

철근의 영향을 고려한 콘크리트 구조물의 염소이온 확산해석

오병환¹⁾ · 장봉석^{2)*} · 이명규³⁾

¹⁾서울대학교 토목공학과 ²⁾한국건설자재시험연구원 ³⁾전주대학교 토목환경공학과

(2002년 4월 9일 원고접수, 2002년 9월 13일 심사완료)

Influence of Reinforcements on the Chloride Diffusion Analysis of Concrete Structures

Byung-Hwan Oh¹⁾, Bong-Seok Jang^{2)*}, and Myung-Kue Lee³⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²⁾ Korea Institute of Construction Materials, Seoul, 137-073, Korea

³⁾ Dept. of Civil Engineering, Jeonju University, Jeonju, 560-759, Korea

(Received April 9, 2002, Accepted September 13, 2002)

ABSTRACT

The chloride penetration in concrete structures is influenced by many factors such as types of cement and admixture proportion. Therefore, the effects of these factors on chloride diffusion must be correctly considered. The conventional diffusion analysis also neglected the existence of reinforcing bar in concrete structures. The purpose of the present paper is therefore to investigate the effect of reinforcing bar on the chloride diffusion in concrete structures. For this purpose, a comprehensive finite element analyses have been conducted to obtain chloride penetration profile. The results indicate that the chlorides are accumulated in front of a reinforcing bar and that the accumulation is much larger for the case of large diameter bars. The higher accumulation of chloride at bar location causes much faster corrosion of reinforcing steel. It can be concluded from the present study that the effects of reinforcing bars must be considered in chloride diffusion analysis for more realistic prediction of durable life of concrete structures.

Keywords : chloride ion, nonlinear binding isotherm, diffusion, lifetime, effects of rebar, reinforced concrete

1. 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

해수환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물에 대한 사용 수명 예측은 구조물의 설계나 유지관리에서 필수적이며, 많은 연구자들이 이에 대한 예측방법을 제안하고 있다. 염해 환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 산정은 일반적으로 철근의 위치까지 염소이온이 확산하여 도달하는 시간까지를 내구수명으로 추정하는 방법을 사용해 오고 있다^{1~2)}. 염소이온의 확산해석 방법은 많은 연구들이 콘크리트만을 고려하여 염소이온 확산에 대한 확산 해석을 수행하여 염소이온의 분포를 예측하고, 철근위치에 해당하는 깊이에서의 염소이온 농도가 임계농도에 도달하는 시간을 내구수명 예측에 사용하는 방법을 제시하고 있다. 국내에서도 염해 환경에 노출되어 있는 철근 콘크리트

구조물의 내구수명 산정을 위한 철근 부식시작 시점을 염소이온 확산 해석을 통하여 예측하기 위한 연구 결과^{19~23)}가 보고되고 있으나 철근의 영향을 고려하여 염소이온의 확산을 고려한 연구는 보고된 바 없으며 외국의 경우에도 콘크리트만을 고려하여 염소이온의 프로파일을 구하여^{3~7)} 원하는 깊이에서의 임계농도 도달시간을 수명예측에 이용하고 있으며 실제적으로 철근을 고려한 보고는 없다.

그러나, 콘크리트구조물의 염소이온 확산 해석에서 콘크리트 내의 철근을 고려하지 않은 염소이온 확산해석은 실제로 철근을 통한 염소이온확산이 이루어지지 않는 것을 무시하여 실제의 확산거동을 제대로 반영하지 못하는 결과를 초래한다. 본 연구결과 철근의 영향이 매우 큰 것으로 나타나고 있으며 정확한 내구수명예측 등을 위해 이의 합리적인 고려가 반드시 필요하다는 것을 보여주고 있다.

1.2 연구목적

따라서, 본 연구는 철근의 영향을 고려한 염소이온 확산해석을 통하여 철근의 염소이온 확산 거동에 미치는 영

* Corresponding author

Tel : 02-3415-8797 Fax : 02-3415-8790

E-mail : svic@orgio.net

향을 규명하고 합리적인 철근 부식 시작 시간을 예측하는데 그 목적이 있다.

본 연구에서는, 또한 시멘트 성분과 배합특성에 영향을 받는 염소이온의 구속효과를 고려하여 확산해석을 수행하였으며, 염소이온 확산해석의 주요 변수는 실제 구조물에서 염소이온의 확산해석에 영향을 미칠 것으로 예상되는 철근의 직경, 철근 덮개 크기, 시멘트 종류 그리고 배합 등의 다양한 변수를 고려하였으며 철근을 고려하지 않은 경우와 비교 분석하였다.

2. 염소이온 확산해석

2.1 확산지배방정식

염소이온의 확산은 Fick의 제2법칙에 따르며, 염소이온의 구속효과는 Tang과 Nilsson이 Freundlich isotherm을 이용하여 유도한 binding isotherm을 이용하였다⁸⁾. 염소이온의 구속효과는 시멘트 종류, 물-시멘트비, 시멘트의 화학조성, 온도 그리고 염소이온의 농도 등에 영향을 받으며, 본 연구에서는 시멘트 화학조성과, 배합특성 그리고 재령에 따른 binding isotherm을 Jennings가 제안한 modified Powers' model⁹⁾을 사용하여 재령에 따라 도출하여 확산 해석에 고려하였다. 염소이온 확산 지배방정식은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다¹⁰⁾.

$$\frac{dC_f}{dt} = \frac{dC_f}{dC_i} \operatorname{div} [D_{Cl} \operatorname{grad}(C_f)] \quad (1)$$

여기서, C_i 는 전염소이온량 (전염소이온중량/콘크리트중량, g/g), C_f 는 자유염소이온량 (자유염소이온중량/콘크리트중량, g/g), t 는 시간, D_{Cl} 는 확산계수 그리고 dC_f/dC_i 는 binding capacity 이다.

