

# 염화물 고정화를 고려한 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 예측

## Service Life Prediction of R.C. Structures Considering Chloride Binding

이창수\* · 박종혁\*\* · 김영욱\*\*

Lee, Chang Soo · Park, Jong Hyok · Kim, Young Ook

### Abstract

Chloride-induced corrosion of steel bars in concrete exposed to marine environments has become one of the major causes of deterioration in many important facilities made of reinforced concrete. A study on chloride penetration in concrete has developed through long period exposure test along seawater, assesment of chloride ion diffusion by electrochemical techniques and so on. However, reasonable and exclusive chloride penetration model considering concrete material properties with mixture, degree of hydration, binding capacity has not been established. Therefore, in this paper, chloride penetration analysis of non-steady state is accomplished with material properties of concrete. Comparing with the results of analysis and chloride ponding test, we could accept the effect of binding capacity on chloride penetration in concrete and these results could be applied to a service life prediction of R.C. structures submerged in seawater. Therefore, there are 20~40% differences of service life to SHRP prediction.

**key words** : Chloride penetration, Binding model, Non-steady state analysis, Chloride ponding test, Service life prediction

### 요 지

자연환경 중 다양한 형태로 존재하는 염화물은 콘크리트 구조물의 철근 부식을 야기하며 이에 따른 심각한 내구성 저하와 함께 구조물의 수명을 감소시킨다. 현재 콘크리트 중의 염화물 침투 특성을 규명하기위한 연구는 해안가 장기 폭로 시험과 전기화학적 촉진 시험에 의한 확산계수 평가 등에 의해 지속적인 발전을 이루어왔으나 콘크리트의 배합, 수화도, 고정화능력, 공극률의 재료적 특성을 고려한 이성적이며 포괄적인 염화물 침투 모델에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실내 염화물 침투 실험을 통해 콘크리트의 염화물 고정화 특성을 파악하고 이를 고려한 염화물 침투 모델로서 비정상상태의 염화물 침투 해석과 함께 해양침지환경하의 철근콘크리트 구조물의 내구수명 예측을 시도하였으며 SHRP 기준과 20~40%의 내구수명의 차이를 보였다.

**핵심용어** : 염화물 침투, 고정화 모델, 비정상 상태 해석, 염화물 침투 실험, 내구수명 예측

### 1. 서 론

협소한 국토의 효율적인 이용을 위하여 해상 공항, 도서를 잇는 교량 및 항만 등의 해양 구조물이 신설되어 왔으며 그 필요성은 계속 증대하고 있다. 그러나 이들 구조물은 항상 염화물에 의한 피해를 받을 수 있는 가혹한 조건하에 있으므로 이에 대한 대책 또한 시급한 실정이다.(이창수 등, 2000) 현재 콘크리트 중의 염화물 침투에 의한 내구수명에 관한 연구는 해안가 장기 폭로 시험과 전기화학적인 촉진 시험에 따른 확산계수 평가에 의해 지속적인 발전을 이루어 왔다.(Andrade, 1993 ; 문한영 등, 2001) 그러나 장기 폭로시험의 경우 지나치게 많은 시간이 소요되며 촉진시험의 경우 촉진 환경과 실제 환경과의 차이점으로 인한 적용성에 다소 한

계가 있다.(Grace, 1991 ; Mackechine, 1997) 따라서 본 연구에서는 시간 단축을 위한 합리적인 염화물 침투 모델링과 함께 실제 환경에서의 염화물 침투 특성을 파악하여 이를 콘크리트 내구수명 예측에 적용하고자 하였다.

우선 염화물에 의한 콘크리트 내구수명 평가는 크게 두 가지의 항목으로 분류할 수 있다. 첫째, 시간에 따른 콘크리트 중의 염화물 침투 속도를 산정하는 것이고, 둘째, 철근부식 개시를 야기하는 임계 염화물량에 대한 정량화이다. 현재 임계 염화물량에 대한 연구는 콘크리트의 배합과 주위환경에 따라 약 0.15~0.2%의 시멘트 질량대비 자유염화물량의 값을 갖는다고 보고되고 있다.(Perez, 2000) 본 연구에서는 임계 염화물량에 대한 논의는 추후 과제로서 논외로 하였으며 콘크리트 중의 염화물 침투 속도 산정에 논점을 맞추었다. 이

\*정회원 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수(교신저자)(E-mail : csll@uos.ac.kr)

\*\*서울시립대학교 대학원 토목공학과 박사과정

를 위한 방법으로 먼저 콘크리트의 배합, 양생 기간, 양생 온도의 초기조건과 시간경과에 따른 콘크리트의 온도, 습도, 수화도 및 고정화 능력을 고려한 염화물 확산계수를 변형된 Fick의 2법칙에 적용하였고 이에 따른 비정상 상태의 염화물 침투 지배방정식을 유한요소 해석을 이용 해결하여 내구수명 예측에 사용하였다.

