

# 염분 농도에 따른 콘크리트 구조물의 염분침투 해석

## Chloride Penetration Analysis of Concrete Structures with Chloride Concentration

양주경(Joo-Kyoung Yang)<sup>1)</sup>

### 요 약

염소이온 침투로 인해 철근 부식에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 염소이온 표면농도이다. 본 연구에서는 염소이온 표면농도에 따른 염해 진행 정도를 개발한 프로그램을 통하여 해석적으로 접근하였다. 또한 해석 프로그램을 통하여 염소이온 표면농도에 따른 내구수명을 산정하였다. 염소이온 표면농도가 600ppm인 경우도 염소이온 침투 깊이가 32.3mm 정도로 나타났다. 콘크리트의 피복두께를 40mm를 유지한다면 염소이온 표면농도가 600ppm일 때 콘크리트의 내구수명은 167년으로 검토되었다.

### Abstract

The major influence factor on chloride penetration into concrete structures is chloride ion concentration. In this study, chloride penetration analyses with chloride ion concentration were carried out by the developed program. Also, the service life of concrete structures was predicted. The penetration depth was 32mm in case that chloride ion concentration was 600ppm. It was shown that the service life of concrete structures with 40mm cover depth was 167 years even though they had been exposed at chloride ion concentration 600ppm during 100 years.

Key Words : chloride penetration, chloride ion concentration, penetration depth, service life

논문 접수 : 2008. 8. 7.

심사 완료 : 2008. 8. 14.

---

1) 정회원 : 청운대학교 교수

## 1. 서 론

철근콘크리트 구조는 콘크리트의 높은 알칼리성으로 인해 철근 주위에 생성되는 부동태 피막이 철근의 부식을 효과적으로 막아주고 콘크리트의 낮은 인장강도를 철근이 보강해주는 상호보완적인 복합재료라 할 수 있다. 따라서 철근콘크리트구조물이 오랜 기간 동안 그 기능을 유지해 나가기 위해서는 서로간의 이러한 보완작용이 얼마나 잘 유지되는지가 매우 중요하다. 일반적으로 철근콘크리트구조물의 수명이 다하게 되는 것은 철근의 피복역할을 하는 콘크리트가 노화되거나 중성화되어 철근의 부식이 자유롭게 발생하여 콘크리트피복이 파손되는 경우를 말한다. 이 때 피복콘크리트에는 철근의 부피팽창으로 인한 인장응력이 유발되며, 이로 인한 균열로 철근의 부식이 더욱 가속화되어 최종적으로는 철근콘크리트 상호간의 보완작용이 그 기능을 상실하게 된다. 그러나 최근에 중요하게 다루어지고 있는 염소이온 침투문제는 콘크리트피복이 노화되거나 중성화되지 않았음에도 철근의 부식을 유발시켜 단기간에도 내구성에 치명적인 손실을 줄 수 있기 때문에 구조물의 내구성을 정확하게 평가하기 위해서는 반드시 이에 대한 정확한 예측이 이루어져야 한다.

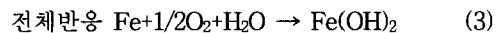
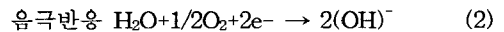
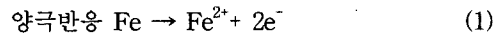
염소이온 침투로 인해 철근 부식에 영향을 끼치는 인자는 여러 가지가 있지만 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 염소이온 표면농도이다. 본 연구에서는 염소이온 표면농도에 따른 염소이온 침투 정도를 개발한 프로그램을 통하여 해석적으로 접근하였다. 또한 해석 프로그램을 통하여 염소이온 표면농도에 따른 내구수명을 산정하였다.

