

콘크리트 표면염화물량의 시간의존성이 철근부식 개시시기에 미치는 영향

Effect of Time-dependancy of Surface Chloride Content on the
Time-to-corrosion Initiation in concrete

문 한 영^{*}, 김 홍 삼^{**}, 김 성 수^{***}, 최 두 선^{****}, 이 종 석^{*****}
Moon, Han Young Kim, Hong Sam Kim, Seong Soo Choi, Doo Sun Lee, Jong Suk

ABSTRACT

The initiation of steel corrosion due to chloride diffusion is predicted to consider time-dependancy of surface chloride content. the profile of chloride concentration is the following: constant condition > square root condition > linear condition

From these results, the initiation of steel corrosion in concrete is reverse order of above results of chloride profile. the effect of prolongation to initiation of steel corrosion is decreased with increasing concrete cover

1. 서론

해양환경과 같이 주로 염화물에 의한 구조물의 성능저하가 지배적일 경우 내구연한 예측 모델은 콘크리트 중의 철근부식을 주된 인자로 고려한다. 철근콘크리트 구조물의 염해는 강재 부식이 개시하기까지의 잠복기, 부식개시에서 부식균열 발생까지의 진전기, 부식균열의 영향으로 부식속도가 대폭으로 증가하는 가속기 및 강재의 대폭적인 단면감소에 의해 내하력 등의 성능이 대폭적으로 저하하는 성능저하기로 기간을 구분할 수 있다. 각 성능저하 과정은 기본적으로 구조물의 상태(수명)에 대응하고 있기 때문에 성능저하 진행 예측은 각 기간의 길이를 예측하는 것이 기본으로 된다. 한편, 부식개시기 이후의 진전기 등은 상대적으로 잠복기에 비하여 짧으므로, 콘크리트 중의 철근부식 개시시기는 보다 안전 측으로 구조물의 수명을 예측하는 한 방법이 된다.

최근, 국내에서도 염해와 관련된 많은 연구 성과가 있는 것은 사실이나 해안에 인접해 있어 비래염화물의 영향을 받거나 용빙제가 사용되는 육상콘크리트 구조물처럼 콘크리트 표면에서 염화물의 농축이 진행되는 경우에 대한 철근부식 개시시기 예측과 관련된 연구는 아직 국내의 관련 시방서의 기준이나 지침 등에 반영할 만한 수준의 연구는 진행되지 못한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 알려진 확산방정식의 경계조건에 따른 이론적인 해를 비교 검토하여 실용적인 수준의 예측 모델을 제안하기 위한 기초 연구과정의 일환으로 표면염화물량의 시간의존특성을 고려한 염화물 이온의 확산에 따른 콘크리트 중의 철근부식 개시시기의 예측결과를 비교하였다.

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수, / ** 정회원, 한양대학교 산업과학연구소 연구조교수

*** 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수 / **** 정회원, 한양대학교 토목공학과 대학원 박사수료

***** 정회원, 한양대학교 토목공학과 대학원 박사수료, 한국건설기술연구원

2. 염해에 대한 철근 콘크리트 구조물의 수명예측 모델

2.1 철근부식에 근거한 내구연한 예측 모델

해양환경과 같이 주로 염화물에 의한 구조물의 성능저하가 지배적일 경우 내구연한 예측 모델은 콘크리트 중의 철근부식을 주된 인자로 고려한다. 또한 철근 부식에 근거한 콘크리트 구조물의 사용 수명을 평가하는 것은 부식 개시 시기까지 만으로 보는 방법과 부식 개시시기와 부식 진행시기의 합으로 보는 방법이 있다. 철근부식의 관점에서 콘크리트 구조물의 내구연한을 예측하는 방법은 그림 1에 나타낸 바와 같이 Tuutti의 모델로써 기본개념을 설명할 수 있다.