본 연구의 특징은 염화물 침투 속도에 큰 영향을 미치는 콘크리트의 염화물 고정화 능력을 실제 해수 농도에서의 침지 실험을 통해 반영한 점이다. 따라서 본 연구를 통한 내구수명 예측은 실제 해양 침지 조건하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 염화에 대한 적절한 보수 시기의 결정은 물론 신설될 해양 구조물의 내구성 배합 설계에 큰 도움이 될 것이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 콘크리트 중의 염화물 침투 메커니즘

콘크리트를 비롯한 다공질 매체로의 물질 이동 메커니즘은 재료적 특성과 환경조건에 의해 결정된다. 즉 재료의 물질 고정화 능력(binding capacity), 공극구조에 따른 침투성(permeability), 그리고 온도, 압력, 함수비, 물질의 이동능력과 양에 따라 다양한 침투 메커니즘을 갖게 되며 본 연구에서는 이온 확산에 따른 염화물의 이동에 초점을 맞추고자 한다.

다공질 매체를 통한 이온 확산은 농도차이에 의해 일어나며 Fick의 제1법칙을 따른다.(Bazant, 1971)

$$J_{cl} = -D \cdot \nabla(C_f) \quad (1)$$

질량보존 관점에서 Fick의 제2법칙에 의해 염화물 확산에 관한 지배방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = -\text{div}(J_{cl}) \quad (2)$$

식(1)을 식(2)에 대입하면

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = -\text{div}[D \cdot \nabla(C_f)] \quad (3)$$

궁극적으로 염화물 확산에 관한 지배방정식은 식(3)이 되며 이를 살펴보면 전염화물 농도  $C_f$ 와 자유염화물 농도  $C_s$ 가 연관되어 있으므로 이 두 변수와의 관계를 식(4)와 같이 정의한다.

$$C_f = w_{sat} \cdot C_s + C_s \quad (4)$$

식(4)를 식(3)에 대입하면 식(5)와 같은 변형된 Fick의 2법칙을 얻을 수 있다.(Saetta, 1993)

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = -\text{div}[D_a \cdot \nabla(C_f)] \quad (5)$$

여기서  $D_a$ 는 겉보기 염화물 확산계수로서 식(6)의 염화물 고정화를 고려한 확산계수이며 본 연구에서는 Table 1과 같은 3가지 고정화 모델을 사용한다.

Table 1 Chloride binding isotherm model

Linear isotherm	$C_s = \alpha C_f$
Langmuir isotherm	$C_s = \frac{\alpha C_f}{1 + \beta C_f}$
Freundlich isotherm	$C_s = \alpha C_f^\beta$

$$D_a = \frac{D_i}{1 + \frac{1}{w_{sat}} \cdot \frac{\partial C_s}{\partial C_f}} \quad (6)$$

이제 식(5)로써 염화물 확산에 관한 지배방정식이 결정되었으며 유한요소 해석을 통해 콘크리트배합, 양생, 콘크리트 수화도, 온도, 습도, 고정화능력을 고려한 비정상 상태의 염화물 침투 특성을 파악하고자 하였다.

### 2.2 염화물 확산계수 산정

염화물 확산계수는 콘크리트 내부로의 이온 확산 속도를 나타내주는 가장 중요한 지표이며 콘크리트의 배합조건, 양생 기간, 양생온도의 초기조건과 양생이후의 온도, 습도에 따라 시간 의존적으로 변하게 된다. 따라서, 이러한 비정상상태의 염화물 확산계수를 묘사하기 위해 Fig. 1과 같은 방법으로 염화물 확산계수를 산정한다.

우선 콘크리트의 배합, 양생온도, 양생기간의 초기조건을 고려한 염화물 확산계수의 산정을 위해 Luciano가 통계적으로 구한 식(7)을 사용한다.(Luciano, 1999)

$$D_{i,ref} = (5.670 + 5.810x_1 - 0.567x_2 - 1.323x_3 + 0.740x_4 - 2.117x_5 - 2.780x_6 + 0.254x_7 + 0.368x_8 + 1.071x_1x_4 - 2.891x_1x_6 - 1.503x_4x_6)^2 \quad [mm^2/year] \quad (7)$$

여기서, 각 변수에 대한 내용은 Table 2와 같다

콘크리트의 염화물 확산계수는 양생이후 주위 환경, 즉 온도와 습도에 따라 그리고 콘크리트의 재령에 따른 수화도에 의해 지속적으로 변하게 된다. 그러므로 온도에 따른 염화물

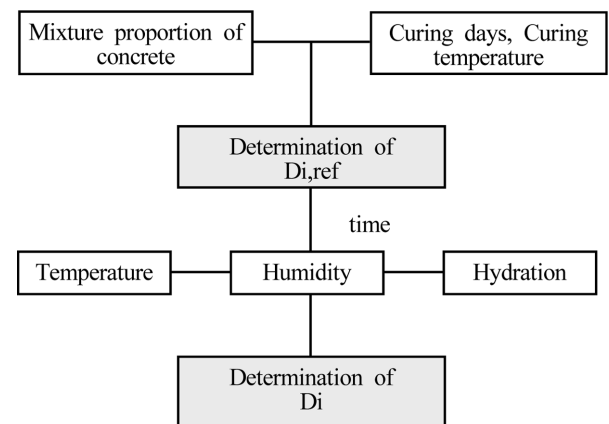


Fig. 1 Determination of chloride diffusion coefficient

Table 2. Selected mixture proportion factors, ranges, and code values

Mixture proportion factor	Range	Standardized value
Water-cementitious materials ratio(W/C)	0.25~0.65	$x1=(W/C-0.45)/0.2$
Cementitious materials contents (C), kg/	250~600	$x2=(C-425)/175$
Silica fume, weight % of total C	0~10	$x3=(\text{silica fume}\%-5)/5$
Fly ash, weight % of total C	0~45	$x4=(\text{fly ash}\%-22.5)/22.5$
Granulated blast furnace slag weight % of total C	0~75	$x5=(\text{slag}\%-35)/35$
Curing time, days	3~1100	$x6=\log_{10}(\text{curing time}-2)/3$
Concrete mixture temperature, °C	10~38	$x7=(\text{temperature}-24)/14$
Coarse aggregate angularity	angular round	$x8=1$ if angular aggregate $x8=0$ if rounded aggregate

