

# 해수에 방치한 콘크리트 시험체 중의 철근 부식 추정

The Estimation of Steel Corrosion in Concrete Specimen  
Exposed under Seawater

문 한 영\*  
Moon Hang-Young

김 성 수\*\*  
Kim Seong-Soo

류 재 석\*\*\*  
Ryou Jae-Suk

## Abstract

This study was performed for the purpose of obtaining the fundamental data to establish the criterion of concrete deterioration and presuming steel corrosion of concrete structures under the environment of seawater. It was exposed in seawater for 1 year that steel was embedded in the concrete specimen. The diffusion coefficients of concrete, corrosion potential and steel corrosion were considered. The results show that corrosion potential is reduced according to steel corrosion and corrosion area ratio is correlative with diffusion coefficients of concrete.

## 1. 서 론

해양 환경하에 축조된 철근콘크리트 구조물의 경우 구조물의 외부로부터 침투된 염분의 영향으로 인하여 콘크리트 내부에 묻힌 철근은 녹슬게 되고 이 녹이 진행되어 콘크리트 구조물이 균열, 박리등과 같은 열화현상으로 나타남으로써 구조물이 치명적인 손상을 받게 된다고 한다.

본 연구에서는 해수 중의 철근 콘크리트 구조물의 열화의 추정방법 및 평가 기준을 확립하기 위한 목적의 일환으로 철근을 묻는 콘크리트 시험체를 제조하여 인천 앞바다에 1년 동안 폭로실험을 실시하였다. 이때 콘크리트 시험체에 함유된 염분량과 염분확산계수를 구하였으며 아울러 콘크리트 속의 철근의 부식 정도를 추정하기 위한 방법으로 자연전위를 측정하여 철근 콘크리트 구조물의 열화 정도를 평가하는 기초자료를 얻고자 하였다.

\* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수  
\*\* 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정  
\*\*\*한양대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

## 2. 실험 개요

### 2-1. 사용 재료

(1) 시멘트 및 혼화재 : 실험에 사용한 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트이며 혼화재는 플라이애쉬와 실리카흄을 사용하였으며, 이들의 화학 성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

(2) 골재 : 굵은 골재는 최대치수 15mm의 강자갈이며, 잔골재는 한강산을 사용하였다.

(3) 강재 :  $\phi 10\text{mm}$  원형 강봉(SR24)의 표면을 아세톤으로 깨끗이 닦아 사용하였다.

### 2-2. 실험 방법

(1) 시험체의 제작 및 자연전위 측정:  $100 \times 100 \times 300\text{mm}$ 의 콘크리트 시험체 속에 직경 10mm의 원형 강봉을 매입 깊이 1cm, 4cm와 2cm, 3cm로 묻고 시멘트 풀과 에폭시로 코팅하여 그림 1과 같이 제작하였다. 이 콘크리트 시험체를 수중에 7일간 표준 양생한 후, 간단한 차이가 있는 인천 송도 앞바다에 1992년 5월부터 1993년 5월까지 1년간 방치하였다.

표 1. 시멘트 및 혼화재의 화학성분 및 물리적 성질

종류	항목	화 학 성 분 ( % )						비중	비표면적 (cm <sup>2</sup> /g)	
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>			g. loss
보통시멘트		21.80	5.84	3.56	60.62	3.54	2.58	0.95	3.12	3,422
고로시멘트		25.0	11.0	2.0	53.1	4.6	2.2	1.2	3.02	3,825
플라이애쉬		56.40	26.60	5.50	0.02	0.30	-	4.25	2.14	4,092
실리카흙		91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	-	2.3	2.51	204,700

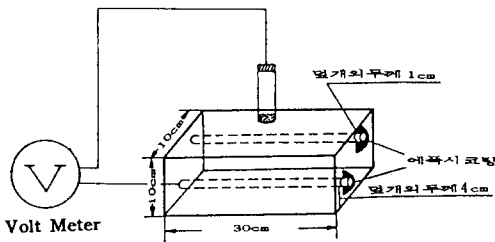


그림 1. 시험체의 크기 및 자연전위 측정장치

자연전위는 포화 황산동전극을 사용하여 그림 1과 같이 측정하였다.

