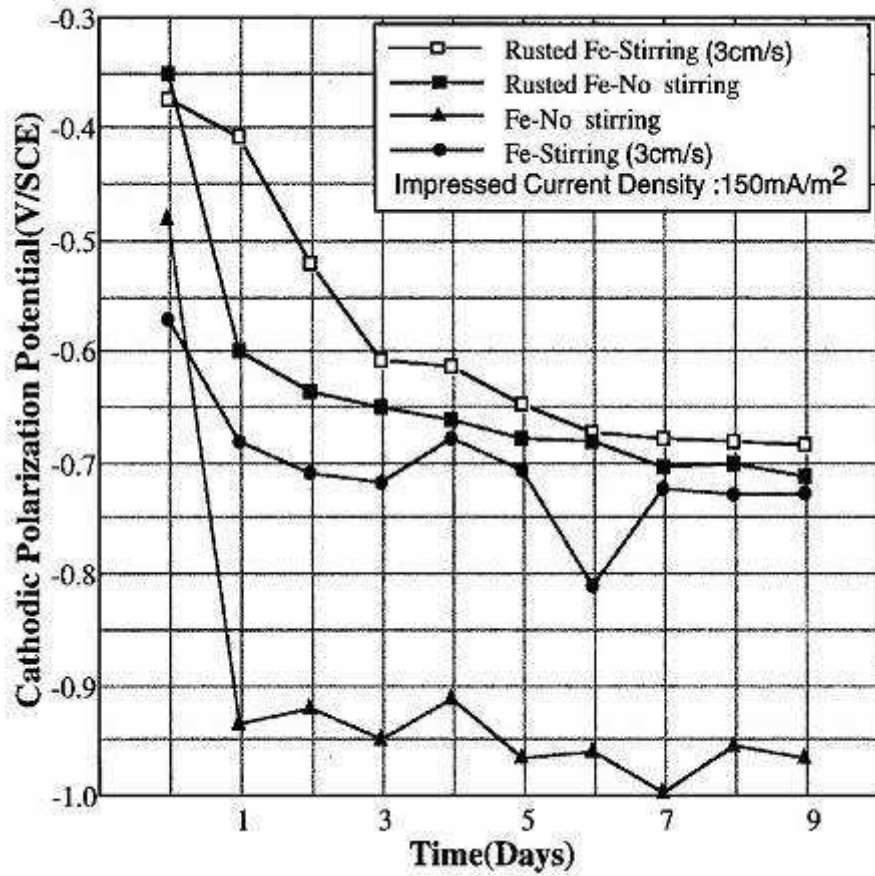


Fig. 3.19 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) with supplied current density of 50 mA/m².

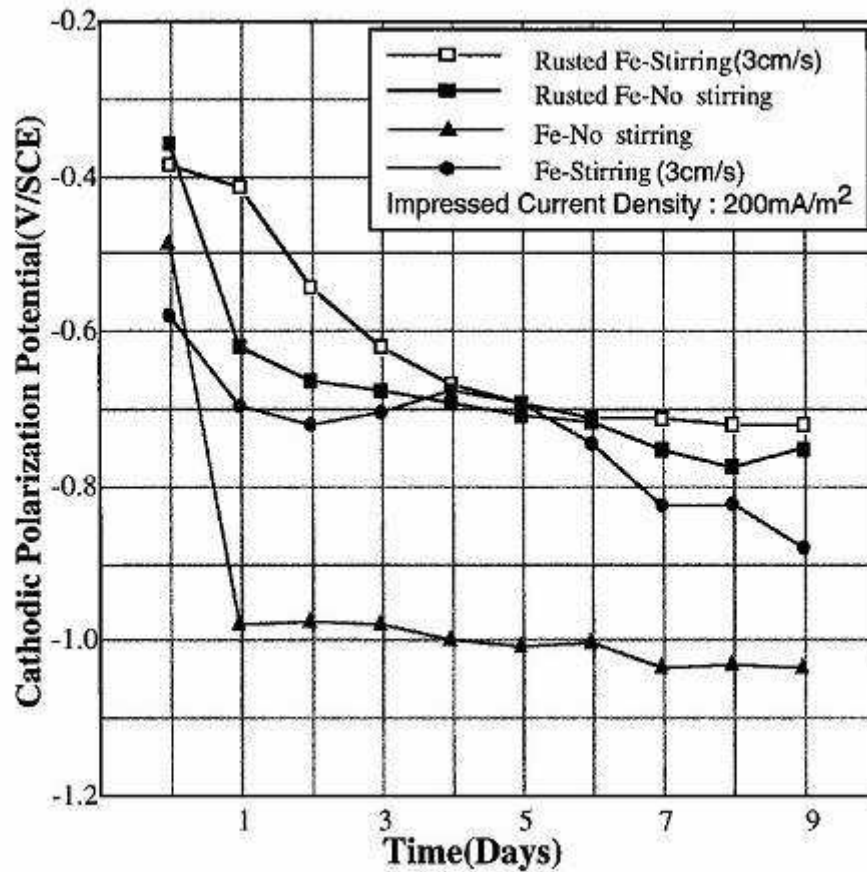


Fig. 3.20 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3 cm/s) with supplied current density of 200 mA/m².

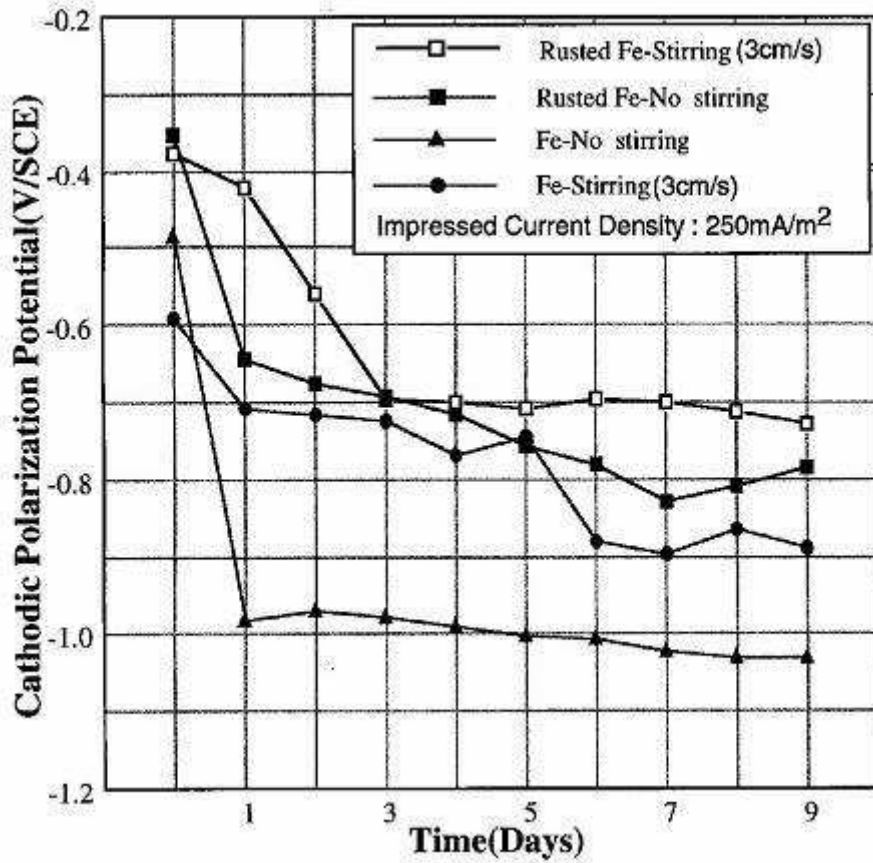


Fig. 3.21 Variation of cathodic polarization potential of Fe (rusted Fe) as a function of no stirring (stirring, 3cm/s) with supplied current density of 250 mA/m².





	No stirring	Stirring (3 cm/s)
100 mA/m ²		
150 mA/m ²		

Photo. 3.7 Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.





	No stirring	Stirring (3 cm/s)
200 mA/m ²		
250 mA/m ²		

Photo. 3.8 Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.

용액의 유동이 없는 경우 100mA/m^2 에서부터 완전 방식 되었음을 알 수 있으며, 용액이 유동하는 경우에는 200mA/m^2 에서 거의 방식 됨을 알 수 있었다. 한편 Photo. 3.9 및 3.10은 rusted Fe 시험편의 공급전류밀도 변화에 대한 표면 방식상태를 나타내고 있다. Rusted Fe 시험편의 경우 용액이 유동하지 않는 경우에는 공급전류밀도 150mA/m^2 에서 거의 방식상태를 나타내었으며 용액이 유동하는 경우에는 250mA/m^2 에서 방식 되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 이때의 음분극전위는 이론적 방식전위(-770 mV, SCE) 보다 높은 전위 값이었다.





	No stirring	Stirring (3 cm/s)
100 mA/m ²		
150 mA/m ²		

Photo. 3.9 Rusted Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.





	No stirring	Stirring (3 cm/s)
200 mA/m ²		
250 mA/m ²		

Photo. 3.10 Rusted Fe specimen surfaces as a function of supplied current density.

4. 정전위법에 의한 유동 유·무에 따른 방식전류밀도 조사

정전위법에 의한 유동 유무에 따른 방식전류밀도를 조사하기 위해 2ℓ의 비이커에 해수를 채우고, 시험편의 노출면적은 1cm^2 , 대극은 백금(Pt)을 사용하였다. 설정전위는 $-870\text{mV}(\text{SCE})$, $-770\text{mV}(\text{SCE})$, $-700\text{mV}(\text{SCE})$ 이었으며, 정지 중 용액과 유동속도 1cm/s 일 때 5일간 potentiostat 장비를 이용하여 시험편을 음분극 시킨 상태에서 방식전류를 측정하여 mA/m^2 으로 단위를 환산하였다.

Fig. 3.22는 정지 중인 경우의 5일간 방식전류밀도 변화를 나타내고 있다. -870mV 의 rusted Fe 시험편의 경우가 658mA/m^2 로 가장 높았으며, -700mV 의 Fe 시험편의 경우가 152mA/m^2 을 나타내었다. 같은 일정전위에서 rusted Fe 시험편이 Fe 시험편 보다 $-870\text{mV}(\text{SCE})$ 에서는 98mA , $-770\text{mV}(\text{SCE})$ 에서는 22mA , $-700\text{mV}(\text{SCE})$ 에서는 28mA 더 높았다. 이는 rusted Fe 시험편의 부식전위가 높기 때문에 일정 음극분극 전위 값을 유지하는데 더 많은 공급전류가 소요되기 때문으로 사료된다.

Fig. 3.23은 유동속도가 1cm/s 인 경우 5일간의 방식전류밀도의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 -870mV 의 rusted Fe 시험편의 경우가 $1,170\text{mA/m}^2$ 로 정지중의 경우에 비해 훨씬 높았으며, -700mV Fe 시험편의 경우가 550mA/m^2 를 나타내었다. 이는 유동에 의해 농도분극이 감소되었기 때문으로 사료된다.

Rusted Fe 시험편의 -770mV 경우 950mA/m^2 로서 일반적인 방식전류밀도 100mA/m^2 까지는 정지중 용액보다는 훨씬 시간이 많이 소요 될 것으로 예상된다. 일정전위 -770mV 와 유동 유무에 따른 방식전류실험 결과 Fe 시험편의 경우 표면에 부식층이 형성되어 있고, 특히 유동이 있는 경우가 더 심함을 알 수 있었다. Rusted Fe 시험편의 경우 실험 전 적색 녹 층은 사라지고 실험 후 흑색 녹 층이 관찰되었다. 이것은 수중에서 녹 층의 박리 또는 여러 환원반응이 일어났기 때문으로 사료된다. 그리고 일정전위 -770mV 와 유동 유무에 따른 방식전류실험 결과 -770mV 와 유사한 경향을 나타내었다. 그런데 -770mV 에서 표면에 부식층이 형성되는 것은 의외의 결과였다. 따라서 실험실에서 5일간의 단

기간 방식전류실험은 무리라고 판단되며, 실제 해상에서 장기간 실험하는 것이 바람직하다고 사료된다. 현장실험 결과는 후에 기술하였다.

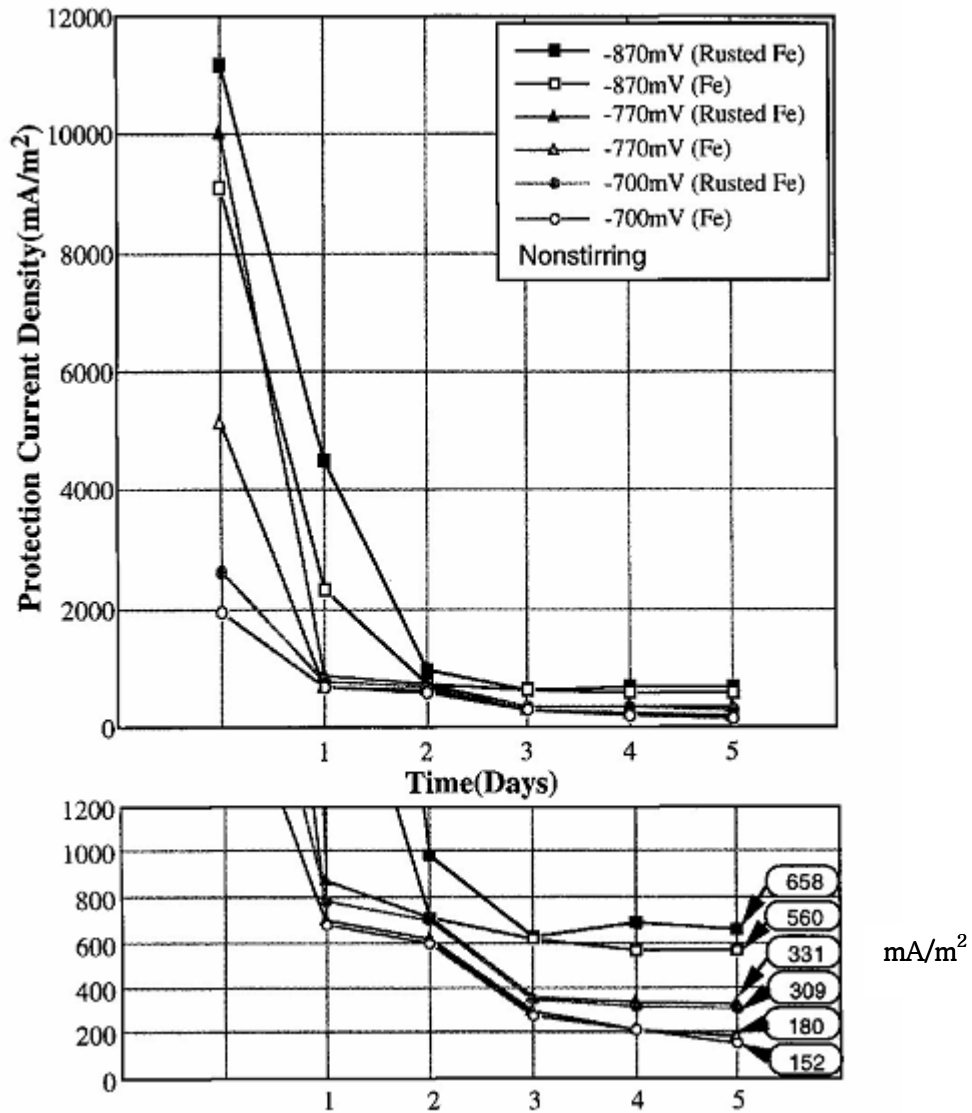


Fig. 3.22 Variation of supplied current density of Fe (rusted Fe) specimen at a constant cathodic polarization potential in no stirring sea water.