Binding capacity는 총염소이온량과 자유염소이온량의 관계로 정의¹⁰⁾되며 다음과 같이 표현된다.

$$C_i = C_f + C_b; \frac{dC_f}{dC_i} = \frac{1}{1 + (dC_b/dC_f)} \quad (2)$$

여기서, C_b 는 구속염소이온량 (구속염소이온중량/콘크리트중량, g/g), dC_b/dC_f 는 binding isotherm을 나타낸다.

2.2 염소이온 구속효과 (Binding Isotherm)

콘크리트 중에 침투한 염소이온은 그 중 일부가 물리적·화학적으로 콘크리트 내부에서 고정화되어 철근의 부식에 영향을 미치지 않은 안정적인 화합물의 형태로 존재

하게 된다. 특히 혼화재나 시멘트 성분중의 $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot F_eO$ 과 반응하여 프리델염(Friedel' Salt, $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)의 형태로 존재하게 된다^{17~18)}. 염소이온의 고정화에 직접적인 영향을 미치는 칼슘 실리케이트(C-S-H) 화합물은 시멘트의 수화반응에 따라 그 양이 달라지게 되며 또한 구속에 영향을 미치는 gel pore의 양도 변하게 된다. 이 두 인자는 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라서 그 분포가 달라지게 되므로 시멘트의 종류나 배합비 그리고 재령에 따라서 염소이온의 구속효과가 달라지게 된다.

따라서 본 연구에서는 각종 배합과 시멘트 종류에 따라서 달라지는 C-S-H 겔에 의한 염소이온의 구속효과를 시간에 따른 수화도를 고려한 수화반응 생성물의 양에 따라 고려하기 위하여 Jennings가 제안한 모델을 사용하였다. Fig. 1은 modified Powers' model을 나타낸 그림으로 Powers' model에서 단순하게 고려한 수화 생성물을 세분할 수 있도록 개선한 것이다. 이 수화물 중에서 염소이온의 구속에 영향을 미치는 인자는 겔 생성물중의 C-S-H gel, gel pore와 capillary pore 등이다. 이 인자들은 modified Power's model 을 이용하여 재령에 따른 수화도를 고려하여 해석을 위한 입력자료로 사용하였다. Freundlich binding isotherm을 이용하여 유도한 비선형 binding isotherm은 다음과 같이 표현된다.

$$C_b' = (C_f')^A \times 10^B \quad (3)$$

여기서, C_b' 은 구속염소이온량 (구속염소이온중량/gel중량, mg_{CL}/g_{gel}), C_f' 은 자유염소이온량 (자유염소이온중량/용액리터, mol/l), A, B는 상수

C_b' 과 C_f' 를 콘크리트 중량에 대해서 표현하기 위하여 β_{sol} 과 β_{CSH} 의 변환계수를 도입하여 사용하였으며, modified Power's model을 이용하여 계산하였다^{9,10)}. β_{sol} 은 콘크리트 중량에 대한 포아용액의 부피비($L_{pore}/g_{concrete}$)

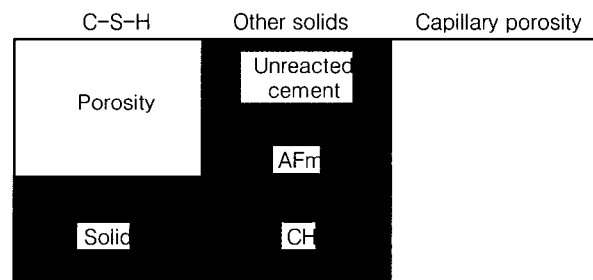


Fig. 1 Schematic model showing the microstructure of portland cement⁹⁾

를 나타내며 β_{CSH} 는 콘크리트 중량에 대한 C-S-H gel의 중량비 ($g_{CSH\ gel}/g_{concrete}$)를 의미한다.

$$\beta_{sol} = \frac{\text{포아부피}(L_{sol})}{\text{콘크리트 중량}(g_{conc})} \quad (4)$$

$$= \frac{V_{pore}}{1000} \cdot \frac{\text{시멘트 페이스트 중량}}{\text{콘크리트 중량}}$$

$$\beta_{CSH} = \frac{V_{CSH\ 중량}(g_{gel})}{\text{콘크리트 중량}(g_{conc})} \quad (5)$$

$$= V_{CSH} \cdot \rho_{CSH} \cdot \frac{\text{시멘트 페이스트 중량}}{\text{콘크리트 중량}}$$

Jennings' model은 다음 식과 같이 각각의 성분으로 표현되며, 이는 시멘트 페이스트 1g 을 기준으로 한 것이다.

$$c = \frac{1}{1 + w/c}$$

$$V_{unreacted\ cement} = c (1 - \alpha_{total}) \left(\frac{1}{\rho_{cement}} \right)$$

$$V_{CH} = c (0.189 \alpha_1 p_1 + 0.058 \alpha_2 p_2)$$

$$V_{AFm} = c (0.849 \alpha_3 p_3 + 0.472 \alpha_4 p_4)$$

$$V_{CSH\ solid} = c (0.347 \alpha_1 p_1 + 0.461 \alpha_2 p_2) \quad (6)$$

$$V_{capillary\ pores} = (1 - c) - \sum_{i=1}^4 (\alpha_i p_i \Delta_i)$$

$$V_{CSH\ pores} = 0.620 V_{CSH\ solid}$$

$$V_{total\ pores} = V_{CSH\ pores} + V_{capillary\ pores}$$

여기서, V_x 는 1g의 시멘트 페이스트의 부피를, c 는 1g의 페이스트에 사용된 시멘트량, α_i 는 수화성분 i 의 수화도 그리고 p_i 는 시멘트 중의 i 성분의 백분율이다. 여기서 $i=1$ 은 C_3S , $i=2$ 는 C_2S , $i=3$ 은 C_3A , $i=4$ 는 C_4AF 를 나타내며, ρ 는 시멘트의 단위중량 그리고 Δ_i 는 i 성분의 수화반응 전후의 부피변화이다.