확산의 활성화 에너지와 콘크리트의 부분 포화 조건, 그리고 수화도에 따른 염화물 확산계수 변화를 고려한 식 (8),(9),(10),(11)을 사용한다.

$$D_i = D_{i,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(h) \cdot f_3(t_e) \quad (8)$$

$$f_1(T) = \exp\left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (9)$$

$$f_2(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4}\right]^{-1} \quad (10)$$

$$f_3(t_e) = \zeta + (1-\zeta) \cdot \sqrt{\frac{28}{t_e}} \quad (11)$$

### 2.3 유한요소 정식화

본 연구에서는 콘크리트의 염화물 침투 특성을 평가하기 위해 포물선 형태의 편미분 방정식을 풀어야 하며 이를 살펴보면 식(12)와 같다

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = -\text{div}[D_a \cdot \nabla(C_f)] \quad (12)$$

정식화를 위해 1차원 가정을 하고 식(12)에 표준간차법을 적용시키면,

$$\int_e w_i \cdot \left[ \frac{\partial C_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( D_a \cdot \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \right] \cdot dx = 0 \quad (13)$$

윗 식에서 미지수인  $C_f$ 를 시간과 공간에 대하여 변수 분리를 행하기 위해 보간함수를  $N_i$ ( $i$ 번째 요소)로 하면,

$$C_f(x, t) = \sum N_i(x) \cdot C_i(t) \quad (14)$$

여기서 가중치에 대해 갤러킨 방법을 사용하면 식(13)은 식(15)와 같다.

$$\int_e N^T \cdot \left[ N \cdot \frac{\partial C_f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( D_a \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot N \cdot C_f \right) \right] \cdot dx = 0 \quad (15)$$

식(15)에 부분 적분을 실시하고 시간에 대한 미지수  $C_f$ 에 대해 정리하면 식(16)과 같은 일차미분방정식으로 수식화된다.

$$V_c \cdot \frac{\partial C_f}{\partial t} + K_c \cdot C_f = q \quad (16)$$

$$\text{여기서, } V_c = \int_e N^T \cdot N \cdot dx$$

$$K_c = \int_e B^T \cdot D_a \cdot B \cdot dx$$

$q$  : external force vector

이제 식(16)의 시간단계별 해를 얻기 위해 이산화시키면 각 시간간격  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ 에 대해 식(17)과 같은 선형연립방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & [V_c^{n+1} + w \cdot \Delta t \cdot K_c^{n+1}] C_f^{n+1} \\ & = [V_c^n - (1-w) \cdot \Delta t \cdot K_c^n] C_f^n + \Delta t \cdot [w \cdot q^{n+1} + (1-w) \cdot q^n] \end{aligned} \quad (17)$$

### 2.4 염화물 침투 실험

본 실험에서는 실제 해수를 묘사할 수 있는 0.5M 염화물 농도의 침전액에 콘크리트를 침지하고 콘크리트의 염화물 고정화 능력을 평가하기 위하여 시간에 따른 전염화물 농도와 자유염화물 농도를 측정하였다.

#### 2.4.1 사용재료

##### 1) 결합재

보통포틀랜드 시멘트(이하 OPC), 고로슬래그(이하 BS), 플라이애시(이하 FA) 및 실리카 흙(이하 SF)를 사용하였으며 각 결합재별 물리적, 화학적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 Chemical composition and physical properties of cement

Item Type	Chemical composition (%)							Specific gravity	Specific surface (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>	Ig.loss		
OPC	21.8	5.8	3.56	60.6	3.54	2.6	1.0	3.14	3,422
BS	25.0	11.0	2.0	53.1	4.6	2.2	1.1	2.79	3,825
FA	68.0	25.0	2.9	2.0	0.9	-	3.5	2.29	4,546
SF	94.0	0.9	1.3	-	0.1	-	-	2.21	20,800

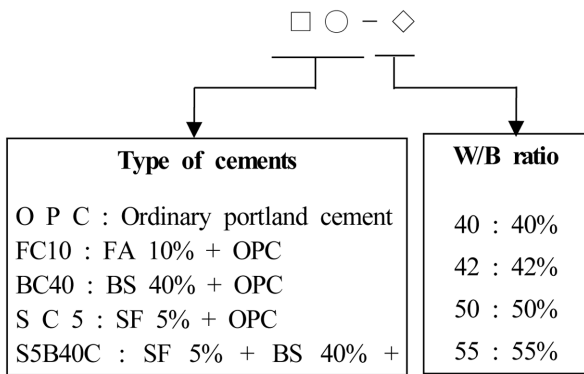
Table 4 Physical properties of aggregate

Agg. \ Item	Gmax (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M	Organic impurities	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Fine agg.	-	2.59	1.50	2.50	good	1,620
Coarse agg.	25	2.74	0.90	7.20	-	1,734

