

## 해양환경에 노출된 고내구성 콘크리트의 전기화학적기법을 이용한 부식저항성 평가

### Evaluation of Corrosion Resistance using Electro-chemical Methods for the High-Durability Concrete exposed to Marine Condition

양은익\* · 김명유\* · 이동근\* · 한상훈\*\*

Eun-Ik Yang\*, Myung Yu Kim\*, Dong Gun Lee\* and Sang Hun Han\*\*

**요 지 :** 해양콘크리트구조물의 내구성은 일반적으로 해수의 침식 작용과 콘크리트 내부로 침투하는 염분의 확산에 따른 부식에 의해 크게 피해를 입으며, 이러한 내구성 저하는 해양콘크리트구조물의 과다한 유지 관리비를 초래하게 된다. 따라서 해양구조물의 내구성 증진을 위하여 고내구성 재료의 사용이 검토되고 있다. 본 연구에서는, 광물질 혼화제(실리카흄, 플라이애쉬, 고로슬래그미분말)와 표면처리 철근(스테인리스 봉강, 에폭시 코팅) 그리고 부식억제제를 사용한 해양콘크리트의 부식저항 특성을 전기화학적기법을 이용하여 비교 검토하였다. 또한 고내구성 재료사용에 따른 내구성 증진효과를 정량적으로 제안하였다.

**핵심용어 :** 해양구조물, 내구성, 부식, 광물질 혼화제, 표면처리 철근, 부식억제제

**Abstract :** The durability of marine concrete structures is severely degraded by corrosion due to seawater attack and diffusion of chloride in concrete. The deduction of durability causes high repair cost for maintenance of marine concrete structure. So, the applicability of high-durable materials is investigated to improve the durability in marine concrete structures. For these, the characteristics of corrosion prevention of marine concrete structures mixed with the mineral admixtures(SF, FA and BFS), the modified steel(stainless and coating steel), and corrosion inhibitors are evaluated using electro-chemical methods. As a results of this study, it is quantified for the effect of promotion of durability by high-durability materials in marine concrete structures.

**Keywords :** marine structure, durability, corrosion, mineral admixtures, modified steel, inhibitor

## 1. 서 론

일반적으로 해양콘크리트구조물에서 발생하는 내구성 저하는 해수의 직접적 접촉에 따른 침식과 구조물 내부철근의 부식에 기인한다(Browne, 1980). 그 중에서 특히 내부철근의 부식은 해수환경에서 공급되는 풍부한 염소이온이 콘크리트 내부로 침투하여 콘크리트 속에 매립되어 있는 철근을 부식시켜 발생하는 것으로 철근이 부식하면 철근이 팽창하여 팽창압으로 콘크리트가 균열이 가거나 탈락하여 구조물의 열화가 가속화하게 된다. 이러한 철근부식은 그 피해 범위가 막대하고 피해정도가 심각하여 구조물에 치명적

피해를 발생시킬 수 있다.

최근 건설되는 해양 구조물의 경우 그 규모면에서 장대화 및 대형화하고 있는 실정이다. 특히 이러한 해양구조물은 가혹한 해양환경에 장기적으로 노출됨에 따라 육상구조물에 비해 많은 문제점을 가지고 있으며 이로 인해 심각한 내구성 저하를 초래하는 것으로 보고되고 있다(문한영, 2002). 이러한 내구성 저하는 구조물의 수명을 극단적으로 저하시키는 물론 구조물의 보수보강 비용의 과다한 증가 등 유지관리에 필요한 추가적인 비용을 유발시키므로 이에 대한 적극적 검토가 필요하다.

이러한, 해양 구조물이 처해지는 특수한 상황 때문에 최

\*강릉대학교 토목공학과(eiyang@kangnung.ac.kr)

\*\*한국해양연구원

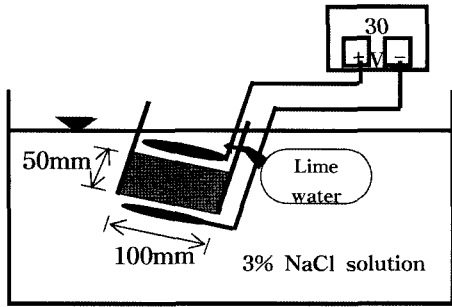


Fig. 1. CTH 실험 개요도.



Fig. 2. 수용액 상태 전위차 측진 실험.

근 많은 관심과 연구가 수행되고 있으며(양은익, 2005), 구조물 설계시 염해에 대한 내구성 설계를 반영하고 있다.

그러나 해양 구조물의 염해에 대한 내구성 설계의 경우, 확산계수의 감소를 통한 설계가 대부분을 이루고 있는 실정이다. 설계 수명 100년을 목표로 하고 있는 최근의 경향으로 볼 때, 확산계수의 감소만으로는 목표수명을 만족할 수 없는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 상황에서 다양한 내구성 재료를 활용한 구조물의 부식 저항성을 높일 필요가 있다. 기존의 연구자들에 의해 다양한 내구성 향상 방안에 대해 개별적인 연구가 수행되어 왔으나, 다양한 재료를 이용한 종합적인 내구성 평가는 많지 않은 실정이다.