이 모델에서는 철근콘크리트의 내구연한 예측시 철근부식 과정을 잠복기(initiation period)와 전진기(propagation period)로 나누고 있으며, 여기서 잠복기는 철근위치에서 염소이온의 농도가 철근부식 임계값에 도달하는데 걸리는 시간을 말하며, 이 기간 동안 철근의 부식이 전혀 발생하지 않는 것으로 가정한다. 그러므로 잠복기는 오직 염소이온의 확산계수와 부식발생 염소이온의 농도에만 의존하는 것으로 단순화될 수 있다.

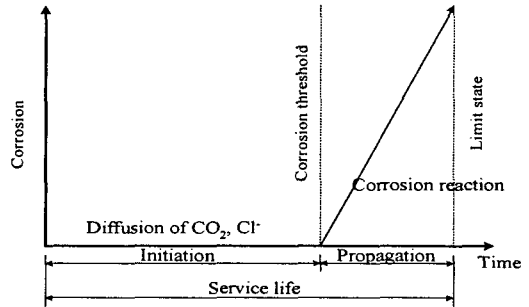


그림 1 콘크리트의 수명예측 모델(Tuutti)

2.2 염소이온 프로파일의 예측

콘크리트중의 염화물이온의 침투가 염소이온의 확산에 기인하고 식(1)과 같은 Fick의 1차원 확산법칙을 따른다고 가정한다. Browne을 비롯한 많은 연구자들은 콘크리트 표면에 도입되는 염소이온의 농도와 염소이온의 확산계수가 시간에 대해 일정하다고 가정하고 Tuutti의 내구연한 예측모델을 적용하여 부식발생시점을 예측하였다. 초기조건과 경계조건이 식 (2) 및 (3)과 같고 염소이온의 확산계수가 상수라면 식(1)의 1차원 확산방정식의 일반해는 식 (4)와 같다. Amey 등은 콘크리트의 표면염화물량(C_o)을 상수로 가정하여 부식개시 시기를 예측하는 Browne 등의 방법과는 달리 노출환경별로 표면염화물량을 선형($C(x,t) = kt$)과 시간의 제곱근에 비례($C(x,t) = s\sqrt{t}$)한다고 가정하고 다음과 같은 해를 제시하였다. 식 (5)는 표면염화물량을 선형으로 가정한 경우의 해이며, 식 (6)은 시간의 제곱근에 비례하는 경우의 해이다. 그러나 이들의 연구결과를 적용하기 위해서는 많은 현장 구조물로부터의 염화물 측정결과 비교와 장기간의 폭로 실험 또는 환경조건 등에 대한 데이터의 축적이 필요하다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{----- (1)}$$

$$t = 0, C(x,0) = 0 \quad (2), \quad x = 0, C(0,t) = C_o \quad \text{----- (3)}$$

$$C(x,t) = C_o \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}\right) \quad \text{----- (4)}$$

$$C(x,t) = k t \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2D t}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D t}}\right) - \left(\frac{x}{\sqrt{\pi D t}}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{4D t}\right) \right\} \quad \text{--- (5)}$$

$$C(x,t) = s \sqrt{t} \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{4D t}\right) - \left[\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{D t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D t}}\right)\right] \right\} \quad \text{--- (6)}$$

여기서, C_o : 표면의 염화물량, $C(x,t)$: 시간 t , 거리 x 에서의 염화물농도, erfc 는 오차함수의 여함수

3. 염화를 농도프로파일의 예측 및 가정조건

우리나라의 경우 2004년 콘크리트학회에서는 최근 개정된 일본의 “콘크리트표준시방서-耐久性照査型-(2002)”를 토대로 해양환경 하에 노출된 콘크리트 구조물의 표면 염화물량을 상수 값으로 제시하고 물-시멘트비에 따른 염화물이온의 확산계수를 상수 값으로 가정하여 식(4)에 의하여 콘크리트의 내구성 설계조건을 만족하도록 제시하였다.