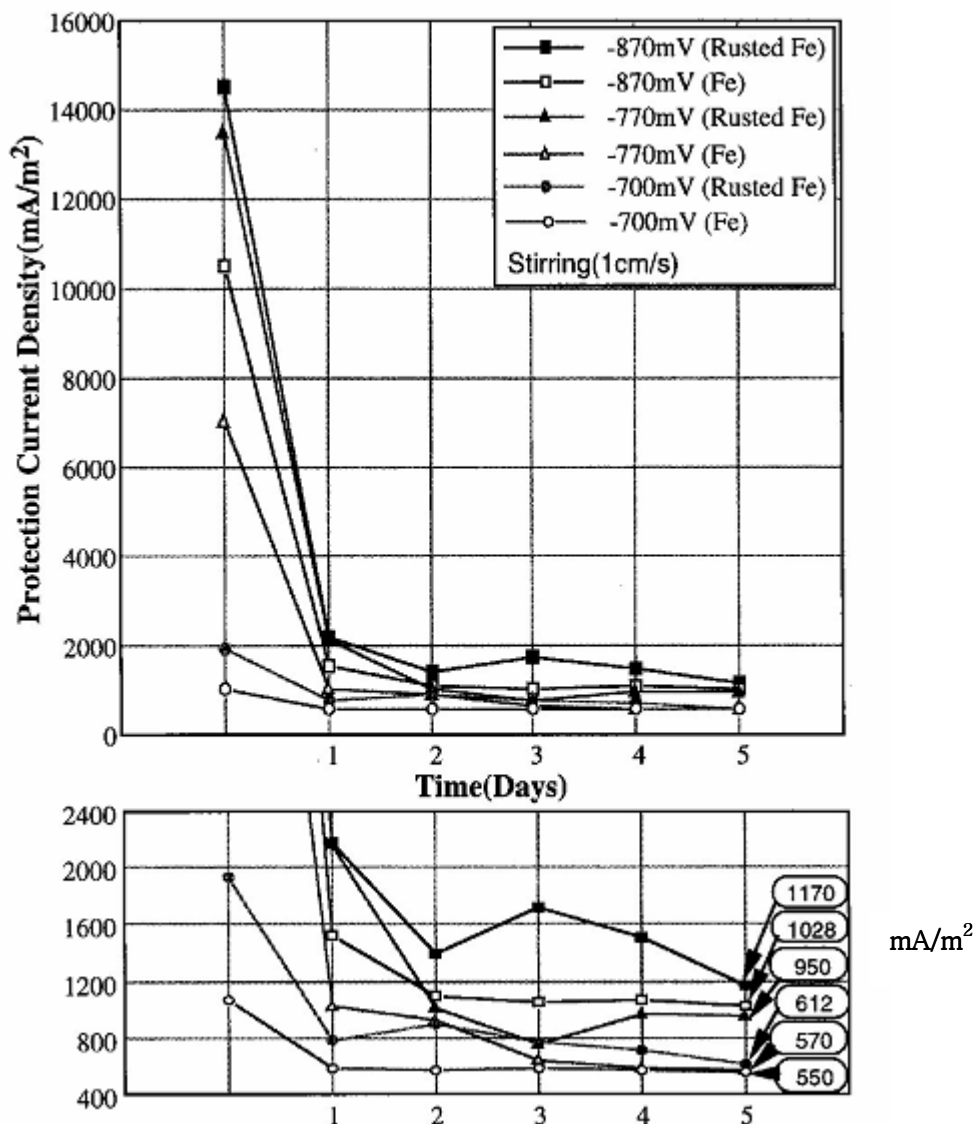


Fig. 3.23 Variation of supplied current density of Fe (rusted Fe) specimen at a constant cathodic polarization potential in stirring sea water.

3.1.4 결과 요약

지금까지 실험실 실험에서 유동해수 중 피 방식체의 표면 부식에 따른 자연 전위의 변화, 희생양극법에 의한 양극소모량 및 분극전위변화, 항구 해수 별 양극소모량 변화, 외부전원법에 의한 분극전위변화, 정전위법에 의한 방식전류 밀도 등을 조사하였다. 이상의 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Rusted Fe 시험편은 Fe 시험편에 비해서 표면에 산화피막 등의 형성에 의해서 해수 중 부식전위가 더 귀한 값을 나타내었다.
- 2) 희생양극법에 의한 음극방식시 Al 희생양극의 발생전류와 양극소모율은 rusted Fe 시험편이 Fe 시험편에 비해서 그리고 용액의 유동이 있는 경우가 없는 경우에 비해서 증가하였다.
- 3) 각 항구 별 해수 중 울산항 제2부두의 해수가 pH와 용존산소농도가 가장 낮고, 이러한 오염된 환경에서 심한 부식으로 인해 양극소모율이 가장 컸으며 다음이 광양 코스모스 관리부두였고, 그리고 부산항 제2부두가 가장 양극소모율이 적었다.
- 4) 외부전원법에 의한 음극방식시 Fe 시험편은 해수의 유동이 없는 경우 100 mA/m² 이상에서 방식가능 하였으나, 3cm/s의 유동용액에서는 200 mA/m²의 방식전류밀도가 필요하였다. Rusted Fe 시험편의 경우에는 유동이 없을 때 150 mA/m² 이상에서 방식가능 하였으나, 3cm/s의 유동용액에서는 250mA/m² 이상의 방식전류밀도가 필요하였다.
- 5) 정전위법에 의한 공급전류밀도 실험에서 설정전위 별 그리고 음극표면 상태 등에 따라 공급전류밀도 값은 달랐으며 녹슨 시험편의 경우가 깨끗한 시험편에 비해 방식전위를 유지하기 위한 공급전류밀도는 큰 값을 나타내었다.

3.2 강 파일의 표면상태에 따른 희생양극소모량과 방식 전류밀도변화

3.2.1 연구배경 및 목적

지금까지 희생양극법과 외부전원법을 적용할 경우 최적의 방식설계를 위한 방식전위와 공급전류 밀도 계산을 위한 해수의 부식특성과 강의 표면상태 등을 변수로 하여 실험실 실험을 통하여 고찰하여 보았다. 그러나 실험실 실험의 결과를 그대로 현장의 방식설계에 적용한다는 것은 많은 오차가 야기될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 대형 실험조와 실제의 해상에서 전술한 실험실결과와 현장실험의 결과에 대한 일치성 여부를 재 확인하는 차원에서 연구고찰 하였다. 본 실험결과는 실험실결과를 현장실험을 통하여 재현시켰다는 점에서 실제 현장에서 방식설계를 위한 참고자료로서 활용할 수 있는 것으로 사료된다.

3.2.2 대형 실험조 제작 및 해상 실험장 제작

본 연구에서는 가능한 현장 실험의 재현을 위하여 Fig. 5.1과 같이 대형 수조를 제작하였다. 수조는 240×240×120cm의 크기이며 외관과 골격은 목재와 합판을 이용해 제작하였다. 수조 내부는 해수의 누수를 막기 위해 FRP를 이용해 0.5cm의 두께로 코팅하였다. 또한 해수의 지속적인 공급에 따른 일정수위를 유지하기 위해 유량 조절용 드레인 밸브(Drain valve)를 설치하였다. 해수 공급은 해수용 펌프(1HP)를 이용하여 실험 기간 중 바다에서 직접 지속적으로 공급하였다. 또한 해수 공급 시 수조 내 시편주위의 유속편차에 따른 영향을 최소화하기 위해 해수 공급용 호스를 수조 바닥에 원형으로 배치하고, 호스 바깥 방향에 10cm 간격으로 구멍을 뚫어 유속 차를 최소화하였다.

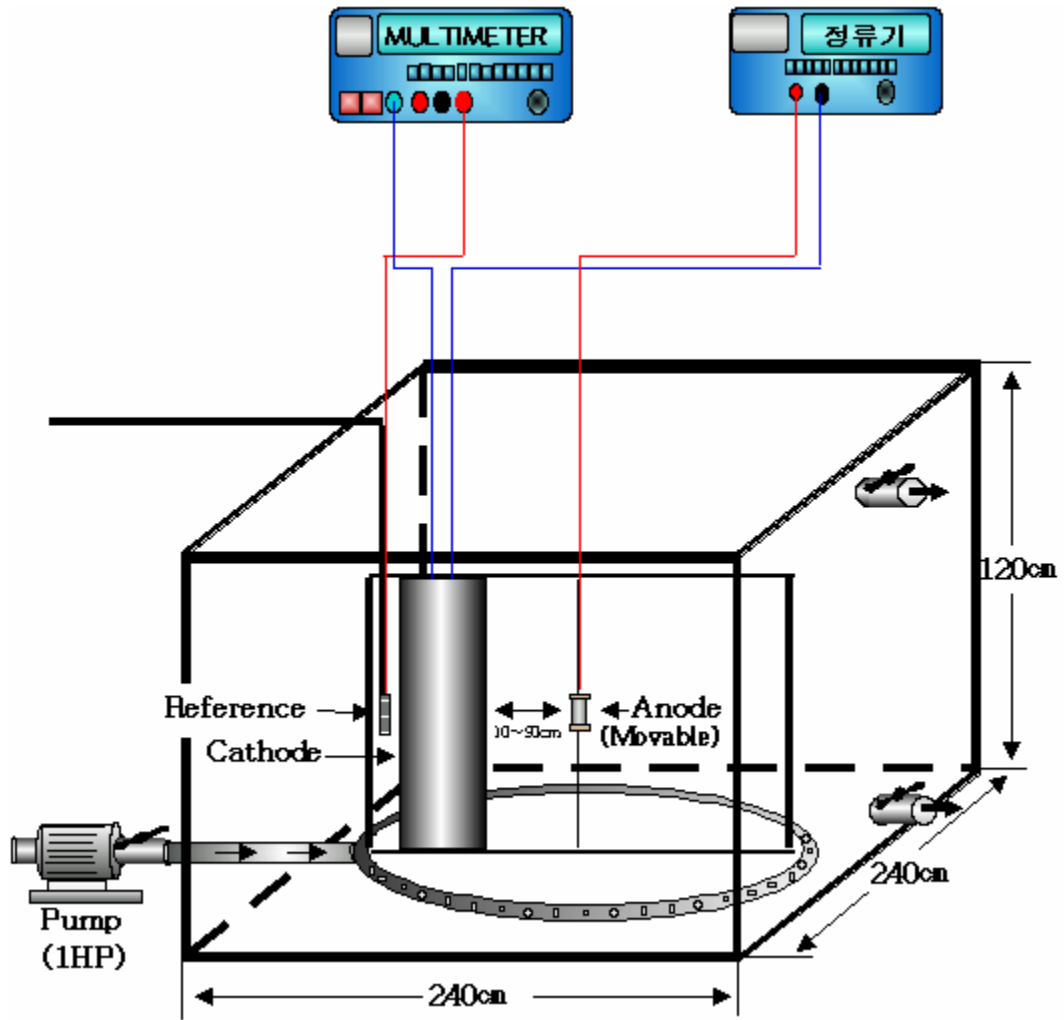


Fig. 3.24 Schematic diagram of experimental apparatus with sea water vessel.

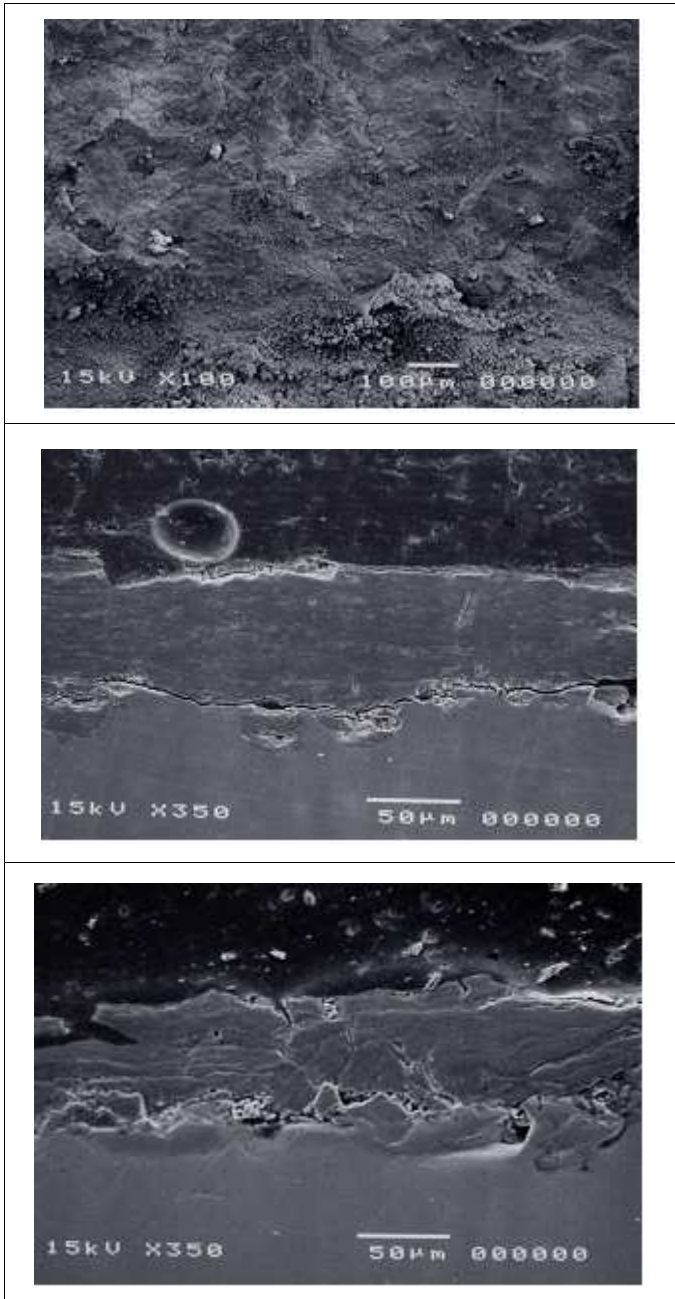
그리고 수조 내 시험편 장치는 시험편(Steel pile, rusted steel pile) 내부에 리드선 연결 후 에폭시 코팅하였다. 그리고 그림과 같이 목재를 이용하여 틀을 만들었으며, 우측에 양극을 음극의 중간에 고정시킨 상태에서 양극으로부터 음극사이의 거리는 30 cm로 고정하였다. 이 때 음극의 리드선 2개 중 하나는 전위 측정용으로 기준전극과 함께 멀티메타에 연결하여 음극 및 양극분극 거동을 측정 하였고, 다른 하나는 양극과 음극 사이에 흐르는 발생전류를 측정하도록 하였다. 이때 사용된 기준전극은 해수염화은전극(Ag/AgCl/해수, SCE전극보다 +0.0088 V귀함)을 사용하였으며 그래프 상에서는 SCE전극으로 변환시켜 도식하였다.