따라서, 본 연구는 이러한 해양콘크리트구조물의 부식평가의 일환으로써 다양한 고내구성 재료를 사용한 구조물의 방식성능을 전기-화학적 기법을 사용하여 비교 검토하였다. 이를 위해 광물질 혼화재와 일반철근 및 스테인리스 봉강, 에폭시 코팅철근의 부식 저항특성과 부식억제제 혼합에 따른 내 부식성을 전기-화학적 기법으로 평가하였다. 또한 고 내구성 재료의 사용에 따른 내구성 증진효과를 정량적으로 평가하여 향후 고내구성 해양콘크리트구조물 개발에 사용할 수 있는 기초 설계 자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 부식평가를 위한 비파괴측정 방법

### 2.1 CTH법을 이용한 부식 개시시기 예측

확산 촉진 실험은 Fig. 2와 같이 Tang & Nilsson(1992)이 제안한 비정상 상태의 확산실험장치를 통하여 실험하였으며, 콘크리트 시험체에 30V의 전압을 8시간 동안 적용하였다. 음극과 양극의 전극은 모두 Stainless steel plate를 사용하여 측정하였다. 또한, 수조의 크기를 크게 함으로써 발생하는 열을 최대한 흡수할 수 있도록 하였으며, 수조의 온도는 16±1°C로 일정하게 유지되도록 실험하였다. 양극쪽

Table 1. CTH test detail

Item	Volt (V)	Time (hour)	F (J/Vmole)	R (J/Kmole)	T (K)
Content	30	8	96485	8.3143	289±1

에는 3% NaCl 용액을 음극쪽에는 석회수를 전해질로 사용하였다. CTH에 의한 확산계수평가는 Tang & Nilsson이 Nernst-Einstein(1992)식으로부터 유도한 아래 식 (1)을 이용하여 평가하였다. 또한, 전기적 확산 촉진실험에 사용된 실험변수값을 나타내면 Table 1과 같다.

$$D = \frac{RT}{zFE} * \frac{x_f}{t} \tag{1}$$

R은 기체 상수, T는 절대 온도, F는 페러데이 상수이며,  $x_f$ 는 질산은 분무에 의해 측정된 침투깊이를 말한다. E는 실험동안 통과한 전하량을 나타내며, 비정상 상태로 실험이 수행되었다.

확산계수를 통하여 부식 개시시기를 예측할 수 있는데, 부식 개시 시기의 예측에는 Tuutti(1979)가 제안한 식 (2)를 사용하였다.

$$t_p = \frac{d^2}{4 \cdot \eta^2 D_{eff}} \quad \eta = \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{C_{cr} - C_i}{C_0 - C_i} \right) \tag{2}$$

여기서,  $C_0$ 는 콘크리트 표면의 염소 이온 농도,  $C_i$ 는 콘크리트 내부의 염소이온 농도,  $\operatorname{erfc}$ 는 오차함수의 역함수이고,  $C_{cr}$ 은 부식 임계 농도,  $D_{eff}$ 는 유효 확산계수,  $t_p$ 는 부식 발생 시간,  $d$ 는 피복두께를 말한다.

### 2.2 분극저항 측정법

콘크리트에 매립된 철근의 부식 정도를 측정하는 방법으

로는 전기화학적 방법과 물리적 방법이 있는데, 물리적 방법으로는 균열, 박리 등 부식으로 인한 거동을 관찰하는데 불과한 반면, 전기화학적 방법으로는 부식의 정성적/정량적인 평가가 가능하다. 전기 화학적인 방법에서 부식의 유·무를 정량적으로 판별할 수 있는 것은 분극저항법 뿐이다. 이러한 분극저항법은 콘크리트 표면에 대극과 조합 전극을 설치하여 대극에서 철근에 전위를  $\Delta E$ 만큼 변화시키면 미소 전류  $\Delta I$ 가 발생하는 원리를 이용한 것이며,  $\Delta E$ 를 변화 시킴에 따라 전위와 전류 사이에는 식 (3)과 같은 직선관계 식이 발생한다. 이 식을 통하여 분극 저항이 결정되고, Stern-Geary 제안한 식 (4)를 이용한 실험을 통하여 타펠계수를 결정함으로써 부식 속도의 지표인 부식전류  $I_{corr}$ 를 얻을 수 있다(고영태, 1994).

$$\Delta E = R_p \cdot \Delta I \tag{3}$$

$$I_{corr}(\mu A/cm^2) = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)R_p} \tag{4}$$

여기서,  $\beta_a$ : 양극 타펠계수(Anodic tafel constant)  
 $\beta_c$ : 음극 타펠계수(Cathodic tafel constant)  
 $R_p$ : 분극저항( $K\Omega \cdot cm^2$ )  
 사용된 양극 타펠계수는 35 mV, 음극 타펠계수는 -35 mV이며, 이 값은 본 연구에서 사용된 분극저항 측정장치의 default값이다. 가드링 전극으로는 플라티늄(Platinum)전극이 사용되었으며, Counter 전극은 유산동 전극이 사용되었다. 최종적으로 부식 속도는 계산된 부식전류밀도( $I_{corr}$ )와 철근의 밀도, 등가중량을 통하여 식 (5)를 이용하여 평가할 수 있다.

