

# 해양 강구조물의 부식 및 방식현황



장도연

(KIMM 재료공정연구부)

- '72-'76 한양대학교 재료공학과(학사)
- '76-'78 한양대학교 대학원 재료공학과(석사)
- '81-현재 한국기계연구원 책임연구원



정용수

(KIMM 재료공정연구부)

- '76-'80 경북대학교 금속공학과(학사)
- '80-'82 경북대학교 금속공학과(석사)
- '85-'94 영국 UMIST공학대학 부·방식센터(박사)
- '92-'93 영국 Salford대학 전자·전기과 연구조원
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



이규환

(KIMM 재료공정연구부)

- '84-'88 한양대학교 재료공학과(학사)
- '89-'91 한양대학교 대학원 재료공학과(석사)
- '91-현재 한국기계연구원 연구원

## 1. 서론

해양은 지구표면적의 70.8%를 점유하고, 지구상에 존재하고 있는 물의 약98%가 바다에 집중되어 있다. 이러한 관점에서 우리나라와 같이 국토가 협소한 나라에서는 연안 해역의 공간이용이 장래에 극히 중요한 분야로 대두되고 있으며, 국내에서도 해상공항, 해상도시, 해상 폐기물 처리시설, 해저터널, 해상의 긴다리, 대형 항만시설 등 해양에 고정되거나 부유물 형태로한 각종 구조물이 건설되거나 계획되고 있다. 해양산업이 발달한 일본에서는 'Mega-Float 계획'을 세워 해상에 공항이나 물류기지를 세우기 위하여 최종적으로 5km × 1km 크기의 초대형 부유구조물을 만든다는 계획아래 길이 100m × 폭 20m의 대형 해양부유단위구조물을 건조하여 해상접합실험 및 내구성 실험을 하고 있다[1]. 국내에서도 해양공간을 이용하기 위하여 대형 Barge선을 건조하여 그위에 지상에서 혐오시설로 취급되는 쓰레기 소각설비나, 지상의 부지확보 곤란 및 공장설비의 이동 활용의 차원에서 해수 담수화 설비나 해상 발전설비 등을 접목시키기 위한 BMP(Barge Mounted Plant)관련 연구과제가 시작단계에 있다.

그러나 해양은 육상과는 비교할수 없으리만큼 심한 부식환경을 가지고 있기 때문에 해양구조물은 그 내구성을 확보하기 위해서 충분한 방청 및 방식대책이 필요하다. 종래의 해양구조물의 방식 방법은 내구년수가 짧은데다가 비교적 빈번한 보수를 요구하고 보수관리에도 많은 경비가 소모되고 있다. 차세대에 개발이 기대되고 있는 해양구

조물들은 대규모이고 내구년한도 50년내지 100년이라는 긴 내구년수를 요구하고 있기 때문에 내수성이 뛰어난 새로운 방식기술의 개발을 꾀하지 않는한 해양구조물의 실용화는 곤란할 것이다.

이상과 같은 상황을 배경으로 하여 국내에서도 해양구조물의 방식기술에 대한 연구개발이 적극적으로 이루어져야 할것으로 생각되며 현재의 해양구조물의 부식과 방식기술의 현황에 대하여 간단히 설명코자 한다.

## 2. 해양구조물의 방식기술

### 2.1 해양 환경에 있어서의 강재의 부식

#### 2.1.1 환경 조건과 부식경향

해수의 미량성분은 해역,깊이, 계절 등에 따라 다소 변동이있지만 주요 성분은 표 1 과 같이 부식성이 강한  $Cl^-$  이온과  $Na^+$  이온이 대부분을 차지하고 약간의  $SO_4^{2-}$  이온과 미량의 기타 성분으로 이루어져 있다. 해수는 깊이에 따라 그림 1. 과같이 온도, pH, 용존산소, 염도 등이 변화하며 유속을 포함한 이들 인자가 부식속도에 영향을 미치게 된다.

표 1. 해수의 성분

이온	g/kg溶液	Cl 比	當量/kg溶液
$Cl^-$	18.9799	0.99894	0.5353
$SO_4^{2-}$	2.6486	0.1394	0.0551
$HCO_3^-$	0.1397	0.00735	0.0023
$Br^-$	0.0646	0.00340	0.0008
$F^-$	0.0013	0.0007	0.0001
$H_3BO_3$	0.0260	0.00137	不解離
全陰이온	21.8601	-	0.5936
$Na^+$	10.5561	0.5556	0.4590
$Mg^{++}$	1.2720	0.06695	0.1046
$Ca^{++}$	0.4001	0.02106	0.0200
$K^+$	0.3800	0.02000	0.0097
$Sr^{++}$	0.0133	0.00070	0.0003
全陽이온	12.6215	-	0.5936
計	34.4816	-	-

(出所) 西昭雄의, 三菱重工技報, Vol. 28(1991), p.258.

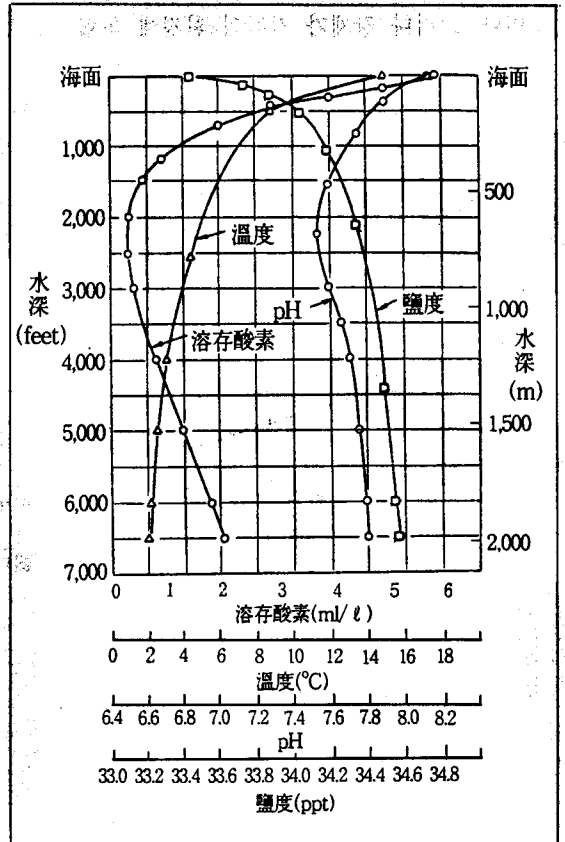


그림 1. 해수 수심에 따른 온도, pH, 용존산소, 염도의 변화

해양구조물의 대부분은 일반 탄소강이나 저합금강이 사용되며 이들 강의 부식경향은 일반적으로 그림 2와 같이 되는 것으로 알려져 있다[2]. 즉 해수 흘날림 부분이 가장 부식이 심하고, 부식속도가 최대로 된다. 그러나 간만부로 됨에따라 부식속도는 저하되고, 해중부로 들어가면 해수면 직하에서 다시 크게 되어 가장 큰 값을 가진다. 더욱 수심이 깊어짐에 따라 부식속도는 저하된다. 부식속도가 간만부에서 작아지고, 해수면 바로 아래에서 가장 큰 값을 갖는 것은, 해수면을 사이에 두고 산소농도의 차이로 갈바니 전지형성에 의한 부식전류가 발생되기 때문이다[3]. 그림 2와 같은 부식경향을 보이는 것은 강재가 해상대기중에서 해수중까지 연결되어서 다른 환경으로 접하는 경

우이다. 그러나 강재가 각각의 환경에 독립적으로 달리 접하는 경우에는 점선과 같은 부식경향을 나타내고, 당연히 산소 농담 전지가 형성되지 않

기 때문에 수면 바로 밑의 해수중 보다 간만대의 부식속도가 커지게 된다. 표 2. 는 해양환경에 따라 형성된 녹의 성분 및 성질을 나타낸다.