그리고 해상부유물은 가로 10m, 세로 20m의 크기로 인공양식장과 유사하며 내부에는 4개의 방으로 구성되어 있으며 육지에서 10m의 떨어진 곳에 설치하였다. 시험편을 수심 2m에 침지시키고 약 100일 동안 방식전류밀도를 조사하였다. 그리고 양극과 음극의 거리를 50cm로 고정시키고, 기준전극은 음극의 후면 부 중앙지점에 고정시켰다. 양극은 크기 5×10cm, 두께 1cm 강판에 Clad welding하고 이 부분을 에폭시로 도포하였다.

3.2.3 실험방법

현장 실험용 Steel pile 시험편은 강 파일 제조 후 표면에 흑피를 제거하지 않은 상태로 사용하였다. Rusted steel pile 시험편은 기간, 장소, 방법은 rusted Fe 시험편의 경우와 동일하다. 시험편은 S사의 일반 배관용 흑관(D3507 SPP)을 사용하였고, 크기는 직경 22.36cm, 길이 76.3cm로 외부 표면적이 0.5m²가 되도록 제작하였다. 시험편 내부에 두 개(전류공급용, 전위측정용)의 전선(리드선)을 음극방식용 파이프에 연결하였다. 이 때 연결방법은 음극방식설비 연결에 널리 사용되고 있는 Clad welding으로 알려진 Thermite welding을 사용하여 접속 저항이 최소가 되도록 하였다. 전선 연결 후 실험면적을 제외한 내부는 에폭시 코팅처리 하였다

Photo. 3.11의 (a)는 rusted steel pile 시험편의 부식층 표면 현미경 사진을 나타내고 있다. 그리고 (b)는 rusted steel pile 시험편의 부식층 단면을 나타내고 있다. 부식층 두께는 평균 $50 \sim 80 \mu\text{m}$ 정도였다. 이 부식층의 XRD분석 결과 주요 부식생성물은 FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄이었다. (c)는 rusted Fe 시험편의 부식층 단면을 나타내고 있다. 부식층 두께는 평균 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ 정도였다. 또한 이 부식층의 XRD분석 결과 주요 부식생성물은 FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄가 혼재된 상태임을 알 수 있었다.



**(a) Surface of
rusted steel pile**

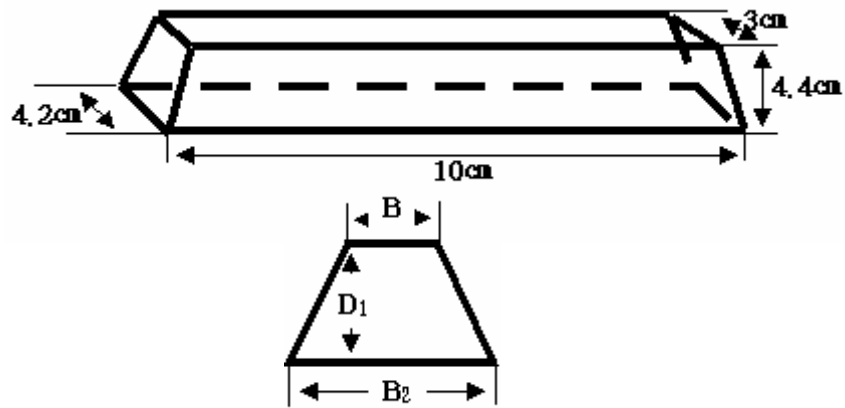
**(b) Cross section of
rusted steel pile**

**(c) Cross section of
rusted Fe**

Photo. 3.11 Fe and rusted Fe specimen surfaces and cross section.

Photo. 3.11의 (a)와 (b)는 실험에 사용된 Al 합금 희생양극이다. (a)는 steel pile과 연결하여 실험한 10일 후의 표면사진이고, (b)는 rusted steel pile과 연결하여 실험한 것이다. 양극소모량을 계산하기 위한 접지저항과 양극발생전류 및 예상수명은 다음과 같다.

- ① 해수의 비저항 : 23.3 Ωcm
- ② 양극 치수



- ③ 등가직경(D)

$$D = \sqrt{\frac{2D_1(B_1 + B_2)}{\pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4.4(3 + 4.2)}{\pi}} = 4.49cm$$



**(a) Al anode specimen after 10 days
(with steel pile)**



**(b) Al anode specimen after 10 days
(with rusted steel pile)**

Photo. 3.12 Al anode specimen surfaces after used for 10 days with sacrificial anode.

따라서 $r = 2.245\text{cm}$, $L = 10\text{cm}$, $\frac{R}{r} = 10/2.245 = 4.454$ 이다.

④ 접지저항(R)

$$\frac{L}{r} > 4.375 \text{ 인 경우 } R > \frac{\rho}{2\pi L} (2.3 \log \frac{8L}{D} - 1)$$

$$R = \frac{23.3}{2 \cdot \pi \cdot 10} (2.3 \log \frac{8 \cdot 10}{4.49} - 1)$$

$$= 0.695\Omega$$

⑤ 평균발생전류(I_A)

$$I_A = \frac{\Delta V}{R} = 0.359A = 0.359A$$

⑥ 예상 수명(Y)

$$Y = 0.85 \frac{W}{I \cdot S} = 0.85 \frac{0.6\text{kg}}{0.0359A \cdot 3.34\text{kg} / A \cdot Y}$$

$$= 0.42Y$$

여기서 Y: 양극 수명(Yr) 0.85: 사용가능 계수(효율)
W: 양극 중량(kg) I : 양극 평균 발생 전류(A)
S: 양극 소모율(kg/A·Y)이다.

Steel pile과 rusted steel pile을 음극방식 할 경우 Al 합금 희생양극의 소모량을 조사하기 위해 수조 내 해수를 지속적으로 공급시켜 10일 동안 분극전위 및 양극발생 전류변화 그리고 Al합금 희생양극의 소모량을 측정하였다. 한편 해상실험의 경우 강 파일의 분극전위를 방식전위인 -770 mV(SCE)로 고정시키고 100일 동안 공급전류밀도를 측정하였다.

3.2.4 실험결과 및 고찰

1. 분극전위변화와 양극발생전류 및 양극소모량 고찰

Fig. 3.25는 희생양극법에 의해 steel pile과 rusted steel pile을 음극방식 시킨 경우 시간 경과에 따른 음극의 분극전위 변화를 나타내고 있다. Steel pile이 rusted steel pile에 비해 낮은 분극전위 값을 유지하고, 전위변화 폭도 다소 안정적이다. 그리고 둘 다 방식전위(-770mV(SCE)이하)에 속하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3.26은 시간에 따른 양극의 분극전위 변화를 나타내고 있다. 양분극 역시 rusted steel pile과 연결된 Al 양극이 높은 분극 전위 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.27은 Al 양극과 강 파일을 연결하였을 때 양극과 음극 사이에 흐르는 양극의 발생전류(mA)를 발생 전류밀도(mA/m²)로 환산하여 나타낸 것이다. 초기에 rusted steel pile의 경우가 1,000mA/m², steel pile이 630mA/m²으로 약 370 mA/m² 정도 차가 있음을 알 수 있다. 이것은 rusted steel pile과 Al 양극 사이의 전위차가 크기 때문에 발생 전류밀도 역시 증가되는 것으로 사료된다. 그리고 9일 경과 후 발생 전류밀도는 각각 205mA/m², 180mA/m² 로 rusted steel pile 이 역시 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3.28은 steel pile과 rusted steel pile을 Al 양극으로 음극방식 시킨 경우 10일 경과 후 양극 소모율을 비교한 것이다. Rusted steel pile의 경우가 steel pile에 비해 양극소모율이 높다는 것을 알 수 있다. 실험 결과는 실험실 실험의 결과와 일치하는 경향을 나타내었다. Photo. 3.12에서 알 수 있듯이 rusted steel pile과 연결된 Al 양극의 표면이 미세한 모공이 많이 관찰되고, 더 많이 소모되었다.

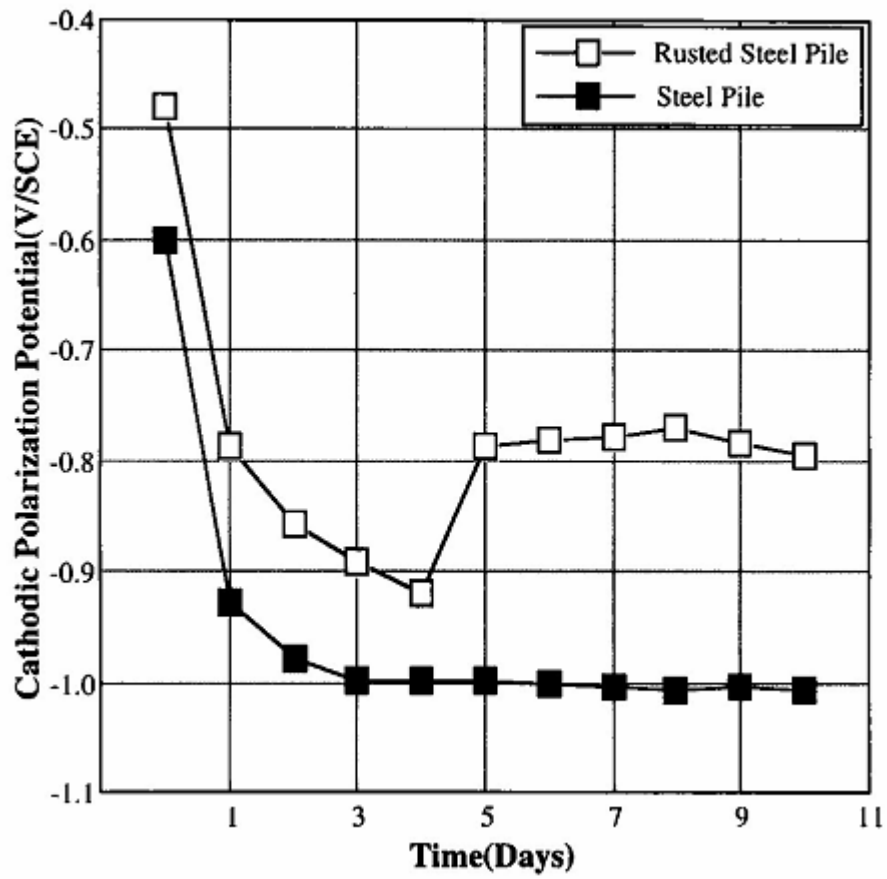


Fig. 3.25 Variation of cathodic polarization potential with rusted steel pile and steel pile specimen in case of cathodic protection by Al anode in natural sea water for 10 days.

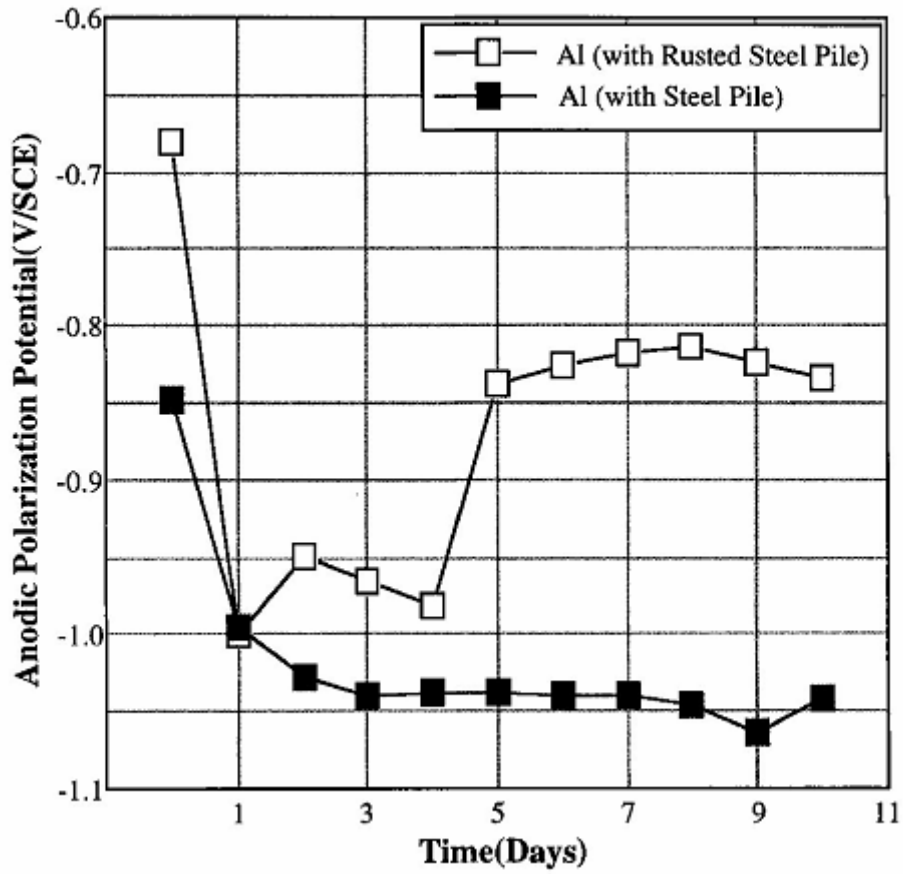


Fig. 3.26 Variation of anodic polarization potential of Al anode used with sacrificial anode in natural sea water vessel for 10 days.