$$\text{부식속도}(mpy) = \frac{3.27 \times I_{corr} \times E.W}{d} \tag{5}$$

여기서,  $I_{corr}$ : 부식전류밀도  
 $E.W$ : 철근의 등가중량  
 $d$ : 철근의 밀도

**Table 3.** 고로슬래그미분말의 화학적조성 및 물리적 특성

SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Ig.loss (%)	specific gravity	specific surface area(cm <sup>2</sup> /g)
21.8	5.8	3.56	60.6	3.54	2.6	1.0	3.14	3422

**Table 4.** 실리카흙의 화학적 특성

SiO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> O (%)	LOI (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	HgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	C (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)
97	0.6	1.0	0.2	0.3	0.3	0.2	0.5	0.1	0.7	0.1	0.05

**Table 2.** 사용 골재의 물리적 특성

Type	Gravity	Absorption	F.M
잔골재	2.59	1.01	2.65
굵은 골재	2.78	0.62	6.80

### 3. 실험

#### 3.1 실험 변수 및 사용배합

##### 3.1.1 사용재료

본 실험에서 사용된 잔골재는 강릉시 연곡천에 있는 모래를 채취하여 사용하였으며, 굵은 골재는 쇠석 골재를 사용하였다. 굵은 골재 최대 치수는 25 mm이다. 배합에 사용된 골재 특성은 Table 2와 같다. 사용 시멘트는 S사의 1종 보통 시멘트를 사용하였다. 슬럼프와 공기량을 확보하기 위하여 사용된 혼화제는 국내 1사의 나프탈렌계 고성능 감수제와 AE제를 사용하였다. 사용된 광물질 혼화제의 물리화학적 특성은 Table 3~5와 같다.

##### 3.1.2 실험변수 및 시험체 배합

본 연구에서는 해양환경 하에 건설되는 콘크리트 구조물에 대해 부식피해를 최소화 할 수 있는 최적의 내구성 재료를 제시하기 위하여 Table 6와 같은 재료와 실험 변수에 대하여 실험을 수행하였다. 해양 콘크리트 설계시 W/C 55%이하를 사용하도록 규정하고 있으나, 본 연구에서는 부식에 따른 빠른 부식 진행성을 살펴보기 위하여 W/C-60%를 가지는 콘크리트에 대하여 실험하였다.

한편, 혼화제 혼합 및 철근 종류별 부식저항성을 알아보기 위하여 Table 7의 배합표를 사용하여 시험체를 제작하였으며, 이때 혼화제 혼합의 경우 시멘트 량에 대하여 고

**Table 5.** 플라이애시의 물리화학적 특성

specific gravity	specific surface area(cm <sup>2</sup> /g)	H <sub>2</sub> O (%)	Ig.loss (%)	SiO <sub>2</sub> (%)
2.15	3555	0.2	2.0	53.7

Table 6. 실험 변수

Item	W/C	Type	Measuring	Specimen
Admixture		FA(10%), BFS(30%), SF(10%)	- Chloride diffusion coefficient	$\phi$ 10*20
Inhibitor	60%	Calcium nitrate	- Setting time	$\phi$ 10*20 Plate (15*15*10)
		-0%, 1%, 2%	- Compressive strength	
		Nitrite inhibitor (NR1900) -0L/m <sup>3</sup> , 3 L/m <sup>3</sup> , 5 L/m <sup>3</sup>	- Polarization resistance - $I_{corr}$	
Reinforcing bar	50%	Normal Stainless (STS304)	- Polarization resistance - $I_{corr}$	15*15*15
		Normal, Coating	- Polarization resistance - $I_{corr}$	Plate (10*20*30)

Table 7. 혼화재 및 철근종류 배합표(I)

W/C (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				AE (%)	SP (%)
	W	C	S	G		
50%	172.5	345	776	1021	0.005	0.3
60%	172.5	288	815	1030	0.01	0.4

Table 8. 부식억제제 배합표(II)

W/C (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				AE (%)	SP (%)
	W	C	S	G		
50%	175	350	765	948	0.01	0.3
60%	175	292	804	957	0.01	0.7

토슬래그미분말(BFS)은 30%, 실리카흙(SF) 및 플라이애시(FA)는 10%를 대체하였다. 부식억제제 관련 배합은 Table 8에 나타내었으며 이 배합은 Table 7과 유사한 배합으로써, 부식억제제 사용에 따른 작업성 저하를 보상하고자 단위수량을 약간 증가시킨 배합이다.

### 3.2 실험 방법

혼화재 혼합에 따른 염화물 침투 저항성을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같은 CTH실험을 실시하였다. 질산은 변색법을 사용하여 염분 깊이를 측정하고 이로부터 계산한 확산계수를 비교 평가하였다.