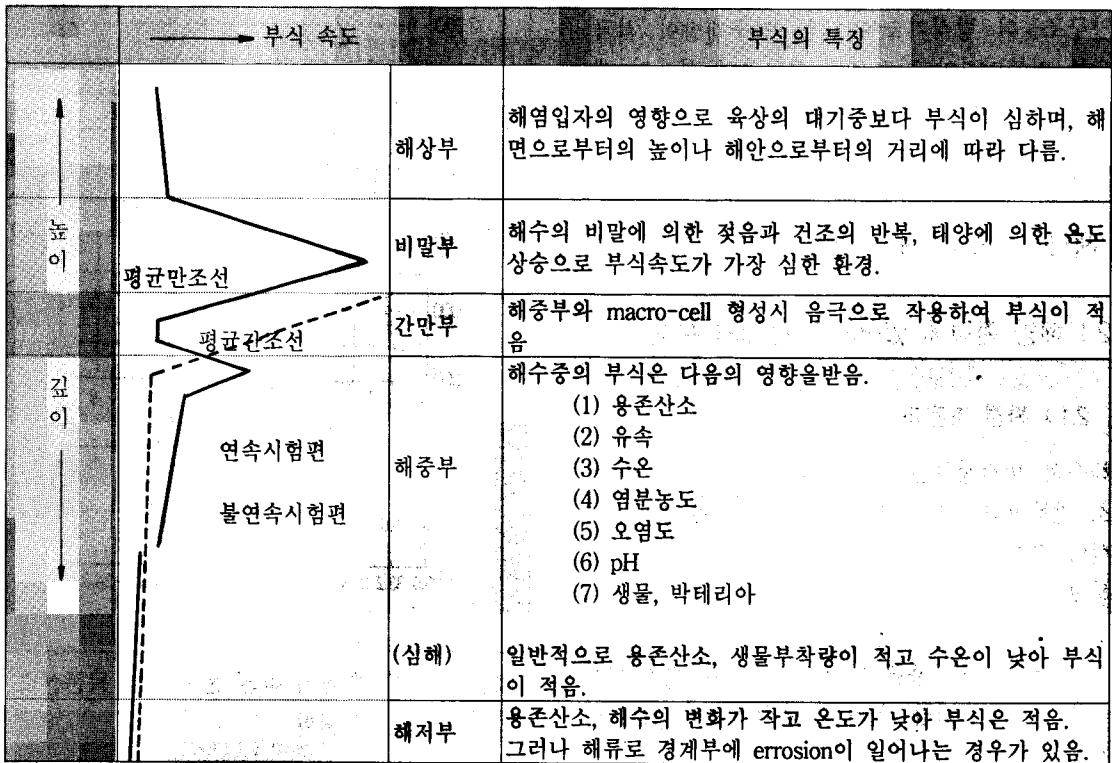


그림 2. 해양환경에 따른 부식속도와 특징

표 2. 해양환경에 따라 생성된 녹의 성분과 성질

해양환경	철녹의 주성분			성질
	내층	외층	외층	
해상대기부	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	< - FeOOH	~ - FeO OH	해염입자의 비말이나 높은 습도는 보호성 녹층의 형성을 방해한다.
비말부				녹층은 기계적으로 파괴되기 쉽다
간만부				
해중부				보호성 녹층(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 를 주성분으로하는 고착내층)이 형성되어 산소의 확산을 억제하며 2층녹(FeOOH/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )의 산화환원반응의 억제가 예측된다.

해중부의 녹은  $\gamma$ -FeOOH 옥시수산화철 및  $\alpha$ -FeOOH 옥시수산화철을 주성분으로 하는 적갈색의 부유성의 녹 외층과  $Fe_3O_4$  을 주성분으로 하는 흑색의 밀착성이 좋은 고착성의 내층을 갖는 2층 구조를 하고 있다. 내층의 녹은 보호성 피막으로 성장하면서 부식의 진행을 억제하는 작용을 한다. 건습의 반복이 일어나는 해상부, 해수비말대, 간만대에서 형성된 녹으로는  $\beta$ -FeOOH 옥시수산화철이 공존한다.  $\beta$ -FeOOH의 생성은 Cl 이온 공존하에서의  $\beta$ -Fe<sub>2</sub>(OH)<sub>3</sub>Cl이 건조상태에서 공기산화에 의하여 만들어 진다고 생각되며 이 녹은 해상 대기부의 철녹 성분이 갖는 특징이다[4].

2.1.2 각 환경조건하에서의 부식속도[3]

(1) 해상 대기중(海上 大氣部)

대기중에 있어 강재의 부식은 강우량, 습도, 기온, 일조량, 대기오염 물질(아황산 가스 등)과 해수염 입자의 영향을 받는데 부식량(Y ; mg/dm<sup>2</sup>·day)에 가장 영향을 미치는 것은 해수염 입자(X<sub>1</sub> ; Cl mg/dm<sup>2</sup>·day) 및 아황산 가스량(X<sub>2</sub>; SO<sub>3</sub> mg/dm<sup>2</sup>·day)으로, 대개 다음식과 같은 관계를

갖는다.(7)

$$Y = 4.4 + 39.7 X_1 + 3.74 X_2$$

즉, 해상 대기중에 있는 강재의 부식은 해수염 입자의 영향을 받아서 육상 대기중과 비교 했을 때 현저히 촉진된다. 해수염 입자의 영향을 보인 조사결과와의 일례를 그림 3.에 보였다.

(2) 해수 비말대(海水 飛沫帶)

평균간조선 약간 윗부분의 해수 물보라가 닿는 비말대 부분은 가장 부식이 심한 곳으로, 강재의 부식은 전면부식과 국부부식이 혼합된 형상을 하고 있으며, 부식생성물은 단단하고 두꺼운 편상(flake) 모양을 나타낸다. 부식속도가 1mm/Y에 달하는 것도 있다. 흘날림 부분의 강재등의 부식량 조사결과와의 일례를 그림 4.에 보였다.

(3) 간 만 부(干滿部)