시멘트의 수화도는 식 (7) 에 나타낸 Avrami-type 식을 사용하여 고려하였으며, 시멘트의 종류 및 배합 특성을 모두 고려하였다.

$$\alpha_i = 1 - \exp(-a_i (t - b_i)^{c_i}) \quad (7)$$

여기서, α_i 는 수화성분 i 의 수화도, t 는 재령(일), 계수 a_i , b_i 그리고 c_i 는 Table 1 에 나타내었다.

염소이온의 구속효과를 고려하기 위하여 사용한 세 가지 종류의 콘크리트 배합은 Table.2에 나타내었다. Fig. 2 는 제1종 시멘트의 경우 물-시멘트비 0.4와 0.6이 배합의

경우 재령에 따른 β_{CSH} 와 β_{sol} 의 값을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 시멘트의 수화가 진행됨에 따라 염소이온의 구속효과에 큰 영향을 미치는 β_{CSH} 와 β_{sol} 의 콘크리트의 배합에 관계없이 28일 이전에 급격한 변화 후, 56~90일 사이에서 거의 일정한 값으로 수렴함을 볼 수 있다. 이는 시멘트의 수화반응이 대부분 28일 내에 완료된다는 것과 일치하는 결과로 장기적인 거동을 보이는 염소이온의 침투 해석시에 염소이온의 구속효과를 고려할 때에 β_{CSH} 와 β_{sol} 의 값을 56일 또는 90일 재령의 값으로 결정해서 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

2.3 해석에 사용한 계수

앞에서 유도한 염소이온 binding isotherm과 더불어 염소이온의 확산해석에 고려한 변수들은 다음과 같다.

2.3.1 구속효과

염소이온의 구속효과를 고려하기 위하여 Jennings의 model을 이용하여 유도한 binding isotherm은 다음 Fig. 3 과 같고 시멘트 종류, 물-시멘트비 등에 따라 유도한 binding isotherm의 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4

Table 1 Value used in avrami equations

Compound	a_i	b_i	c_i
C3S	0.25	0.90	0.70
C2S	0.46	0	0.12
C3A	0.28	0.90	0.77
C4AF	0.26	0.90	0.55

Table 2 Mix proportion of concrete (kg/m³)

W/C	Cement content	Water	Fine aggregate	Coarse aggregate	Cement type
0.4	420	168	602	1088	Type I
0.6	310	186	687	1046	Type I
0.4	420	168	602	1088	Type III

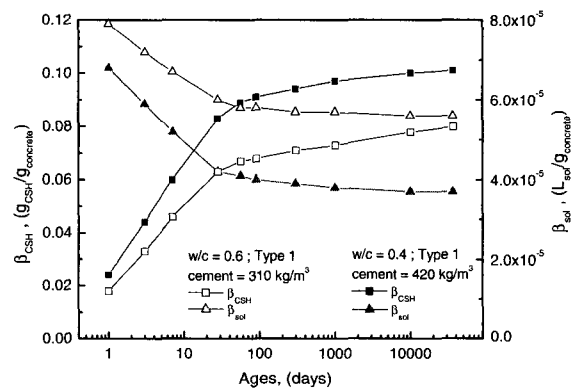
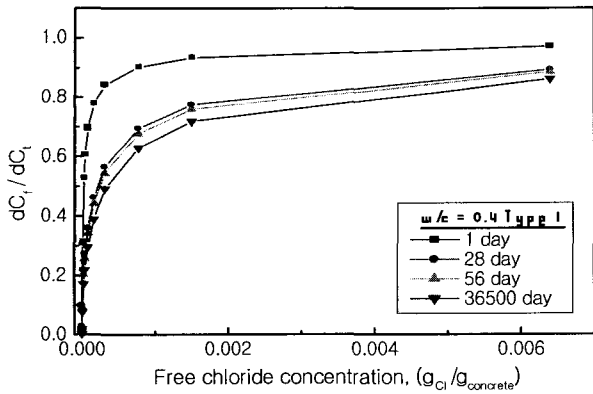
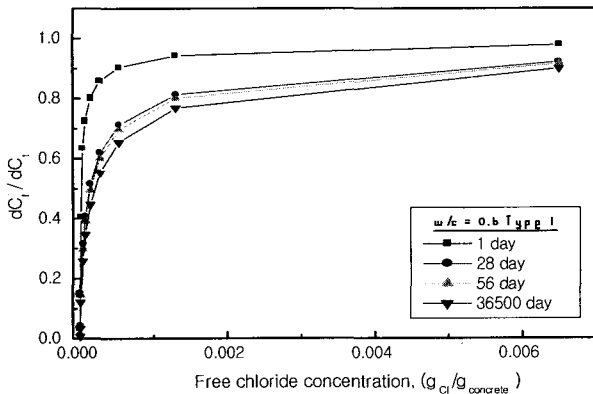


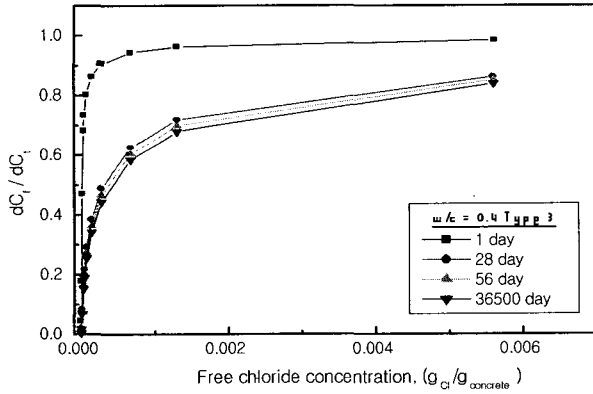
Fig. 2 Variation of β_{CSH} and β_{sol} according to age



