

철근 부식 예측 시스템의 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Steel Corrosion Prediction System

○ 김도겸^{*} 박승범^{**} 이택우^{*} 이종석^{***} 이장화^{****}
Kim, Do Gyeum Park, Seung Bum Lee, Taek Woo Lee, Jong Suk Lee, Jang Hwa

ABSTRACT

One of the main deteriorating factors that affect the service life of concrete structures is the corrosion of reinforcement. The chlorides penetrate the concrete, destroy the passive layer surrounding the steel, and help initiate the steel corrosion. A Corrosion Prediction System(CPS) has been developed to assist the engineer in analyzing the service life of existing sea-shore structures and future concrete repairs by calculate the chloride diffusion in concrete. The CPS calculates the chloride diffusion coefficient, future chloride profiles, and steel corrosion time based on concrete mixing design, physical properties or recent chloride profiles. The CPS can be used to evaluate changes in concrete cover, chloride loads, and environmental conditions in different structural designs.

1. 서론

대형 콘크리트 교량을 포함한 해상 또는 해안가에 건설되는 콘크리트 구조물은 내구성능 측면에서 우수성이 보장되어야 하지만 해양 환경의 대표적인 특징인 염화물의 영향에 의해 구조물의 손상이 발생한다. 미국 유럽 등지에서는 이러한 해안구조물의 내구성능 평가와 열화 손상예측을 위한 연구가 활발히 진행되어 왔으나 우리나라의 경우에는 염해에 대한 조사분석 뿐만이 아니라 이에 대한 연구성과도 미미한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 해안 구조물의 사용수명을 예측하기 위한 일환으로 중량보존법칙 및 확산이론을 적용하여 염화물의 이동을 분석하고 분석된 결과로부터 철근의 부식시기를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

2. 염화물 확산 예측

콘크리트 내부로 염화물이 침투하여 철근 부위에서 일정량 이상의 염화물이 존재하게 되면 철근의 부식이 발생하여 부식압에 의해 피복콘크리트가 탈락하게 되고 종국에는 구조물의 수명을 단축시킨다. 따라서, 염화물의 침투에 의한 철근 콘크리트 구조물의 수명을 예측하기 위해서는 염화물이 철근까지

* 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구그룹 연구원

**** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구그룹 수석연구원

도달하는데 걸리는 시간과 염화물량이 일정량 이상으로 응집되는 것과 관련된 침투 메커니즘을 분석할 필요가 있다.

2.1 고정 염화물 이온과 자유 염화물 이온

콘크리트 중의 염화물은 매우 다양한 형태로 존재하게 되며 자유이온, 화학적 결합이온, 물리적 결합이온 및 화학적 흡착이온으로 분류할 수 있다. 이중 자유 염화물 이온만이 철근의 부식을 유발시켜 콘크리트의 열화를 촉진시키므로 침투된 총 염화물 이온량 보다는 자유 염화물 이온량이 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다. Rasheeduwafar, Page와 Vennesland, Arya, Hussain 등의 연구에 따르면 세공 용액중의 양이온들이 염화물 이온의 구속 정도를 결정하는 매우 중요한 영향 인자이지만 성분 비율은 시멘트의 화학적 구성 비율, w/c비, 혼화제의 사용 여부, 수화도(hydration degree) 및 함수율에 따라 다르게 나타나며 아직까지 이에 대한 규명은 명확하지 않은 실정으로 향후 지속적인 연구가 필요하다. 총 염화물 이온과 자유 염화물 이온과의 비로서 표현되는 콘크리트의 염화물 이온 구속 능력은 세공 용액중 양이온의 영향 등에 의해 화학적으로 평형을 이루면서 일정비율을 이루게 되는데 이러한 일정온도에서의 총 염화물 이온과 자유 염화물 이온의 평형농도 관계를 구속 등온식(binding isotherm)이라고 하며 Langmuir binding isotherm, Freundlich binding isotherm 및 Linear binding isotherm과 같은 일정한 방정식으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 염화물 이온의 구속 등온식을 자유 등온식으로 변환하여 사용하였다.

$$C_t = aC_i^b \approx 0.0441 \cdot C_i^3 - 0.3687 \cdot C_i^2 + 1.8359C_i$$

2.2 오차 함수

오차 함수(error function)는 가우스의 분포(Gaussian distribution)라고도 불리우는데 실험적 오차를 수학적으로 풀기 위하여 정규 분포로서 적절히 설명한 것으로 정규 분포도로부터 유도할 수 있다. 오차 함수는 일반적인 방법으로는 풀릴 수 없기 때문에 많은 연구자들은 컴퓨터에 의해 수치 해석된 값을 멱 함수 및 지수 함수로 해결하려고 노력하였으나 실패하였고, 최근 들어 Cady 와 Gannon 등의 연구자들이 다항식을 사용함으로써 비교적 정확한 해법을 얻을 수 있었다. 이 식은 1998년 Cady와 Gannon에 의해 제시된 비선형 회기 분석식으로 결정 계수(R^2)가 0.998이다. 본 연구에서는 오차 함수의 회기식에 대한 신뢰성을 향상시키기 위하여 비선형 회기 분석을 통하여 오차 함수를 분석하였으며, 우측의 식과 같은 수계산이 가능한 회기식을 도출하였다

$$\psi_0(x) = \int_{-\infty}^x N(0,1)dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy = \text{erf}(x)$$