조수의 간만에 따른 주기적인 침적과 노출이 반복되어, 흘날림 부분과 유사한 환경이지만, 그림

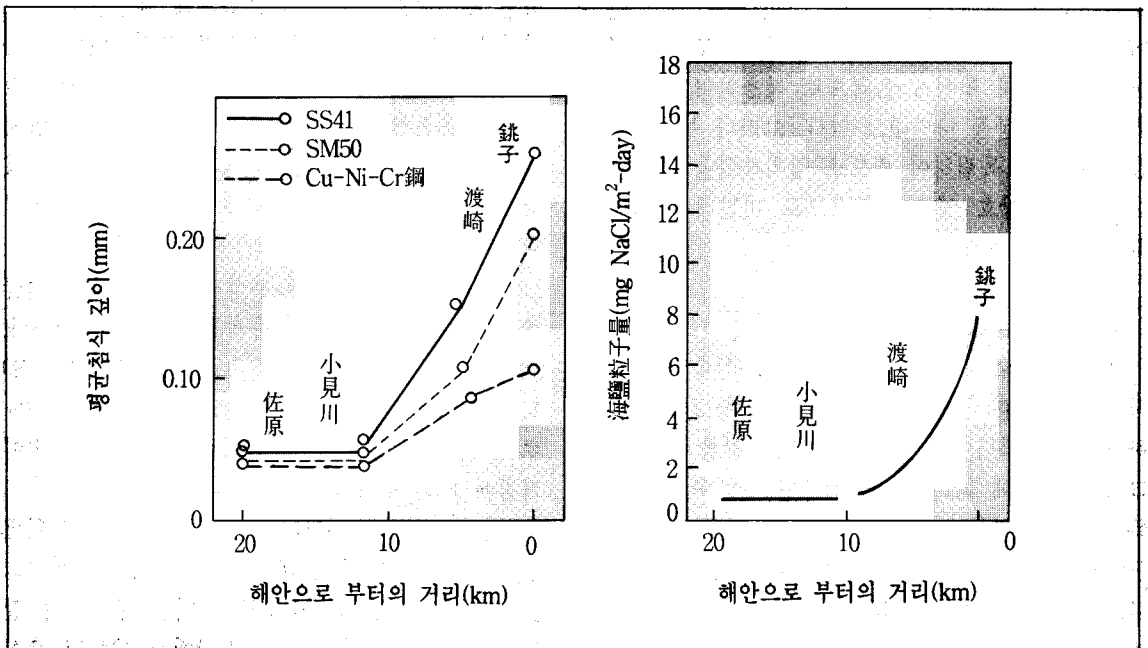


그림 3. 해안으로부터의 거리에 따른 부식량과 해염입자의 량

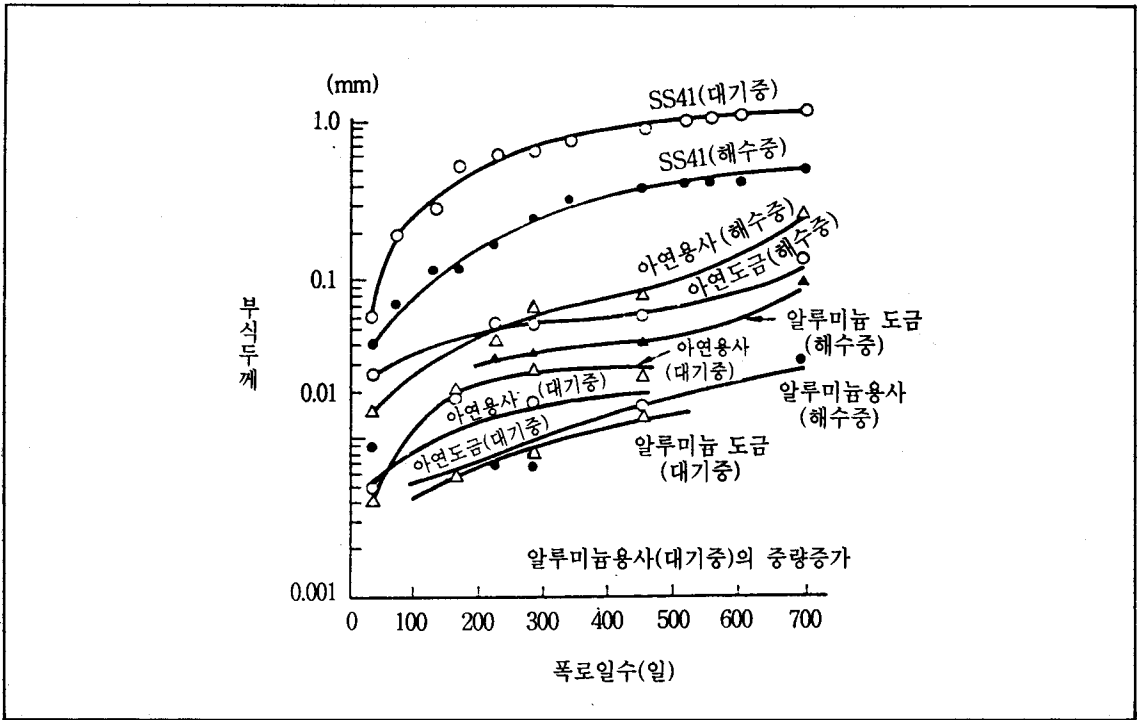


그림 4. 해수 비말대에 있어서 강과 금속피복의 부식 속도

2에서 나타난 것과 같이 강재의 설치상황에 따라 부식속도가 달라진다. 간만부는 해중부와 가장 인접한 부분으로 수면 직하부분의 산소농도차에 의한 macro-cell 형성시 음극으로 작용하여 부식이 적어지는 경향을 나타내고 있다. 그러나 부식시편을 부위별로 독립하여 별도로 장착하였을 경우에는 이러한 상호 영향이 없으므로 비말대에 해당하는 큰 부식속도를 나타낸다.

(4) 해 중 부(海中部)

해수면 바로 밑에서 부분적으로 부식속도가 커지지만, 수심이 깊어짐에 따라서 부식속도는 감소하고, 얇은 바다에서는 거의 일정한 값을 보인다. 그러나, 해역에 따라서는 수심방향으로 수질이 다른 해수가 층상으로 존재하는 등, 특정의 수심부분에서 부분적으로 부식속도가 커지는 경우도 있다. 그러나 일반적으로 심해에서의 부식은 그림 2에 나타난 것과 같이 용존산소의 분포와 관련하여, 깊이가 깊은곳에서는 부식속도가 감소한다. 그

림 5는 수심에 따른 부식속도와 용존산소 농도에 따른 부식속도를 나타내고 있는데 해수면에서 수심이 2,500m 까지는 부식속도가 감소하였다가 다시 증가하는, 경향을 보이는데 이것은 2,500m 지점에서 용존산소의 농도가 최저가 되는 것과 일치함을 보이며 이는 그림 5(b)에서 용존산소 농도에 따른 부식속도의 변화를 나타낸 그림에서도 확인된다.

해수중에서의 강재의 부식속도는 위에서 언급한 용존산소 외에 수온, 유속등의 영향을 받는다. 5℃이하로도 내려가는 오후크크해에 비교해서, 30℃ 근처에 이르는 열대해역에서 부식속도는 2배로도 늘어난다. 또 조류가 있는 경우에는 유속이 커짐에 따라 부식속도가 커진다.

다음의 표들은 해양환경에 따른 강재의 부위별 부식속도를 나타낸다. 표 3은 일본에서 방식처리를 하지않은 73건의 구조물에 대한 부식조사 결과이고 표 4는 영국 등의 각국에서 행해진 부식조사 결과이다[5].

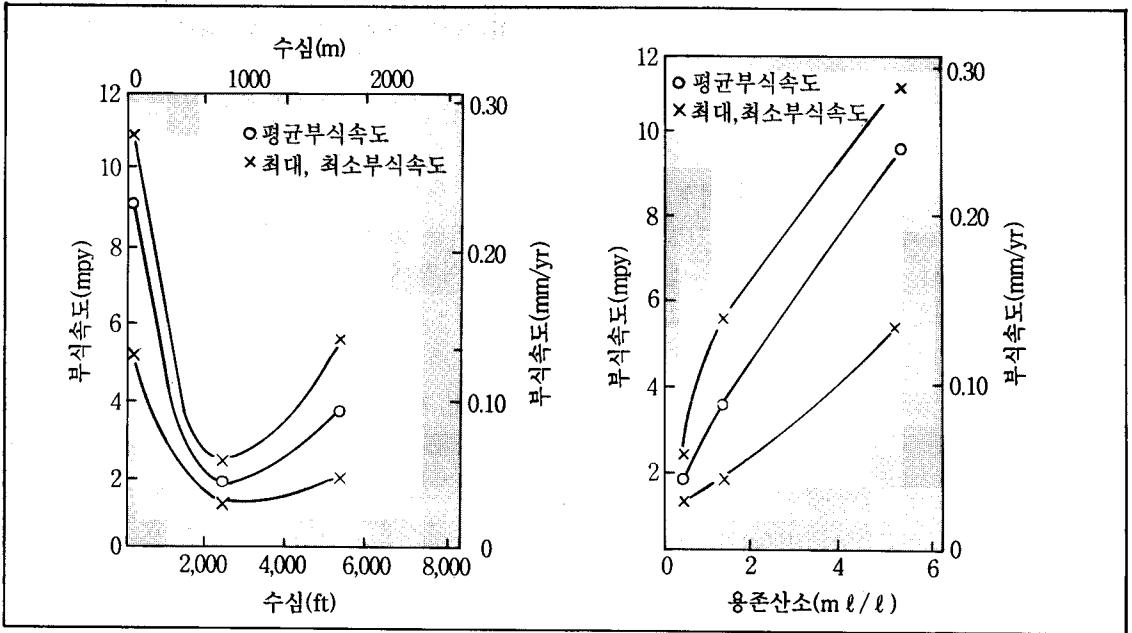


그림 5. 해수 깊이와 용존산소 농도에 따른 부식속도의 변화

표 3. 환경 및 강재 종류별 부식속도

강재 종류	부식속도 (평균값) mm/y					
	H.W.L 부근	M.S.L 부근	L.W.L 부근	해수중 상부	해수중 중하부	해저 토중부
凸 시판	0.100	0.057	0.126	0.068	0.050	0.037
凹 시판	0.092	0.054	0.061	0.048	0.041	0.031
강관형	0.166	0.066	0.200	0.084	0.067	0.034
강재 종류	표준편차 mm/y					
	H.W.L 부근	M.S.L 부근	L.W.L 부근	해수중 상부	해수중 중하부	해저 토중부
凸 시판	0.104	0.031	0.097	0.044	0.031	0.028
凹 시판	0.076	0.041	0.043	0.038	0.026	0.015
강관형	0.101	0.033	0.137	0.053	0.043	0.031

