
해양 구조물의 철근부식 예측기법 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Corrosion Prediction System of Reinforcing Bars in Sea-shore Structure



박승범*

Park Seung-Bum



김도겸 **

Kim Do-Gyeum

ABSTRACT

Service life of concrete structures that are exposed to the environmental attack is largely influenced by the corrosion of reinforcing bars due to the chloride contamination. Chloride ions penetrate continuously into concrete from the environment, and chloride diffusion velocity is governed by a mechanical steady state. In this study, a method is developed to predict corrosion initiation of reinforcing bars in the sea-shore structures, based on governing equations that take into account the diffusion of chloride ions and a mechanical steady state.

As a result of this study, Corrosion Prediction System (CPS) is developed, and it can be used to determine an optimal time for repair and rehabilitation actions need to be taken. Furthermore, CPS assists the concrete mixing design and determination of concrete cover depth in the design process of new structures by predicting of chloride concentrations in concrete mixture, exposed to salt concentrations and service environment.

Keywords : chloride, diffusion, prediction, corrosion, sea-shore structure, corrosion prediction system, prediction method

* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

시간경과에 따른 콘크리트 구조물의 성능변화는 구조물의 사용환경, 시멘트풀의 미세구조 및 콘크리트의 내구성능에 지배를 받으며 계절적 온도변화, 동결융해 싸이클, 강우와 습도의 변화, 지하수 또는 대기에서의 성능저하물질 응집 등을 포함한 환경적 요인이 주된 성능저하요인이 된다. 특히 해양 구조물과 같이 염화물에 의한 환경적 성능저하에 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 사용수명은 염화물의 확산속도를 결정짓는 재료특성과 염화물 확산에 저항하는 시간의 경과에 따른 구조물 요소의 저항특성에 따라 크게 달라질 것이다. 염화물은 이온의 형태로 주변환경으로부터 콘크리트의 내부구조 속으로 지속적으로 이동하며, 콘크리트를 통한 염화물 이온의 침입속도는 시멘트풀 및 콘크리트의 물리적 구조에 크게 의존한다. 또한 침투 이온과 철근 콘크리트 구성 요소 사이의 화학적 반응이 콘크리트의 공극구조에 현저하게 영향을 받는다고 할 지라도 이들의 반응과 확산속도는 역학적 평형상태에 의해 지배받는다.

따라서 본 연구에서는 염화물 이온의 확산과 역학적 평형상태를 반영할 수 있는 적정 지배방정식을 제시하고 염화물 확산 알고리즘을 정식화함으로써, 염화물 함유량의 변화 및 철근의 부식 시기를 예측할 수 있는 기법을 개발하고자 한다.

2. 기존 연구의 검토

철근부식 예측을 위한 초기의 기법은 적정 지배방정식의 구성과 지배방정식의 적용을 위한 정성적 추론에 초점이 맞춰져 있었으며, 이후 1976년 Halstead의 연구를 시작으로 Bazant, Tuutti, Browne, Cady, Saetta, Frey, Andrade, Chatter 등에 의하여 발전되었다.

수학적 예측기법의 구성에 관련된 최근의 연구 동향을 보면 1993년 Poulsen 및 Frederiksen은 Fick의 제2법칙으로부터 초기에 혼입된 염화물량을 고려한 확산방정식을 유도한 후 컴퓨터의 수치해석 이외로는 풀리지 않는 오차함수를 해결하기 위하여 표면탄젠트법을 사용한 단순 방