(a) w/c=0.4, Type 1 cement



(b) w/c=0.6, Type 1 cement



(c) w/c=0.4, Type 3 cement

Fig. 3 Variation of binding isotherm according to age

에서 알 수 있듯이 물/시멘트비가 증가함에 따라 구속효과가 줄어드는 것을 볼 수 있으며 이는 시멘트량이 증가하여 미치는 영향으로 설명될 수도 있다. 또한 시멘트 종류에 따라서 구속효과가 다름을 확인할 수 있다. 제1종 시멘트의 binding isotherm 결과가 여러 가지 변수에 대한 실험으로 제시한 Tang의 binding isotherm의 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.(Fig. 5) 이것은 배합비와 혼입한 혼화제의 종류에 따른 배합의 특성을 그 성분들의

화학 조성을 사용하여 binding isotherm을 비교적 합리적인 수준에서 추정할 수 있음을 의미한다고 할 수 있다.

2.3.2 확산계수

해석에 사용한 염소이온의 확산계수는 다른 연구자들의 결과를 근거로 일반적으로 사용되는 콘크리트가 가지는 범위의 값으로 세 가지 수준을 가정하여 사용하였다.(Table 3) 본 해석에 사용한 배합과 유사한 배합들 중에서 가장 작은 수준인 $1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 와 고강도/고성능 콘크리트가 가지는 확산계수로서 $0.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 그리고 보통강도 콘크리트의 값으로서 $4.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 선정하여 사용하였다. 염소이온 확산에 미치는 철근의 영향을 알아보기 위해서 보통 강도 콘크리트에 해당하는 확산계수 $1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 를 사용하여 비교하였다.

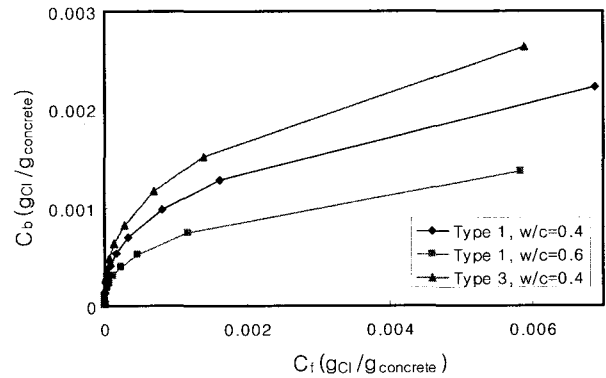


Fig. 4 Binding isotherm according to free chloride

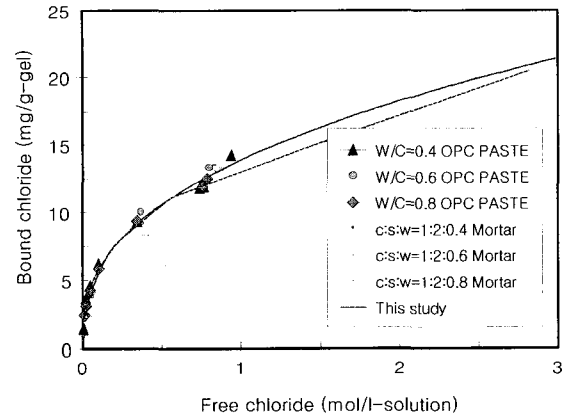


Fig. 5 Comparison of binding isotherm

Table 3 Effective diffusivity of chloride ions¹¹⁾

Cement type	$D_e (\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s})$
OPC	4.47
OPC/30 % PFA	1.47
OPC/65 % PFA	0.41
SRPC	10.0

Note : at 25°C, w/c=0.5

2.3.3 경계조건

표면염소이온 농도는 Bazant의 연구 결과에 따라 해수에 직접 노출된 경우 콘크리트가 염소이온으로 포화되어 있다는 가정을 사용하여 $0.006 \text{ g}_{Cl}/\text{g}_{concrete}^{12)}$ 를 사용하였다.

철근 부식을 일으키는 염소이온의 임계농도에 대한 많은 연구들이 수행되었으나, 각각의 연구 결과에서 상이한 결과를 제시하고 있으며(Table 4), 이는 각각의 연구에 사용된 시멘트와 골재 등의 재료적인 측면과 시험환경의 차이 그리고 규명되지 않은 여러 가지 요인들에 의한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 철근을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 철근 부식 시작 시간의 비교를 위하여 동일한 임계농도 조건을 가정하였으며, Hussain 등의 연구 결과인 '시멘트 중량의 0.8% ~ 1.2%가 임계농도¹³⁾를 사용하여 상·하한 값의 평균인 총염소이온량/콘크리트중량 $0.0015 \text{ g}_{Cl}/\text{g}_{concrete}$ 을 임계농도로 가정하여 해석 결과 비교의 기준으로 하였다.

3 철근을 고려한 확산해석

3.1 해석 변수

확산해석 예제는 철근직경과 철근 덮개를 주요변수로 하였으며, 철근을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하였다. 또한 철근 덮개의 크기와 철근 직경에 따라 그 영향을 고찰하였다. 해석 예제변수를 Fig. 6에 나타내었다. 첫 번째의 변수명 h와 n은 철근을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 나타내며, 두 번째는 철근의 직경, 세 번째는 덮개의 두께 그리고 마지막은 배합특성을 나타내는 변수명이다. 세 번째의 배합 특성은 염소이온의 구속 효과에 대한 것으로 철근을 고려한 확산해석에서는 C1의 제1종 시멘트, 물-시멘트비 0.4의 경우를 사용하였다.