\* H.W.L : 평균 만조선, L.W.L : 평균 간조선, M.S.L : 평균 수면선

표 4. 환경별 부식속도

장소	부식속도 (평균값) mm/y			
	흘날립 대	간만 대	L. W. L 부근	해수중
영국	0.09	0.04	0.09	0.05
키프러스	0.10	0.04	0.09	0.05
아랍 수장국 연방	0.13	0.07	0.07	0.08
장소	표준편차 mm/y			
	흘날립 대	간만대	L.W.L 부근	해수중
영국	0.05	0.03	0.08	0.04
키프러스	0.07	0.03	0.05	0.04
아랍 수장국 연방	0.06	0.04	0.03	0.08

2.2 각종 해양구조물의 방식기술 현황

이상에서와 같이 해양분위기에서는 금속의 부식을 촉진하는 많은 요인이 있으며 방식대책으로는 일반적으로 ① 적정 내식재료의 선정, ② 도장, 라이닝, 도금 등의 방식피복, ③ 전기방식, ④ 환경개선 등이 있다. 해양구조물의 방식법으로는 유기피복과 전기방식 방법이 주로 사용되고 있다.

표 5 는 일본에서 각종 해양구조물에 실제로 쓰이고 있는 방식법의 현황을 나타내고 있다[6].

장재는 주로 보통강이 쓰이고 있는데, 일부 내후(기후)성강과 내해수강도 사용되고 있다. 일반적으로 해상 대기부 및 비말대부에는 중방식도장을 실시한 것이 많다. 해수중 및 해저토중부에는 전기방식이 행해지고 있다.

표 5. 해양구조물의 방식방법 개요

분 류	조사 건수	강 재	방식법			비 고
			해상대기부	출날림부	해중·해저토중	
해양 석유 굴삭 장치	12	보통강 또는 보통강+고장력강 병용	도장 (Zinc리치프라이머+ 에폭시 또는 타르에폭시계)	중도장 (좌동) 일부 전기방식의 병용도 있음	전기방식 혹은 전방+도장 전방: AI양극 도장: 좌동	보수가 간단한 장소는 목적에 상응한 도장(주: 갑판: 데키페인트 거주구: 합성수지 무: 에폭시 등
해양 토목 작업대 (플랫폼)	9	상 동	도장 (엡슈프라이머+ 합성수지계)	중도장 (엡슈프라이머+에폭시 혹은 타르 에폭시계)	도장 (좌동) 전기방식과의 병용은 적다.	자기 승강식 작업대 (SEP)는 보수가 가능한 리그나 고정식 작업대에 비해 방식성에서 약한 도장계가 채용되어 있다.
씨 버스	45	①잔교·돌핀 방식은 상동 ②계류방식은 보통강 뿐	-	중도장 (무기 Zinc리치프라이머, 타르에폭시 혹은 무기Zinc리치+타르 에폭시)	전기방식 혹은 전방+도장 (전방: AI양극 도장: 타르 에폭시)	도장이외에 일부 아스팔트 등 라이닝, 오래된 것은 외부전원방식이 많다
해중 전망탑 해중레스토랑 이쿠아폴리스	6	보통강 또는 보통강+고장력 강 병용	도장 에폭시 혹은 합성수지계 등	중도장 에폭시 혹은 타르 에폭시	전방+도장 (전방: AI양극 도장: 에폭시계 혹은 도장(타르에폭시계)	해중전망탑 조사 4건중 2건은 각 환경모두 FRP 라이닝
관측 탑 표이 대	19	보통강 (일부내후성강, 내해수성강이 병용)	도장 에폭시, 타르에폭시 혹은 합성수지	중도장 (좌동)	도장 혹은 전방+도장(전방: AI 혹은 Zn양극 도장: 합성수지 혹은 타르 에폭시계)	등표의 출날림부에서 일스 부, 수지, 콘크리트 텐데스 등의 라이닝이 있다.
해저 파이프라인	25	보통강	-	-	파이프 외면: 전방+도피장 (전방: 외부전원 방식이 주로 쓰임 도피장: 콘크리트+아스팔트계) 파이프내면: 방식을 안하는 경우가 많다	-
침매 터널	4	보통강	-	-	전방+도장 (전방: 외부전원 도장: 타르에폭시)	모두 콘크리트 외면을 강판으로 감싼 구조 도장이 전방만으로 된 것도 있다.

### 2.3 방식기술 개발의 현황과 문제점

#### 2.3.1 해상 대기부

해양구조물의 대기중의 부위는 다른 부분에 비해서 보수가 용이하고, 미관상 혹은 안전상의 관점에서 착색이 필요함에 따라, 방식기술로서 도장이 행해지고 있다. 다른 부위에 비해 보수가 용이하다고 해도, 해상작업이고, 기상조건의 영향, 부착면분의 제거 등의 작업은 곤란한 점이 많다. 또 비교적 빈번한 보수는 막대한 유지경비를 요구하게 된다. 이러한 점에서 최근 장기방청형 도장계의 개발 연구가 적극적으로 진행되어, 해상 장대교에는 내구성이 뛰어난 새로운 장기방청형의 도장계가 채용되고 있다.

최근 기술개발의 결과에서, 해양구조물에 적당한 장기방청형의 도장계로서 표 6의 도장계를 들 수 있다[7]. 이들 도장계는 종래의 도장계에 비해 내구성은 현저하게 뛰어나리라 생각되는데, 오랜

기간에는 약화되어 일정기간 경과후에는 덧칠을 해줄 필요가 있다.

표 6에 있어, 도장계 A, B, C, D는 착색이 자유롭고, 실제적으로도 가장 신뢰성 높지만, 도장의 반복 칠 횟수가 많고, 보수시의 해상작업 이라는 조건하에서 예상한대로 정확한 시공을 할 수 있는것인지, 덧칠 후 충분한 내구성이 얻어지는지 등의 문제점이 많다고 생각된다. 도장계 E는 실적도 많고 신뢰성도 높지만 착색이 자유롭지 못한 점에서 적용개소가 한정된다. 또 도장계 F는 착색도 자유롭고, 내구성도 뛰어나며, 도장 중복 횟수도 적은 잇점이 많은 것이나, 시공상에 문제점이 남아있고 특히, 덧칠시 현장시공방법으로 검사의 여지가 있는 문제가 있다.

이상 언급한 것과 같이 내구성이 뛰어난 장기방청형 도장계가 개발되고 있어 커다란 기대를 모으고 있으나, 유지관리기술을 포함하는 일관된 기술로서는 여전히 이후 기술개발 추진이 기대되고 있는 실정이다.