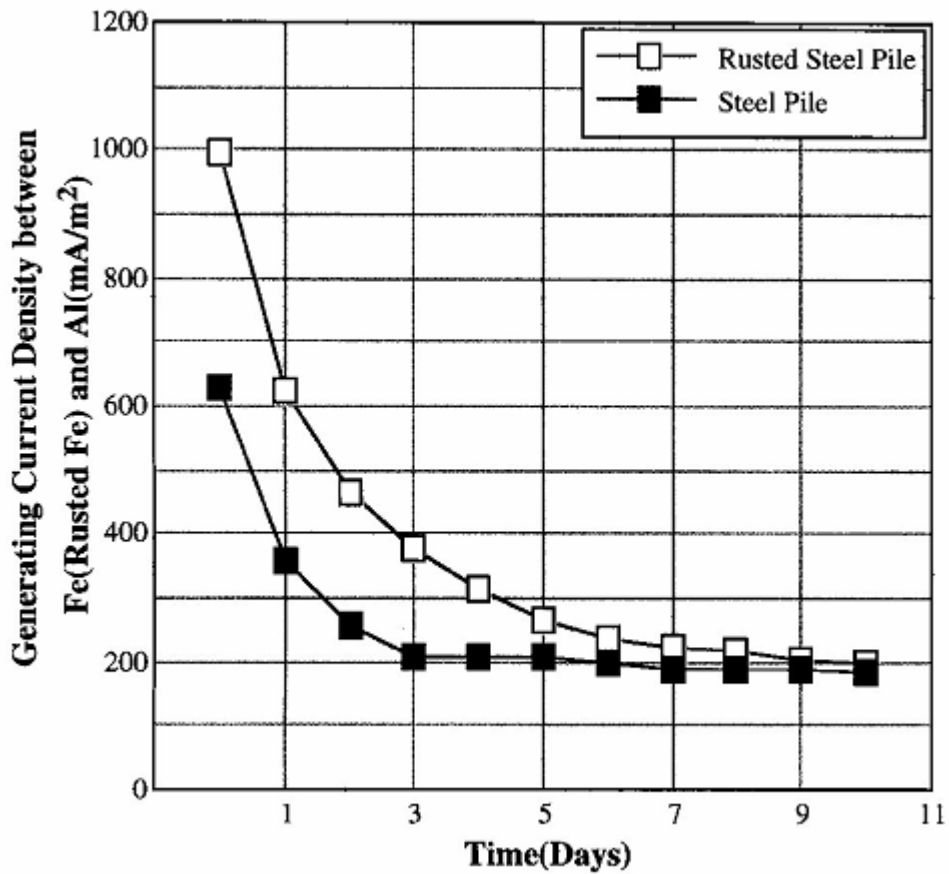


Fig. 3.27 Variation of generating current density between Al anode and rusted steel pile and steel pile specimen in natural sea water for 10 days.

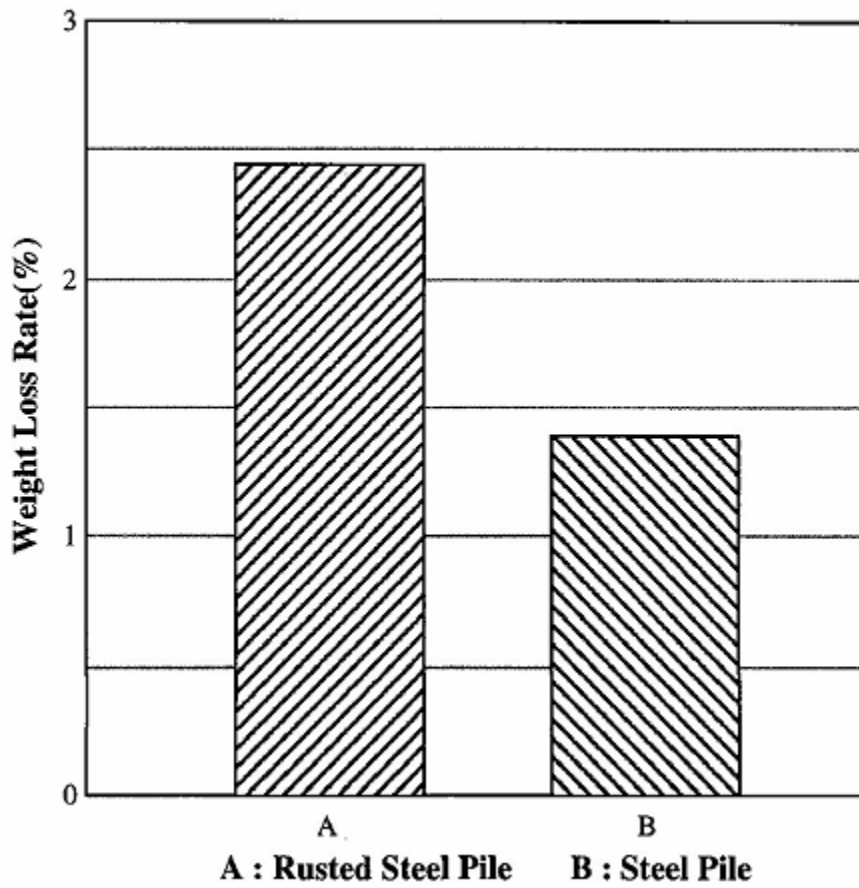


Fig. 3.28 Weight loss rate of Al anode used with sacrificial anode for rusted steel pile and steel pile specimen in natural sea water vessel for 10 days.

2. 해상실험장에서 강 파일의 일정 방식전위유지를 위한 공급전류 밀도 변화 고찰

Fig. 3.29는 해상에서 정전위법에 의해 steel pile과 rusted steel pile을 음극방식 할 경우 방식전류밀도를 조사하기 위한 실험 장치도이다. 육지에서 약 10m 이격된 해상에 부유 구조물을 설치하고, 그림과 같이 시험편을 수심 2m에 침지시키고 약 100일 동안 방식전류밀도를 조사하였다. 외부전원법에 의한 음극의 균일한 전위분포를 나타내는 양극과 음극의 거리가 50cm이었다는 이전 실험결과를 바탕으로 그림과 같이 양극과 음극의 거리를 50cm로 고정시키고, 기준전극은 음극의 후면부 중앙지점에 고정시켰다. 양극은 크기 5×10cm, 두께 1cm 강판에 Clad welding하고 이 부분을 예폭시로 도포하였다.

Fig. 3.30은 steel pile과 rusted steel pile을 해상에서 100일 동안 방식전류밀도를 조사한 결과를 나타내고 있다. 이 때 음극의 설정전위는 일반적인 방식전위로 알려진 -770mV(SCE)로 설정하여 이 전위 값을 유지하는데 필요한 방식전류밀도를 조사하였다. 침지 초기 1일에 rusted steel pile이 660mA/m², steel pile이 380mA/m²로 약 280mA/m²의 전류밀도 차가 발생하였다. 시간 경과에 따라 steel pile의 경우 약 10일 경과 후부터 안정된 값을 나타내면서 100일 경과 시 약 100mA/m²의 방식전류밀도에 근접하는 것을 알 수 있다. rusted steel pile의 경우는 100일 경과 시 약 200mA/m²로 steel pile에 비해 약 100mA/m² 높게 나타났다. 따라서 희생양극으로 음극방식을 할 경우 녹 슨 표면을 가진 강구조물의 음극 표면 상태를 고려하지 않고 일반적인 음극방식 기준을 적용하여 방식한다면 양극 예상수명은 훨씬 단축될 것으로 본 실험을 통해 알 수 있었다.

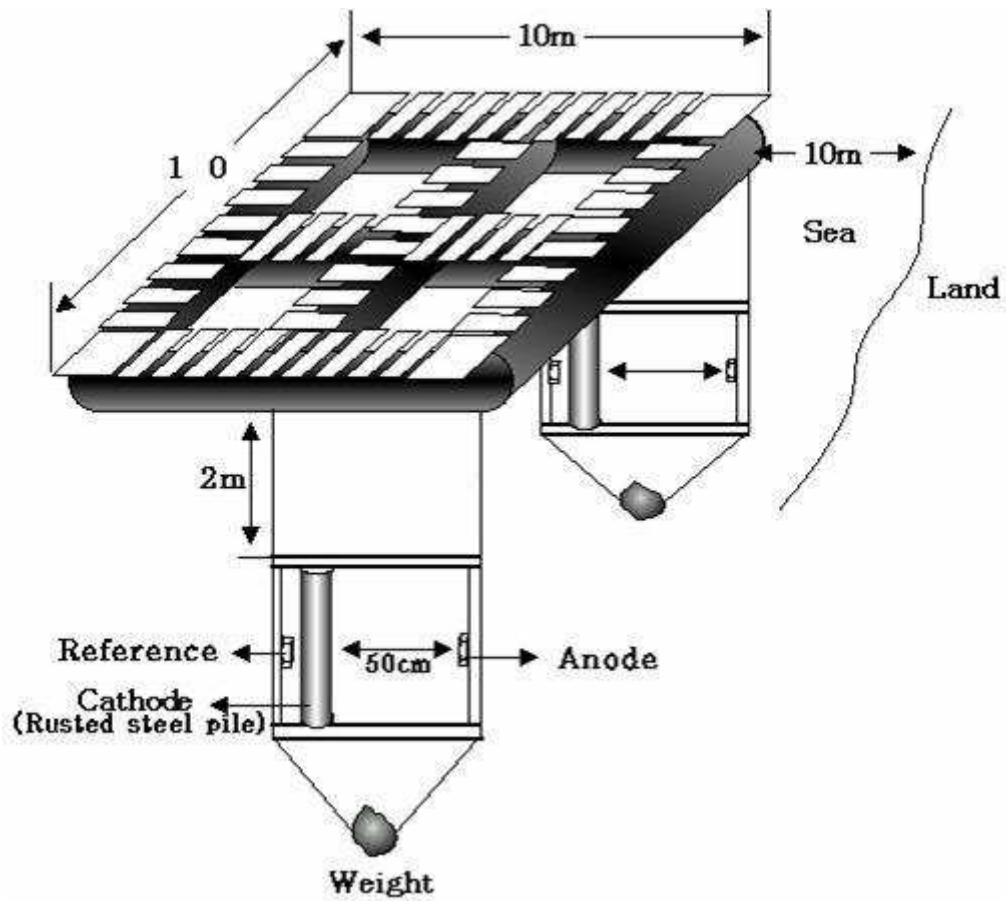


Fig. 3.29 Schematic diagram of experimental equipment for measuring the protection current density at sea.

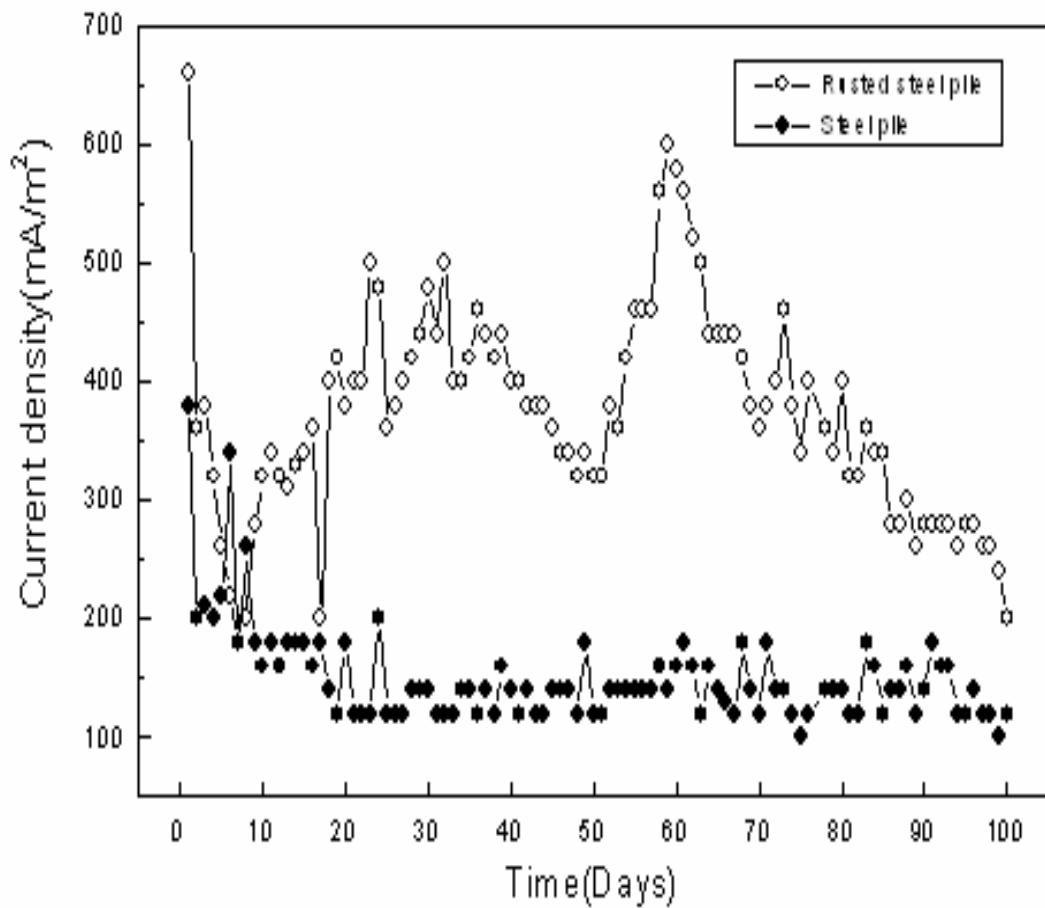


Fig. 3.30 Variation of corrosion protection current density of rusted steel pile and steel pile specimen immersed in sea for 100days.

