

# 기존 자료를 통한 염소이온 확산계수 분석 및 철근콘크리트 구조물의 염해 수명예측

## Prediction of the Durability Life for RC Structures through the Analyzing Chloride Diffusion Coefficient of the Establish Data

이 우 진\*    이 성 복\*\*    이 한 승\*\*\*    유 제 준\*\*\*\*    윤 병 수\*\*\*\*\*  
Lee, Woo Jin    Lee Sung Bok    Lee, Han Seung    Ryu, Jae Jun    Yun, Byung Soo

### ABSTRACT

It is important to decide the precise chloride diffusion coefficient in order to predict the durability plan of concrete structure chloride and prediction of remaining lifetime. However, the inland references are limited to the rapid test in laboratory. The purpose of this study is to examine and analyze the established data, which are restricted by chloride diffusion coefficient, and to examine the prediction of the concrete structure durability by an FEM interpretation and the chloride diffusion coefficient as a variable.

#### 1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 열화현상 중 가장 심각한 것은 염해이며, 이는 주로 외부로부터 콘크리트 내부로 염소이온이 침투하여 철근이 부식하기 때문에 발생된다. 따라서, 염해를 받는 구조물의 열화상태 예측, 즉, 염소이온 침투 및 강재부식 진행을 예측하기 위해서는 콘크리트내로의 염소이온 침투를 정확히 예측할 필요가 있으며 이를 위해서는 콘크리트의 염소이온 확산계수를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 국외의 염소이온 확산계수를 조사분석 한 결과에 의하면 염소이온 확산계수는 상당한 편차를 가지고 있으며, 이를 가지고 염소이온 침투를 수치적으로 계산하면 동일 피복조건에서 철근이 부식하기 시작하는 임계염화물 농도까지의 경과년수 예측은 몇십년의 차이가 나는 것으로 알려지고 있다. 그러나, 국내에서는 염소이온 확산계수에 관한 자료가 매우 불충분하고, 특히, 실구조물이나 폭로조건에서의 염소이온 확산계수 산정에 관한 연구는 거의 전무하다.

본 연구에서는 이러한 관점에서, 우선, 염소이온 확산계수를 실험적으로 구한 국내 논문을 조사분석하여 염소이온 확산계수의 분포를 파악함과 동시에 국외의 실구조물 조사결과와 비교분석하고, 이들 확산계수를 이용하여 FEM해석에 의한 염소이온 침투를 시뮬레이션 하여 확산계수 값이 철근위치에서의 임계염화물 농도에 도달하기 까지 경과년수, 즉 염해수명에 미치는 영향을 검토하였다.

\* 정회원. 한양대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

\*\* 정회원. 대한주택공사 주택도시연구원 건설기술연구부 책임연구원

\*\*\* 정회원. 한양대학교 공학대학 건축학부 조교수, 공학박사

\*\*\*\* 정회원. 한양대학교 STRESS 연구조교수, 공학박사

\*\*\*\*\* 정회원. 한양대학교 산업경영대학원, 석사과정

## 2. 국내 논문에서 나타난 염소이온 확산계수 (Dc) 조사 분석

본 연구에서는 과거 10년간 토목·건축 관련 학회지와 논문집에서 보고된 약 200여개의 염소이온 확산계수를 대상으로 실험실 내에서의 촉진실험 결과 및 침지실험 결과를 조사하였다. 그림 1은 물시멘트비에 따른 염소이온 확산계수의 분포를 나타낸 것이며, 표 1은 물시멘트비에 따른 염소이온 확산계수의 평균값 및 99.9% 신뢰구간인  $D_{c-ave} \pm 3\sigma$ 의 값을 나타낸다. 동일 물시멘트비라도 염소이온 확산계수의 최대 및 최소값은 두자릿수 정도의 큰 차이를 보이고 있으며, 매우 편차가 많은 것을 알 수 있어 확산계수를 이용한 염소이온 침투를 해석하는 경우에 상당한 차이가 발생할 것으로 예상된다. 이는, 염소이온 확산계수 시험방법이 연구자에 따라 다른 점과 염소이온 확산계수의 평가 시점이 연구자마다 다르기 때문으로 판단된다. 한편, 그림 2는 일본에서 실제구조물 및 폭로시험체에서 조사한 염소이온 확산계수의 회귀선 및 국내 실험실에서의 확산계수 실험 결과 회귀선을 나타낸 것이다. 국내 실험 결과는 일본의 토목학회 시방서에 나타난 결과<sup>2)</sup>와 매우 유사한 경향을 나타내고 있으나, 실제 구조물에서 조사한 결과<sup>1)</sup>와는 물시멘트비 50% 이상부터 상당한 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있었다.