표 6 해상대기부에 적용하는 도장계 (상도처리까지 공장에서 도장)

도장계	소지조정	제 1 층	제 2 층	제 3 층	제 4 층	제 5 층	제 6 층	제 7 층	기호(도료명)
A	블러스트	H·Z	M	H·E	H·E	PU	PU	-	H·Z: 후막무기아연 Z: 무기 아연
B		"	JISK-5633 (1종)	H·V	H·V	H·V	H·V	-	M: 미스트 코트 HE:후막형 에폭시 PU:폴리 우레탄
C		"	"	Ph·Z	Ph·M10	Ph·M10	Ch	Ch	H·V:후막 비닐 Ph·Z:페놀 아연 크로메이트
D		Z	H·ME	H·ME	H·ME	H·ME	-	-	Ph·M10:페놀 M10 Ch: 염화 고무
E		"	T·E	T·E	T·E	T·E	-	-	H·ME:후막변성 에폭시 T·E:타르 에폭시
F		프라이머	GF·PE	GF·PE	-	-	-	-	GE·PE :글래스 플레이크 함유 에폭시



2.32 비말대부와 간만부

비말대부와 간만부에서는 계속적인 파랑, 물보라 등의 영향을 받아 부식이 가장 심한 반면 보수가 극히 곤란하기 때문에, 가장 내구성이 뛰어나

난 방식이 필요하게 된다. 종래의 해양구조물에서는 비말대부와, 간만부에서도 일반적으로 중방식도장이 행해져 왔으나, 최근 비말대부와 간만부에 적용하는 새로운 방식재료의 연구개발이 진행되

표 7. 비말대부 · 간만대부의 방식피복

분 류	피복의 종류	항		시험편		분 류	피복의 종류	항		시험편	
		C	A	C	A			C	A	C	A
금속피복	내해수강(Cu-Cr-Ar계) 두께(6mm)	○	○	○	○	유기질 라이닝 (폴리에 스테르)	글래스 프레이크 함유 폴리에스테르(1mm)				○
	스테인레스강(25Cr-13Ni계) 두께(3mm)	○		○			글래스 프레이크 함유 폴리에스테르(2mm)				○
	모넬 두께(2mm)				○		폴리에틸렌(추출하여 성형, 4mm)	○	○	○	○
	티탄크라드(0.5mm)				○		폴리에틸렌(추출하여 성형, 4mm)				○
금속용사 +도장	알루미늄 용사(100 $\mu$ m) +타르에폭시(300 $\mu$ m $\times$ 2)	○		○		상동 (폴리에 틸렌)	분체 폴리에틸렌(8mm)				○
	알루미늄 용사(100 $\mu$ m) $\times$ 비니론크로스	○		○			폴리에틸렌 슈링크 튜브(3mm)				○
	보강타르에폭시(300 $\mu$ m $\times$ 3)						에폭시 분체도장(0.3mm)+폴리에틸렌(추 출하여 성형, 4mm)				○
	알루미늄용사(100 $\mu$ m)+글래스 크로스 보강에폭시(300 $\mu$ m $\times$ 3)		○		○		폴리우레탄 고무(4mm)			○	○
도장	알루미늄용사 (봉공처리, 200 $\mu$ m)	○		○		상동 (폴리 우레탄)	발포 폴리우레탄(10mm)				○
	아연용사(100 $\mu$ m)+타르에폭 시(300 $\mu$ m $\times$ 2)	○		○			우레탄마스티크(3mm)			○	○
	HB무기징크(75 $\mu$ m)+타르에 폭시(300 $\mu$ m $\times$ 3)	○	○	○	○		부틸고무(4mm)				○
	HB무기징크(75 $\mu$ m)+글래스 크로스 보강 에폭시(300 $\mu$ m $\times$ 3)	○	○	○	○		클로로프렌 고무 시트(5mm)				○
유기질 라이닝 (에폭시)	HB무기징크리치 페인트(100 $\mu$ m)				○	상동 (그외)	아스팔트마스티크(10mm)				○
	레진모르타르(에폭시20wt%, 4mm)	○	○	○	○		페르트락탐합침 테이프(2mm)+FRP(3mm)				○
	레진모르타르(에폭시33.3wt %, 5mm)				○		스틸 하이버 콘크리트 (형틀10mm)	○			
	글래스 프레이크 함유 에폭시(2mm)				○		스틸 하이버 콘크리트(칠 5mm)	○			
유기질 라이닝 (에폭시)	수중경화형에폭시 (5mm)				○	무기질 라이닝	시멘트 모르타르(47mm)+FRP(3mm)			○	○
	타르에폭시마스티크(14mm)				○		글래스섬유 함유 시멘트 모르타르 (20mm)			○	○
	부직포 합침 에폭시테이프(3mm)				○						

고 있다. 그 예를 표 7에 나타내었으며 대표적인 방식재료의 약 10년간의 폭로시험결과를 표 8에 나타내었다[8]. 이들 방식재료는 구조물의 형상등에 따라 반드시 적용할 수 있는 것은 아닌 것으로 이들의 적용성을 표 9에 나타내었다.

이들 방식재료의 중에는 대단히 내구성이 뛰어난 것도 있고, 내해수성 스텐레스강이나 티탄늄 등의 금속피복은 무보수용(maintenance-free)으로서 기대 되지만, 실구조물의 적용에 대해서는 가공기술의 확립과 가격적으로 합리성이 있는지 등

의 문제가 남겨져 있다.

폴리에틸렌 라이닝 (추출 성형)은 10년간 실제 해역의 폭로시험에서 생물의 부착이나 파랑 등에 의한 손상도 대단히 작고 장기간의 내구성을 기대할 수 있지만, 강관널판등 원주형 형상의 것에만 적용 가능하다. 종래 일반적으로 사용되어 온 중방식도장 보다 훨씬 뛰어난 방식재료가 개발되고 있는데, 각각 일장일단이 있어 해양구조물의 종류에 맞춰 적재적소의 이용을 생각하는 것이 중요하다.

표 8. 방식강관파일의 부식상태 조사결과 요약

방식피복의 종류	피복의 상황	생물의 부착 상황
무처리	전체적으로 상당히 부식이 진행되고 있다.	굴, 홍합
스텐레스강(25Cr-13Ni계) 두께(3mm)	용접부에 약간 색의 변화가 있으나 부식의 진행은 알 수 없을정도이다. 피복경계부의 무처리부분에 요철부식이 다수발생하고 있다.	굴, 홍합
내해수강(Cu-Cr-Al계) 두께(6mm)	전체적으로 부식이 진행 되고 있다. 간만대에서는 비교적 치밀한 녹층으로 덮여져 있다.피복경계부의 무처리부분에 요철부식을 볼 수 있다.	굴, 홍합
알루미늄사(200 $\mu$ m) (봉공처리)	대기~비말대부에서는 백색의 녹이 점존하고 간만대에서는 회생방식효과 때문에 알루미늄의 소모가 진행된다.	굴, 홍합 녹색 이끼
알루미늄사(100 $\mu$ m) +타르에폭시도장(300 $\mu$ m $\times$ 2)	대기부는 도장막의 박리, 부풀음이 여러군데 발생하고 있다. 비말대부, 간만대에서는 도장막에 박리가 현저하고 알루미늄용사도 대부분 소모되어 붉은 녹이 발생	굴, 홍합
알루미늄사(100 $\mu$ m) +비닐론크로스보강 타르에폭시도장(300 $\mu$ m $\times$ 2)	대기~비말대부는 도장막의 박리가 각처에 보이고 붉은 녹과 백색 녹이 혼재하고 있다. 간만대에서는 비교적 큰 도장막의 박리가 있고, 붉은 녹이 발생	굴, 홍합
아연용사(100 $\mu$ m) +타르에폭시도장(300 $\mu$ m $\times$ 2)	대기~비말대부는 비교적 양호하나 간만대에 커다란 도장막의 박리가 있고, 아연용사도 대부분 소모되어 붉은 녹 및 백색 녹이 혼재하고 있다.	굴, 홍합
무기장크리치페인트도장(75 $\mu$ m)+타르 에폭시도장(300 $\mu$ m $\times$ 3)	대기~비말대부는 작은 상처, 부풀음이 여러군데서 볼 수 있는 정도이고, 간만대는 비교적 큰 도장막의 박리가 있어 붉은 녹 및 백색 녹이 혼재	굴, 홍합
무기장크리치페인트도장(75 $\mu$ m)+글래스 스크로스보강에폭시도장 (300 $\mu$ m $\times$ 3)	대기~간만대에는 작은 상처가 여러군데 있고 약간의 녹이 발생하고 있으나 간만대의 도장막에 이상은 확인할 수 없었다.	굴, 홍합 녹색 이끼
폴리에틸렌추출한 라이닝(4mm)	전반적으로 외관은 양호	굴, 홍합
에폭시계레진모르타르라이닝 (4mm)	대기부의 커다란 상처에 의해 박리 및 일부 피복에 크랙이 발생함을 볼 수 있다. 전반적으로 얇은 녹이 색을 나타내고 있다.	굴, 홍합 녹색 이끼
화이버콘크리트라이닝 No.12 형틀:100mm, No.12' 칠:50mm	전면에 스티필화이버에 의한 점선상의 녹이 있고, 항의 외부에 작은 크랙이 발생	굴, 홍합 녹색 이끼