한편, 철근 종류에 따른 부식 저항성을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 콘크리트 매립 전 3%의 염화나트륨 수용액 상태에서의 전위차 촉진실험을 실시하여 중량법을 이용한 부식률을 평가하였다. 또한 Fig. 3과 같은 실험방법을 통하여 3%의 NaCl용액을 사용하여 전위차 촉진 부식 실험을 수행하였다. 콘크리트 시험체에 매립된 일반 및 코팅철근의 부식저항 성능평가를 위하여 해수에 반복 건습을 시킨 후 분극저항을 측정하여 비교하는 한편, 일반 및 스테인리스 봉강의 부식저항 성능평가를 위해 철근콘크리트 부재에 전위차 촉진실험을 실시하고 이에 따른 부식 상태를 평가

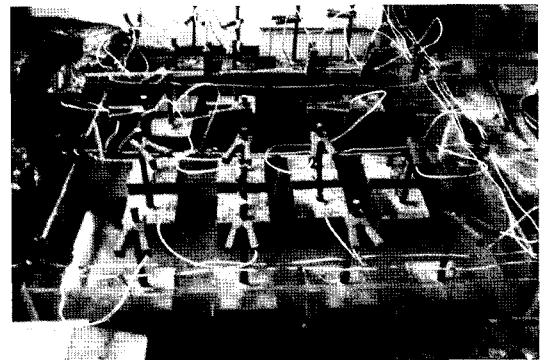


Fig. 3. 철근 매립 전위차 촉진실험.

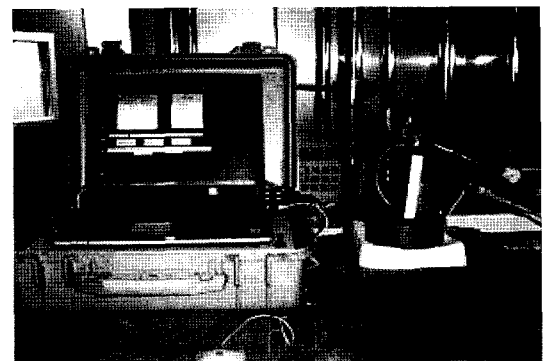


Fig. 4. 분극저항 측정 실험 전경.

기 위하여 분극저항을 측정하였다. 부식억제제의 혼합에 따른 내 부식성 평가에 있어서는 먼저 초기응결 특성을 검토하기 위하여 KS F 2436(관입저항침에 의한 콘크리트 응결 시간 시험방법)에 따라 시간에 따른 응결을 측정하였으며, 다음으로 재령별 압축강도를 측정하여 비교하였다. 또한 철근을 매립한 콘크리트 슬래브 시험체를 해수에 대하여 반복 건습을 실시하고 재령에 따른 분극저항을 측정하였다. Fig. 4는 부식에 따른 분극저항 및 부식율 측정에 사용된 가

드링된 분극저항 측정 장치를 나타낸다. 이 장치는 미국 C사의 PR Monitor 4600이 측정에 사용되었다.

### 4. 결과 및 분석

#### 4.1 혼화재 혼입 콘크리트의 압축강도

Fig. 5는 혼화재를 혼입한 콘크리트의 재령 7일, 28일에 서의 압축강도를 나타낸다. 실리카흄이 가장 좋은 압축강도를 보였으며, 다음으로 고로슬래그미분말을 혼입한 콘크리트로서 약 24 MPa 수준의 강도를 보였다. 그러나 플라이 애시를 10% 대체한 경우는 초기의 강도증진이 낮아서 보통 콘크리트와 유사한 압축강도를 나타냈다. 이러한 압축강도 특성은 염화물 확산계수 결과에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

#### 4.2 혼화재 혼입에 따른 염해저항성 평가

혼화재 혼입에 따른 염해 저항성 평가에 대한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 결과를 살펴보면 BFS 30% 및 SF 10%를 시멘트에 대체한 경우 확산계수가 각각 1.55와 0.56 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )으로써 보통포틀랜드시멘트(OPC) 대비 약 75, 30% 수준으로 감소였다. 이는 혼화재가 공극을 채워줌으로써 물리적 구속능력을 향상시킨 결과로 사료된다. 이에 비해, FA 10%의 경우에는 OPC와 비슷한 수준의 확산계수를 보였는데, 이는 FA의 공극을 채워주는 효과가 아직 미비하고 압축강도 발현속도가 다른 혼화재 효과보다 늦어 발생한 것으로 판단된다.

따라서 확산계수 저감을 위해 광물질 혼화재를 사용할 경우에는 BFS 및 SF의 적절한 대체가 염화물 침투 저항성을 높일 수 있는 것으로 판단된다. 한편, 본 연구의 범위에서

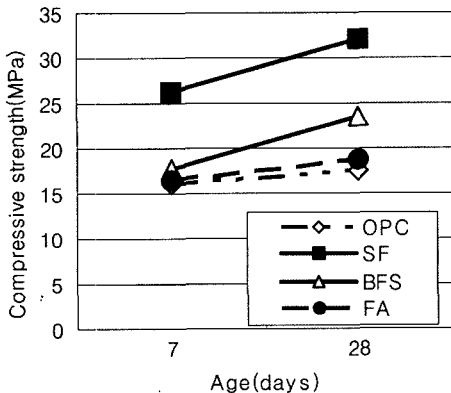


Fig. 5. 압축강도 측정 결과.