표 1 염소이온 확산계수의 분포값

물시멘트비 (%)	염소이온 확산계수 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )		
	$D_{c-ave} + 3\sigma$ (최대)	$D_{c-ave}$ (평균)	$D_{c-ave} - 3\sigma$ (최소)
40	$2.0 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-8}$	$4.0 \times 10^{-9}$
50	$4.2 \times 10^{-7}$	$6.0 \times 10^{-8}$	$6.2 \times 10^{-9}$
60	$5.8 \times 10^{-7}$	$7.2 \times 10^{-8}$	$7.9 \times 10^{-9}$

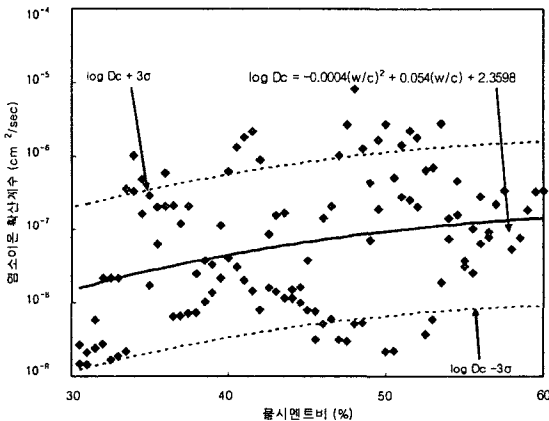


그림 1 물시멘트비와 확산계수와의 관계(국내 자료)

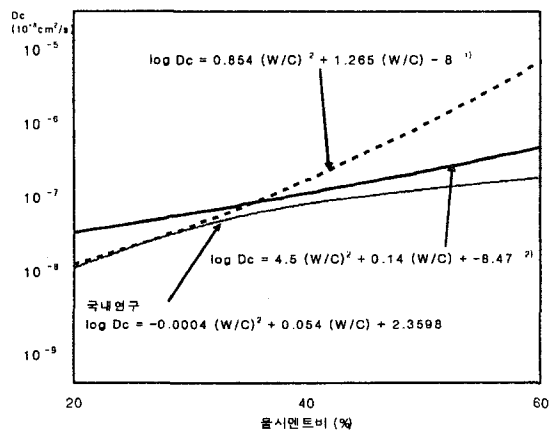


그림 2 물시멘트비에 따른 염소이온 확산계수 비교

## 3. 염소이온 확산계수(Dc)를 이용한 철근콘크리트내의 염분침투 FEM 해석

### 3.1 염분침투 FEM 해석 개요

염분이 구조물내로 침투할 때에 적용되는 푸리에 법칙에서 물체내의 단위면적을 단위시간 t안에 이동

하는 염분침투유속  $q$  는 염분의 침투하는 방향의 구배  $dC/dx$  ( $C$  : 염분량,  $x$  : 염분의 침투방향에서 취한 좌표) 에 비례한다.

$$q = -D_x \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

식(1)의 비례정수  $D_x$ 를 확산계수라 부르며, 물질에 있어서 염분이 침투하기 쉬움의 정도를 나타내는 것이다. 또한, 그림 3과 같이 물체내 임의의 위치  $(x,y,z)$  에서 직육면체를 생각하면, 위치  $(x,y,z)$ , 시간  $t$  에 있어서 염분농도를  $C(x,y,z,t)$ 로 두고, 식(1)의 푸리에 법칙을 이용하여 시간  $dt$  사이에 A면에서 유입하는 염분유속  $(dq_x)_{in}$ 을 구하면,

$$(dq_x)_{in} = -\left[ D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] dydzdt \quad (2)$$

으로 된다. 또 B면에서 유출되는 염분유속  $(dq_x)_{out}$ 는

$$(dq_x)_{out} = -\left[ \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx \right] dydzdt \quad (3)$$

으로 되고, 식(2), (3)에 의해  $x$ 방향 염분 출입에 따라 직육면체에 축적되는 염분은 식(4)로 표시된다.

$$(dq_x)_{in} - (dq_x)_{out} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx dy dz dt \quad (4)$$

본 연구에서 사용한 염소이온 침투해석을 위한 FEM 해석모델은 그림 4와 같이 콘크리트 표면의 염분농도를 고정시키고, 1차원 모델의 수평방향으로의 염소이온 확산만을 고려하였다. 또한, 염소이온 확산계수는 본 연구에서 조사한 국내 연구 자료를 사용하였으며, 경과년수에 따라 철근위치의 염소이온 농도를 산정하였다.