(2) 콘크리트의 염분확산계수 : 콘크리트 표면으로 부터 각 깊이별 두께 1cm로 절단하여 채취한 미분말 시료 40g을 일본 콘크리트 학회 규준(안)의 경화한 콘크리트 중의 염분량 측정 방법에 의해 염분용액을 추출한 후, Salt Meter(CL-203)를 사용하여 염소이온 농도를 측정한 다음 염분농도(% NaCl)로 환산하였다. 표면에서 깊이 0-1cm에서의 염분량을 표면염분량이라 하였으며 콘크리트의 염분확산계수( $D_c$ )는 Fick의 확산이론에 의해 유도된 식(1)을 사용하여 역산하였다.

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \quad \text{---(1)}$$

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$$

$C(x,t)$ : 시간  $t$ , 거리  $x$ 에 있어서 염분량

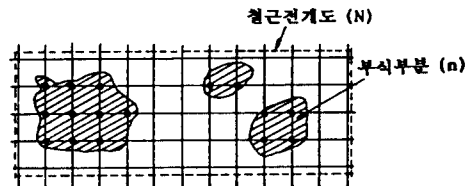
$x$ : 콘크리트 표면으로 부터의 거리(cm)

$C_0$ : 표면 염분량

$t$ : 경과시간(sec)

$D_c$ : 확산계수(cm<sup>2</sup>/sec)

(3) 철근의 부식면적을 : 콘크리트 속의 철근을 꺼내어 부식 부분을 트레이싱지로 스케치한 후, 방안지를 이용하여 그림과 같이 부식 부분에 포함된 교점수  $n$ 를 구하고 철근의 전개도에 포함된 교점수를  $N$ 으로 하여 다음 식에 의해 부식 면적을 계산하였다.



$$\text{부식 면적율(\%)} = \frac{n}{N} \times 100$$

(4) 콘크리트의 압축강도 :  $\phi 10 \times 20$ cm 원주형 공시체를 제조한 후, 표준양생하여 재령 7일 및 28일의 압축강도를 KS F 2505에 따라 측정하였다.

### 2-3. 콘크리트의 배합

포틀랜드 시멘트(OC), 고로슬래그 시멘트(SC)와 플라이애쉬를 20% 혼합한 시멘트(FC20) 및 실리카흙을 10% 혼합한 시멘트(SF10) 콘크리트를 표 2와 같이 배합하였다.

표 2. 콘크리트의 배합

종류	항목	Gmax (mm)	Slump (Cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (Kg/m <sup>3</sup> )					
							W	C	S	G	Ad.	SP(CX%)
OC-40		15	10±2	2.2	40	41	160	400	754	1105	-	0.68
OC-45		"	"	2.0	45	"	167	370	757	1110	-	0.56
OC-50		"	"	2.3	50	"	175	350	755	1107	-	0.41
OC-55		"	"	2.1	55	"	176	320	753	1121	-	0.20
SC-50		"	"	1.8	50	"	175	350	748	1103	-	0.41
FC20-50		"	"	2.1	50	"	175	280	743	1108	70	0.43
SF10-50		"	"	1.9	50	"	175	315	753	1104	35	0.48

### 3. 실험결과에 대한 고찰

#### 3-1. 자연전위에 의한 철근의 부식 추정

염분의 영향을 받는 콘크리트 속에 묻혀있는 철근은 염분의 침투에 의해 부동태 피막이 파괴됨으로써 철근이 부식된다. 콘크리트 속의 철근의 부식은 전해질 용액이 존재하기 때문에 전기화학적 부식이 일어난다. 그러므로 철근과 콘크리트의 접촉부분에서 발생하는 자연전위를 측정하므로써 철근의 부식을 추정할 수 있다.

그래서 물-시멘트비와 결합재가 각각 다른 종류 콘크리트 시험체를 제조하여 간단한 차가 있는 해변에 1년동안 폭로 방치하여 재령별로 자연전위를 측정, 정리한 것이 그림 2 및 그림 3이다.

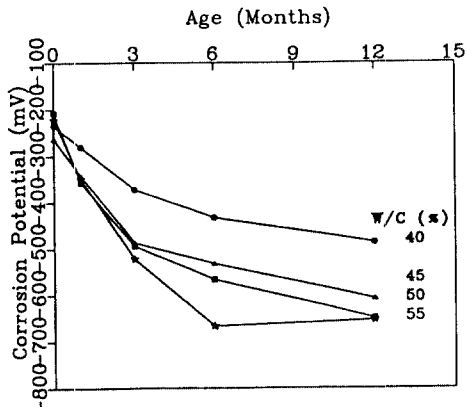


그림 2. 재령에 따른 자연전위의 변화 (보통시멘트 콘크리트)