## 2. 철근 부식 기구

콘크리트의 내부에 묻힌 철근의 부식은 콘크리트 구조물의 성능저하를 일으키는 주요한 원인 중의 하나이다. 콘크리트는 pH가 12.5~13.0에 이르는 알칼리 상태에 있기 때문에 철근 주

위에 부동태피막이라 불리는 보호막이 형성되어 부식을 억제한다. 그러나, 콘크리트 구조물의 외부환경으로 인하여 또는 콘크리트 구조물 자체적 원인으로 인하여 콘크리트 내부에 일정량 이상의 염소이온이나 산성 음이온이 존재하게 되는 경우, 철근 주위의 부동태피막이 파괴되고 철근은 부식하기 쉬운 상태가 된다<sup>1)</sup>. 콘크리트 내부의 철근이 부식하면, 철근자체의 단면이 손실되어 구조물의 전체 강도가 저하될 뿐 아니라 철근의 체적이 본래의 약 2.5배로 팽창하고 그 팽창압으로 균열을 발생시키게 되고 균열이 발생하면 산소나 물의 공급이 용이하게 되어 철근의 부식이 더욱 촉진되고 결국에는 피복 콘크리트가 탈락하여 구조물은 현저한 성능저하를 일으킨다.

콘크리트 내부의 철근에 발생하는 부식은 습식의 하나로서 이 부식현상은 다음과 같은 전기화학적 반응으로 설명된다.



위 식과 같이 부식반응은 양극반응과 음극반응으로 이루어져 하나의 전지를 구성한다. 부식전지는 양극부와 음극부의 거리에 따라 조금 떨어진 위치에서 생기는 매크로셀과 비교적 가까운 거리에서 생기는 마이크로셀로 나누어지는데 매크로셀은 마이크로셀에 비해 전위차가 크기 때문에 부식속도가 대단히 빠르다. 해양환경과 같이 극심한 환경에서는 양극과 음극간의 거리가 약40~100cm가 되는 경우도 보고된바있다<sup>2),3)</sup>.

임계농도값에 대해서는 많은 연구가 이루어졌으나 연구결과의 분산정도가 커서 아직 일반적으로 널리 인정받는 값은 정해지지 못하고 있으며 콘크리트의 재료적 특성에 따라 변하는 것으로 인식되고 있다<sup>4)</sup>.

염소이온의 침투과정은 특정한 한 가지 현상만으로 명확하게 설명될 수 있는 것이 아니라 여러 가지 물리적, 화학적 현상이 복합적으로 작용된 결과이다. 물리적 현상으로는 확산, 모세관흡수(capillary suction), 수분이동, 염소이온흡착

등이 있으며, 화학적 현상으로는 콘크리트와 염소이온 간의 화학반응(고정화, binding)에 따른 Friedel염 형성 현상을 들 수 있다. 뿐만 아니라 콘크리트는 여러 가지 요인들에 의해 그 특성이 변하기 때문에 콘크리트의 재료적 특성들에 영향을 미치는 요인들(수화도, 물/시멘트 비, 재료 성분비 등)역시 고려해 주어야만한다<sup>5),6)</sup>.

### 3. 염소이온 침투 방정식

콘크리트 내부로의 염소이온 침투해석을 위해서는 우선 침투과정을 수식적으로 묘사한 염소이온 침투방정식을 구해야 한다. 통상 확산이론에 근거하여 침투방정식을 유도하게 되는데, 확산이란 어떤 매질에 녹아있는 농도의 차이로 그 물질의 이동이 유발되는 경우를 말한다. 확산작용은 일종의 분자운동의 결과이기 때문에 분자운동이 활발한 상태인 기체상태 또는 액체용매에 녹아있는 이온상태의 경우에 발생하게 된다. 확산작용에 의해 이동하는 물질의 양은 아래와 같은 Fick의 첫 번째 법칙에 따라 구해진다. 이때 모든 방향으로의 확산계수는 같다고 가정하였다.

$$J_c = -D_c \nabla C_c \quad (4)$$

여기서,  $J_c$  : 염소이온 확산유속 ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )

$D_c$  : 염소이온 확산계수 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$C_c$  : 염소이온 농도 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\nabla$  : gradient

식(4)에서 우변의 (-)기호는 농도가 감소하는 방향으로 물질의 이동이 발생한다는 사실을 의미한다. 즉, 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 물질이 이동하며, 그 농도차이와 확산계수가 클수록 이동량은 증가하게 된다.