Table 5 Mix proportion of concrete

Type \ Items	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				AE Ad (C×:%)	SP Ad. (C×:%)
						W	C	S	G		
OPC-45	25	12±2	4.5±1	45	42	171	380	697	1012	0.02	-
OPC-50	25	12±2	4.5±1	50	42	190	380	677	983	0.02	-
OPC-55	25	12±2	4.5±1	55	42	209	380	657	954	0.02	-
FC10-42	25	12±2	4.5±1	40	42	160	342	705	1204	0.02	0.69
BC40-42	25	12±2	4.5±1	40	42	160	228	704	1022	0.02	0.67
SC5-45	25	12±2	4.5±1	45	42	171	361	694	1009	0.023	0.47
S5B40C-45	25	12±2	4.5±1	45	42	171	209	689	1001	0.023	0.39

※ Description of mix proportion :



$$w_{sat} = \frac{m_{sat} - m_{dry}}{m_{sat} - m} \quad (18)$$

### 2.5.2 자유염화물 농도와 전염화물 농도의 측정

각 배합에 대하여 100×100×200 mm의 공시체를 제작하여 1일 후 탈형하고, 온도 23±1 C의 수중에서 28일간 양생한 후에 염화물의 일방향 침투를 유도하기 위해 5개면을 에폭시로 실링하고 NaCl 0.5M의 수용액에 6개월, 9개월간 침지시켜 깊이별 자유염화물 함유량 및 전염화물 함유량을 측정하였다. 자유염화물 함유량은 콘크리트 표면으로부터 5 mm 간격으로 시료 40 g을 채취한 후 일본 콘크리트공학협회 표준(안)[경화콘크리트 중의 염분량 측정방법]에 의해 염화물을 추출한 다음, 이온전극법을 이용한 미국 F사 제품 AR-25를 사용하여 측정하였다. 또한 전염화물 함유량(산에 녹는 염화물 함유량)은 콘크리트 표면으로부터 5 mm 간격으로 시료 3 g을 채취한 다음, 미국 J사의 CL-1000을 사용하여 전염화물량을 측정하였다.

## 3. 연구결과

### 3.1. 염화물 침지 실험 결과 분석

각 배합별로 측정된 수분침투 공극량과 자유염화물 농도 그리고 전염화물 농도로서 식(19)와 같이 고정염화물을 산출하여 자유염화물과 고정염화물의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

$$C_b = C_t - W_{sat} \cdot C_f \quad (19)$$

여기서 고정화 모델에 사용한 고정화 상수는 Table 6에 정리하였다.

일반적으로 해양 침지 환경에서 콘크리트의 염화물 고정화는 시멘트 종류, 광물질 혼화재 치환율, 시멘트량과 물-시멘트비, 양생조건 등의 영향을 받는다고 알려져 있다. 즉, 시멘트 종류나 시멘트량에 따른 C3A의 증감이나 혼화재 치환에

2) 골재  
굵은 골재는 부순돌, 잔골재는 강모래를 사용하였으며 각각의 물리적 성질은 Table 4와 같다.

### 3) 혼화제

목표 공기량을 확보하기 위하여 주성분이 리그닌술포산 칼슘인 표준형 AE감수제를 사용하였으며 고성능감수제를 사용하여 목표 슬럼프를 확보하였다.

### 2.4.2 콘크리트 배합

물시멘트비와 광물질 혼화재 치환에 따른 염화물 침투 특성의 변화를 파악하기 위해 Table 5와 같은 배합을 선정하였다.

## 2.5 실험방법

### 2.5.1 공극률 측정

표면건조 포화상태의 시험체 무게( $m_{sat}$ )와 7일 동안 수중침지 상태에서의 무게( $m_{sub}$ ), 105°C에서 3일간 완전 건조시킨 무게( $m_{dry}$ )를 각각 측정하여 수분 침투 공극률을 식(18)과 같이 산정하였다.

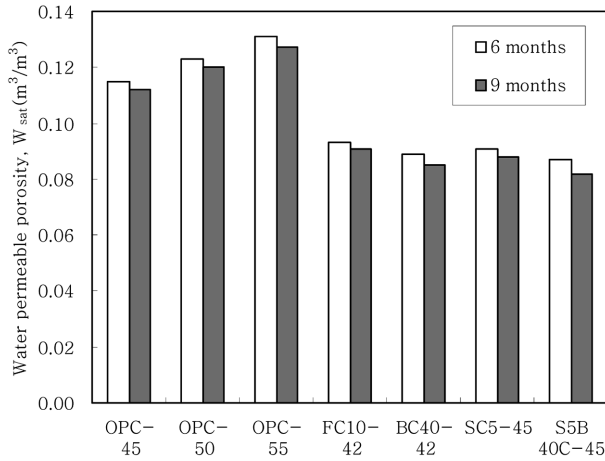


Fig. 2. Water permeable porosity by concrete

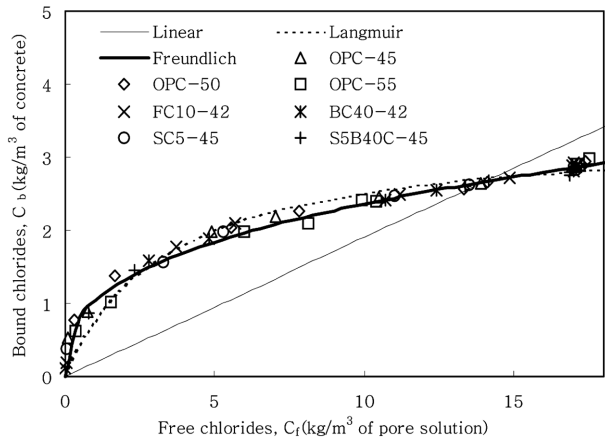


Fig. 3. Binding isotherm by chloride ponding test

Table 6 Used binding constants

Binding constants	Model		
	Linear isotherm	Langmuir isotherm	Freundlich isotherm
$\alpha$	0.19	0.99	1.08
$\beta$	-	0.30	0.36