3.2 해석모델

유한요소해석에는 아래 Fig. 7과 같은 2-D 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. C_s 는 표면 경계조건이며, C_0 는 내부 초기 염소이온량으로 상면에서 내부로 염소이온의

Table 4 Chloride threshold in researcher¹³⁻¹⁶⁾

Source	Threshold chloride, percent by cement weight	
	Free (water-soluble)	Total (acid-soluble)
Hope and Ip	-	0.10 to 0.20
Evertte et al.	-	0.40
Thomas et al.	-	0.50
Hussain et al.	-	0.8~1.2
Page and havdahl	0.54	1.00
Strafull	-	0.15

확산이 한 방향으로 일어나는 경우를 모델링한 것이다.

Fig. 7에서 (a)는 철근을 고려한 경우의 mesh이며, (b)는 철근을 고려하지 않은 경우의 mesh를 나타낸 것이다. 각각의 해석을 수행하여 표면에서의 깊이와 시간에 따른 염소이온의 프로파일을 비교하였다. 이때 염소이온의 비선형 구속효과를 고려하여 해석을 수행하였으며 철근 덮개의 크기와 철근 직경에 따라 그 영향을 고찰하였다.

3.3 해석결과

철근의 영향을 고려하지 않은 경우와 철근의 영향을 고

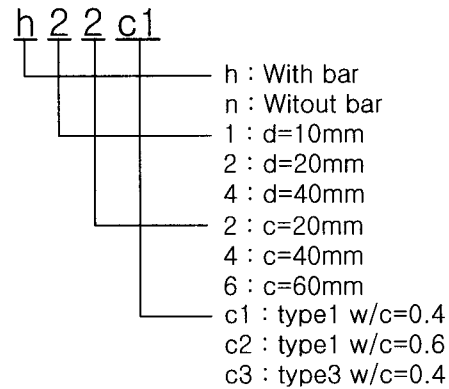
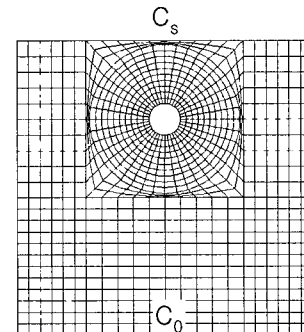
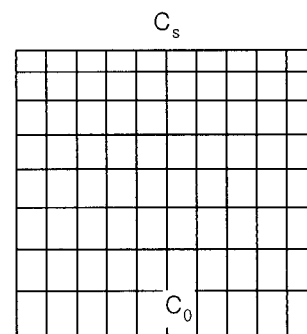


Fig. 6 Analysis variables



(a) Mesh considering bar



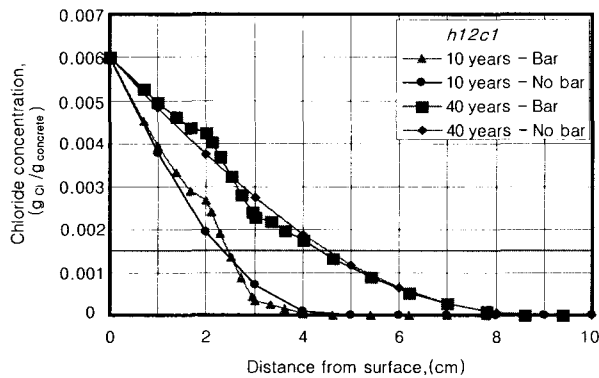
(b) Mesh without bar

Fig. 7 Mesh for FEM analysis

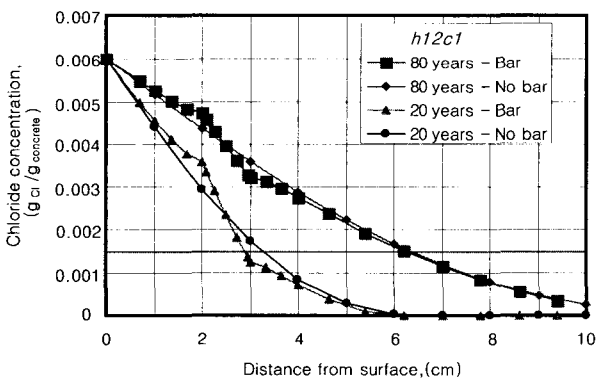
려한 염소이온 확산해석 결과를 Fig. 8 ~ Fig. 12 에 나타내었다. 그 결과를 Table 5 에 나타내었으며, 철근 위치에서 염소이온의 농도가 임계농도에 도달하는 시간을 Table 6 에 나타내었다.

Table 5 과 Fig. 8 ~ 12 에서 알 수 있듯이, 염소이온 확산해석에 있어서 철근을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 해석 결과는 큰 차이를 나타내고 있다. 철근을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 염소이온의 프로파일의 분포가 확연히 다르게 나타났으며, 동일한 시점에서 표면에서 가까운 철근 쪽의 염소이온의 농도가 철근을 고려하지 않은 경우의 농도보다 현저히 커지는 결과를 나타내었다. 이는 염소이온 확산해석에서 철근을 고려하는 것이 매우 중요하다는 것을 의미한다.

또한 철근 덮개의 크기가 일정한 경우, 철근의 직경이 커질수록 철근을 고려한 경우의 염소이온농도와 철근을 고려하지 않은 경우의 염소이온 농도의 비가 증가함을 보이고 있다. 철근의 직경이 일정한 경우는 덮개의 크기가 작을 수록 철근을 고려한 경우의 염소이온농도와 철근을 고려하지 않은 경우의 염소이온 농도의 비가 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 철근이 염소이온 확산의 경로 중간에서 방해물의 역할을 하여 염소이온이 표면에 축적되면서 생긴 결과로 설명될 수 있다.