표 9. 비말대부와 간만부의 방식기술 적용성

방식법		인공섬		강관기초	케이슨	부채 구조물
		강널판	강관널판			
도 장	크로스재 병용 없음	○	○	○	○	○
	크로스재 병용	×	×	○	×	×
유기 라이닝	폴리에틸렌 (추출)	×	×	○	×	×
	폴리에틸렌 (분말)	△	○	△	△	△
	레진모르타르	○	○	○	○	○
	방식 테이프	×	×	○	×	×
무기 라이닝	-	○	○	○	○	○
	FRP형틀사용	×	△	○	×	×
금속용사	-	○	○	○	○	○
내식성금속피복	-	○	○	○	○	○
저합금계 내해수강 희생철판	-	○	○	○	○	○

주) ○:적용용이, △:적용보통, ×:적용불가능

2.3.3 해수중 및 해저토중부(海水中 및 海底土 中部)

해수중 및 해저토중부에는 전기방식이 가장 신뢰성이 높은 방식방법으로 종래에서 부터 일반적으로 쓰여지고 있다. 전기방식을 하는 경우에는 구조물이 설치되는 환경조건에 맞춰 적절한 방식 전위 및 방식전류밀도를 정할 필요가 있다. 전기방식의 방법에는 외부전원방식과 희생양극방식의 2개의 방식이 있는데, 종래의 해양구조물에서는 일반적으로 희생양극방식이 사용되고 있다. 실제의 해양구조물에 채용되고 있는 전기방식의 설계기준치의 예와 근래 행해진 전기방식의 설계방법에 관한 연구 결과, 해양 환경 조건에 맞춘 방식 전위와 방식전류밀도의 설계기준치 등은 별도로 기술된 음극방식 항목에서 나타내기로 한다.

방식전위에 따라 대응하는 희생양극의 종류, 초기전류밀도에 대응하는 양극의 설치 장소수, 정상전류밀도에 대응하는 1개소당 양극중량이 정해진다. 양극의 설치개소수는, 구조물의 형상등에 의해서도 달라질 수도 있고, 형상에 맞는 설치방법, 메 보수를 용이하게 하기 위한 설치방법등, 해양구조물의 종류에 상응하는 적절한 양극의 설치비가

필요하다. 또 전기방식을 보다 합리적으로 하기 위해 전기방식과 도장을 병용하는 것이 고려되어 최근에 전기방식과 병용하기 위한 도장재료가 개발되고 있다.

2.4. 음극 방식

전기를 이용한 음극방식법(Cathodic protection)으로는 외부전원에 의한 강제전류법(Impressed Current Method)과 희생양극법(Sacrificial Anode Method)이 있으며 주로 해수에 잠겨있는 해중부의 도장되지 않은 강구조물이나 도장으로 도포되어 있어도 가능한 완벽한 방식을 하기 위하여 음극방식이 병용된다. 강제전류법은 직류전원장치를 이용하여 구조물에 음극전류를 공급함으로써 부식전위보다 음극쪽으로 분극을 시켜 부식을 방지하는 방법이다. 희생양극법은 직류전원장치 대신 이온화경향이 낮은, 즉, 해수에서의 전위가 구조물의 전위보다 낮은 금속을 전기적으로 연결되게 부착시켜 자신이 양극으로 작용하여 부식되면서 발생한 전기(전자)를 구조물에 공급함으로써 구조물을 음극으로 만들어 방식하는 방법이다. 그림 6은 음극방식의 원리를 나타내고 있다.

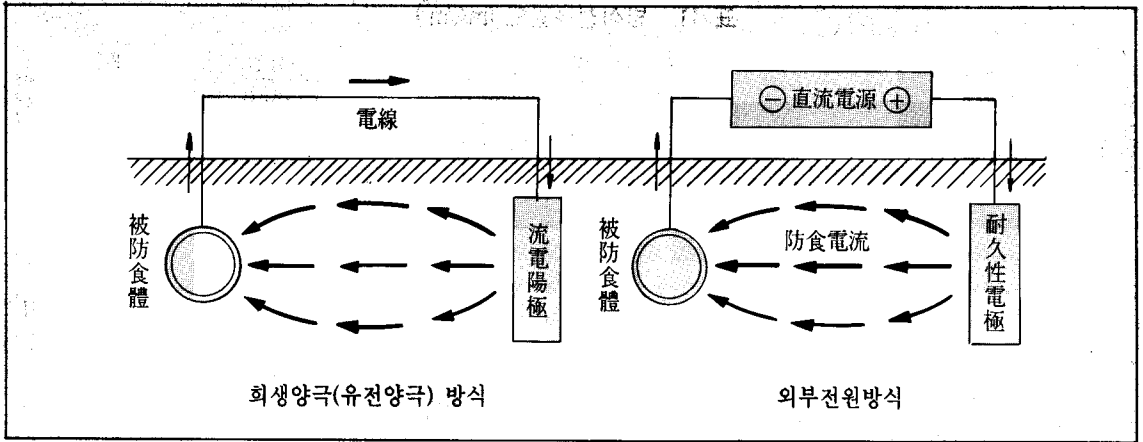


그림 6. 음극방식의 원리

2.4.1. 방식 전류 밀도

전기방식공법의 적용범위는 원칙적으로 평균간조면 이하로 한다. 해수에 있어서 방식 전류 밀도는 해류의 유속이나 수온, 해수의 오염정도, 파랑 작용, 도장후의 경과시간 등의 상태의 변화에 의해 수배에서 수십 배로도 변한다. 하천수나 여러 가지 폐수가 유입되는 곳이나 유화물의 농도가 높은곳에서는 일반적으로 소요되는 방식전류밀도는 증가한다. 전기방식공법을 적용할 때 방식전위는 기준전극의 종류에 따라서 포화감홍전극(SCE)은 -770 mV, 인공해수 염화은전극(Ag/AgCl)은 -780mV, 포화황산동전극은 -850mV로 유지하여야 한다. 이는 수소전극으로 -530 mV 이며 이

는 기준전극의 전위가 수소전극에 대하여 서로 다르기 때문이다.

표 10과 표 11은 환경인자에 따른 전기방식에 필요한 방식전류밀도와 방식전위를 나타낸다.[9][10]

전기방식의 효과는 피방식체인 강재가 해수중에 있는 시간이 길어지면 커지고 짧게되면 감소한다. 표 12는 해수침수율과 방식율의 관계를 표시하는데 평균간조면 이하에서의 방식율은 90%를 표준으로 하여 음극방식 설계를 한다[11]. 간만대에 유입하는 방식전류는 해수중에서 적용되는 전류밀도와 비교하면 상당히 크기 때문에 전기방식의 적용범위는 평균 저조면(低潮面) 이하로 하는 것이 바람직 하다.

표 10. 전기방식장치의 설계기준(대표적 예)

환경인자					
지역	해수저항 (oh' m-cm)	수온(℃)	파랑작용 (Wave Action)	조류	대표적인 설계전류밀도 mA/ft <sup>2</sup> (mA/m <sup>2</sup> )
Gulf of Mexico	20	22	Moderate	Moderate	5~6(54~65)
U.S.West Coast	24	15	"	Low	7~8(76~86)
Cook Inlet	50	2	Low	High	35~40(380~430)
North Sea	26	12	High	Moderate	8~15(86~162)
Persian Gulf	15	30	Moderate	Low	7~10(76~108)
Indonesia	19	24	"	Moderate	5~6(54~65)

표 11. 방식전류밀도 (mA/m<sup>2</sup>)

전기 방식의 종류		전기 방식			복합전기방식(도장병용)	
		초기방식 전류밀도	정상방식 전류밀도	방식전위 (mV vs SCE)	초기방식 전류밀도	정상방식 전류밀도
정정 해역 (저온, 희석 환경을 포함)	해수중	100	50	- 770	왼쪽에 기술한 값에다 도장막의 박리율을 더한값	오른쪽에 기술한 값에다 도장막의 박리율을 더한값
	토 중	20	10			
오염 해역	해수중	100×K	50×K	- 900		
	갯벌중	150	100			
	토 중	20×K	10×K			
고조류 해역	2m/s	230	115	- 770		
	5m/s	270	135			

\*참고: K값은 오염 정도에 따라 1.2에서 1.5까지의 범위이다.