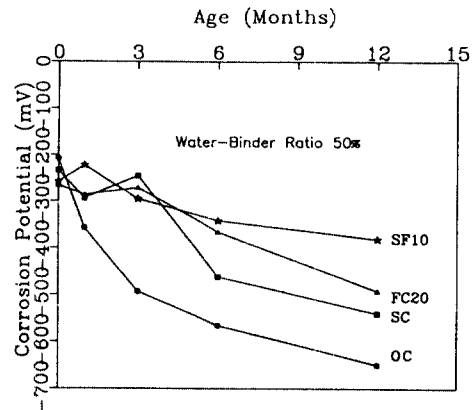


그림 3. 재령에 따른 자연전위의 변화

물-시멘트비가 각각 다른 OC 콘크리트의 경우 재령 3개월까지 자연전위가 급격히 감소하고 있으며 물-시멘트비가 40%인 경우 자연전위의 감소가 가장 적게 나타났다. 그림 3의 결합재의 종류별 재령에 따른 자연전위의 변화는 OC 콘크리트의 경우 재령 초기부터 급격히 감소되고있는 반면 혼화재를 혼합한 콘크리트는 재령 3개월까지는 자연 전위의 변화가 거의 없으며 SC 콘크리트의 경우 재령 6개월에서 급격히 감소되고 있는 것을 알 수 있다.

그림 4 및 그림 5은 물-시멘트비가 50%인 OC 콘크리트와 FC 콘크리트의 자연전위와 철근의 부식 전개도를 나타낸 것이다.

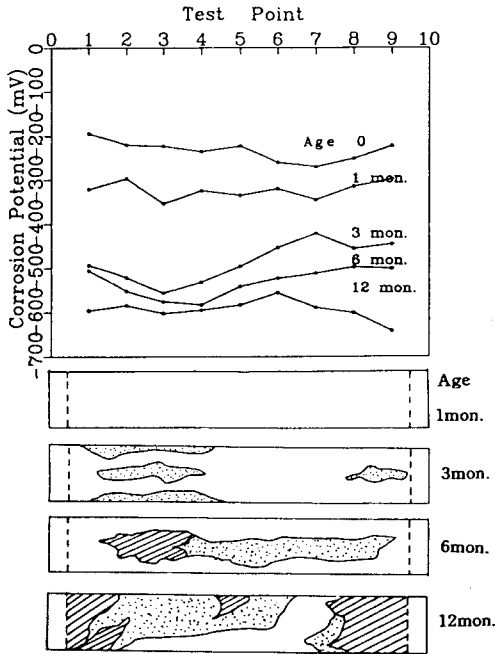


그림 4. 자연전위와 철근의 부식 전개도 (OC 콘크리트, W/C=50%)

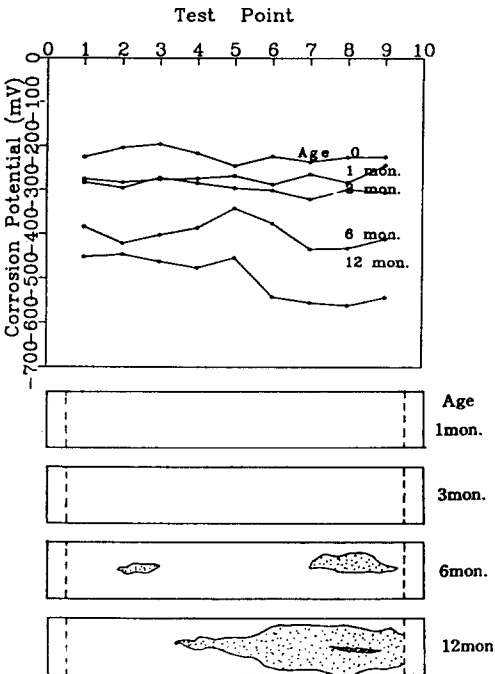


그림 5. 자연전위와 철근의 부식 전개도 (FC20 콘크리트, W/C=50%)

그림 4에서는 철근의 부식이 발생된 재령 3개월 및 6개월의 경우 부식이 발생된 부분에서의 자연전위 절대값이 크게 나타남을 알 수 있으며 그림 5의 FC콘크리트에서도 같은 경향을 나타내었다.

콘크리트 공시체속에 묻어둔 철근의 부식정도를 각 재령별로 조사하여 부식 면적율을 정리한 것이 그림 6 및 그림 7이다. 그림 6에서 철근의 부식면적율은 물-시멘트비가 클수록 크게 나타났으며, 재령이 증가할수록 크게 증가하였다. 그림 7은 동일 물-시멘트비 50%인 결합재의 종류별 철근 부식 면적율을 비교한 것으로서 OC 콘크리트의 경우 강재의 부식면적율이 재령 1년에 80% 정도임에 비하여 SF10 콘크리트는 3% 정도에 지나지 않은 적은 값을 나타내었으며, SC 콘크리트 및 FC20 콘크리트는 OC 콘크리트에 비해 매우 적게 나타났다.