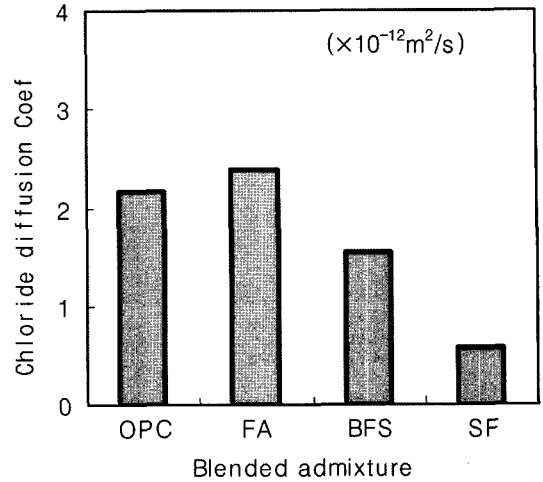


Fig. 6. 혼화재 종류에 따른 확산계수.

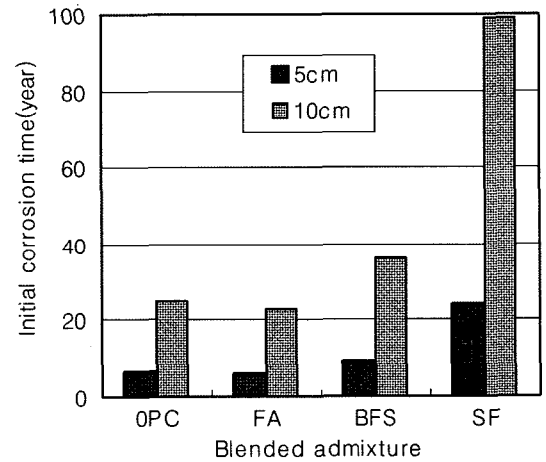


Fig. 7. 혼화재 종류에 부식개시시기.

는 제외되었으나, 각 혼화재의 개별 사용 외에 병용 사용에 따른 상호 보완효과를 극대화하는 방법, 즉, SF와 BFS의 삼성분계 또는 SF, FA 및 BFS의 사성분계 사용도 바람직할 것으로 사료된다.

한편, 본 연구를 통하여 얻어진 확산계수에 기초하여 Tuutti(1980)의 부식예측 모델을 이용하여 부식 개시시기를 예측하였다. 예측에 사용된 경계 조건에서는 해양 구조물이 건설될 경우 가장 높은 부식 가능성을 가지는 비말대로 가정하여 표면 염화물 농도( $C_0$ )를  $13 \text{ kg/m}^3$ , 부식을 발생시키는 임계 염화물 농도는 많은 연구자들이 제안하고 있는  $1.2 \text{ kg/m}^3$ , 콘크리트 피복두께는 각각 5, 10 cm로 가정하여 비교하였다. Fig. 6은 이러한 가정아래에서 예측한 혼화재별 부식 개시시기를 나타낸 비교 그림이다.

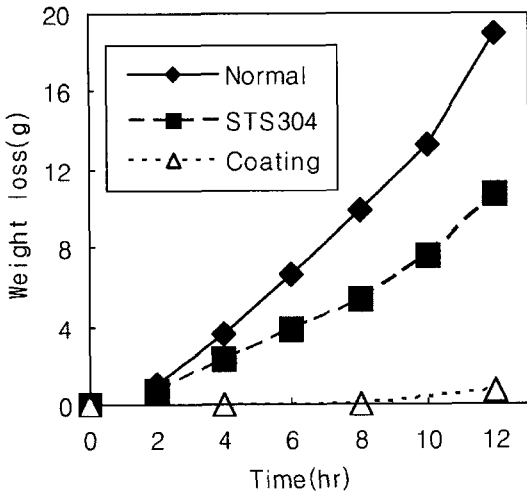


Fig. 8. 시간에 따른 중량 손실.

결과를 살펴보면, 슬래그 미분말과 실리카흙을 혼합한 경우 부식 개시시기를 보통 콘크리트에 비해 각각 1.5배, 4배 정도 지연시키는 것으로 나타났다. 따라서 최근 건설되는 해양구조물의 경우 염해 내구성 설계를 기본적으로 반영하는 추세임을 감안할 때, 설계시 적절한 혼화재의 대체와 적합한 피복두께를 제안하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.3 철근 종류 및 코팅에 따른 염해 저항성 평가

4.3.1 노출 부식상태에서의 철근 종류별 부식성 평가

철근콘크리트 부재의 부식 평가실험에 앞서 노출 부식상태에서의 사용 철근 고유의 부식 저항성을 비교하고자 3종류의 철근 시편을 제작하여 염화물 용액에서의 전위차 부식 실험(배수호, 2000)을 선행 수행하였다. Fig. 8은 일정한 전압 상태에서 12시간동안의 부식에 의한 중량 감소량을 나타내며, Fig. 9는 12시간의 통전시간과 중량감소량을 토대로 부식속도를 계산한 결과이다. 중량 감소의 경우, 보통철근 > 스테인리스강 > 에폭시코팅 철근의 순으로 나타났다. 부식속도는 보통 철근의 경우 약 360 mm/yr인 반면, 스테인리스강과 코팅 철근은 각각 220, 17 mm/yr의 느린 속도를 보였다. 코팅 철근의 경우는 약 20배 정도의 느린 부식속도를 보였는데, 이는 철근 외부에 코팅이 됨으로써 부식의 매개체 역할을 수행하는 염화물 이온의 접촉을 막고, 부식전위를 줄이기 때문으로 판단된다.