표 12. 해수 침수율에 따른 전기방식법의 방식율

해수 침수율(%)	방식율 (%)
0 - 40	40 이하
41 - 80	41 - 60
81 - 99	61 - 90
100	91 이상

2.4.2. 희생양극법(犧牲陽極法)

희생양극법은 유전양극법(流電陽極法)이라고도 하며 일반적으로 일정규격의 알루미늄판이나 아연판을 방식대상이 되는 구조물에 설치하여 구조물을 음극으로 분극시켜 방식(防蝕)하는 방법이다. 이 방법은 고속의 대형선과 같이 선체저항 증가에 따른 연료손실이 큰 경우에는 부적합하지만 소형선이나 저속선 또는 해상 부유구조물 등의 방식용으로서 일반적으로 널리 사용되고 있다.

양극재료로서는 주로 아연 합금과 알루미늄합금이 쓰이고 있다. 알루미늄은 1개의 원자가 6개의 전자를 방출하고 이온으로 용해되기 때문에 2개의 전자를 내놓는 아연에 비하여 훨씬 경제적이다. 마그네슘 양극은 음극과의 전위 차가 너무 크기 때문에 양극근처가 과방식되기 쉽고, 또 양극의 소모도 빠르기 때문에 구멍에 캡을 씌운다던가, 초기 양극의 반수를 피복해 주어야하고 적당한 때에 피복을 벗겨주는 작업을 해주는 등의

결점을 제거해야 하기 때문에 경제적이지 못하다. 표 13은 희생양극재료의 성능을 비교하여 나타낸 것이다[11].

알루미늄계 희생양극법은 1965년경부터 세계 각국에서 연구가 현재에는 수백건의 특허가 출원되어 있지만 실용화된 합금은 그리 많지 않다. 최근까지는 Al-In-Zn 및 Al-Zn-Mg-In-Sn, Al-Zn-In-Si 등이 많이 사용되고 있으며 2,450-2,600 Ah/kg의 발생전기량의 성능(효율 85-90%)을 나타내고 있다. 일본에서는 1980년대초 고순도의 Al-Zn-Mg-In에 Ca, Ga, Si를 소량 첨가하여 2,700 Ah/kg의 발생전기량을 갖는 양극이 개발되었다. 이들 고성능 양극은 최고 90-96%의 양극효율을 갖는다[12].

2.4.2. 외부 전원 방식[13]

외부전원에 의한 방식의 경우 전극이라는 것은 방식대상물에 전기를 공급하기 위한 대극(對極) 역할을 하는 것으로 선박의 경우 전극은 선미에서 가까운 양현에 한 두개 정도씩 배치하고, 각각 기준 전극을 적당수 설치하는 것이 통례이다. 비교적 작은 배에서는 선미부만 전극을 배치하는 것도 있다. 선저에는 양호한 도장이 실시되어 있기 때문에 전위분포는 일반적으로 양호하다.

기준전극에 의해 선체 전위를 검출하고, 설정

표 13. 희생양극재료의 성능비교

특성		Al-Zn-In		Zn, Zn합금	Mg, Mg-Mn	Mg-6Al-3Zn
비중		2.26-2.8		7.14	1.74	1.77
개회로양극전압(SCE, V)		1.08		1.03	0.56	1.48
철에대한 유효전압(V)		0.25		0.20	0.75	0.65
발생전기량 이론치(A · hr/g)		2.87		0.82	2.20	2.21
해수중 1mA/cm <sup>2</sup>	전류효율(%)	80	90	95	50	55
	발생전기량(A · hr/g)	2.30	2.60	0.78	1.10	1.22
	소모량(kg/A/년)	3.8	3.4	11.8	8.0	7.2
지중 0.03mA/cm <sup>2</sup>	전류효율(%)	65*		65	40	50
	발생전기량(A · hr/g)	1.86*		0.53	0.88	1.11

\*조성에 따라 변함

표준 전위와의 차이를 증폭하여 정류기를 제어하고 그 설정 표준 전위 부근에 선체 전위를 자동적으로 제어하는 방식이 일반적으로 사용되고 있다.

대극(對極)의 재료로는 Pt-Ti 전극, Pb-Sb-Ag 전극 등이 주로 쓰이고 있으며 원형 혹은 긴 판상의 전극이 쓰이고 있다. 선체 관통 부에서 누수되지 않도록 설계 시공상 유의하고 있다. 기준 전극으로서는 주로 아연 혹은 Ag/AgCl/해수 전극이 사용되고 있다.

전극이 직접 구조물과 접하는 부분에는 절연재료를 설치 한다. 절연재료는 전기적 작용이나 전극의 부식 생성물에 의해 영향을 받지 않는 재료를 사용한다. 일반적으로 글래스 화이버 보강 폴리 에스테르수지를 사용한다. 그 면적은 sealed가 있는 경우에는, sealed에, sealed가 없는 경우에는 구조물 도장 막에 악영향을 주지 않도록 정한다

sealed의 목적은 선저 도장에 악영향을 주지 않는 것과 전류분포를 양호하게 하는 것이다. sealed재로서는 주로 코울타르 에폭시가 쓰이고 있다. 선저 도료가 에폭시 혹은 코울타르 에폭시인 경우에는 sealed는 불필요하다.

Morgan은 절연 혹은 sealed 크기의 계산식을 다음과 같이 제시하고 있다.

원형 전극  $V = I\rho/2\pi r$

장형 전극  $V = 6I\rho/2\pi(L+2B)$

단  $V =$  절연(sealed) 끝의 전위변화(V)  
 $= 1V(\text{절연})(\text{선체 전위 } -1.5 \text{ Ag/AgCl})$   
 $= 0.6V(\text{sealed})(\text{선체전위 } -1.1 \text{ Ag/AgCl})$

- I = 전극 발생 전류(A)
- $\rho$  = 해수의 저항률( $\Omega$ -cm)
- r = 절연(sealed)의 반경(cm)
- L = 절연(sealed)의 길이(cm)
- B = 절연(sealed)의 폭(cm)

표 14에 절연, sealed의 설계전류밀도를 나타내었다. Hughes의 것은 전류 밀도가 어떤 경우에도 커서; 도장 막이나 sealed가 손상을 받기 쉬운 가능성이 있다.

표 14. 절연 sealed의 설계 전류 밀도 (A/ft<sup>2</sup>)

회사명 · 연구자명	절 연	sealed
F.A.Hughes	7.1	0.43
Morgan Berkley	1.07	선저 도료 에폭시
A.E.G.	1.07	"
Engelhard	0.71	-
Skarpenord	1.16	0.12
J.H.Morgan	0.6	0.175
R.N.Benedict	0.8	-

24.5. 음극방식이 구조물에 미치는 2차적 영향[14]

(1) 알칼리에 의한 도막의 열화

음극 방식을 하면 구조물의 전위는 낮아지고, 적정 전위 이하로 과음극분극이 되면 표면의 알칼리도가 커지게 된다. 따라서 유성(油性)도료계는 -0.85V(Cu/CuSO<sub>4</sub>)보다 낮은 전위로 되어서는 안된다. 비닐이나 염화고무는 내알칼리성이 유성계보다 강하지만, 이들도 어느한도의 낮은 전위로 되면 도장 피막이 침식을 당하게 된다.