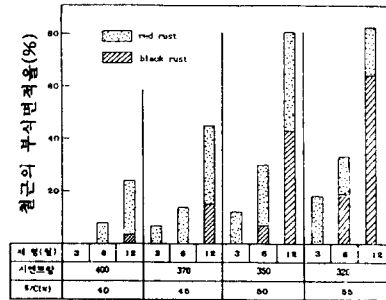


그림 6. 콘크리트중의 철근의 부식면적율

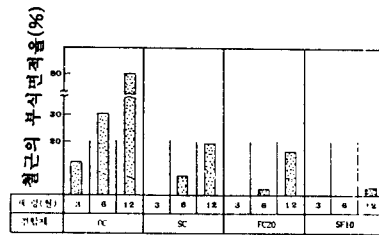


그림 7. 콘크리트중의 철근의 부식면적율 (W/C=50%)

그래서 1년간 해수에 방치한 콘크리트 공시체의 자연전위와 철근 부식면적율과의 관계를 정리한 것이 그림 8이다. 그림 8에서 자연전위의 값이 -350mV 이상에서 부식이 발생되고

있는 것을 알 수 있으며 자연전위의 절대값이 커짐에 따라 부식면적율이 증가됨을 알 수 있다. 따라서 자연전위에 의해 철근 부식의 정도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

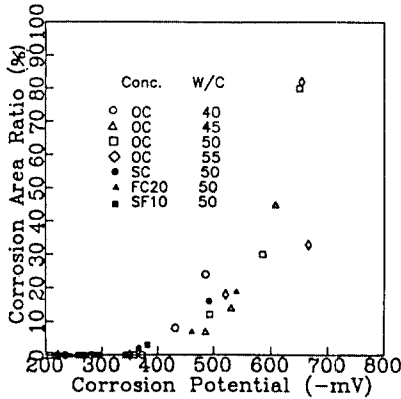


그림 8. 자연전위와 부식면적율과의 관계

### 3-2. 염분확산계수와 철근의 부식

해안부근의 환경하에 있는 철근 콘크리트 구조물은 외부로부터 침투한 염분에 의해 열화된다. 철근 콘크리트구조물의 염해방지대책에 있어서 가장 중요한 것은 염분의 침투확산의 저지라 할 수 있겠다. 각종 콘크리트의 염분확산계수를 알아보기 위하여 콘크리트 공시체를 1년간 해변에 폭로 방치한 후 염분확산계수를 구하여 정리한 것이 그림 9 및 그림 10이다.

그림 9에서 시멘트-물 비에 따른 보통시멘트 콘크리트의 염분확산계수를 나타낸 것으로서 확산계수( $D_c$ )는  $3.44-6.74 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$  정도

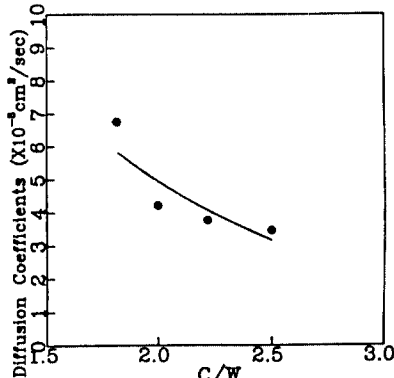


그림 9. 시멘트-물비와 염분확산계수와의 관계

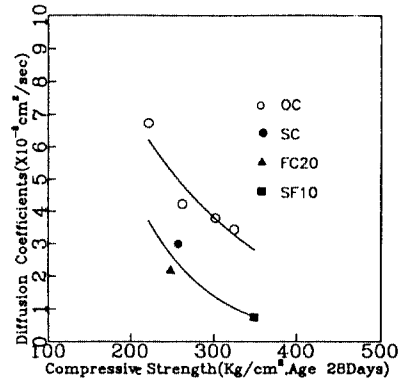


그림 10. 압축강도와 염분확산계수와의 관계

이며 시멘트-물비가 클수록 감소되고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 콘크리트 압축강도에 따른 염분확산계수를 나타낸 것으로서 보통시멘트 콘크리트의 경우 강도가 클수록 확산계수가 작으며 혼합시멘트 콘크리트가 보통시멘트 콘크리트에 비해 염분확산계수가 대체로 작게 나타났다. 한편 실리카흄을 10% 혼합한 콘크리트의 염분확산계수는  $0.74 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$  정도로 보통 콘크리트에 비해 훨씬 적게 나타났다. 그림 11은 염분확산계수와 철근의 부식면적율과의 관계를 나타낸 것으로서 염분의 확산계수가 클수록 철근의 부식면적율이 대체로 크게 나타났다.