4.3.2 RC부재에서의 보강 철근 종류에 따른 부식 저항성

수용액 상태의 연구 결과를 토대로 철근의 종류에 따른 RC 부재에서의 부식 저항성을 살펴보았다. 철근의 종류는

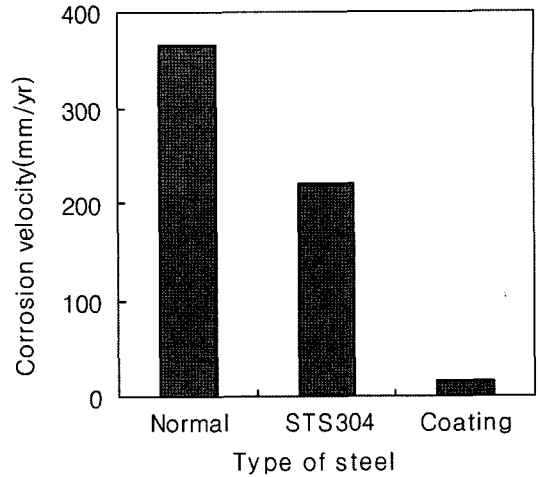


Fig. 9. 철근 종류별 중량감소에 의한 부식속도.

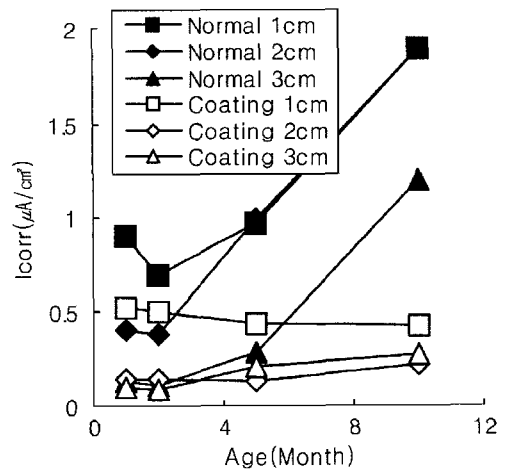


Fig. 10. 코팅유무에 따른 부식전류속도.

수용액에서와 동일하게 코팅철근과 스테인리스강, 보통철근을 콘크리트에 매립하여 실험하였다.

코팅철근의 유무에 따른 실험에서는 제작된 시험체를 반복 건습조건에서 연구가 수행되었다. 코팅유무에 따른 실험 결과는 분극 저항값을 측정함과 동시에 부식전류속도를 평가하였다. Fig. 10은 측정된 분극저항 값을 토대로 계산된 부식 전류속도를 나타낸 것이다. 보통철근을 사용한 경우의 결과를 CEB 기준에 따라 살펴보면, 피복두께가 작은 부재에서는 1개월 재령에서도 상당한 부식이 발생할 수 있으며, 피복두께가 3cm인 경우에도 재령 10개월 이전에 격렬한 부식이 발생하는 것으로 측정되었다. 이에 비해 피복 2cm 이상이고 재령 10개월이 경과한 시험체에서 코팅철근을 사용한 경우의 부식저항성은 보통철근의 경우보다 약

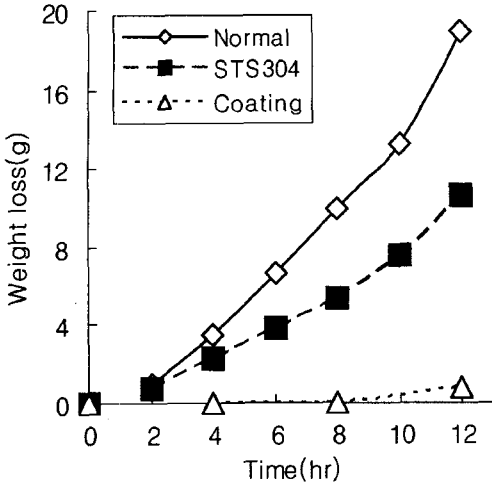


Fig. 11. 스테인리스강봉과 보통철근의 부식속도.

7.7배 이상 증진되는 것으로 나타났다. 즉, 코팅철근을 사용한 경우에는 어느 정도의 피복이 확보되면 상당기간 부식에 대해 안정된 저항을 할 수 있는 것으로 예상된다. 따라서 염화물 환경에 건설되는 구조물에서 보통철근보다 에폭시 코팅철근의 사용이 내구성 측면에서는 적극적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 에폭시 코팅철근을 사용할 경우에는 경제성과 콘크리트와의 부착성능을 추가로 검토할 필요가 있다.

한편, 보통철근 및 스테인리스 봉강의 RC 부재에서의 내부식성을 평가하기 위하여 철근콘크리트 시험체를 제작하고 시험체에 전위차 촉진부식실험을 실시하였다. 동일한 전압으로 74시간 동안 전류를 흘린 후 분극저항을 측정하여 Fig. 11의 부식전류속도 결과를 구하였다. 결과에 따르면, 보통철근에 비해 STS 304의 부식전류밀도는 전 기간에 걸쳐 매우 낮고 안정된 값을 나타내었으며, 따라서 앞선 수용액 상태에서의 결과와 마찬가지로 스테인리스 봉강이 일반철근에 비해 염해 저항성이 우수한 것으로 판단된다.