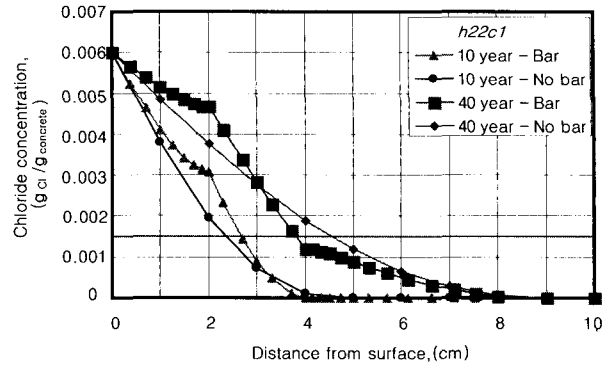


(a) h12c1, 10, 40 year

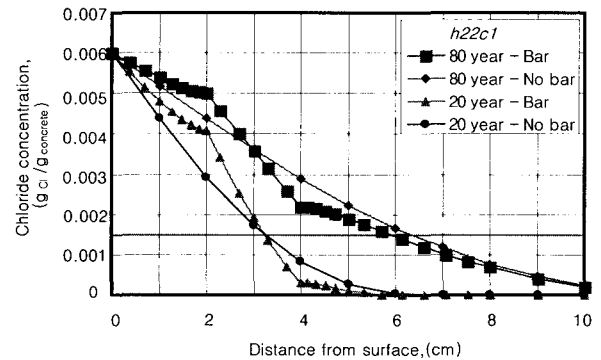


(b) h12c1, 20, 80 year

Fig. 8 Profile of chloride ion

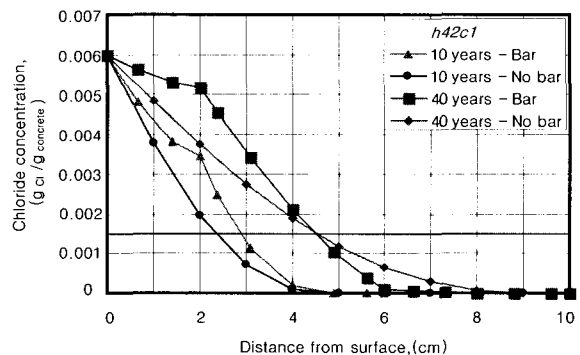


(a) h22c1, 10, 40 year

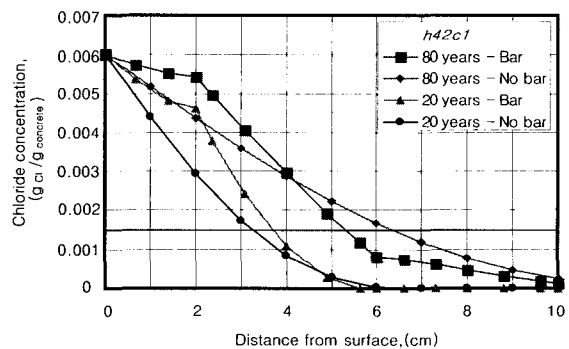


(b) h22c1, 20, 80 year

Fig. 9 Profile of chloride ion

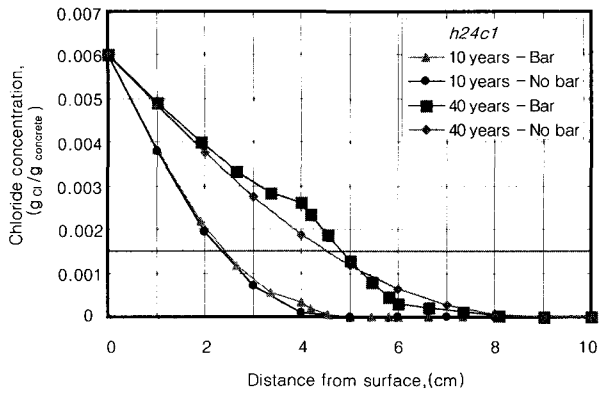


(a) h42c1, 10, 40 year

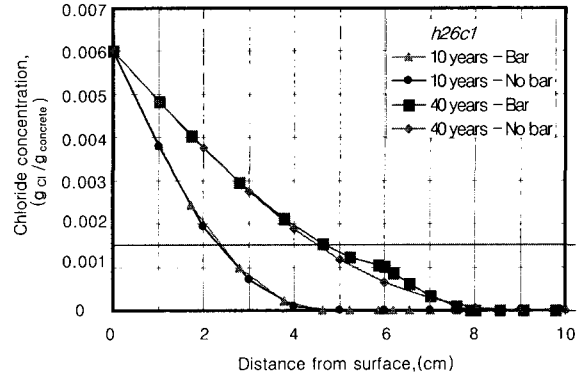


(b) h42c1, 20, 80 year

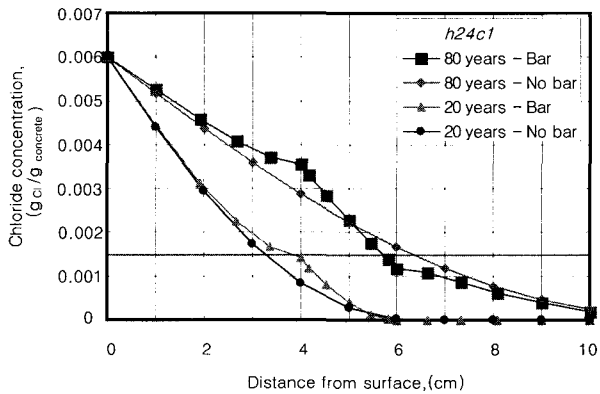
Fig. 10 Profile of chloride ion



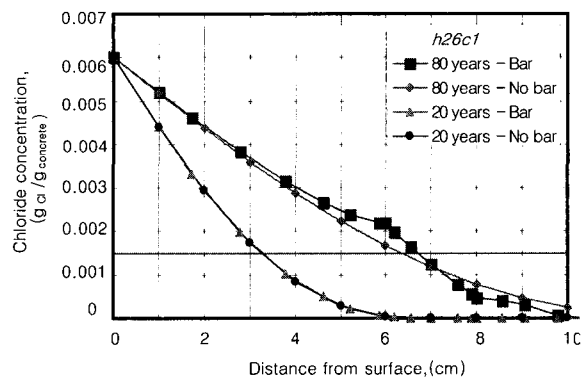
(a) h24c1, 10, 40 year



(a) h26c1, 10, 40 year



(b) h24c1, 20, 80 year



(b) h26c1, 20, 80 year

Fig. 11 Profile of chloride ion

Fig. 12 Profile of chloride ion

Table 5 Result of analysis according to rebar effects, ($\times 10^{-4}$ gCl/g_{concrete})

Variables			10 year	20 year	40 year	80 year
h12c1	top of bar	Without bar	19.4	29.3	37.5	43.7
		With bar	26.8	35.9	42.5	47.3
		$\Delta Cf(\%)$	+38	+23	+13	+8
h22c1	top of bar	Without bar	19.4	29.3	37.5	43.7
		With bar	30.9	41.0	46.6	50.2
		$\Delta Cf(\%)$	+59.3	+39.9	+24.5	+14.9
h42c1	top of bar	Without bar	19.4	29.3	37.5	43.7
		With bar	34.7	46.2	51.7	54.2
		$\Delta Cf(\%)$	+79	+58	+38	+24
h24c1	top of bar	Without bar	1.05	8.39	18.9	28.9
		With bar	3.25	14.4	26.3	35.5
		$\Delta Cf(\%)$	+210	+72	+39	+23
h26c1	top of bar	Without bar	4.1e-14	0.22	6.54	16.7
		With bar	3.4e-12	0.67	10.3	21.9
		$\Delta Cf(\%)$	-	+204	+57.5	+31.1

본 해석 결과를 염소이온 임계농도를 $0.0015 \text{ g Cl / g concrete}$ 로 일정하다는 가정으로 철근부식 시작시간을 산정하면 각각의 결과는 Table 6 과 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 염소이온의 확산에 의한 철근부식이 내구수명 저하의 주요