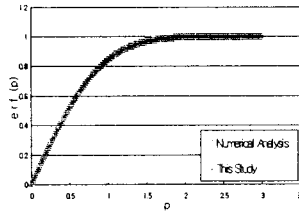


그림 1 오차 함수

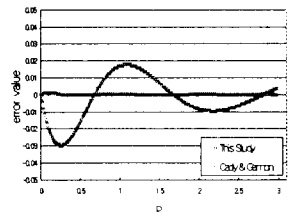


그림 2 오차값 비교

$$\text{erf}(p) = m_1p^5 + m_2p^4 + m_3p^3 + m_4p^2 + m_5p$$

$$m_1 = 0.0009, m_2 = -0.02, m_3 = 0.179, m_4 = -0.729, m_5 = 1.4$$

$$\text{erf}(p) = K_1p^6 + K_2p^5 + K_3p^4 + K_4p^3 + K_5p^2 + K_6p$$

$$K_1 = +0.00946, K_2 = -0.10522, K_3 = +0.43814, K_4 = -0.75950, K_5 = +0.15175, K_6 = +1.10763$$

2.3 염화물 확산계수

염화물 이온의 확산 계수를 중심으로 Fick의 제 2법칙(Fick's 2nd law)를 정리하면 우측의 식과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial D_e}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

이 식은 1979년 Gummerson 등이 보통 포트랜드 시멘트를 사용한 모르타 중의 수화 확산성 (hydraulic diffusivity)을 평가하기 위해 처음 사용되었으며, 1995년 Tumidajski와 Chan이 콘크리트중의 염화물 확산 계수에 대한 해석적 방법론(Boltzmann-Matano methodology)으로서도 제안한 것이다. 그러나, 염화물 확산 계수는 수치해석에 의해 염화물 프로파일로부터 역 계산함으로써도 동일한 값을 산출할 수 있으므로 본 연구에서는 후자의 방법을 택하였으며, 다음과 같은 함수를 구성하였다.

$$D(C') = -\frac{1}{2t} \cdot \left(\frac{dx}{dC} \right)_{C'} \cdot \int_0^{C'} x \cdot dC$$

$$D_e = f_1(c/w) \cdot f_2(W_c) = f_3(f_c) \cdot f_4(V_p) \cdot f_5(K)$$

2.4 염화물 이온의 철근 부식 임계치

염화물 이온의 철근 부식 임계치에 관하여는 많은 연구가 진행되었으나, 아직까지 명확히 정의되지는 못하였다. 부식 임계치에 관련하여 지금까지 수행된 연구 결과를 정리한 표 1을 보면 많은 연구자들이 부식 임계치로서 다양한 값을 제시하고 있음을 알 수 있다. 한편, Nilsson은 실험실 및 현장 실험 자료로부터 콘크리트 구조물의 사용 환경에 따른 부식 임계치를 제시하고 있는데, 이 값은 부식의 주요 인자인 산소 및 물의 확산을 고려한 것으로서 가장 신뢰성이 있는 값이라고 판단되므로 본 연구에서는 Nilsson이 제시한 염화물 이온의 철근 부식 임계치를 사용하였다.

표 1. 부식 임계치

Researcher(s)	Year	kg/m ³ of concrete	% of concrete weight
Lewis	1962	0.7	0.030
Hausmann	1967	0.2~2.8	0.009~0.122
Berman	1972	0.77	0.034
Clear and Hay	1973	0.6~0.9	0.026~0.039
Clear	1974	0.66	0.029
Stratfull et. al.	1975	0.66	0.029
Cady	1978	0.6~1.3	0.026~0.057
NRC	1979	-	0.028~0.041
Browne	1980	1.33	0.058
Pfeifer et. al.	1986	0.5	0.022
Brian et. al.	1987	-	0.014~0.022

표 2 Nilsson의 부식임계치

Condition	Cl % of Concrete Weight		
	w/c = 0.3	w/c = 0.4	w/c = 0.5
Concrete below sea-level	0.33	0.3	0.225
Concrete near Tidal-zone	0.15	0.12	0.09
Concrete above sea-level	0.12	0.09	0.06

3. 철근 부식 시기 예측 과정

3.1 구조물의 제원 및 특성

본 연구에서 개발한 철근 부식 예측 시스템을 이용하여 철근의 부식 시기를 예측하기 위해서는 구조물 현황 자료를 필수적으로 입력하여야 하며 콘크리트의 배합 특성, 콘크리트의 물리적 특성 또는 깊이별 염화물 함유량 측정 자료 중 한가지를 입력하는 것이 필요하다.