4.4 부식억제제 혼입에 따른 적용성 분석

4.4.1 부식억제제 혼입에 따른 응결시간 변화

Table 9. CEB에 의한 부식속도 판정 기준

부식속도 측정치( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	부식속도의 표정	분극저항( $\text{k}\Omega\text{cm}^2$ )
0.1~0.2미만	부동태상태(부식하지 않음)	130~260이상
0.2~0.5	저~중 정도의 부식속도	52~130
0.5~1	중~고 정도의 부식속도	26~52
1보다 클 때	격렬하고 높은 부식속도	26미만

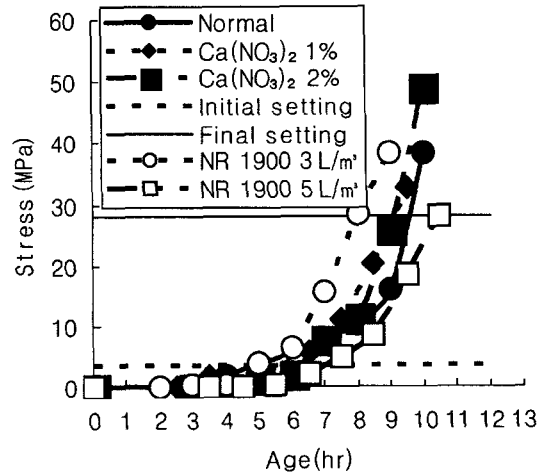


Fig. 12. 부식억제제 혼입에 따른 응결 특성.

부식억제제의 콘크리트 적용에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향 여부를 판단하고자 초기응결특성을 검토하였으며, 그 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 결과를 살펴보면, 질산칼슘을 혼입함에 따라 응결 시간이 약 1시간 정도 빠르게 나타나는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 기존의 연구결과와도 일치하는 결과이다(Saraswathy, 2007). 이에 비해 아질산염을 3 L/m<sup>3</sup> 사용한 경우에는 응결시간이 상당히 빨라졌으나 표준사용량 이상의 아질산염이 혼입된 경우(5 L/m<sup>3</sup>)에는 응결이 더디게 일어나는 현상을 보였다. 따라서 아질산염의 경우에는 표준 사용량 이상의 사용에 대해서는 추가적인 응결특성 검토가 필요할 것으로 판단된다.

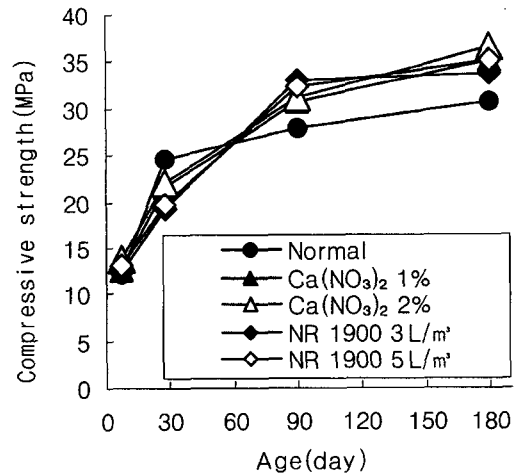


Fig. 13. 부식억제제 혼입에 따른 압축강도.

4.4.2 부식억제제 혼입에 따른 압축 강도

부식억제제 사용에 따른 압축강도특성을 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 결과에 따르면, 재령7일 압축강도의 경우 혼입량이 증가함에 따라 강도도 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 부식억제제를 혼입함으로써 수화반응이 빠르게 일어나고 그 결과 빠른 수화반응에 의해 강도발현이 빨리 나타나 강도가 증가한 것으로 판단된다. 한편 재령28일 압축강도의 경우에는 부식억제제 종류에 상관없이 모두 기준보다 작게 나타나는 경향을 보였으며, 그 이후 3개월, 6개월 재령에서는 부식억제제를 사용한 콘크리트의 압축강도가 크게 발현되는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상에 대해 추가적으로 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.4.3 부식억제제 혼입에 따른 방식효과

부식억제제의 혼입에 따른 역학적 특성과 아울러 방식 효과를 살펴봄으로써 적절한 부식억제제 종류 및 사용량에 대하여 살펴보고자 하였다. 부식 억제제는 질산칼슘과 아질산염 두 종류가 사용되었으며, 각 경우에 대하여 사용량을 2가지로 변화시켰고, 시험체의 피복두께를 2 cm, 3 cm로 변화시켜 실험하였다. Fig. 14는 부식억제제 혼입에 따라 측정되는 분극저항으로부터 구한 부식속도를 나타낸다. 이 결과는 w/c비 60%이며, 피복두께 3 cm, 보통철근을 매립한 콘크리트 시험체가 4개월 동안 염화물용액에 반복건습을 받은 경우에 대한 데이터이다.

실험결과에 따르면, 일정량 이상의 부식억제제를 혼입할 경우, 오랜 기간에 걸쳐 일정한 방식 효과를 보이는 것으로 나타났다.