정식을 구성하였으며, Clifton은 철근부식에 의한 구조물의 수명예측 방법으로서 수학적 해석과 촉진시험의 병용을 제안하였고, Mori는 신뢰성 해석에 기초한 구조물의 상태평가와 수명예측 방법을 제안하였다. 또한, Saetta와 Frey 등은 Fick의 제1법칙과 질량보존법칙에 근거한 거시적 관점에서 확산이론을 적용한 수학적 방정식을 구성하였으며, Andrade와 Chatterji는 Nernst-Planck 방정식 및 Nerst-Einstein 방정식과 같은 전기 화학적인 기초방정식에 근거하여 철근의 부식을 예측할 수 있는 방정식을 구성하였다. 1994년 Andrade와 Sanjuan 등은 콘크리트의 염화물 확산에 대한 수학적 예측모델의 구성을 시도하였으며, Frey, Page 및 Tsivilis 등은 촉진 실험에서 얻은 결과로부터 수학적 해석을 통한 접근을 시도하였다. 1996년 Schiessl은 확산 법칙을 사용하여 단순화된 시간 의존적인 염화물 확산 방정식을 제안하였으며, Zhang 등은 Fick의 확산 이론과 전기적 이중층 이론을 중심으로 한 수학적 모델을 도입하여 염화물 확산을 해석하기 위한 방정식을 구성하였고, Garboczi 등은 삼투이론을 중심으로 미세구조와 염화물 이온의 확산 및 전이특성을 설명하려고 시도하였으며, Chan 등은 중성화와 황산염 침해가 염화물의 확산에 미치는 영향을 분석하였다. 한편, Basheer와 Chidiac 등은 콘크리트의 기본적인 특성을 투수특성과 파괴강도라고 정의하고 이들 특성과 성능저하 메카니즘과의 관계를 수학적 모델로서 설명하기 위하여 성능저하의 전체적 모델을 콘크리트의 미세구조에 근거한 환경적 반응으로 구성하였으며, Basheer등은 성능저하 메카니즘과 콘크리트 미세구조 사이의 상호작용에 따른 미시적 손상예측 방정식을 제안하였다. 1999년 Bazant는 염화물 흡착 등온선을 사용하여 염화물 이온의 결합능력을 모델화 한 후, Marty에 의해 개량된 Kozeny-Carman 방정식을 사용하여 시멘트풀의 확산을 분석하였다.

이와 같이 수학적 예측기법의 구성과 관련된 기존의 연구는 구조물의 사용환경과 콘크리트의 저항특성을 매개변수로 한 수학적 방정식으로부터 염화물의 확산을 예측할 수 있는 적합 모델을 구성하고자 한 연구가 주류를 이루고 있다.

3. 염화물 함유량 예측 방정식

3.1 기초 방정식의 구성

염화물의 확산에 의해 발생하는 철근 콘크리트 구조물의 손상을 정의하기 위해서는 구조물의 사용 수명과 관련된 기초방정식을 구성하여야 한다. 여기서 염화물의 확산계수는 환경 및 요인별로 다르므로 기초방정식을 수립하기 위해서는 염화물 확산계수를 상수 K_d 로 표현할 수 있다.¹⁾ 또한 계절에 따라 온도가 변화하지만 이러한 변화까지 성능저하 기법에서 모사할 수는 없으므로 시간의 항을 t_y 로 표현하여 일정하다고 보면 기초방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A_d = K_d \cdot t_y^n \quad (1)$$

여기서, A_d 는 시간에 따른 성능저하량을 나타내며, t_y 는 재령(년)을 나타낸다. n 값은 성능저하 메카니즘에 따라 달라지며 염해와 같이 확산이 성능저하를 지배하는 경우에는 1/2, 동결융해와 같이 반응이 성능저하를 지배하는 과정일 경우에는 1이 된다. 또한, 황산염 침해와 같이 성능저하 메카니즘이 반응과 확산에 의해 지배된다면 n 값은 1/2~1의 값이 된다.²⁾

따라서 염화물에 의한 손상을 표현할 수 있는 기초 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A_d = K_d \cdot \sqrt{t_y} \quad (2)$$

본 연구에서는 A_d 및 K_d 를 철근부식이 발생하는 시점에서의 염화물 농도(부식임계치) 및 염화물 확산에 관여하는 상수로 정의한 후, 구조물의 사용환경에 따른 염화물 함유량 예측 알고리즘을 구성하는 기초방정식으로 사용하였다.