인자인 구조물에 대하여, 철근부식예측을 위한 확산해석에 있어서 철근을 고려한 경우의 철근부식 시작 시간이 철근을 고려하지 않은 경우의 철근부식 시작시간(initiation time)보다 최대 42 %정도 짧아짐을 알 수 있다.

Table 6 Corrosion initiation time (years)

Variables (1)	Analysis with bar (2)	Analysis without bar (3)	Relative ratio (4) = (2)÷(3)
h12c1	5.09	7.48	68 %
h22c1	4.62	7.48	62 %
h24c1	21.74	31.41	69 %
h26c1	52.75	73.25	72 %
h42c1	4.36	7.48	58 %

이는 구조물의 내구성 설계 또는 내구수명 예측에 있어서 매우 중요한 요인으로 작용함을 의미하며, 염소이온의 확산을 고려한 내구성 설계 및 내구수명 예측에 있어서 반드시 철근의 영향이 고려해야 한다는 것을 의미한다²⁴⁾.

4. 결 론

최근 들어 해안에 건설되는 구조물들이 늘어남에 따라 염소이온 침투에 의한 철근부식 문제가 큰 문제로 부각되고 있다. 염소이온 침투에 있어서 그 동안 철근의 영향을 무시하고 염분 침투량을 계산하였으나 실제로 철근의 영향을 고려하는 경우 염소이온의 침투양상은 매우 달라질 것으로 사료된다. 따라서 본 연구의 목적은 실제적이고도 정확한 염소이온 침투량을 예측하기 위하여 철근의 영향을 고려한 염소이온 확산해석을 수행하여 이들의 영향을 규명하였다. 본 연구로부터 도출된 연구결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

1) 시멘트의 화학조성 및 배합 특성을 사용하여 염소이온의 비선형 binding isotherm을 도출하여 염소이온 비선형 구속효과를 고려한 확산해석을 수행하였다.

2) 염소이온의 확산해석에서 철근 위치에서의 염소이온 농도는 철근 덮개가 일정한 경우에는 철근의 직경이 클수록, 철근의 직경이 일정할 경우는 철근 덮개가 작을수록 철근을 고려하지 않은 경우와 비교하여 매우 높은 염소이온 농도를 나타내었다.

3) 염소이온 확산에 있어서 철근은 방해물의 역할을 하여 표면에서 가까운 철근 위치에서는 염소이온 농도가 철근을 무시한 경우에 비하여 크게 증가되는 것으로 나타났다.

4) 즉, 철근의 영향을 무시하고 확산해석을 하여 철근부식 시작시간을 예측하는 경우, 실제보다 철근부식시작시간을 길게 계산하여 매우 불안정한 결과를 낳는다는 것을 말해주고 있다.

5) 철근부식 시작시간(corrosion initiation time)은 철근의 영향을 고려하지 않은 경우와 비교할 때 최대 42 %정도 짧아지는 것으로 나타나 이의 영향고려가 필수적임을 말해 주고 있다.

6) 따라서, 염소이온 확산해석에 있어서 실제의 염소이

온 침투현상을 합리적으로 고려하기 위하여 철근의 영향을 반드시 고려해야 하며, 앞으로의 내구성 설계 또는 해석 기준에 철근의 고려를 명시해야 될 것으로 사료된다.