다른 CSH 겔의 표면적 증감에 따라 물리·화학적 인 염화물 고정화가 영향을 받는다는 견해이다. 그러나 Fig. 3를 살펴보면 콘크리트 배합에 따라 Langmuir와 Freundlich 고정

Table 7 Parameters used in F.E.M. of chloride diffusion in seawater concrete

Type	Items	$\xi$	U/R (deg K)	$W_{sat}$	Binding constant	
					Langmuir	Freundlich
OPC-45		0.7	3000	0.115	$\alpha=0.99$ $\beta=0.30$	$\alpha=1.08$ $\beta=0.36$
OPC-50	0.123					
OPC-55	0.131					
FC10-42	0.093					
BC40-42	0.089					
SC5-45	0.091					
S5B40C-45	0.087					

화 모델과 일치하는 경향을 나타내지만 선형 구속등온선은 일치하지 않는 것을 알 수 있으며 일반적으로 선형 구속등온선은 잘 일치 하지 않아 적용하기 어렵다. 위의 결과로 판단할 때 콘크리트내의 염화물 고정화는 콘크리트 공극내의 자유 염화물 농도에 가장 큰 지배를 받는 것으로 사료된다. 예를 들어 설명하면 고로슬래그를 치환할 경우 염화물 고정화 증가 효과는 치환에 따른 C3A와 CSH 겔의 양에 따른 고정화 효과보다는 고로슬래그를 치환함에 따라 자유 염화물이 이동할 수 있는 수분 침투 공극량이 줄어들게 되고 이에 따라 자유염화물 침투량 감소와 함께 고정염화물이 감소하는 영향이 더욱더 지배적인 것으로 판단된다. 그러므로 거시적인 관점에서 본 연구에서 행한 0.5M 염화물 침지 실험에 따른 염화물 고정화 특성은 염화물 침투에 관한 모델 구성시에 유효할 것으로 판단된다.

### 3.2 해양 침지조건 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 예측

본 연구에서는 SHRP(Strategic Highway Research Program)에서 제안한 식(20)의 염화물 침투 속도식과 본 연구에서 행한 염화물 고정화를 고려한 유한요소 해석과의 비교를 통해 염화물 고정화가 염화물 침투 속도에 미치는 영향과 이에 따른 내구수명을 판단해보고자 하였다.(Weyers, 1994) 여기서 임계염화물량은 ACI Committee 201과 ACI Committee 222에서 각각 제안한 시멘트 중량대비 0.20%와 0.15% 자유 염화물량으로 하였다. 또한 표면 염화물량은 실제 해수의 염화물 농도를 묘사할 수 있는 0.5M(2.93 kg/m³)로 하였으며

Table 8 Service life prediction according to chloride binding

Type	C <sub>cr</sub>	No binding model		Langmuir model		Freundlich model	
		0.15%	0.20%	0.15%	0.20%	0.15%	0.20%
		OPC-45	33	49	46	64	46
OPC-50	31	42	38	52	38	52	
OPC-55	26	36	33	44	33	44	
FC10-42	56	90	73	111	73	111	
BC40-42	97	162	118	196	118	196	
SC5-45	56	86	72	106	72	106	
S5B40C-45	125	212	166	254	166	254	

\*단위는 year(년)임.

콘크리트 피복두께는 흠에 접하여 콘크리트를 친 후 영구히 흠에 묻혀 있거나 수중에 있는 콘크리트인 8cm를 사용하였다.

$$C_{(x,t)} = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (20)$$

한편 염화물 고정화를 고려하지 않은 SHRP 기준식(20)과의 염화물 침투 속도 비교를 위한 유한요소 해석에 사용된

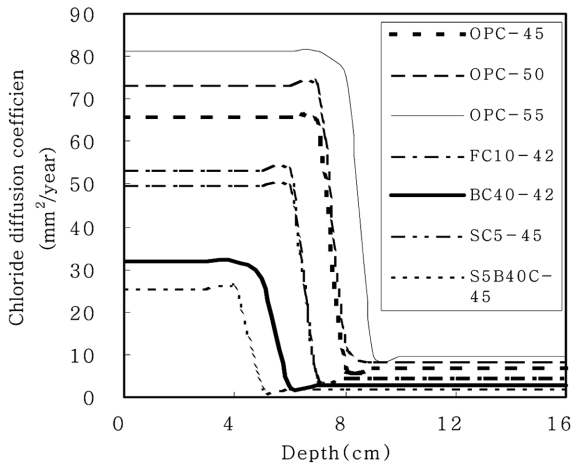


Fig. 4. Chloride diffusion coefficient to depth(Langmuir model)