3.2 염화물 함유량 예측 알고리즘의 구성

3.2.1 해수의 직접적인 영향을 받는 구조물

콘크리트 내에서의 염화물 이온확산은 염화물의 함유량이 높은 지역에서 낮은 지역으로 이동하며 확산 메카니즘에 의해 지배를 받는다. 따라서, 염화물 확산을 경계조건이 변화하지 않는 평형상태(Steady State Condition)로서 가정하면, Fick의 제 1법칙에 의해 설명할 수 있다.^{3,4)}

$$J = \frac{dm}{dt} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{dC}{dt} = D_e \frac{dC}{dx} \quad (3)$$

여기서, J 는 염화물 이온의 질량흐름(g/cm^3)을 나타내며, m 은 질량이동($g/cm^2 \cdot s$), C 는 어떤 거리 x 에서의 염화물 이온농도(g/cm^3), D_e 는 유효 확산계수(cm^2/sec)를 나타낸다.

평형상태에서의 확산계수는 식(3)에서 유도된 다음의 식으로부터 실험을 통하여 구할 수 있다.

$$D = \frac{V \Delta Q}{A \Delta t} \times \frac{L}{c_1 - c_2} \quad (4)$$

여기서 V 는 Cell 2의 용적(m^3)을 나타내며, ΔQ 는 Cell 2에서 염화물 이온의 증가량(kg/m^3), Δt 는 측정 시간간격(s), A 는 실험용액에 노출된 시험편의 면적(m^2), L 은 시험편의 두께(m), c_1 은 Cell 1에서의 염화물 이온농도(kg/m^3), c_2 는 Cell 2에서 염화물 이온의 평균 응집량(kg/m^3)을 나타낸다. 평형상태에서 확산계수를 구하기 위한 전형적인 확산셀 실험은 Gordon⁵⁾이 처음 시도하였으며, Ushiyama와 Gota⁶⁾가 경화된 시멘트풀에 대하여 여러 종류의 이온에 대한 확산 실험을 실시함으로써 공인되었다. 이 방법은 시험편의 특성에 따라 확산 계수가 명확하게 차이나므로 시험편별 상대비교에 도움을 주며 실험방법이 복잡하지 않아 실험오차가 크게 발생하지 않는 장점을 지니고 있으나, 사용환경을 평형상태로 가정하므로써 실제 구조물에서의 염화물 확산과 상당한 차이를 발생하게 되며 적용할 수 있는 시험편의 두께제한으로 인하여 콘크리트에 대한 적용은 불가능하고 모르터 또는 시멘트풀에 대하여만 가능한 단점을 지니고 있다.

부분적으로 포화되어있는 구조물의 경우와 같이 콘크리트가 경계조건이 변화하는 불안정 상태(non-stationary condition)에 있고 콘크리트 표면에 일정량의 염화물이 존재하고 있다고 가정하면, 염화물 침투 메카니즘은 Fick의 제2법칙과 질량보존법칙에 의해 설명할 수 있다.^{7,8)}

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

부식 발생이 없는 초기기간은 C_1 가 부식임계치의 농도 C_{cr} 과 같아질 때까지의 기간이 되며, 이 기간은 식(5)로부터 유도된 다음과 같은 일반적인 해로부터 산출할 수 있다.

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\operatorname{erf} \left(\frac{(2n+1)y}{2\sqrt{r}} \right) \right] \quad (6)$$

여기서 y 는 $(L-x)/L$ 이며, r 은 D_{et}/L^2 , x 는 피복두께(cm), L 은 콘크리트 요소의 두께(cm)가 된다. 위의 공식에서 $n=0$ 인 조건을 고려한다면, 식(6)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{1-y}{2\sqrt{r}} \right) \quad (7)$$

식(7)에 $y=(L-x)/L$ 과 $r = D_{et}/L^2$ 를 대입하면, Browne⁹⁾, Crank¹⁰⁾ 및 Laylor¹¹⁾가 얻은 미분방정식 해법과 동일한 표현인 식(8)이 된다.

초기조건 : $C_x = 0, x>0, t=0$

경계조건 : $C_x = C_0, x=0, t>0$

$$\frac{C_x}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4D_{et}}} \right] \quad (8)$$

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_{et}}} \right) \right] \quad (9)$$

식(9)는 표면에 일정한 염화물량이 존재할 때 유효한 식으로서 바닷물 또는 다른 일정한 염화물량에 노출된 콘크리트 구조물에 적합하다¹²⁾.