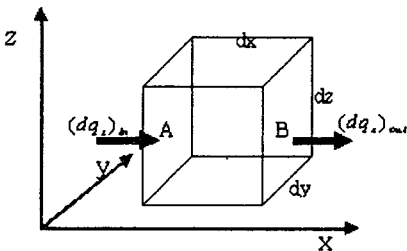


그림 3 3차원 모델에서 염화물 이온 이동

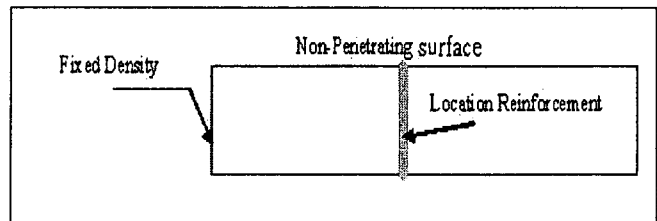


그림 4 본 연구에서의 FEM 해석 모델 개요

### 3.2 염분침투 FEM 해석 결과

그림 5는 물시멘트비 50%의 경우, 확산계수가 각각  $6 \times 10^{-7}$ 과 의  $6 \times 10^{-8}$  경우, 염화물 이온 침투깊이와 염소이온의 농도와의 관계를 나타낸다. 동일 경과년수라도 확산계수가 크면 표면으로 부터의 깊이별 염소이온 농도가 크게 되는 것을 알 수 있다. 특히, 피복두께 4cm 위치의 경우, 철근이 부식하기 시작하는 임계염소이온 농도  $1.2\text{kg/m}^3$ 에 도달하는 경과년수는 확산계수  $6 \times 10^{-7}$ 에서 약 1.2년, 확산계수  $6 \times 10^{-8}$ 에서는 약 13년으로서 약 10배의 차이가 나고 있으며, 이로 부터 철근부식에 영향을 미치는 철근위치의 임계염소이온 농도는 염소이온의 확산계수에 의해 크게 좌우되는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 6은 확산계수가  $6 \times 10^{-8}$ 의 경우, 각 피복두께에 따른 철근부식 임계농도 도달시간을 나타낸 것이다. 피복두께가 커질수록 철근부식 임계농도에 도달하는 시간은 증가하고 있다. 특히, 피복두께 4cm의 경우, 임계농도가  $1.2\text{kg/m}^3$ 에서  $2.4\text{kg/m}^3$ 로 2배 증가하면, 임계농도 도달시간은 약 2배 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 콘크리트내로의 염소이온 침투 및 이에 따른 철근부식에 관한 명확한 예측을 실시하기 위해서는 콘크리트내로의 확산계수와 함께, 철근부식 임계농도를 적절하게 산정하는 것이 필요하다고 판단된다.

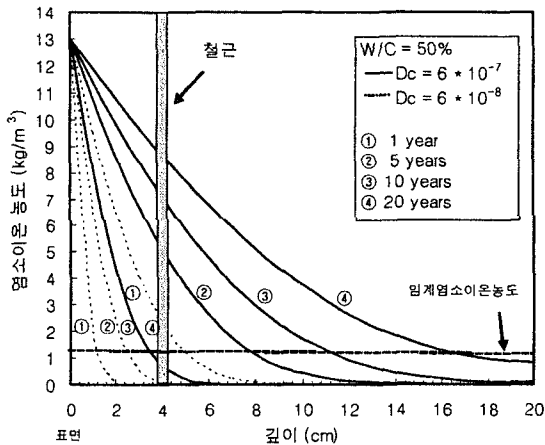


그림 5 염화물 이온 침투깊이와 농도와의 관계

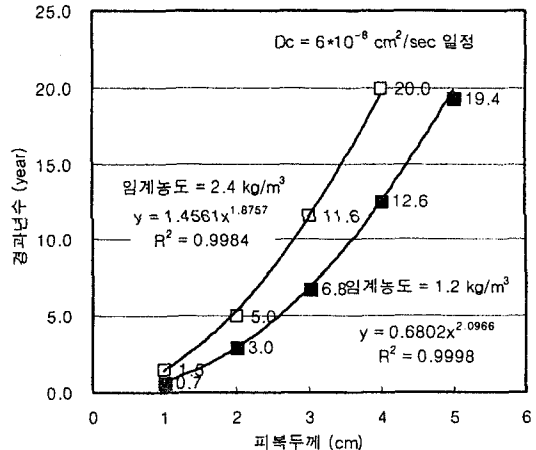


그림 6 피복두께에 따른 임계농도 도달 년수

### 4. 결론

염소이온 확산계수를 실험적으로 구한 국내 논문을 조사분석한 결과, 염소이온 확산계수는 약 두 자릿수의 매우 큰 편차를 가지고 있으며, 이를 사용한 FEM 염소이온 침투해석 결과, 철근위치에서의 철근 부식 임계염소이온 농도에 도달하는 경과년수는 자릿수가 하나 증가할 때마다 약 10배씩의 경과년수가 나타나 염소이온 침투는 확산계수에 따라 매우 크게 차이가 발생한다. 따라서, 콘크리트내로의 염분침투를 명확히 파악하기 위해서는 콘크리트내로의 염소이온 확산계수를 보다 정확히 예측하는 것이 매우 중요한 것을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 武若, “海洋環境下のコンクリートの含有塩分量調査分析”, 土木學會43回學術講演會概要集, p p36-37, 1988
2. 日本土木學會, “コンクリート標準示方書, 維持管理編”, 2002年制定