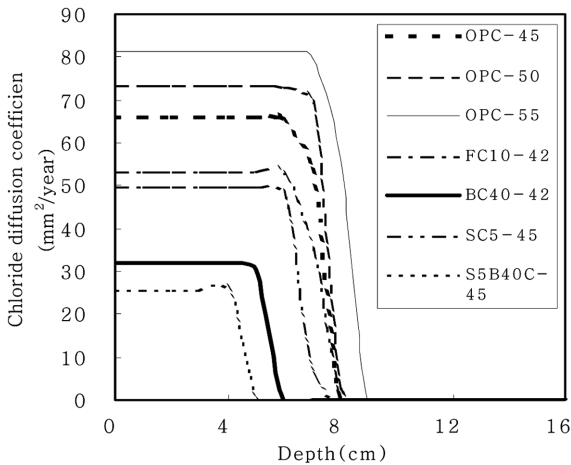


Fig. 5. Chloride diffusion coefficient to depth(Freundlich model)

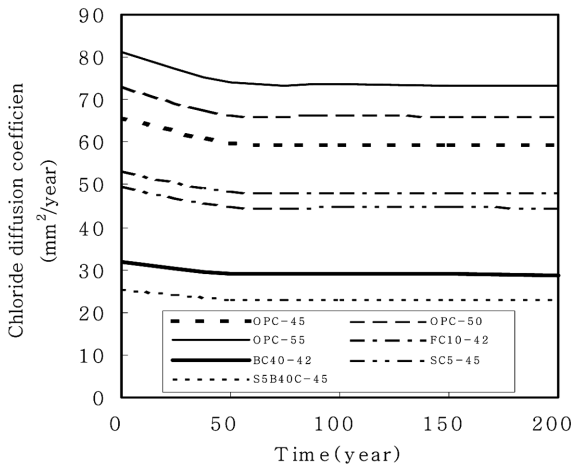


Fig. 6. Chloride diffusion coefficient to time(Langmuir model)

파라미터는 Table 7에 정리하였다.

우선 고정화를 고려한 유한요소 해석으로부터 깊이별, 시간별 염화물 확산계수 변화를 Fig. 4 ~ Fig. 7처럼 나타낼 수 있었으며 이는 비정상 상태의 염화물 침투를 적절하게 묘사하고 있음을 알 수 있다. 따라서 깊이별, 시간별 염화물 확산계수 변화를 포함한 유한요소 해석과 이를 고려하지 않은 염화물 침투 속도와 내구수명 예측은 Fig. 8 ~ Fig. 14와 Table 8에서 보듯이 극명한 차이를 보이고 있으며 특히 임계

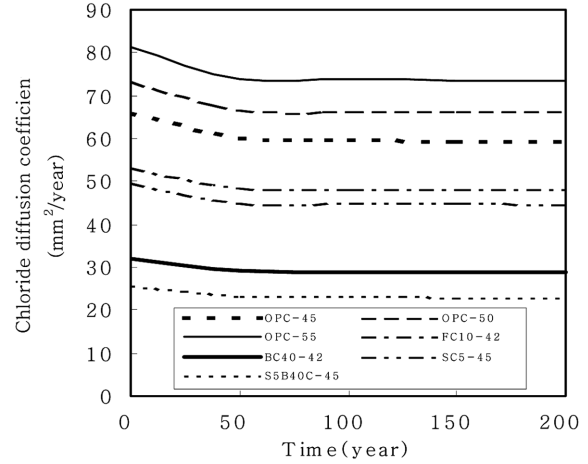


Fig. 7. Chloride diffusion coefficient to time(Freundlich model)

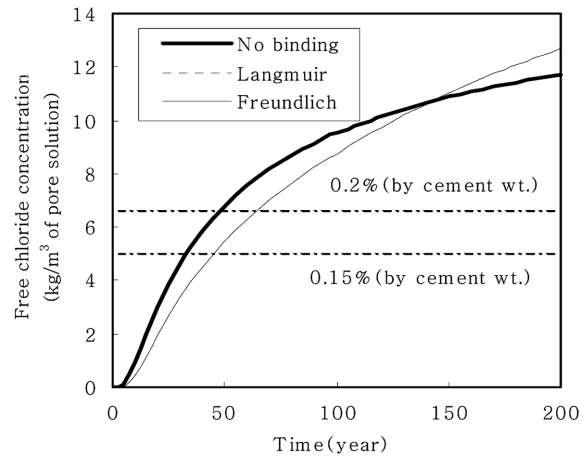


Fig. 8. Free chloride concentration with time(OPC-45)

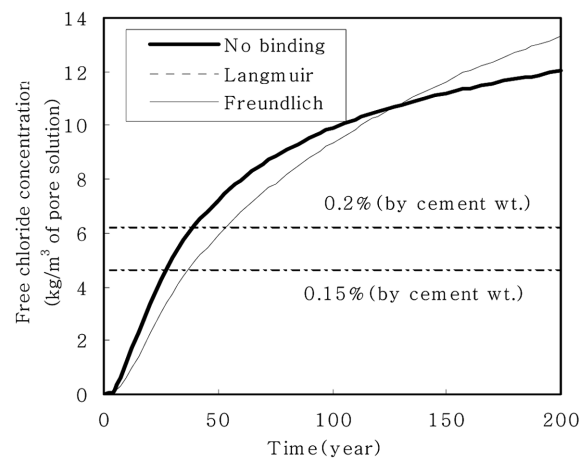


Fig. 9. Free chloride concentration with time(OPC-50)