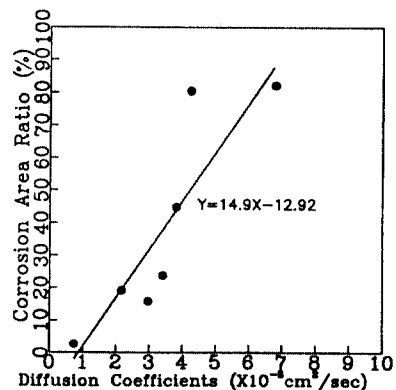


그림 11. 염분확산계수와 부식면적율과의 관계

콘크리트중의 염분침투기구를 확산이론에 의해 해석함에 따라 콘크리트 열화의 정도나 철근의 부식 정도를 추정하는데 참고 자료가 될

근의 부식 정도를 추정하는데 참고 자료가 될 뿐 만 아니라 철근에 대한 콘크리트의 피복두께, 물-시멘트비의 선정 또는 내구연수의 추정 등 염해 대책에도 활용이 가능할 것으로 생각된다. 다만, 표면 염분량과 확산계수값에 대해서는 콘크리트의 품질, 외부의 환경조건 등 영향을 미치는 인자가 많기 때문에 이들에 관한 자료의 축적과 연구가 요망된다.

#### 4. 결론

1. 해수에 폭로한 콘크리트 중의 철근의 자연전위는 재령에 따라 크게 감소되며 철근이 부식된 부분에서의 자연전위의 값이 적게 나타났다.
2. 철근의 부식은 물-시멘트비가 클수록 크게 나타났으나 혼화재를 혼합한 콘크리트에서 부식면적율이 감소되는 결과를 나타내었다.
3. 자연전위의 값이  $-350\text{mV}$  이상에서 철근의 부식이 발생되었으며 자연전위값에 의해 철근의 부식을 추정하는 참고 자료를 얻었다.
4. 염분확산계수는 물-시멘트비가 적을수록 압축강도가 클수록 적게 나타났으며 염분확산계수와 철근 부식면적율과의 사이에는 약간의 상관관계가 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 文輪英, 金成秀, 柳在碩, "人工海水에 浸漬한 모르타 중의 鐵筋 腐蝕에 대한 研究," 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제5권 1호, 1993
2. Visanty Sivasundaram, Georges G. Carette, and V. Molhotra, "Mechanical Properties, Creep, and Resistance to Diffusion of Chlorid Ions of Concretes Incorporating

High Volums of ASTM Class F Fly Ashs from Seven Different Sources." ACI Journal, July-August 1991

3. Brian B. Hope and Alan K.C. Ip, "Corrosion of Steel in Concrete Made with Slag Cement." ACI Journal, November-December 1987

4. 迫田 恵三 外2名, "海洋環境下における各種暴露コンクリートの鹽分浸透と鐵筋の腐食の進行狀況", 콘크리트工學年次論文報告集, 日本콘크리트工學協會, 1988

5. 川上英男, "鐵筋콘크리트建物の鹽分蓄に關する-考察," 콘크리트工學年次論文報告集, 日本콘크리트工學協會, 1985

6. Berke, N.S., "Long-Term Corrosion Resistance of Steel in Silica Fum and Fly Ash Containing Concrete," Durability of Concrete 2nd International Conference, ACI SP-126, 1991

7. C. Andrade, "Effect of Fly Ash in Concrete on the Corrosion of Steel Reinforcement," Durability of Concrete 2nd International Conference, ACI SP-126, 1991

8. Geiker, M., Thaulow, N., Andersen, P.J. "Assessment of Rapid Chloride Permeability Test of Concrete with and without Mineral Admixtures," Proceedings of the Fifth International Conference on Durability of Building Materials and Components, 1990

9. Angui. L, Study on Corrosion Prevention in Reinforced Concrete Containing Condensed Silica Fume and Its Application, Durability of Concrete 2nd International Conference, ACI SP-126, 1991

10. Gjorv. O.E., Vennesland, O., Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete, Cement and Concrete Reearch, Vol. 9, No.2, 1979