3.2.5 결과 요약

지금까지 대형 수조 및 해상에서 steel pile과 rusted steel pile을 대상으로 외부 전원법과 희생양극법을 적용할 경우 분극전위 변화는 어떻게 변화하는가를 조사하였다. 그리고 희생양극법에 의한 양극소모율과 정전위법에 의해 해상에서 방식전류밀도는 어떻게 변화하는가도 조사하였다. 대형수조 내에서의 전위분포 조사에 의해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 희생양극법으로 음극방식 할 경우 AI 합금 희생양극의 발생전류 및 소모율은 rusted steel pile의 경우가 steel pile에 비해서 높게 나타났다.
- 2) 희생양극으로 음극방식 할 경우 녹슨 강 파일의 분극전위가 깨끗한 강 파일에 비하여 높은 전위 값을 나타내었다.
- 3) 해상에서 일정방식전위를 유지하기 위한 100일 동안의 공급전류밀도 측정에서 rusted steel pile의 경우가 steel pile에 비해 높은 전류밀도를 나타내었다.
- 4) 공급전류밀도가 100mA/m^2 의 경우에는 음극과 양극 거리가 30cm일 때, 공급 전류밀도가 250mA/m^2 의 경우에는 음극과 양극 거리가 50cm일 때, 분극전위 분포가 균등한 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.
- 5) 대형수조 내에서 음극 강 파일을 외부전원법으로 음극방식 할 경우 양극에서 바라본 전면부에서는 외관상 방식 되었으나, 측면부와 후면부는 방식효과가 떨어지는 경향을 나타내었다. 이것은 수조의 크기가 실제의 해상보다 작기 때문에 전위분포의 신뢰성이 떨어지는 것으로 사료된다.
- 6) 희생양극법으로 음극방식 할 경우 양극과 음극의 거리가 30cm인 경우에는 전면부에서 양극 직하점이 가장 전위가 낮고 상부와 하부에서 전위가 높았다. 그리고 양극과 음극에서 거리가 30cm에서 음극 강 파일의 분극전위분포가 균등한 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

3.3 음극방식에 의해 강 파일에 유입한 방식전류가 인접한 강 파일에 미치는 영향

3.3.1 연구배경 및 목적

부두의 강 파일을 희생양극법에 의해 음극 방식 할 경우 부두의 공사시기가 영역별로 다름에 따라 방식공사의 일정도 다를 수 밖에 없다. 이 경우 어느 지역의 희생양극 예상수명이 설계 수명보다 짧은 경우가 있는데 이것은 해수의 오염에 의한 양극의 자기부식 증가에도 그 원인이 있을 수도 있으나 경우에 따라서는 이웃에 접하고 있는 미방식 강 파일에 방식전류가 공급되어 양극의 수명이 짧아질 수 있다.

본 연구에서는 해상실험장에서 어느 일정 강 파일을 음극 방식 할 경우 그 강 파일과 전기적으로 연결되어 있는 다른 강 파일의 분극전위가 거리에 따라 어떻게 변하고 있는지를 고찰해 보았다. 그리고 양극과 강 파일 사이에 흐르는 전류의 변화와 예상 수명에 대해서 함께 고찰해 보았다. 상기의 실험 결과는 부두의 강 파일을 영역별로 공사 할 경우 다른 영역에도 방식전류가 공급되어 예상 수명과 분극전위에도 영향을 미치게 됨을 감안하여 정확한 방식 설계를 하는데 유용한 자료가 될 것이라고 기대한다.

3.3.2 실험 방법

1) 시험편 제작 및 설계 방법

본 실험에 사용한 설계 기준과 설계 계산은 다음과 같다.

1) 설계 기준

방식대상	강관PIPE(외경: Ø0.1652 X 880mm, 9분)
소요전류밀도(i)	0.12A/m ²
양극수명(Y)	20일이상
해수비저항	30 ohm·cm
기준 전극	Zn electrode, 9ea(음극 1분당 1개씩 설치)

양극 사양	
양극의 규격	150Ø X 105L(mm)(Al-Anode)
양극의 중량	0.05Kg
개로 전위	-1.1(V)
이론전기발생량	2,850 A·Hr/kg
전류 효율	90% 이상
소모율	3.415(kg/A·Yr.)
유효 사용율	85%

2) 설계 계산

방식대상면적(S)	$S(m^2) = \pi \times \{ \text{강관 PILE의 외경} \times \text{강관 PILE의 길이} + (\text{강관 PILE의 외경}^2 \div 4 \times 2) \} \times \text{강관 PILE의 수량}$ $= \pi \times \{ 0.1652 \times 0.88 + (0.1652^2 \div 4 \times 2) \} \times 9$ $= 4.5(m^2)$	
소요전류 (I)	$I(A) = \text{방식대상 면적} \times \text{소요 전류 밀도}$ $= 4.5 \times 0.12 = 0.54 (A)$	
양극의 접지 저항 (R)	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot (\ln \frac{8L}{D} - 1)$ $= \frac{30}{2\pi \times 10.5} (\ln \frac{8 \times 10.5}{1.5} - 1)$ $= 1.367 (ohm)$	R : 접지저항(ohm) ρ : 해수의 비저항(Ω·cm) L : 양극 길이 (cm) D : 등가 직경 (cm)
양극의 개당 발생 전류 (Ia)	$I_a = E \div R$ $= 0.25 \div 1.376$ $= 0.182(A/EA)$	E : 양극과 방식된 강관의 전위차 (-0.85V - (-1.1)) = 0.25V
소요양극수량 (N)	$N(EA) = \text{소요전류(A)} \div \text{양극의 개당 발생전류(A/EA)}$ $= 0.54 \div 0.182 = 2.97 (EA)$	
양극의 이론 수명 (일)	$Y(\text{일}) = \text{양극의 중량} \times \text{유효사용량} \times 365 \div (\text{양극의 개당 발생 전류} \times \text{양극의 소모율})$ $= 0.05 \times 0.085 \times 365 \div (0.182 \times 3.415)$ $= 24 (\text{일})$	

즉 상기 설명과 같이 강 파일 수는 9개이며 음극과 양극 및 기준전극의 규격은 Fig. 3.3.1과 같다. 그리고 음극 강 파일 CA1에 Fig. 3.3.2 와 같이 양극 3개를 연결시켰으며 기준 전극은 CA1에서 CA9까지 각각 1개씩 설치 하였다.

그리고 Fig. 3.3.3의 CA9 파일은 양극 1개를 연결하여 음극 방식 시켰다. CA1에서 CA9까지 전기적으로 연결되어 있으며, 양극발생전류 변화에 대한 측정을 위해서 CA8과 CA9는 연결 또는 절연 하였다.

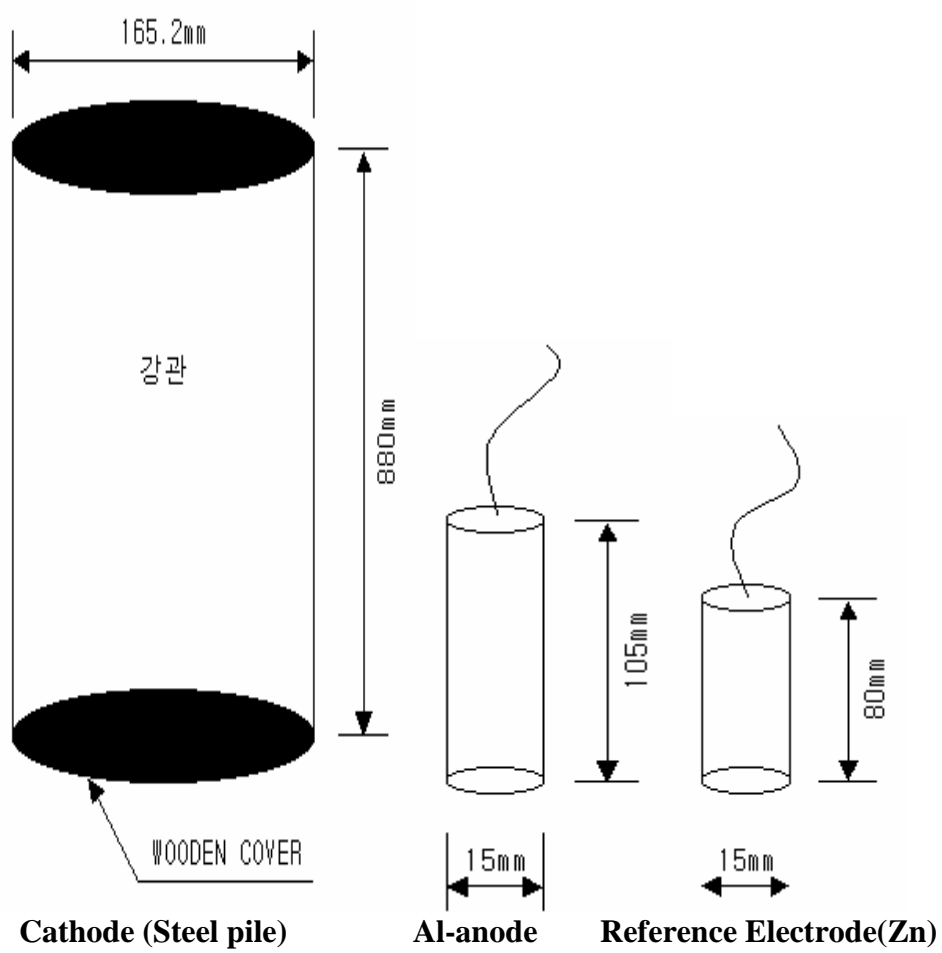


Fig. 3.31 The size of cathode, anode and reference electrode.

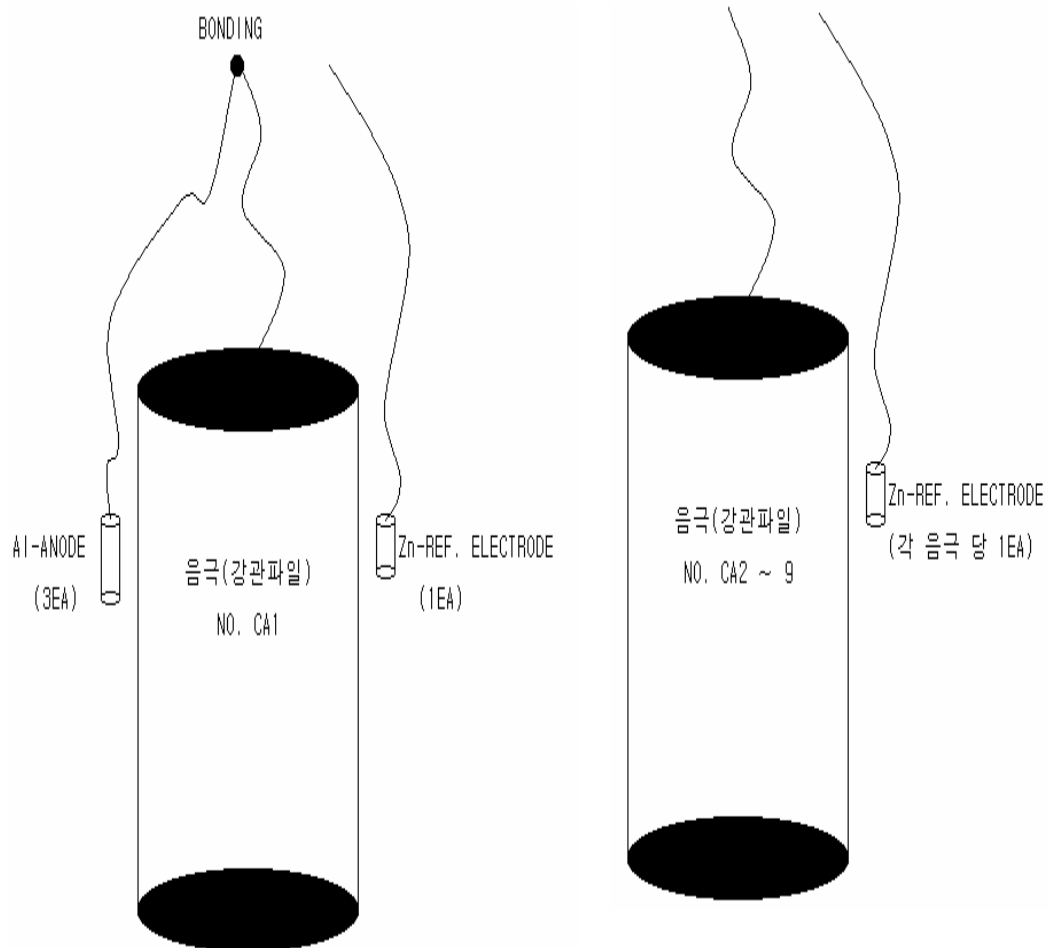


Fig. 3.32 Schematic diagram of steel pile, Al-anode and reference electrode.

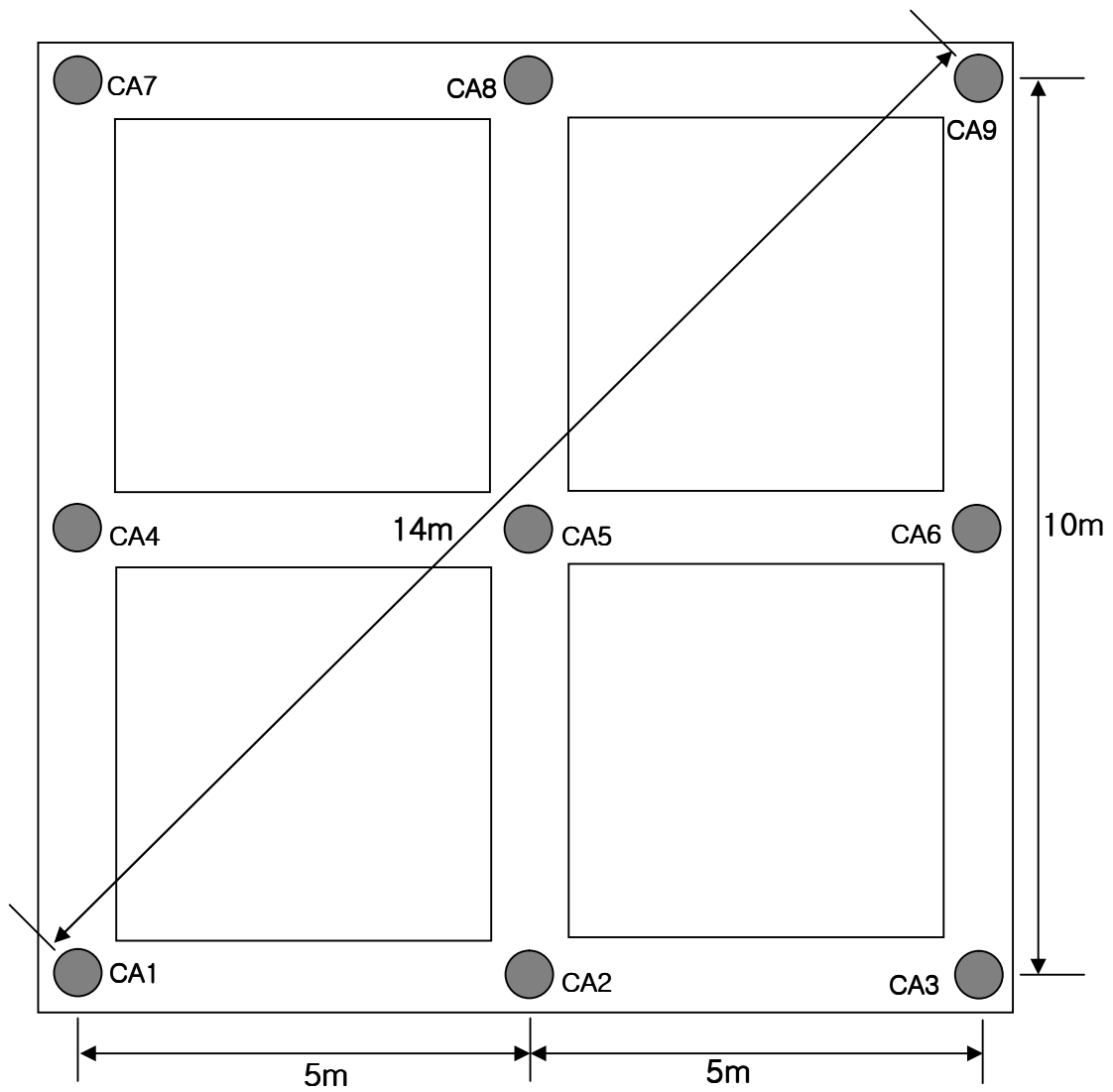


Fig. 3.33 Test rack of steel piles (cathode) test rack with ID number and dimension

2. 실험 방법

해상 시험장에 9개의 강 파일을 강 파일 상부가 수심 50cm 밑에 잠기도록 하고 강 파일 하부는 무게 추를 이용하여 고정시켰다. 그리고 각각의 강 파일에 대한 분극전위와 CA1 파일과 양극 사이의 발생전류와 CA9 파일과 양극 사이에 흐르는 전류를 초기 7일간 매일 측정하였고 그 이후는 2일에 1회씩 측정하였다. 그리고 CA1 파일에 연결되어 있는 희생양극으로 방식할 경우 CA1에서 CA9까지의 분극전위 변화와 양극 발생전류를 일정기간 측정한 후 CA9에 희생양극 한 개를 연결시킴으로써 CA1 파일과 양극 사이에 흐르는 전류 변화와 각 강 파일의 분극전위 변화를 측정하였다. 또한 CA8 파일과 CA9 파일을 절연시킴으로써 CA9 파일과 양극 사이에 흐르는 전류 변화도 측정하였다. 그리고 다시 CA9 파일에 연결되어 있는 양극을 절연시켜 CA1 파일에 연결되어 있는 양극 발생전류 변화를 측정하였다.