사진 1. 초기 화면

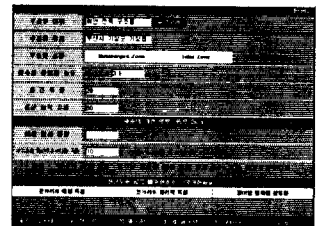


사진 2. 구조물 특성 입력창

3.2 콘크리트의 배합 특성

입력된 배합 설계표로부터 이론 공극율을 계산한 다음 시멘트-물 비, 단위 시멘트량 및 이론 공극율로부터 염화물 확산 계수를 추정하도록 구성되어 있다.

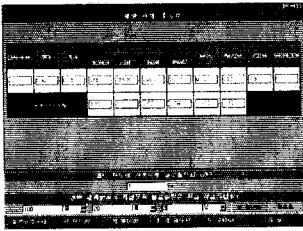


사진 3. 배합특성 입력창

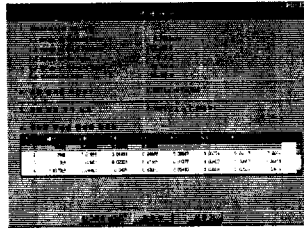


사진 4. 특성자료 출력창

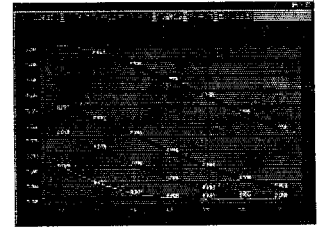


사진 5. 그래프 출력창

3.3 콘크리트의 물리적 특성

입력된 자료로부터 콘크리트의 28일 압축 강도를 추정하고 실험 공극율을 계산한 다음 28일 압축 강도, 실험 공극율 및 투기성 측정 자료로부터 염화물 확산 계수를 추정하도록 구성되어 있다.

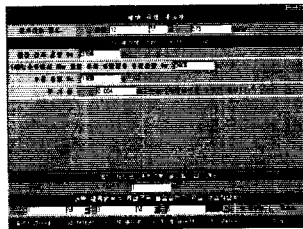


사진 6. 물리적특성 입력창

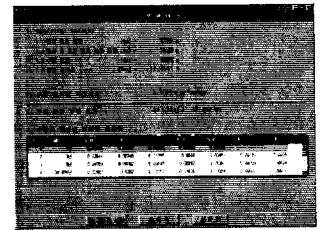


사진 7. 물리적특성 출력창

3.4 깊이별 염화물 함유량 측정

입력된 자료로부터 측정 재령에서의 염화물 확산 계수를 깊이별로 계산하고 여기서 대표 염화물 확산 계수를 도출한 다음 철근의 부식 시기를 예측하도록 구성되어 있다.

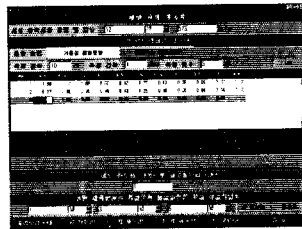


사진 8. 염화물자료 입력창

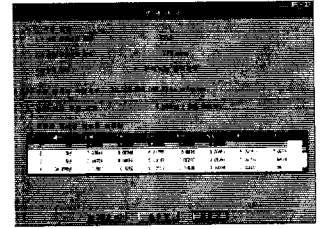


사진 9. 염화물자료 출력창

4. 결론

본 연구는 중량보존법칙 및 확산이론으로부터 염화물의 확산을 예측할 수 있는 기법을 유도하고 확산과 관련된 매개변수에 대한 해석적 접근을 통하여 해안구조물의 사용수명 예측에 중요한 자료를 제공할 수 있는 철근부식예측시스템을 개발하는 연구이다. 본 연구에서 개발된 철근 부식 예측 시스템(CPS)은 콘크리트의 배합, 물리적 특성 또는 코어 채취에 의한 염화물 함유량의 측정으로부터 염화물 확산계수, 재령에 따른 염화물 농도 및 철근의 부식시기를 예측할 수 있는 프로그램으로 해안구조물의 상태 평가와 향후의 보수시기 예측에 유용한 자료를 제공할 수 있을 것으로 판단되며, 기타 해안 구조물의 설계시 노출 염화물 농도 및 사용환경에 따른 콘크리트 피복두께의 결정 등에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) T.Liu and R.W.Weyers, "Modeling The Dynamic Corrosion Process in Chloride Contaminated Concrete Structures", Cement and Concrete Research, Vol.28, No.3, pp.365-379, 1998