또한, 콘크리트 미소부피에 대해 출입하는 총 염소이온양이 질량보존의 법칙을 만족하기 위해서는 다음과 같은 수식이 성립되어야 한다.

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = -\nabla \cdot J_c \quad (5)$$

여기서,  $t$  : 시간 (s)

$\nabla \cdot$  : divergence

식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 확산방정식을 유도할 수 있다(Fick의 두 번째 법칙).

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = \nabla \cdot (D_c \nabla C_c) \quad (6)$$

이 때  $D_c$ 가 콘크리트 내부의 위치와 상관없이 일정하다면 식(6)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

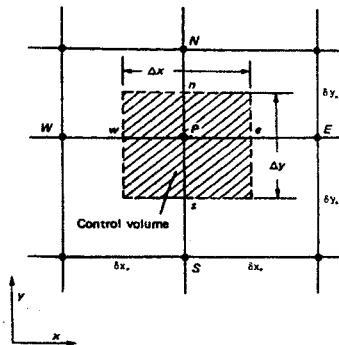
$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = D_c \nabla^2 C_c \quad (7)$$

이러한 Fick의 확산이론에 근거하여 염소이온 침투방정식을 세워 콘크리트 내부의 염소이온 농도분포를 구하기 위해서는 우선 해석하고자 하는 콘크리트의 염소이온 확산계수값을 알고 있어야 한다. 일반적으로 확산계수는 콘크리트에 대한 실제의 실험결과를 바탕으로 구해지는데, 확산계수가 콘크리트의 재료적 특성뿐만 아니라 염소이온 고정화, 습도분포 등에도 영향을 받는다.

### 4. 염소이온 침투 정식화

식(6)을 2차원 미분 방정식의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial C_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c \frac{\partial C_c}{\partial y} \right) \quad (8)$$



[그림 1] 2차원 유한체적 mesh

그림 1은 전형적인 2차원 유한체적(Finite Volume)을 나타낸 것으로, 이 유한체적의 각 변으로 유입 및 유출되는 flow와 유한체적 중심점의 농도 사이에 적합조건을 적용하면 다음과 같은 다원일차방정식을 얻을 수 있다<sup>7)</sup>.

$$a_P C_{c,P} = a_E C_{c,E} + a_W C_{c,W} + a_N C_{c,N} + a_S C_{c,S} + b \quad (9)$$

여기서,  $a_E = \frac{D_{c,e} \Delta y}{\delta x_e}$

$$a_W = \frac{D_{c,w} \Delta y}{\delta x_w}$$

$$a_N = \frac{D_{c,n} \Delta x}{\delta y_n}$$

$$a_S = \frac{D_{c,s} \Delta x}{\delta y_s}$$

$$a_P^0 = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}$$

$$b = a_P^0 C_{c,P}^0$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0$$

본 연구에서는 Gauss-Seidel iteration 방법을 사용해서 각 시간단계에 대해 식(9)의 해를 구하였다.

### 5. 염소이온 확산계수

염소이온 확산계수와 관련한 사항은 대부분 ACI의 Life 365에서 인용하여 사용하였다<sup>8),9)</sup>. 구체적인 내용은 다음과 같다.

일반적으로 염소이온 확산계수는 시간이 지남에 따라 서서히 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 해석 모델은 다음과 같은 지수형태의 수식을 사용해서 염소이온 확산계수를 산정하였다.

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (10)$$

여기서,  $D(t)$ :  $t$ 일 때의 염소이온 확산계수  
 $D_{ref}$ :  $t_{ref}$ 일 때의 염소이온 확산계수

$m$ : 지수

$D_{ref}$ 와  $m$ 은 물/결합재 비와 결합재의 성분비에 따라 결정되는 상수이다. 또한 염소이온 확산계수가 무한히 감소하는 것을 방지할 수 있도록 식(10)의 관계는 재령 30년까지만 유효한 것으로 보고, 그 이후에는 염소이온 확산계수가 일정한 값을 가지는 것으로 가정하였다.