7) 본 연구는 염소이온 침투에 의한 철근부식이 내구수명의 주요인자인 구조물의 내구수명 산정 및 설계에 합리적인 방안을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 한국과학재단(과제번호 : R05-2001-000-01341-0) 지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Tuutti, K., "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, 1980, pp.223~236.
2. Broomfield, J. P., "Corrosion of Steel in Concrete : Understanding, Investigation and Repair," RILEM, E & FN Spon, 1997.
3. Thomas, M., "Chloride Thresholds in Marine Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 4, 1996, pp.513~519.
4. L. Tang and L.-O. Nilsson, "A Numerical Method for Prediction of Chloride Penetration into Concrete Structures," *The Modelling of Micro Structure and Its Potential for Studying Transport Properties and Durability*, pp.539~552.
5. Tang, L., "A Windows Program for Prediction of Chloride Penetration into Submerged Concrete," *Proceedings of the RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete*, Oct. 15-18, 1995.
6. Tang L. and L.-O. Nilsson, "Service Life Prediction for Concrete Structures Under Seawater by a Numerical Approach," *dBMC Components 7*, E&FN Spon, 1996.
7. Eric J. Hansen and V. E. Saouma, "Numerical Simulation of Reinforced Concrete Deterioration -Part I : Chloride Diffusion," *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 2, 1999, pp.173~180.
8. Tang, L. and Nilsson, L. O., "Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Pastes and Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, No. 2, 1993, pp.347~353.
9. H. M. Jennings and P. D. Tennis, "Model for

- Developing Microstructures in Portland Cement Paste," *J Am. Ceram. Soc.*, Vol. 77, No. 12, 1994, pp.3161~3172.
10. Yunping, Xi and Z. P. Bazant, "Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete," *J. of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 1, Feb., 1999, pp.58~65.
 11. C. L. Page, N. R. Short, A. El Tarras, "Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, Vol.11, 1981, pp.395~406.
 12. Bazant, Z. P., "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures : Application," ASCE, ST6, 1979, pp.1155~1165.
 13. Hussain, S. E. and Al-Gahtani, A. S., Rasheeduzzafar, "Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 6, 1996, pp.534~538.
 14. Page, C. L., Short, N. R., and Holden, W. R., "The Influence of Different Cements on Chloride -Induced Corrosion of Reinforcing Steel," *Cement and Concrete Research*, Vol. 16, No. 1, 1986, pp. 79~86.
 15. Stratfull, R. F., "Half Cell Potentials and the Corrosion of Steel in Concrete," *Presented at the 52nd Annual Meeting of Highway Research Board*, 1973.
 16. Hope, B. B. and Ip, A. K. C., "Chloride Corrosion Threshold in Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 84, No. 4, 1987, pp.306~314.
 17. Rasheeduzzafar, Hussain, S. E. and Al-Saadoun, S. S. "Effect of Cement Composition on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, 1991, pp.777~794.
 18. Rasheeduzzafar, Hussain, S. E. and Al-Saadoun, S. S., "Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Chloride Binding and Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 1, 1992, pp.3~12.
 19. 오병환, 정원기, 강승희, 장승엽, "염소이온에 의한 철근부식에 관한 콘크리트 구조물의 내구연한 예측을 위한 수학적 모델," 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집 제8권 2호, 1996. 11., pp.201~206.
 20. 김은겸, 신치범, 이윤환, "콘크리트 구조물의 염화물이온 침투거동 해석," 콘크리트학회지, 제9권 6호, 1997., pp. 233~241.
 21. 김도겸, 이종석, 고경택, 이장화, 송영철, 조명석, "철근의 부식 예측 모델에 관한 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 1999., pp.739~742.
 22. 이석원, 박상준, 송하원, 변근주, "고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물이온 확산모델," 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제8권 2호, 2000. 11., pp.467~472.
 23. 오병환, 장봉석, "철근 영향을 고려한 콘크리트 구조물의 염소이온 확산해석," 대한토목학회 학술발표논문집, 2001.
 24. 장봉석. "염소이온 확산에 미치는 철근의 영향과 비선형 부식분포를 고려한 철근콘크리트 구조물의 사용수명 추정방법," 서울대학교 박사학위 논문, 2001.

요 약

염해 환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물의 내구수명 산정은 일반적으로 철근의 위치까지 염소이온이 확산하여 임계농도에 도달하는데 걸리는 시간으로 추정해 오고 있다. 염소이온의 확산해석 방법은 많은 연구들이 콘크리트만을 고려한 염소이온 확산해석을 수행하여 염소이온의 분포를 예측하고, 철근 깊이에서의 염소이온 농도가 임계농도에 도달하는 시간을 내구수명 예측에 사용하는 방법을 제시하고 있다. 콘크리트에서의 염소이온의 확산 해석에서 콘크리트 내의 철근을 고려하지 않은 염소이온 확산해석은 실제 철근의 염소이온 확산 계수가 거의 '0'인 점을 고려하면 실제 염소이온의 확산 거동을 제대로 반영하지 못한 것이다. 따라서, 본 연구는 철근의 영향을 고려한 염소이온 확산 해석을 통하여 철근이 염소이온 확산 거동에 미치는 영향을 규명하고 합리적인 철근 부식 시작 시간을 예측하고자 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는, 또한 시멘트 성분과 배합 특성에 영향을 받는 염소이온의 구속효과를 고려하여 확산해석을 수행하였으며, 염소이온 확산 해석의 주요 변수는 실제 구조물에서 염소이온의 확산해석에 영향을 미칠 것으로 예상되는 철근의 직경, 철근 덮개 크기, 시멘트 종류 그리고 배합 등의 다양한 변수를 고려하였으며 철근을 고려하지 않은 경우와 비교 분석하였다.

핵심용어 : 염소이온, 비선형 구속효과, 확산, 내구수명, 철근의 영향, 철근콘크리트