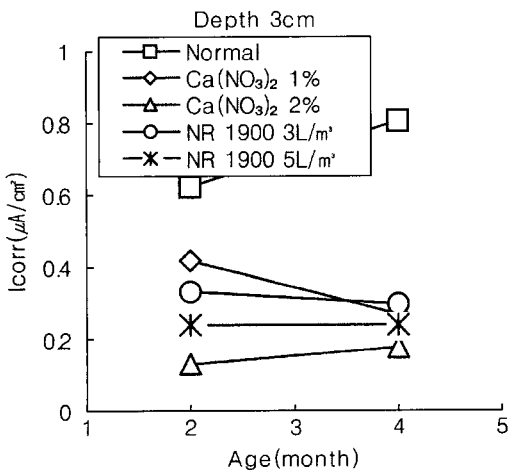


Fig. 14. 부식억제제 혼입에 따른 부식속도.

로 나타났다. 즉, 부식억제제 사용에 의해 시험체는 부동태 상태를 유지하거나 저~중 정도의 부식상태를 보이면서 안정화되는 반면 기준 시험체의 경우에는 중~고 정도의 부식을 보이면서 부식이 크게 증가하고 있음을 보이고 있다. 한편 질산칼슘의 경우는 2%를 혼입한 경우가 방식효과가 크게 상승하는 결과를 보였으며, 적절한 질산칼슘 사용량을 결정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 이에 비해 아질산염의 경우에는 표준사용량(3 L/m<sup>3</sup>) 이상을 사용하여도 방식효과가 비례하여 증가하지는 않는 것으로 판단된다. 따라서 각 부식억제제를 사용할 경우에는 부식억제제 종류에 따라 콘크리트 역학적 특성에 미치는 영향평가와 함께 방식특성을 정량적으로 평가하여 그 사용량을 결정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. BFS 30% 및 SF 10%를 시멘트에 대체한 경우, 확산계수가 각각 1.55와 0.56(×10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s)으로 보통포틀랜드시멘트(OPC) 대비 약 75, 30% 수준으로 감소하였으며, 측정된 확산계수를 통하여 부식개시 시기를 예측한 결과, 슬래그 미분말과 실리카흄을 혼입한 경우 부식 개시시기를 보통 콘크리트에 비해 각각 1.5배, 4배정도 지연시키는 것으로 나타났다.
2. 일반적인 부식 상황(염화물용액상태)에서 에폭시 코팅 철근이 보통 철근에 비해 20배 느린 부식속도를 보였으며, RC 부재 실험에서도 보통철근 대비 7배 이상 부식속도를 지연시키는 것으로 나타났다.
3. 스테인리스 강봉의 경우, 일반적인 부식상황에서 보통 철근에 비해 부식속도가 50% 감소하였으며, RC부재 실험에서는 보통 철근에 비해 매우 우수한 부식 저항성을 보였다.
4. 부식억제제 혼입의 경우, 응결시간은 대체적으로 빨라지며, 초기 강도 및 장기강도도 증가하는 경향을 보이지만 재령 28일 강도가 저하하는 결과를 보여 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.
5. 부식억제제의 혼입이 장기간에 걸쳐 방식 효과를 보이는 것으로 나타났으며, 질산칼슘의 경우는 시멘트 중량당 2% 혼입된 경우가 좋은 방식 효과를 보였고, 아질산염계 부식억제제는 표준사용량의 사용이 바람직한 것으로 나타났다.
6. 따라서, 적절한 혼화제의 사용과 보강철근의 사용, 부식억제제의 효율적 사용은 가혹한 염화물 환경에 건설되는



해양 구조물의 목표 내구수명의 연장을 가능하게 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 해양수산부 차세대 성장 동력 사업 “지능형 항만물류시스템 기술 개발”의 하이브리드 안벽구조물의 내구성 확보를 위한 최적 구조재료 개발 과제의 지원에 의해 연구되었음.

### 참고문헌

- 고영태, 박경환 (1994). 분극저항 측정법에 대한 고찰, 한국부식학회지, Vol.23, No.4, pp. 260-267.
- 문한영, 김홍삼, 김진철 (2002). 해양환경하에 위치한 콘크리트 구조물의 내구성 저하, 한국콘크리트학회 연구위원회 발표집, pp. 57-71.
- 배수호 등 (2000). 방청제에 의한 콘크리트 내의 철근 방식법에 관한 실험적 연구, 2000년도 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, Vol.12, No.1, pp.710-713.
- 배수호 등 (2000). 부식촉진실험에 의한 콘크리트 내의 철근의 부식특성에 관한 연구, 2000년도 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, Vol.12, No.2, pp.503-507.
- 양은익, 김명유, 임영문, 박해균 (2005). 콘크리트 구조물의 염화물 침투 특성 파악을 위한 변색법의 적용성, 한국콘크리트학회 논문집, Vol.17, No.6, pp.931-938.
- Browne, R.D. (1980). Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structure, ACI SP-65, pp.179.
- Saraswathy, V. and Song, H-W. (2007). Building and Environment Improving the durability of concrete by using inhibitors, 42, 464-472.
- Tang, L. and Nilsson, L.-O. (1992). Rapid Estimation of Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, ACI Materials Journal, Jan-Feb., pp.49-53.
- Tuutti, K. (1980). Service Life of structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel, Performance of Concrete in Marine Environment, SP-65, Journal of American Concrete Institute Detroit, pp. 223-236.

---

Received April 16, 2007

Accepted July 6, 2007