3.3.3 실험 결과 및 고찰

Table 3.4는 침지 초기부터 약 40일간 각 파일의 분극전위와 CA1 파일과 양극 그리고 CA9 파일과 양극 사이의 발생전류를 측정하여 정리한 결과를 보여주고 있다. 그리고 Fig. 3.34는 측정 일수와 각 강 파일의 분극전위 변화를 보여주고 있으며 Fig. 3.35는 측정일자에 따른 양극의 발생전류 변화를 나타내고 있다.

Table 3.4 Cathodic polarization potential of various steel piles and anodic producing current between CA1, CA9 and Al anode

Date	Cathodic Polarization potential (mV)									Current (A)	
	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5	CA6	CA7	CA8	CA9	CA1	CA9
1st day	299.5	321	321	322	324	325	320	318	316.2	0.34	0.11
4th day	226.8	261.5	263.9	260.3	260.9	268.2	259.9	259.4	256.2	0.491	0.101
6th day	223.4	257.6	259.5	254.7	254.1	260.9	255.4	258.1	254.8	0.501	0.097
8th day	220.6	257.4	260.1	253	253.1	260.1	255.8	260.4	257.1	0.494	0.09
10th day	223.7	264.5	261.7	255.3	254.8	261.8	260.8	261.1	258.5	0.488	0.086
12th day	217.8	256.3	255.8	248.7	247.6	258.5	248.3	246.9	243.6	0.486	0.077
14th day	223.3	268.1	259.1	251.6	251.3	262.4	251.8	247.4	241.2	0.469	0.071
16th day	219.5	263.2	259.2	249.3	249.6	260.5	253.4	244.2	240.1	0.46	0.056
24th day	201.2	235.4	237.3	231.2	232.8	242.4	225.4	223.1	219.4	0.394	0.014
28th day	198.3	240.8	234.4	229.5	225.7	234.6	227.8	221.4	220.1	0.401	0.013
34th day	205.3	236.3	235.6	230.6	230.1	236.8	229.3	225.2	223.2	0.375	0.008
35th day	350	355	350	342.1	355.7	356.3	357.9	342.1	340.1	0.079	0.004
36th day	348.8	358.6	353	352	355.1	353.9	361.5	344.7	343.2	0.078	0.003

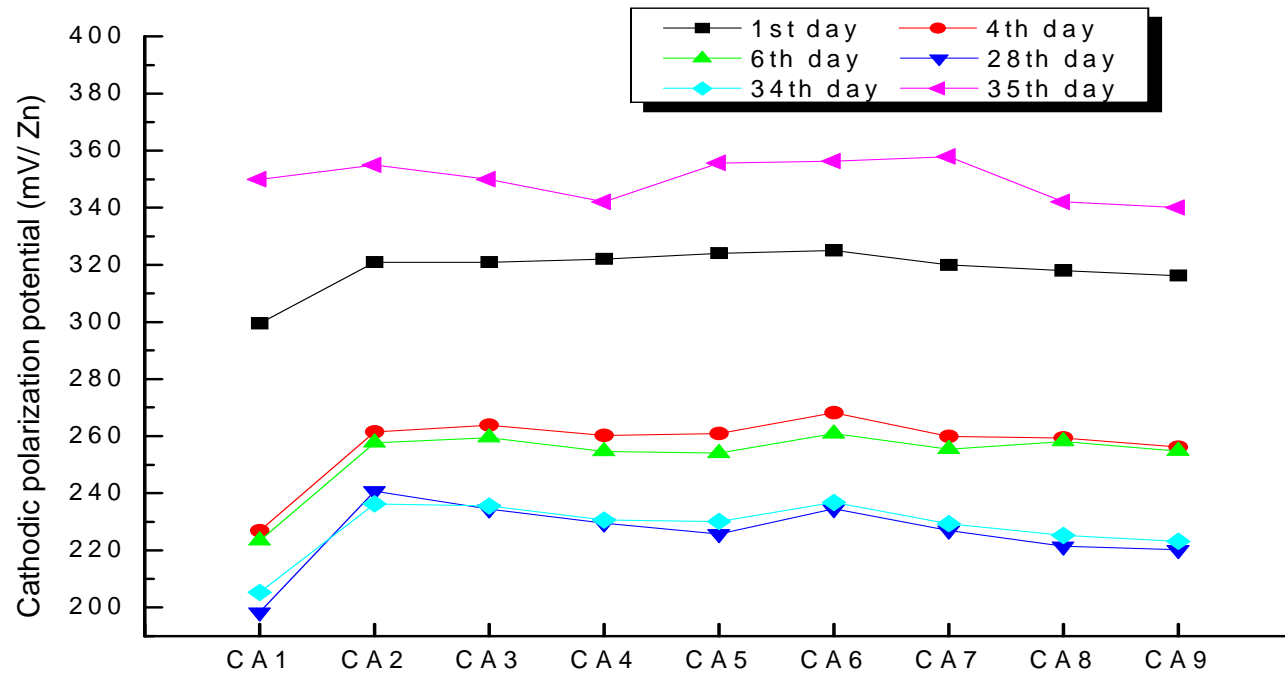


Fig. 3.34 Variation of cathodic polarization potential for various steel piles with increasing of submerged day.

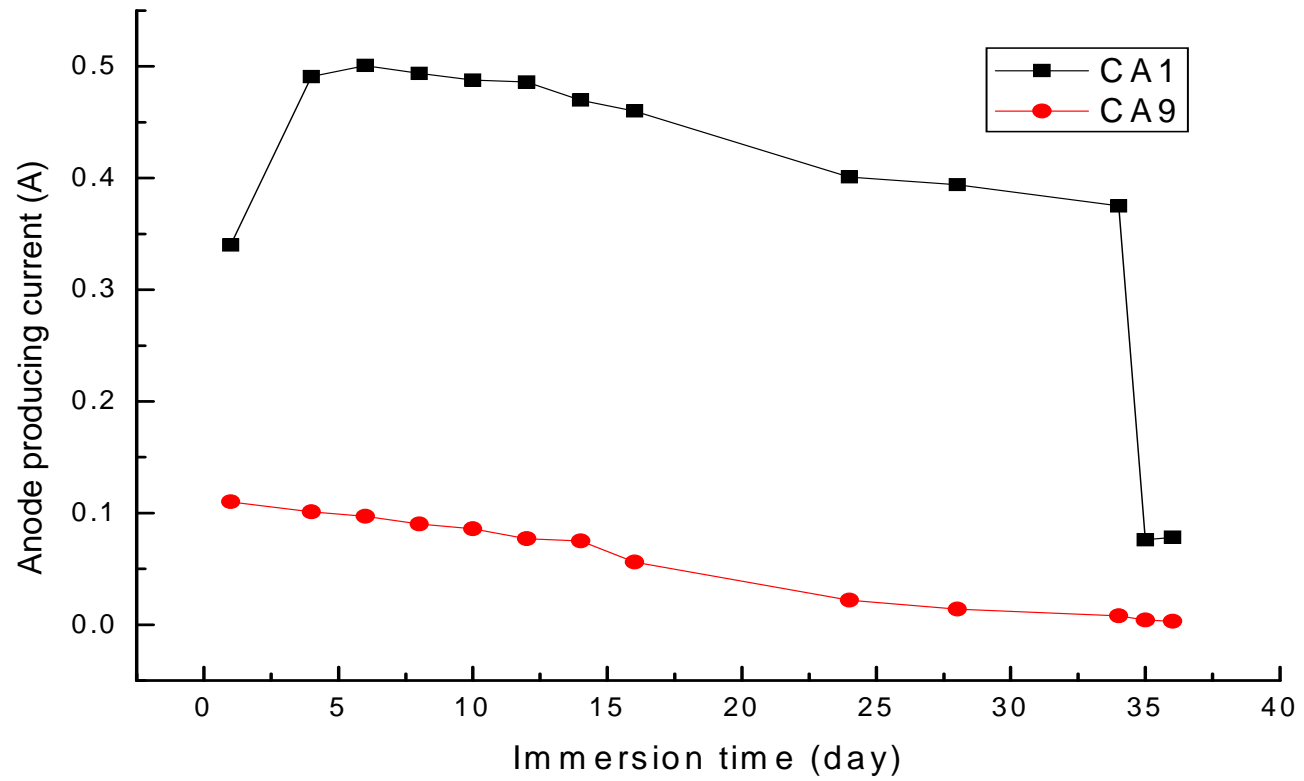


Fig. 3.35 Variation of anode producing current with increasing of measured day.

Fig. 3.34에서 알 수 있듯이 측정 첫 날은 강 파일의 분극전위가 비교적 귀한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 강 파일의 이론적 방식전위 -770mV(SCE) 는 기준전극이 Zn이므로 $260\text{mV}(-770\text{mV}-(-1030\text{mV}))=260\text{mV}$ 이하의 값을 유지해야 방식되므로 침지 첫 날은 방식전위 영역에서 이탈되어 있음을 알 수 있다. 그러나 침지 4일째에는 거의 방식전위 영역에 들어 있음을 알 수 있다. 또한 CA1 강 파일이 다른 강 파일에 비해서 분극전위가 훨씬 비한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 희생양극에서 가까운 강 파일 일수록 방식전류가 많이 공급되며 거리가 멀수록 방식전류의 공급이 적어지는 것을 알 수 있었다. 그러나 CA9 파일은 별도의 양극이 방식하고 있으므로 분극 전위가 비교적 비한 값을 나타내고 있다.

한편 방식일수의 증가에 따라 강 파일의 분극전위는 점차 비 방향으로 이행하였으며 침지 35일째 되는 날부터 급격히 분극전위가 방식전위 이상으로 상승하는 사실을 알 수 있었다. Fig. 3.35의 양극 발생전류 역시 침지 35일째부터 0.079A로 급격히 감소한 결과에 기인하는 것으로 사료된다.

그리고 CA1 강 파일에 연결되어 있는 양극의 이론수명은 24일이므로 실제의 수명은 이론수명보다 약 10일 긴 것으로 판단된다. 이것은 CA9에 1개의 양극이 달려 있으므로 이 양극의 영향을 받아 실제 수명이 연장된 것으로 사료된다. 양극 발생전류는 침지 6일째 0.501A(단, 이론 발생전류 $0.182 \times 3 = 0.546\text{A}$)로 최고의 값을 나타낸 후 점차 감소하였다. CA9 강 파일과 연결된 경우의 발생 전류는 침지 1일째 최고의 값(0.11A)을 나타낸 후 점차 감소하였다. 그러나 CA1과 연결된 희생양극은 CA1에서 CA9까지의 강 파일을 방식할 목적으로 설계된 경우이며, CA9과 연결된 희생양극은 CA9 강 파일만을 방식할 목적으로 설계 되었다. 따라서 CA9과 연결된 양극이 CA1에서 CA9까지 모든 강 파일을 방식하도록 연결되었기 때문에 양극의 발생전류는 측정 6일째부터 0.1A 이하로 떨어지는 과부하 상태임을 알 수 있었으며 CA1에 연결된 양극 발생전류는 측정 35일부터 0.1A이하로 떨어지는 경부하 상태를 나타내었다. Table 3.5는 CA1 파일에 희생양극을 연결 한 경우 및 CA9 파일에 희생 양극을 연결한

경우와 CA8 파일과 CA9 파일을 절연시켰을 경우 그리고 CA9에 연결된 희생양극을 절연시켰을 경우에 대한 각 강 파일의 분극전위 변화와 CA1 파일과 CA9 파일에 연결된 희생양극의 발생전류 변화 등을 측정한 결과이다.

Fig 3.36은 각 강 파일의 측정일수 변화에 따른 분극전위 변화를 나타내고 있다. CA1 강 파일에 희생양극을 연결한 첫 번째 날에는 강 파일 전체가 방식전위(260mV) 보다 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 침지 4일째에는 모든 강 파일의 분극전위는 방식전위 이하로 떨어졌음을 알 수 있다. 그리고 CA9에 희생양극을 연결한 5일째부터 강 파일의 분극전위는 급격히 비 방향으로 이행하였으며 7일째에는 더욱 비한 분극전위 값을 나타내었음을 알 수 있다. 또한 침지 8일째에 CA8과 CA9 파일을 절연시킴에 따라 CA9에 연결되어 있는 희생양극의 방식전류 영향을 받지 못하는 CA1~ CA8까지의 강 파일들의 분극전위가 다소 상승하는 경향을 보였다. 게다가 침지 11일째에 CA9에 연결된 희생양극을 절연시킴에 따라 강 파일의 분극전위는 다시 귀한 방향으로 전위가 높아지는 경향을 알 수 있다. 이것은 CA9에 연결된 희생양극의 방식전류 영향이 없어지고 CA1에 연결된 희생양극으로만 방식전류가 공급되기 때문으로 사료 된다. Fig 3.37은 각 강 파일 측정일수 변화에 따라 분극전위 변화를 나타내고 있다. 침지 첫 날에는 각 강 파일의 분극전위 변화 차이가 없으나 침지 4일째에는 희생양극이 연결되어 있는 CA1 파일의 분극전위가 가장 낮았으며 침지 15일 짜까지 같은 경향을 보여주고 있다. 그리고 CA8은 CA4 파일에 대해 CA1 강 파일에서 먼 거리에 있으나 오히려 CA4 파일보다 전위가 낮은 경향을 나타내었다. Table 3.5에서 알 수 있듯이 CA2 파일에서 CA8 파일까지는 거리에 관계없이 전위값이 불규칙하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 거리의 영향보다는 각 강 파일에 미치는 표면상태 및 유속의 영향에 기인하는 것으로 사료된다. CA9 파일은 희생양극을 연결하였을 경우에는 낮으나 절연 하였을 경우인 침지 11일 짜부터는 CA4, CA8 파일보다 전위가 조금 높게 나타나는 것을 알 수 있으며 이것은 CA9 파일이 CA1 파일에서 가장 먼 위치에 있기 때문으로 사료된다. 즉 거리의 영향이 조금은 있는 것으로 볼 수

있다.