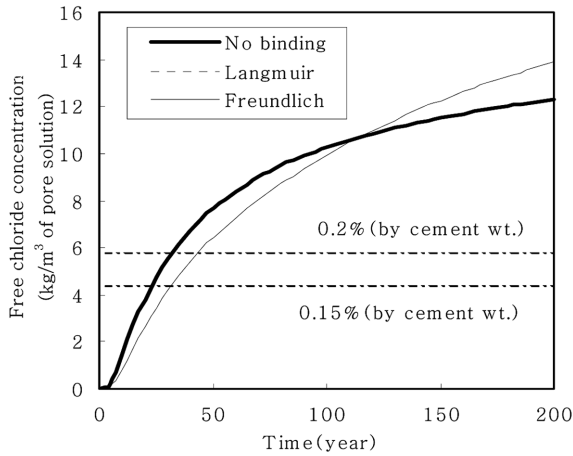


Fig. 10. Free chloride concentration with time(OPC-55)

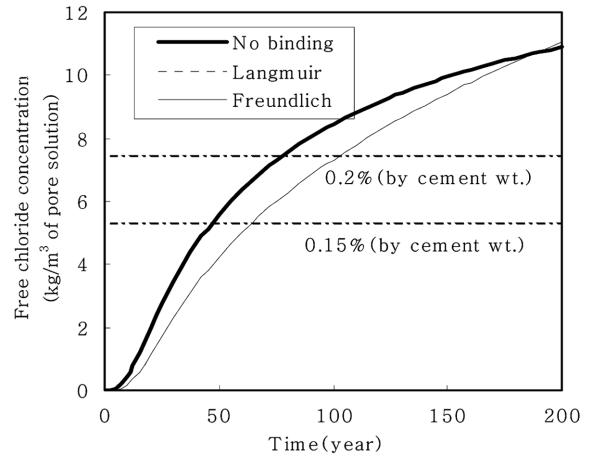


Fig. 13. Free chloride concentration with time(SC5-45)

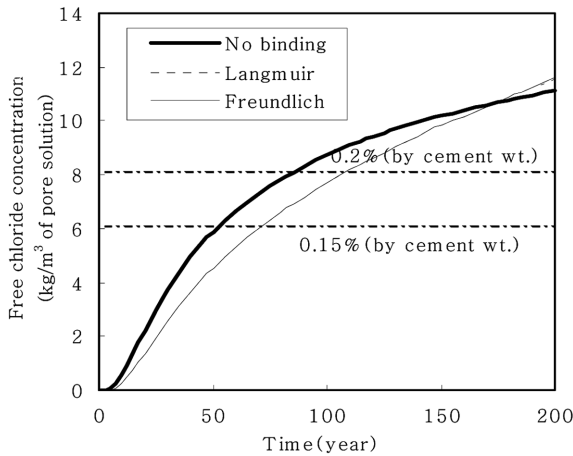


Fig. 11. Free chloride concentration with time(FC 10-42)

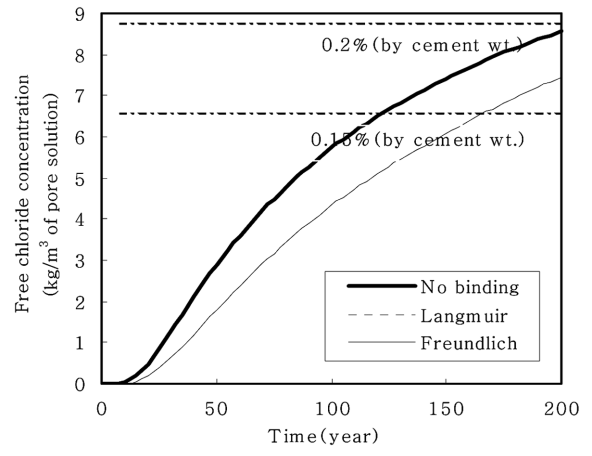


Fig. 14. Free chloride concentration with time(S5B40C-45)

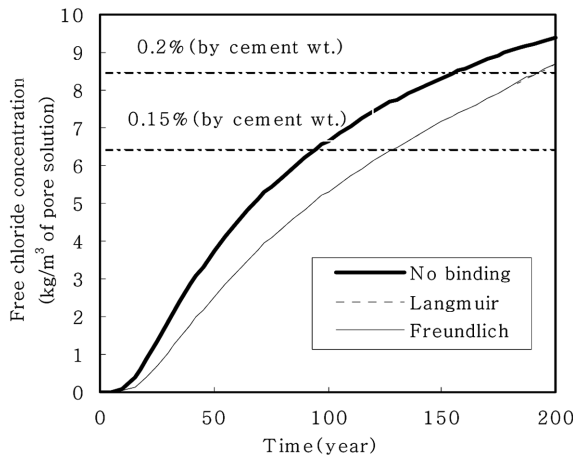


Fig. 12. Free chloride concentration with time(BC40-42)

염화물 도달 시기에서 가장 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 식 (18)에 의한 염화물 침투 속도는 콘크리트의 염화물 고정화를 고려하지 못하므로 지나치게 빠른 염화물 속도를 나타내고 있으며 고정화를 고려했을 경우와 대비하면 콘크리트 배합에 따라 약 20~40%정도의 임계염화물량 도달시기의 차이가 있었다. 이는 기존의 콘크리트 염화물 고정화 능력을 고려하지 않은 내구성 설계 시 과도한 피복두께의 산정을 초래할 것으로 사료된다.