본 연구에서는 표면염화물량의 시간의존성에 따른 염화물량 프로파일 및 철근부식 개시시기를 단순비교하기 위하여 표 1에서의 값을 토대로 표면에서의 염화물량이 노출시간 100년 시점에서 6.0kg/m^3 에 도달하며, 각각 선형증가 및 시간의 제곱근에 비례하여 증가하는 것으로 가정하고 식(4) 및 (5)의 의하여 염화물량 프로파일을 구하였다. 이들 결과를 식(3)에 의한 상수표면염화물량 조건과 비교하였으며, 이때 염화물이온의 확산계수는 $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 고정하였으며, 철근부식 임계염화물량은 1.2kg/m^3 으로 고정하였다.

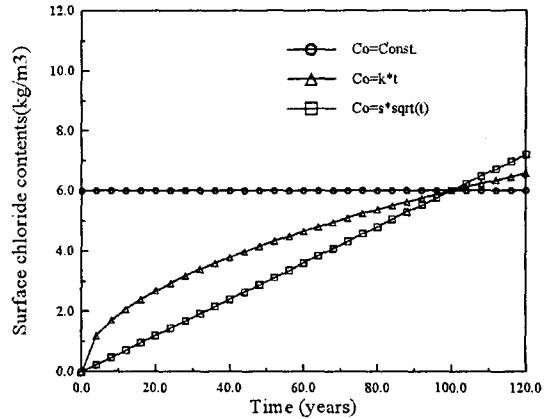


그림 2 표면염화물량의 시간의존성

3. 표면염화물량의 시간의존성을 고려한 철근부식 개시시기 예측결과의 비교

3.1 염화물 농도 분포의 변화

표면염화물량의 시간의존성을 각각 경과시간의 선형 비례(Case 1)와 경과시간의 제곱근에 대한 선형비례(Case 2)에 근거하여 예측한 염화물농도 프로파일의 결과를 25, 50, 75 및 100년에 대하여 정리한 것이 그림 3~4이다.

그림 3은 50년 경과 후의 염화물농도 프로파일로써 피복두께 6cm 위치에서의 염화물은 상수조건인 경우 약 2.70kg/m^3 인 반면 Case 1의 경우는 약 0.76kg/m^3 이고, Case 2의 경우는 1.38kg/m^3 으로 계산되었다. 그림 4은 100년경과 후의 염화물농도 프로파일로써 피복두께 6cm 위치에서의 염화물은 상수조건인 경우 약 3.56kg/m^3 인 반면 Case 1의 경우는 약 2.36kg/m^3 이고, Case 2의 경우는 2.82kg/m^3 으로 계산되었다.

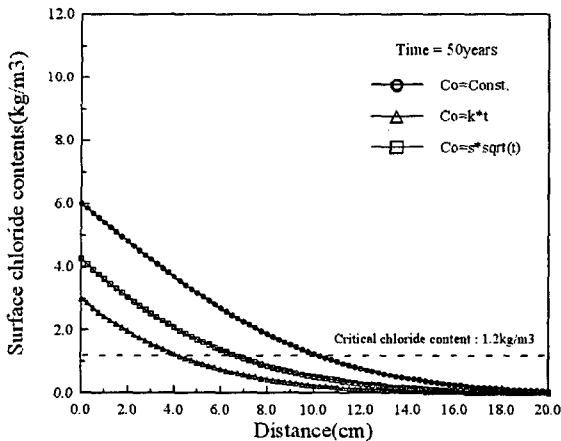


그림 3 염화물 농도 프로파일(50년)

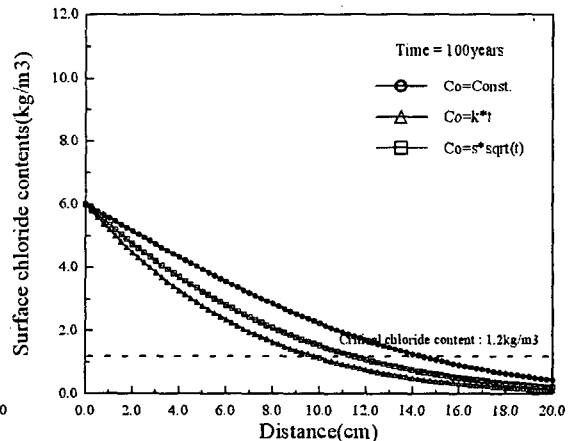


그림 4 염화물 농도 프로파일(100년)

한편, 그림 3~6모두 염화물농도 프로파일은 상수조건이 가장 많은 염화물 침투를 보이며, 그 다음은 Case 2의 경우이며, Case 1인 경과시간의 선형비례가 가장 적은 염화물 침투량을 나타내었다.