일반적으로 온도가 증가할수록 염소이온 확산계수도 증가하는데, 본 해석 모델에서는 다음과 같은 모델을 사용해서 이 관계를 모사하였다.

$$D(T) = D_{ref} \cdot \exp \left[ \frac{U}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (11)$$

여기서,  $D(T)$ :  $T$ 일 때의 염소이온 확산계수  
 $D_{ref}$ :  $T_{ref}$ 일 때의 염소이온 확산계수  
 $U$ : 활성화 에너지 (35,000 J/mol)  
 $R$ : 기체 상수  
 $T$ : 절대 온도 (K)

일반적으로 물/결합재 비( $w/b$ )가 감소할수록 염소이온 확산계수도 감소하는 것으로 나타난다. 다음은 물/결합재 비에 따른 염소이온 확산계수 값을 나타낸 모델식이다.

$$D_{ref} = 1 \times 10^{(-12.06 + 240w/b)} \text{ m}^2/\text{s} \quad (12)$$

시멘트에 플라이애쉬나 고로슬래그를 혼입하면 재령에 따른 염소이온 확산계수의 감소량이 큰 것으로 알려져 있으며, 이를 반영하기 위해 다음과 같이 플라이애쉬 및 고로슬래그 혼입량이 지수  $m$ 에 영향을 미치는 것으로 모델링하였다.

$$m = 0.2 + 0.4 (FA/50 + SG/70) \quad (13)$$

여기서,  $FA$ : 플라이 애쉬 대체율(%)  
 $SG$ : 고로 슬래그 대체율(%)

### 6. 해석 및 결과 분석

#### 6.1 해석조건

1종포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트 강도 27 MPa인 부분에 대하여 두 가지 표면 농도 (300, 600 ppm)에 대해 염해 해석을 수행하고,

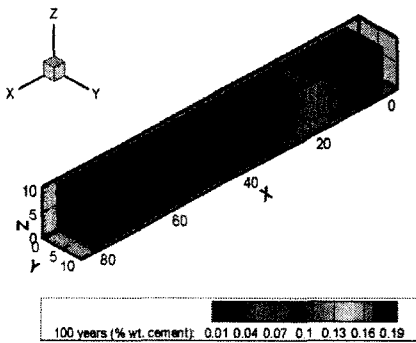
그 결과로부터 각각의 내구수명을 산정하였다. 이 때, 외기의 온도는 20℃, 상대습도는 75%로 가정하였다. 해석을 수행하고, 그 결과로부터 각각의 내구수명을 산정하였다. 사용한 콘크리트의 배합 조건은 표 1과 같다. 염화물 임계농도는 가장 보수적인 조건인 총 염화물 농도를 기준으로 하였으며, 시멘트 중량의 0.15%를 사용하였다.

<표 1> 사용한 콘크리트 배합

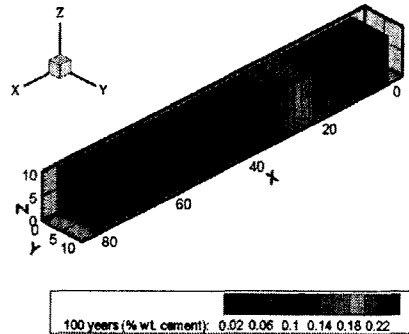
굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	W/C (%)	단위수량 (kg)	굵은골재함수율 (%)	잔골재함수율 (%)
25	12	44	174	0.8	1.0

6.2 해석결과 및 분석

그림 2와 그림 3은 구조물이 염화물에 노출된 지 100년이 지났을 때, 콘크리트 내부의 총 염화물 농도 분포(시멘트에 대한 중량 백분율로 표시)를 나타낸 것으로서 그림 2는 염소이온 표면농도가 300 ppm일 때, 그림 3은 염소이온 표면농도가 600 ppm일 때의 해석 결과이다.