한편 Fig 3.38은 침지일수 변화에 따른 CA1과 CA9 파일에 연결된 희생양극과 강 파일 사이에 흐르는 전류변화를 나타내고 있다. 침지 첫째 날부터 4일까지 CA1 강 파일과 연결된 양극의 발생 전류는 점차 증가하다가 5일째 되는 날 CA9에 희생양극을 연결함으로써 CA1의 발생 전류는 0.37A에서 0.342A로 급격히 감소하였다. 그 후 점차 감소하는 경향을 보이다가 침지 8일째 CA8과 CA9 강 파일을 절연함에 따라 침지 7일째의 0.312A에서 다시 0.316A로 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보였다. 또한 침지 11일째 다시 CA9에 연결된 희생양극을 절연시킴에 따라 발생전류는 10일째의 0.313A에서 0.324A로 증가하였고 침지 15일째에는 0.331A로 증가한 후 안정되었다. CA9에 연결된 희생양극의 발생전류는 침지 5일째 CA9에 연결함에 따라 0.089A에서 침지 7일째 0.086A로 증가하였고 침지 8일째 CA8과 CA9 파일을 절연시킴에 따라 0.073A로 감소하였으며 침지 10일째에는 0.074A로 안정되었다.

이상의 실험결과에서 알 수 있듯이 양극의 발생전류는 방식하고 있는 기존의 강 파일과 이웃에 접하고 있는 강 파일이 전기적으로 연결되어 있을 경우, 이웃하는 강 파일의 방식 유무와 방식 정도에 따라 기존의 강 파일을 방식하고 있는 희생양극 발생전류가 예상 발생전류 보다 증가 또는 감소되어 희생양극 수명에 영향을 미칠 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 방식대상 파일을 희생양극에 의해 방식할 경우 희생양극에서 먼 거리에 있는 강 파일의 분극전위가 감소하는 경향이 있었으며 본 실험의 결과에서는 희생양극에서 14m 떨어져 있는 강 파일의 분극전위가 감소하는 결과가 나왔다. 그러나 방식 가능한 거리는 이 보다 훨씬 먼 거리까지 가능할 것으로 사료된다.

Table 3. 5 The cathodic polarization potentials for nine steel piles and the anodic current for CA1 and CA9

Date (Day)	Polarization potential (mV)									Current (A)		
	CA1	CA2	CA3	CA4	CA5	CA6	CA7	CA8	CA9	CA1	CA9	
1st	309.5	318.3	307.6	304.6	302.7	304.4	315.5	309.4	308.7	0.368		CA1 양극 연결
2th	291.5	297.7	290.4	291.6	288.5	287.5	293.1	288.9	287.2	0.369		
3th	249.6	267.4	251.8	263.4	250.7	253.9	260.5	261.4	263.3	0.37		
4th	238.9	256.6	249.2	248.9	241.1	246.5	251.9	247.5	243.8	0.37		
5th	221.5	238.3	230.8	229.8	221.9	227.4	242.7	226.3	221.5	0.342	0.085	CA9 양극 연결
6th	207.4	225.4	219.6	219.9	211.8	218.9	222.1	211.9	209.7	0.321	0.083	
7th	197.9	216.8	211.7	210.7	204.3	210.2	219.9	206.4	204.8	0.312	0.086	
8th	200.4	218.1	212.5	211.9	205.1	211.4	220.8	207.4	206.1	0.316	0.073	CA8과
9th	199.7	218.3	213.1	211.8	205.3	211.6	221.6	207.3	204.8	0.314	0.075	CA9
10th	199.6	218.2	213.6	212.0	205.4	211.7	221.1	207.5	204.1	0.313	0.074	분리
11th	207.4	227.1	222.1	220.9	214.9	221.2	230.9	217.5	230.4	0.324		CA9 양극 절연
12th	210.9	229.1	224.8	223.9	217.7	224.0	232.9	220.1	233.1	0.326		
13th	225.6	245.8	239.2	237.4	231.7	237.6	241.9	230.5	246.3	0.337		
14th	224.7	245.1	238.3	235.9	230.9	236.9	243.8	229.1	244.2	0.331		
15th	223.4	243.7	240.2	235.3	231.3	235.8	246.9	228.7	243.5	0.331		

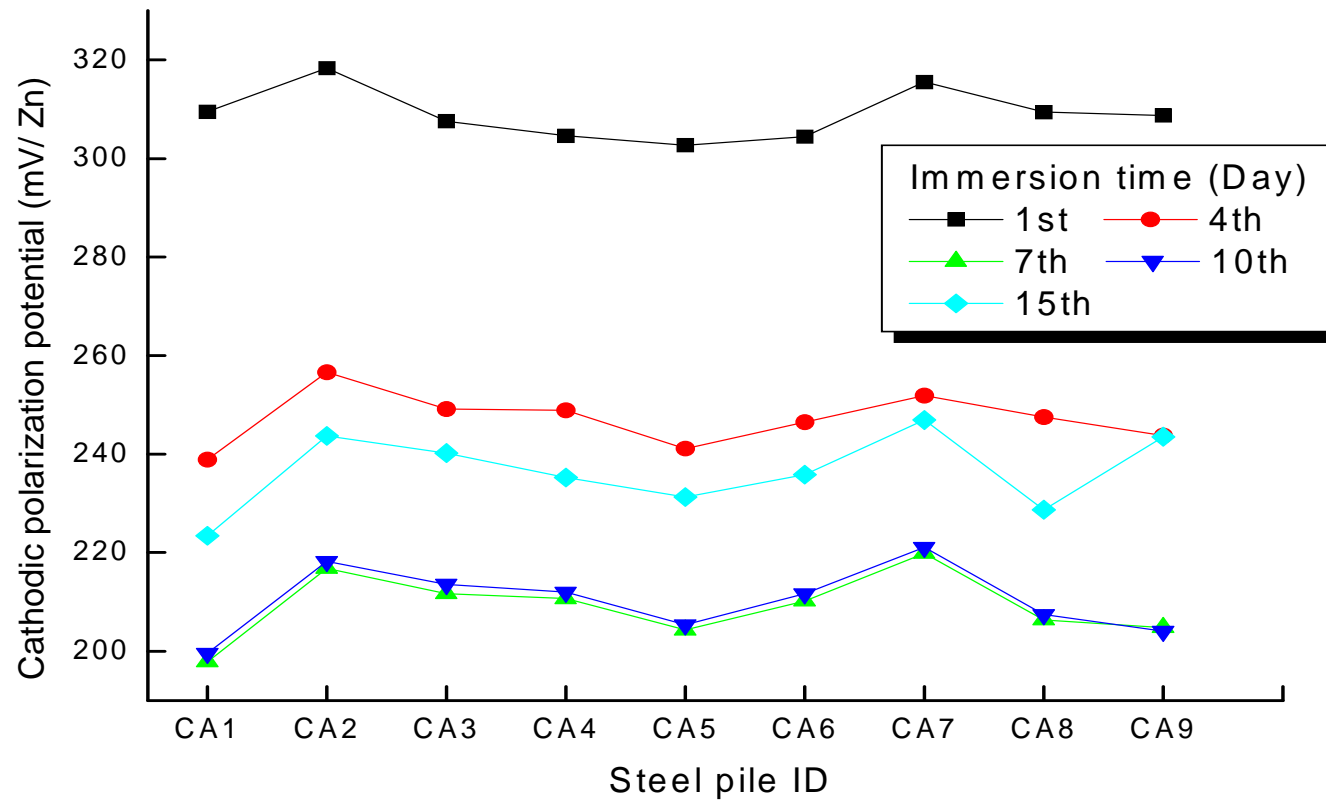


Fig. 3. 36 Variation of cathodic polarization potential for nine steel piles with time.

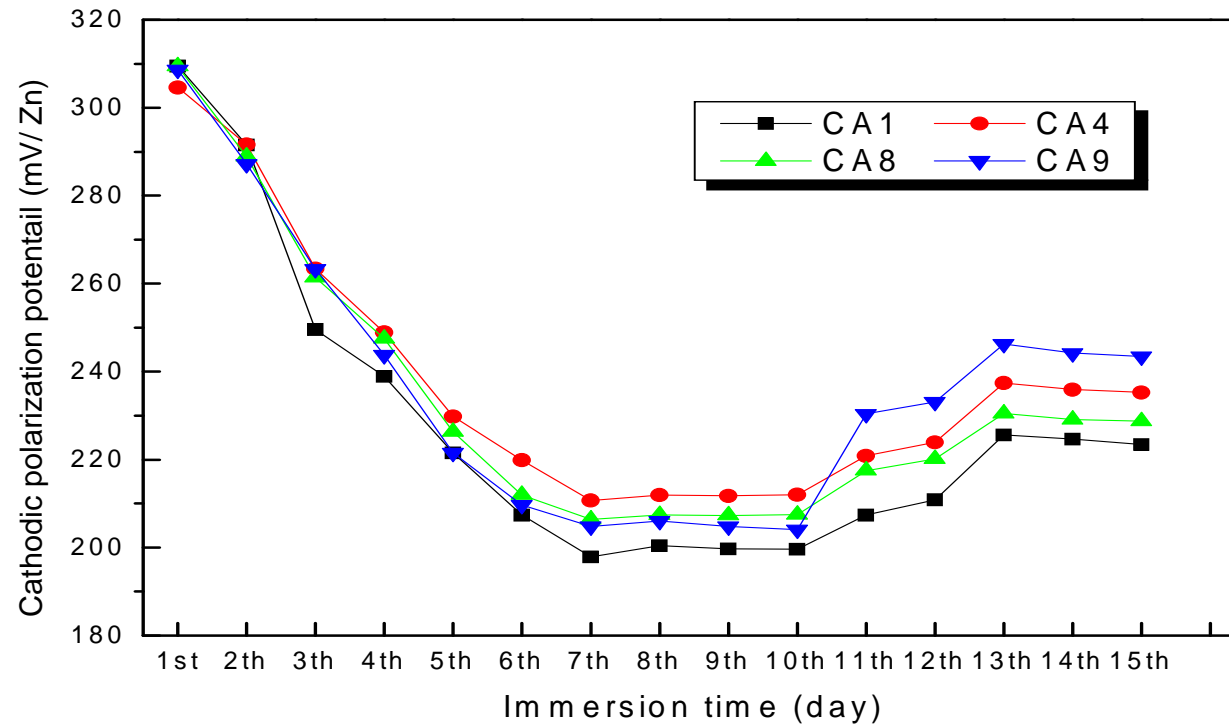


Fig. 3. 37 Variation of cathodic polarization potential for nine steel piles with time.

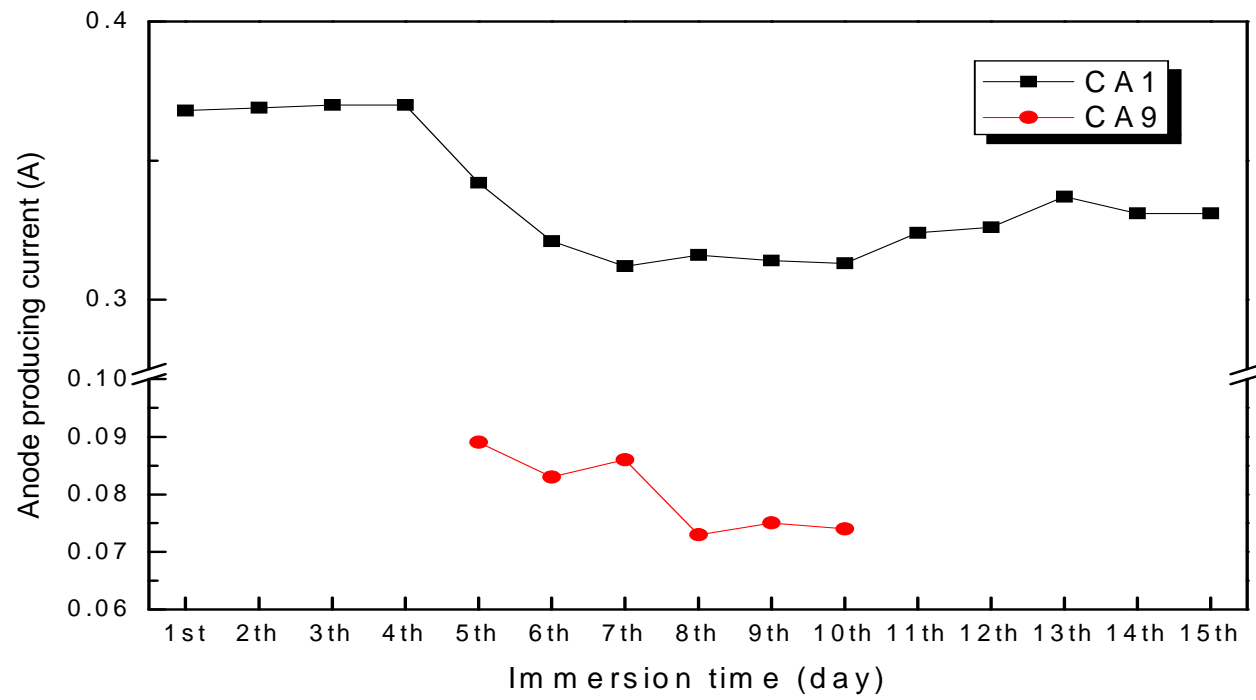


Fig. 3. 38 Variation of anodic current with time for CA1 and CA9.