3.2 철근부식 개시시기의 비교

표면 염화물농도가 시간에 따른 변화하는 특성을 반영하여 임계염화물량을 1.2kg/m^3 으로 가정할 경우 피복두께 4, 6, 8 및 10cm에서의 철근부식 개시시기 예측결과를 정리한 것이 그림 5이다.

이 그림에서 피복두께 4cm의 경우 임계염화물량에 도달하는 시기는 상수조건인 경우 7.72년이었으며, Case 1의 경우는 48.66년이고 Case 2의 경우는 28.22년이었으며, 피복두께 10cm의 위치에서는 임계염화물량에 도달하는 시기는 상수조건인 경우 48.27년이었으며, Case 1의 경우는 102.33년이고 Case 2의 경우는 83.4년으로 나타났다. 이들 결과로부터 철근부식 개시시기는 전체적으로 표면염화물량이 상수조건인 경우 < 경과시간의 제곱근에 선형적으로 비례하여 증가하는 경우 < 경과시간에 선형적으로 비례하여 증가하는 순으로 나타났다. 한편, 철근부식 개시시기 연장효과는 피복두께 4cm의 경우 각각 상수조건 대비 6.3배 및 3.65배였고, 피복두께 10cm의 경우 상수조건 대비 약 2.1배 및 1.7배로 나타나 철근부식 개시시기 연장효과는 피복두께가 증가할수록 연장효과는 점차 감소하는 것으로 나타났다.

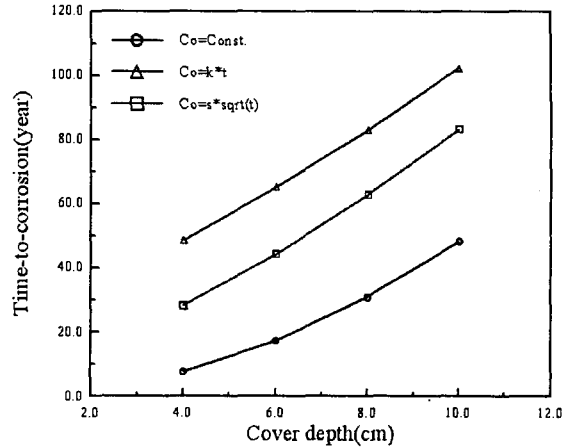


그림 5 표면염화물량의 시간의존성에 따른 철근부식 개시시기

4. 결론 및 향후 연구과제

표면염화물량의 시간의존특성을 고려한 염화물 이온의 확산에 따른 콘크리트 중의 철근부식 개시시기의 예측한 결과, 염화물농도 프로파일은 상수조건이 가장 많은 염화물 침투를 보이며, 그 다음은 표면염화물량이 경과시간의 제곱근에 비례하여 증가하는 경우이며, 경과시간에 선형적으로 비례하여 증가하는 경우가 가장 적은 염화물 침투량을 나타내었다. 이들 결과로부터 철근부식 개시시기는 전체적으로 표면염화물량이 상수조건인 경우 < 경과시간의 제곱근에 선형적으로 비례하여 증가하는 경우 < 경과시간에 선형적으로 비례하여 증가하는 순으로 나타났다. 철근부식 개시시기 연장효과는 피복두께가 증가할수록 연장효과는 점차 감소하는 것으로 나타났다.

향후 현장의 비례염화물량 또는 현장구조물의 염화물 농도 프로파일로부터 시간의존성 파라미터를 분석하여 국내 환경조건에 근거한 해환경하 철근부식 개시시기 예측을 방법을 제시하고자 한다.

감사의 글 : 이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 365, Service-Life Prediction-State-of-the-Art Report