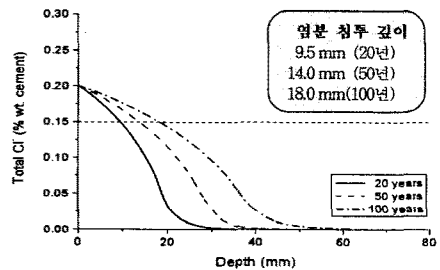


[그림 2] 총염화물 농도 분포(표면농도 300ppm)

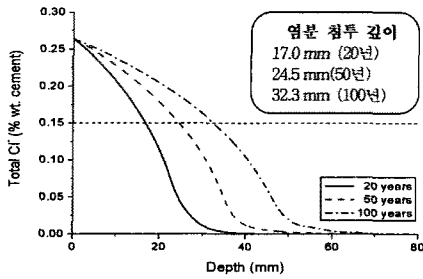


[그림 3] 총염화물 농도 분포(표면농도 600ppm)

그림 4와 그림 5는 구조물이 염해에 노출된 지 20, 50, 100년이 지났을 때, 콘크리트 내부의 총 염화물 농도 분포 이력을 나타낸 것으로서 그림4는 염소이온 표면 농도가 300 ppm일 때, 그림 5는 염소이온 표면 농도가 600 ppm일 때의 해석 결과이다. 그림에 나타난 염소이온 침투 깊이는 시멘트 중량의 0.15%를 임계농도로 설정하여 계산된 값이다. 해석 결과를 살펴보면, 각각의 경우 100년의 노출 기간 이후에도 염소이온 침투깊이가 각각 18, 32.3 mm에 머물고 있어 피복 두께를 40 mm로 가정한다면 철근 위치까지는 염소이온 침투가 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있다. 주어진 환경 및 재료 조건에 대해 200년간 염소이온 침투 해석을 수행하여 내구수명을 계산하였으며, 그 결과 염소이온 표면 농도가 300 ppm일 때는 염해 내구수명이 200년 이상, 600 ppm일 때는 약 167년으로 검토되었다.



[그림 4] 염화물 농도 분포 이력(표면농도300ppm)



[그림 5] 염화물 농도 분포 이력  
(표면농도 600ppm)

## 7. 결 론

본 연구에서는 염소이온 침투 과정을 모사할 수 있는 해석프로그램을 개발하였으며 개발한 프로그램을 사용하여 해석을 수행하였다.

염소이온 표면농도가 300ppm, 600ppm인 상태로 100년간 노출되면 염소이온 침투 깊이가 각각 18mm, 32.3mm에 머물고 있다. 콘크리트의 피복두께를 40mm를 유지하고 주어진 환경 및 재료 조건에 대해 내구수명을 계산한 결과 염소이온 표면 농도가 300ppm일 때는 염해 내구수명이 200년 이상, 600ppm일 때는 약 167년으로 검토되었다.

### <참고문헌>

1. Tutti, K., "Corrosion of Steel in Concrete", CBI report No. 4-82, Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Stockholm, 1982
2. Schießl, P., and Raupach, M., "Laboratory Studies and Calculations on the Influence of Crack Width on Chloride-induced Corrosion of Steel in Concrete", ACI Materials Journal, Vol.94, No. 1, pp. 56-62, 1997
3. Arya, C. and Ofori-Darko, F.K., "Influence of Crack Frequency on Reinforcement Corrosion in Concrete", Cement and

Concrete Research, Vol.26, No.3, pp. 345-353, 1996

4. Thomas, M., "Chloride Thresholds in Marine Concrete", Cement and Concrete Research, Vol.26, No.4, pp. 513-519, 1996
5. Pérez, B.M., Zibara, H., Hooton, R.D., and Thomas, M.D.A., "A Study of the Effect of Chloride Binding on Service Life Predictions", Cement and Concrete Research, Vol.30, No.8, pp. 1215-1223, 2000
6. Saelta, A.V., Scotta, R.V., and Vitaliani, R.V., "Analysis of Chloride Ion Diffusion into Partially Saturated Concrete", ACI Materials Journal, Vol.90, No.5, pp. 441-451, 1993
7. Patankar, S.V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere publishing corporation, 1980
8. Thomas, M.D.A., and Bentz, E.C., "Life-365: Computer Program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides", Program manual, 2000
9. Stanish, K., "Predicting the Diffusion Coefficient of Concrete From Mix Parameters", University of Toronto Report, 2000

### 양주경



한국과학기술원 토목공학과 (공학박사)  
현 청운대학교 철도행정토목학과 부교수  
관심분야 : 콘크리트 구조 및 재료