Greenblatt에 의하면 비닐계는 -0.84V(Ag/AgCl)에서는 이상이 없으나 -1.0V에서는 손상을 받는다고 하였다. Francis는 -1.0V(Cu/CuSO<sub>4</sub>)로 22개월 동안 침적했을 때, 다음과 같은 도장계가 대부분 이상이 없었다고 하였다.

- 비닐/ F105(Navy cold plastic A/F)
- 비닐/ F121(비닐 A/F)
- 비닐/살란 A/F
- F-14N(MIL-P-19453)/호트 플라스틱 A/F

또한 Francis는 다음과 같은 절연계가 -1.5V(Cu/CuSO<sub>4</sub>)로 4개월간, -3V로 3개월간, -4.5V로 8개월간 등 모두 연속해서 15개월 침적하였을 때 거의 이상이 없었다고 발표하였다.

- 클로로 프렌, 시트/F121(비닐A/F)
- 에폭시, 글래스/F121(비닐A/F)

영국의 전기방식 기준에서도 유성계도료는 -0.8V(Ag/AgCl/해수), 염화 비닐, 염화고무에서는 -0.9V를 넘지 않을 것을 규정하고 있다.

(2) 석회질 피막의 생성

방식구조물 표면에 형성되는 알칼리분위기에 의하여 해수중의 Ca, Mg 등이 용해도적에 의해 침적하여 주로 CaCO<sub>3</sub>나 Mg(OH)<sub>2</sub> 와같은 석회질의 석출층을 형성한다. 이피막은 음분극의 정도에 따라 Ca/Mg의 비가 다르게 형성되며, 방식특성이 있다. 최근 일본 IHI사에서는 이러한 특성을 이용하여 인위적인 음극전원을 구조물 표면에 부가하여 방식피막을 형성시키는 새로운 공법을 개발하

여 선박의 방식기법으로 실용화를 추진하고 있으며[15] 항만기술연구소에서는 항만 콘크리트 구조물의 보수방법으로 이용하기 위한 연구를 하고 있다[16].

(3) 수소가스의 발생

구조물에 수소발생전위를 초과해서 음극분극을 시키면 표면에서 수소가스가 발생하여 도장피막의 박리를 초래함과 동시에 밀폐계에서는 수소가스의 축적을 가져온다. 따라서 음극면에서 수소가 흡수되면 인장응력하에 있는 고장력강에서는 균열이 발생하는 경우가 생긴다. 또 스텐레스강이나 티타늄 등에서는 재료의 취화가 일어나는 경우도 있다.

(4) 염소기스의 생성

염소과전압이 낮은 전극을 사용하면 Cl<sub>2</sub> 가스가 전극표면에서 발생하며 밀폐계에서는 틈새에 축적되어 일부는 해수와 반응하여 부식성의 반응물을 만들어 2차부식의 원인이 된다.

(5) 누설전류에 의한 부식

방식대상외의 금속구조물이 전기방식 대상물 가까이 있을 때 또는 이것에 방식전류가 흘러들어가는 회로가 형성될 때 유출부에서 부식이 생기는 경우가 있다.

하나의 부표에 2척이상의 배가 계류되는 경우에 1척은 음극 방식을 하고, 다른 배는 방식을 하지않는 경우에 비방식의 배는 급격한 부식을 받는다. 이러한 경우에는 이들 배의 사이를 저저항(0.0005Ω)의 연결선으로 접속하면 전식을 방지할 수가 있다.

24.6. 전기방식법의 표준화

주요 구조물의 전기방식법에 대하여 그 적용에 해당하는 기술기준이나 성능시험법을 표준화하는 작업이 일반화되어 있으며 다음과 같은 주요한 규격이 있다[12].

- (1) 매철관 : NACE RP-01-69 (1983)
- (2) 해양구조물 : NACE RP-01-79 (1983)
- (3) 해저관 : NACE RP-05-75

- (4) 항만시설 : 일본 운수성 감수, 항만시설의 기술상의 기준·동해설 (1988)  
해운항만청, 항만시설물 설계기준서(1993)
- (5) 저유시설 : 일본 운수성 감수, 항만시설의 기술상의 기준·동해설 (1988)  
해운항만청, 항만시설물 설계기준서(1993)
- (6) 전기방식 전반 : 영국 BS I CP-1021 (1976)
- (7) 부식방지협회(일) : 유전양극시험법 (1982)

한 관련 연구기관의 노력과 유기적인 협력이 필요하다.

- (1) 해수비말대와 간만대 적용 방식기술의 개발
- (2) 전기방식 설계기술의 개발
- (3) 강구조물의 방식성 평가기술의 개발
- (4) 내해수 콘크리트부재의 설계기술 개발
- (5) 부식피로 및 마모를 고려한 계류용 재료 및 방식기술 개발
- (6) 부대구조물의 방식설계 기술 개발
- (7) 생물 부착방지 및 제거기술의 개발

### 3. 결 론

앞에서 언급했듯이 선진국에서는 이미 해양을 생산활동의 공간으로 적극적으로 활용하기 위한 노력을 경주하고 있다. 삼면이 바다인 우리나라에서도 앞으로 해양공간의 이용을 극대화 할 필요가 있고 특히 계속 증가추세에 있는 폐기물처리 시설, 원자력 발전소, 공항 등 육상기피시설물의 수용에 능동적으로 대처할 시기가 닥아오고 있다. 따라서 이러한 시설물의 안전성 확보와 수명연장을 위한 해양구조물의 부식과 이를 토대로한 방식기술의 개발 또한 병행되어야 할 것이다.

그러나 현재 국내에서 이루어지고 있는 해수부식에 대한 연구는 화력발전소의 냉각수 시스템이나 가스인수기지의 증발기 열교환장치의 부식연구 정도에 지나지 않으며 해양구조물에 대한 부식연구는 거의 없는 것으로 알려져 있다. 또한 국내의 선박이나 해양구조물의 방식과 관련하여 실제 시공에 참여할 수 있는 업체도 수개에 지나지 않을뿐만 아니라 그규모도 영세성을 겨우 벗어난 단계에 지나지 않는다.

국내에서도 다음과 같은 사항의 기술개발에 목표를 두고 장차 해양구조물의 방식기술 개발에 대한 체계적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각되며 이를 위해 정부차원의 지원과 대학을 포함

### 참 고 문 헌

- [1] 海洋産業研究會 資料 ニュース月報, 11月號, (1995) 30
- [2] 増田 一廣, 鋼構造物の防蝕, 表面技術, vol.46, no.6 (1995) 509
- [3] 蒔田 實, 海洋構造物の防蝕技術, 防蝕技術, vol.35 no.8 (1986) 471
- [4] 紫田 俊夫 외, 제3회 鐵鋼의 環境強度部會 symposium 前刷集, 日本鐵鋼協會 (1987) 133
- [5] 横井 聰之, 港灣構造物の腐蝕實態と防蝕對策, 防蝕技術, vol.38 no.7 (1989) 390
- [6] 鋼材俱樂部, 海洋構造物の設計施工指針(1976)
- [7] 建設省土木研究所: 海洋構造物の補修管理技術に關する報告書(1982)
- [8] 鋼管杭協會, 鋼管杭とその海洋ばくろ試驗記錄(その10) (1983)
- [9] NACE Standard RP-01-76(1983) Recommended Practice, Control of Corrosion of Steel, Fixed offshore Platforms associated with Petroleum Production
- [10] 建設省土木研究所, (財)土木研究センター: 電氣防蝕設計指針・同解説(1985)
- [11] 해운항만청, 항만시설물 설계기준서, 상권 (1993) 313
- [12] 小林 豊治, 電氣防蝕法概論, 防金青管理, no.



- 11(1984) 352
- [13] 福谷 英二, 船舶の防蝕管理, 防蝕技術, vol. 30, no.6(1981) 358
- [14] 内堀 利也, 電気防蝕設計要點, 防蝕技術, vol. 37, no.11 (1988) 685
- [15] 海洋産業研究會 資料 ニュース月報, 11月號 (1995) 28
- [16] 阿部 正美 외, 港灣技術研究報告 第30卷 第3號 (1991) 25