3.3.4 결과 요약

해상 실험에서 강 파일을 음극방식 할 경우 거리에 따른 분극전위 변화와 양극과 강 파일 사이의 발생전류 변화에 대해서 고찰한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 1) 해수중 강 파일의 분극전위는 양극과 가장 가까운 CA1 파일의 분극전위가 가장 낮았으며 14m 떨어진 CA9 파일의 분극전위가 조금 높은 경향을 보였다.
- 2) 일정한 강 파일을 방식하기 위한 희생양극의 발생전류는 이웃에 접하고 있는 강 파일의 방식유무와 방식정도에 따라 발생전류가 증가 또는 감소할 수 있음을 알 수 있었다.
- 3) 일정한 강 파일을 방식하기 위한 희생양극의 예상수명은 이웃의 강 파일에 연결된 희생양극의 도움으로 수명이 연장될 수 있으며, 이웃 강 파일이 충분히 방식되고 있지 않을 경우에는 오히려 수명이 감소될 수 있음을 알 수 있었다.

4. 총괄 결론

최근 산업사회의 급격한 발전과 함께 각종 항만 구조물의 설비도 증가 추세에 있다. 그리고 이들 항만 구조물은 염을 포함한 해양 분위기 즉 가혹한 부식 환경하에 있으므로 부식으로 인한 구조물의 파손으로 인해 직간접적으로 끼치는 안전 재해상의 피해는 물론 경제적 손실 또한 큰 것으로 보고되고 있다. 따라서 이들 구조물들은 장기 수명유지를 위해 적절한 방법으로 방식하지 않으면 안되며, 특히 해수중 강 파일의 경우 음극방식법의 일종인 외부 전원법과 희생양극법으로 방식하는 경우가 많다. 그러나 최근 들어 대기오염에 따른 산성비와 환경오염에 따른 해수의 부식특성이 달라지게 됨에 따라 강 구조물의 방식을 위한 최적 방식 설계를 위한 여러가지 환경 변수가 고려되어야 한다. 이미 선진국 등에서는 이들 변수를 고려한 방식설계를 하고 있으나 우리나라에서는 재래적인 방법을 그대로 적용하고 있어 희생양극의 실제 수명이 예상수명보다 훨씬 단축되는 사례가 발생하고 있다.

본 연구에서는 상기한 최적 방식설계에 끼치는 환경 변수 즉 해수의 비저항, 유속, 양극전류효율, 피 방식체의 표면 상태 등을 변화시켰을 때 실제의 방식 효과에 미치는 영향에 대해서 시뮬레이션에 의한 고찰과 실제 실험 즉 실험실 실험과 현장실험을 통하여 고찰하였다.

- 1) 제 2장에서는 국내의 항만 구조물용 희생양극 중에서 10종을 선택하여 각각의 양극에 대해 비저항을 변수로 하였을 때 접지저항과 발생 전류, 소요 개수, 양극 수명 등에 대해서 시뮬레이션 하였다. 그 결과 비저항이 커지면 양극의 발생전류가 감소하고 수명이 증가되며 양극 소요 개수도 증가됨을 알 수 있었으며, 양극 형상에 따라 접지 저항의 공식도 달라져야 하며 공식에 따라 접지저항 값이 변하므로 양극 예상수명, 소요 개수에도 영향을 미치게 됨을 알 수 있었다. 그리고 양극의 전류효율이 증가함에 따라 예상수명이 증가되는 결과를 알 수 있었으며 해수의 오염도에 따라

자기 부식량이 증가하는 사례를 비추어 볼 때 전류효율을 모든 항만에 일률적으로 적용하였을 경우 정확한 예상 수명을 구하기 어렵다는 사실도 알 수 있었다.

- 2) 제 3장의 3.1절에서는 해수의 유속과 피 방식체의 표면 상태가 양극 소모량 및 발생전류, 음극 분극전위와 공급전류밀도에 미치는 영향에 대해서 실험실 실험을 통하여 고찰하였다. 그 결과 녹 슨 시험편은 표면의 산화 피막에 의해서 부식전위가 깨끗한 시험편에 비해 귀한 값을 나타내었으며 양극 소모율 역시 녹 슨 시험편의 경우가 증가하였고 해수의 유동이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 소모율이 증가하였다. 그리고 각 항구 별 해수중 울산항 2부두의 해수가 양극 소모율이 가장 컸으며 그 원인은 해수 오염이 가장 심한 것을 확인하였다. 한편 방식전류밀도는 피 방식체의 표면 상태에 관계없이 해수의 유동(3cm/s)이 있는 경우에는 $250\text{mA}/\text{m}^2$ 의 전류밀도가 필요하였으며 유동이 없는 경우에는 $100\text{mA}/\text{m}^2$ 의 방식전류밀도가 적절함을 알 수 있었다.
- 3) 제 5장에서는 현장 실험을 통하여, 제 3.2절에서의 실험 결과를 확인하고자 하였다. 즉 대형 실험조를 제작하여 해수를 유입, 유출 시키면서 녹 슨 강 파일과 녹 슬지 않은 강 파일에 대해 희생양극법으로 고찰하였다. 그 결과 제 4장의 실험결과와 같이 녹 슨 강 파일의 경우가 깨끗한 강 파일에 비해 양극 소모율 및 발생전류가 큰 값을 나타내었으며, 분극전위 역시 녹 슨 강 파일이 귀한 값을 나타내었음을 알 수 있었다. 그리고 일정 방식 전위(-770mV/SCE)를 유지하기 위한 공급전류밀도 또한 녹 슨 강 파일이 큰 값을 나타내었다.
- 4) 제 3.3절에서는 일정한 강 파일을 음극방식할 경우 인접한 강 파일에도 방식전류가 공급되어 예상 설계수명이 짧아지는 경우와 이와 반대로 인접

한 이웃의 강 파일을 방식 하는 희생양극은 실제의 수명이 길어질 수 있다는 사실을 알 수 있었다.

- 5) 이상의 실험결과에서 최적의 방식설계를 위해서는 방식하고자 하는 피 방식체의 표면 상태는 물론 해수의 유속, 해수 오염도 등을 고려하여 양극 전류효율, 방식전류밀도 및 접지저항과 예상수명 등을 결정해야 함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 港灣鋼構造物 防蝕 マニコフル, 沿岸開發 技術研究センター, p. 2-11(1984)
- 2) 小若正倫, 金屬の腐食損傷と防食技術, アグネ, p. 3(1998)
- 3) R. Baborian, ASTM STANDARIZATION NEWS, OCT, p. 28(1998)
- 4) 澤田徳秋, 陰極防食と防食技術, p. 34(1985)
- 5) 蜂谷實, “防蝕技術”, p. 34(1985)
- 6) 笠原 明, “材料と環境”, Vol. 43, p. 580(1994)
- 7) D. H. Kroon, "Material Performance", p. 33, 1126(1994)
- 8) W. Baptista & G. Pimenta, "Material Performance", p p. 29 ~ 34(1995)
- 9) R. N. Parkins & A. J. Mark Worth & J. H. Nolbrook, "Corrosion", p. 44(1988)
- 10) 重野集太, 清原宗遠, 倉成喬, "防蝕技術", Vol. 9, p. 2(1982)
- 11) R. Johansen & E. Bardal, Corrosion, p. 41, 296(1985)
- 12) K. Nisancioglu, P. O. Gantland, T. Dahe & E. Sander, Corrosion, Vol. 12, p. 43, 710(1987)
- 13) J. Newman & J. E. Soc, Corrosion and Prevention, p. 138(1991)
- 14) D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Macmillan Publishing Co. pp. 39 ~ 166(1992)
- 15) M. G. Fontana, Corrosion Engineering, McGraw-Hill Book Co. pp. 445~502(1986)
- 16) 문경만, 알기쉬운 문답식 실용전기화학, 효성출판사, pp. 63 ~ 184(1999)
- 17) 米山 宏, “電氣化學”, 大日本國書, p.86 ~ 121(1985)
- 18) M. Pourbaix, Lectures on Electrochemical Corrosion, NACE International, pp. 7~182(1995)
- 19) C. H. Hamann, A. Hamnett & W. Vielstich, Electrochemistry, WILEY-VCH, pp.65 ~ 142(1998)
- 20) 이학렬, 금속부식공학, 연경출판사, pp. 15 ~ 86, 163 ~ 169(1995)
- 21) 건설교통부, 방식기술편람(3), 신덕문화사, pp. 415 ~ 457(1998)

- 22) 腐食防蝕協會, 金屬防食技術便覽, 日刊工業新聞社, pp. 197~216, 679~686, 900~912(1986)
- 23) F. L. Laque, "Marine Corrosion Causes and Prevention", J.Wily & Sons, p. 116(1975)
- 24) D. L. Piron, " The Electrochemistry of Corrosion", NACE, pp. 1~150(1991)
- 25) (財)日本規格協會, 防食技術マニュアル, 三美印刷(株), p. 33(1984)
- 26) 문경만, 김기준, 이명훈 등, “강관구조물의 방식대책에 관한 연구 용역”, 해운항만청, pp. 315~375(1995)
- 27) 전대회, 실용방식공학, 태화출판사, pp. 1~125, 251~263(1990)
- 28) J. H. Morgan, "Cathodic Protection", 2nd edition NACE, pp. 257~360(1987)
- 29) W. H. Hartt & E. Lemieux, "A Principle Determination in Cathodic Protection Design of Offshore Structures", Corrosion 99, Paper No.627(1999)
- 30) J. Wagner, "Cathodic Protection Design I", NACE International, pp. 3~28(1992)
- 31) W. V. Baeckmman & W. Schwenk & W. Prinz, "Handbook of Cathodic Corrosion Protection", Gulf Publishing, pp. 367~389(1997)
- 32) 정경수, 문경만, “희생양극법에 의한 항만 강구조물의 방식설계 개선방안에 관한 연구”, 한국해양대학교 석사논문(1997)
- 33) G.A Gahring, JR. & M.H. Peterson, “Corrosion of 5456 H117 Aluminum in High Velocity Sea Water”, Corrosion-NACE, Vol. 37, No.4 pp. 232~242(1981)
- 34) T.S. Lee, E.W. Thiele & J.H. Waldorf, “The Effect of Seawater Velocity on Corrosion Potentials of Materials”, Technical Note, Materials Performance (1984)
- 35) 김기주, “1.0N N NaHCO₃ 유속의 구리의 부식에 미치는 영향”, 한국부식학회지, Vol. 16, No. 3, pp. 19~25(1987)
- 36) 원덕수, 김재철 등, “인공해수의 유속, 탁도, 이종금속효과 및 음극방식이 Cu합금, Ti, 주철, 스테인레스강의 Erosion-Corrosion 거동에 미치는 영향”, 한국부식학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 24~32(1990)

- 37) 김도형, 김기준, “해수중 유속이 알루미늄 희생양극에 미치는 전기화학적 특성에 관한 연구” 한국해양대학교 석사논문(1998)
- 38) 大阪市港灣局, 鋼構造物 腐食調査報告書, 日本港灣局, pp. 2~56(1989)
- 39) M. G. Fonfana, "Corrosion Engineering", McGraw-Hill book Company, p. 485(1986)
- 40) D. A. Jones, "Principles and Prevention of Corrosion", Maxwell Macmillian International Edition, p. 121(1991)
- 41) 文慶萬, 알기 쉬운 문답식 實用電氣化學, 효성출판사, p. 147(1999)
- 42) 柴田夫訊, 腐食と酸化, 産業圖書, p. 69(1983)
- 43) 李鶴烈, 金屬腐蝕工學, 淵鐘文化社, p. 262(1991)
- 44) M. Pourbaix & N. D. Zoubov, Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solution, Ed. by M. Poubbaix, p. 307(1966)
- 45) 中川雅央, 電氣防食法の實際, 地人書館, p. 33(1967)

感謝의 글

2004년 올해는 저에게 永遠히 잊지 못할 한 해가 될 것 같습니다. 뒤늦게 覺醒하여 늦깎이로 始作한 배움 德分에 腐蝕,防蝕技術로 포스코 사내벤처 10호로 選定되어 진짜 내가 하고 싶어하는 새로운 일을 하게 되었고, 또한 그 바쁜 職場生活 속에서도 博士學位를 받을 수 있는 機會를 하느님께서 許諾해 주신 해이기 때문입니다.

職場生活와 學問이라는 그 힘겨운 二重生活 속에서 “機會는 누구에게나 찾아오는 것이 아니라, 準備된 者에게만 찾아 온다.” 는 어느 先輩의 希望 섞인 忠告 하나로, 始作한 工夫였습니다. 바로 잊그제 大學院 門을 두드린 것 같은데 벌써 9년이라는 歲月이 지나갔고, 저는 이제야 그 先輩의 眞實된 忠告에 感謝드립니다.

본 論文이 完成되기까지 陰으로 陽으로 도움을 주신 모든 분들께 紙面을 통하여 感謝 드리며, 특히 始作부터 끝까지 論文指導와 激勵와 채찍을 아끼지 않으신 문경만 교수님께 眞心으로 머리 숙여 感謝를 드립니다. 그리고 바쁘신 중에도 몇 번이고 마다하지 않으시고 論文指導를 해주신 김기준 교수님, 이명훈 교수님, 박도삼 교수님, 이병우 교수님, 뒤에서 物心兩面으로 도와주신 포스코 건설 한수양 사장님, 황태현 부사장님, 김진천 부사장님, 포스코 정준양 소장님, 조성식 전무님, 정동화 상무님, 박종식 실장님, 권춘근 부장님, 박은수 팀장님, 정순신 팀장님, 그리고 항상 도움을 아끼지 않았던 포스코 입사 동기들, 토건설 비팀원들, 사내벤처지원팀원들, 우리 AACC 벤처팀 이형배, 송기수, 김덕규씨, 해양대학교 재료공학과 박경화 박사, 조황래씨와 부식방식 실험실 여러 학생들에게도 깊은 感謝의 말씀을 올립니다.

또한 빠뜨릴래야 빠뜨릴 수 없는 나의 사랑하는 아내와 항상 바쁜 아빠를 이해해주고 사랑해준 늠름한 아들 용재, 열이, 그리고 천사 같은 우리 늦둥이 용우에게 이 선물을 드립니다.

마지막으로 이 작은 기쁨을, 함께 누리고 싶어하는 나의 家族들과 나의 오랜 親舊들에게도 나누어 주고 싶습니다.

이제 여기가 끝이 아니라 이제부터 始作이다라고 생각하고 있습니다. 더욱 새로운 覺悟와 다짐으로 저를 아끼고 보살펴 주신 분들께 報答하기 위해 열심히 모든 일에 最善을 다하는 모습을 보여드릴 것을 約束 드리고 싶습니다. 그동안 여러 가지로 저에게 도움과 성원을 아끼지 않으신 모든 분들께 다시 한번 感謝 드리며 이 論文을 바칩니다.

0.