염화물 고정화를 고려한 철근 콘크리트 구조물의 내구성 예측

#### 4. 결 론

해양 침지환경하의 철근부식에 의한 내구성명 예측을 위하여 염화물 침투 실험과 콘크리트 재료적 특성을 고려한 염화물 침투 유한요소해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 0.5M 해양 환경하에서의 콘크리트 염화물 고정화 상수는 Langmuir 모델에서  $\alpha=0.99$ ,  $\beta=0.30$ , Freundlich 모델에서  $\alpha=1.08$ ,  $\beta=0.36$ 의 값을 도출하였으며 이 상수들은 자유염화물량 대비 고정화된 염화물량의비율을 의미한다고 할 수 있다.
- 2) 고정화를 고려한 침투모델과 고려하지 않은 침투모델의 내구성명은 20~40%의 차이를 보였으며 고정화를 고려하지 않은 내구성 설계는 과도한 피복두께를 초래할 것으로 사료되어 지나치게 보수적인 설계가 발생함에 따라 비경제적인 설계를 유발하는 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구의 고정화를 고려한 염화물 침투 모델로서 기존의 보통 콘크리트 배합보다 효과적인 내구성 배합을 도출할 수 있음을 물론 기존 해양 구조물의 적절한 보수 시기의 결정에 큰 도움이 되어 구조물의 안전성 및 경제성 향상에 많은 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 기 호

- $J_{cl}$  : 이온플럭스( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$ )  
 $D$  : 염화물 확산계수( $\text{m}^2/\text{sec}$ )  
 $C_f$  : 자유염화물농도( $\text{kg/m}^3$  of pore solution)  
 $w_{sat}$  : 수분침투공극률( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )  
 $C_b$  : 고정염화물농도( $\text{kg/m}^3$  of concrete wt.)  
 $R$  : 기체상수( $\text{KJ/mol} \cdot \text{K}$ )  
 $C_t$  : 전염화물농도( $\text{kg/m}^3$  of concrete wt.)  
 $U$  : 활성화에너지( $\text{KJ/mol}$ )  
 $T$  : 절대온도( $\text{K}$ )  
 $h$  : 상대습도  
 $h_c$  : 콘크리트 내부의 염화물 확산이 급속히 감소 하는  
 임계 상대습도 Bazant는 0.75로 제안  
 $\zeta$  : 시멘트 종류에 따른 상수, 0~1

### 참고문헌

- 문한영, 이승태, 김홍삼 (2001) 시멘트 경화체의 해수침식에 의한  
 성능저하 및 저항성 평가. **한국콘크리트학회 논문집**, 제4권 2  
 호, pp.175-183  
 이창수, 윤인석 (2000) 서울시내 140개 철근콘크리트 교량의 내  
 구성 현황분석. **한국구조물진단학회 논문집**, 제4권 3호, pp.161-  
 168  
 Andrade, C., (1993) Calculation of Chloride Diffusion Coefficients  
 in Concrete from Ionic Migration Measurements, *Cement and*

- Concrete Research*, Vol. 23, pp.58-66  
 Bazant, Z.P. and Najjar, L.J. (1971) Drying of concrete as a Nonlin-  
 ear diffusion Problem, *Cement and Concrete Research*, Vol. 1,  
 pp.461-473  
 Grace, W.R. (1991) Chloride Penetration in Marine Concrete : A  
 Computer Model for Design and Service Life Evaluation, *Inter-  
 national Proceedings of Corrosion 91*, Australians Corrosion  
 Association, pp.121-129  
 Luciano, J. and Miltenberger, M. (1999) Predicting Chloride Diffu-  
 sion Coefficient from Concrete Mixture Properties, *ACI Mate-  
 rial Journal*, Vol. 96-M86, pp.698-703  
 Mackechine, J.R. and Alexande, M.G. (1997) Exposure of Concrete  
 in Different Marine Environment, *Journal of Materials in Civil  
 Engineering*, Vol 27, No. 2, pp.154-162  
 Perez, M.B., Zibara, H. and Hooton, R.D. (2000) A study of the  
 effect of chloride binding on service life predictions, *Cement  
 Concrete Research*, Vol. 30, No. 8, pp.1215-1223  
 Saetta, A.V., Scotta, R.V. and Vitaliani, R.V. (1993) Analysis of  
 chloride diffusion into partially saturated concrete, *ACI Mate-  
 rial Journal*, Vol. 90, No. 5, pp.441-451  
 Weyers, R.E., Fitch, M.G., Laren, E.P., Al-Quadi, I.L., and Hoff-  
 man, P.C. (1994) Concrete Bridge Protection and Repair, and  
 Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion: A Meth-  
 ods Application Manual, *SHRP-S-360, National Research  
 Council*, Washington D.C., pp.268,

- © 논문접수일 : 2009년 07월 14일  
 © 심사의뢰일 : 2009년 07월 15일  
 © 심사완료일 : 2009년 11월 10일