3.2.2 해풍에 의한 영향을 받는 구조물

해풍의 영향에 의해 지속적으로 비래염화물에 노출되어 있는 구조물의 경우에는 매년 구조물에 접하는 비래염분량(M_0)이 일정하다고 가정하면 식(5)는 다음과 같이 표현할 수 있다.¹²⁾

$$C_{(x,t)} = M_0 \left[\sqrt{\frac{t}{\pi D_e}} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4D_{et}} \right) - \frac{x}{2D_e} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2D_{et}} \right) \right) \right] \quad (10)$$

식(10)을 간략식으로 표현하면,¹³⁾

$$C_{(x,t)} = M_0 \left[\sqrt{\frac{t}{\pi D_e}} \cdot \exp \left(-\frac{x^2}{4D_{et}} \right) \right] \quad (11)$$

식(11)의 적용을 위해서는 대상 구조물의 비래염화물량을 정확히 평가하여야 하지만, 우리나라에는 아직까지 비래염화물량 평가방법이 정립되지 않은 상황이며, 비래염화물량에 대한 조사·분석자료도 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 해안으로부터의 거리별 비래염화물량을 조사한 일본의 평가자료³⁸⁾를 이용하였으며, 이 자료를 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

$$M_0 = -8.6102 \cdot \ln(d) + 55.241 \quad (12)$$

여기서 d 는 해안선으로부터의 거리가 된다.

한편, 해풍에 의한 영향을 받는 구조물일지라도 일정기간 이후에는 콘크리트 표면에 응집되는 염화물량이 일정한 농도를 유지한다고 가정하면 식(9)를 적용할 수 있으나^{39,40)}, 해안 폭로실험을 통하여 조석대 및 비말대에서의 C_0 값을 결정하고자 한 연구결과⁴¹⁾를 보면 560일의 실험기간동안 콘크리트 표면에 일정한 염화물량을 유지하는 C_0 를 얻는데 실패하였음을 보고하고 있으므로, 식(9)의 적용성 향상을 위해서는 비말대 및 조석대에 있어서의 C_0 산정에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

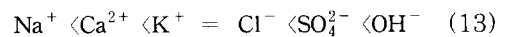
따라서, 본 연구에서는 해풍의 영향을 받는 구조물에 대하여 식(11) 및 식(12)를 적용하였으며, 우리나라의 사용환경에 적합한 거리별 비래염화물량 평가에 대하여는 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

3.3 염화물 확산 알고리즘의 정식화

3.3.1 구속 염화물 이온과 자유 염화물 이온

콘크리트 중의 염화물은 매우 다양한 형태로 존재하게 되며 이중 자유 염화물 이온만이 철근의 부식을 유발시켜 콘크리트의 성능저하를 촉진시키므로 침투된 총 염화물 이온량 보다는 자유 염화물 이온량이 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다.

일반적으로 이온들의 운동성은 식(13)과 같으며¹⁵⁾ 콘크리트 내부에서 발생하는 염화물 이온의 확산은 수산화 나트륨 이온과 황산 이온이 존재하지 않을 경우 양이온과의 전하적 평형상태에서 이루어진다고 할 수 있다.¹⁶⁾



총 염화물 이온과 구속 염화물 이온과의 비로서 표현되는 염화물 이온 구속능력은 세공용액중 양이온의 영향 등에 의해 화학적으로 평형을 이루면서 일정비율을 이루게 되는데 이러한 일정온도에서의 총 염화물 이온과 구속 염화물 이온의 평형농도 관계를 구속등온식이라고 하며 다음과 같은 일정한 함수로 표현할 수 있다.¹⁷⁾

Langmuir binding isotherm :

$$C_b = \frac{\alpha C_t}{1 + \beta C_t} \quad (14)$$

Freundlich binding isotherm :

$$C_b = \alpha C_f^b \quad (15)$$

Linear binding isotherm :

$$C_b = \alpha C_f \quad (16)$$

본 연구에서는 염화물 이온의 구속등온식을 자유등온식으로 변환하였으며, 변환과정은 다음과 같다.

Fick의 제2법칙으로부터 유도된 식(9)에 대하여 콘크리트가 완전히 포화되어 있다고 가정하면 총 염화물 이온량 C_t 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_t = w \cdot C_f + (1-w) \cdot C_b \quad (17)$$

여기서 C_t 와 C_f 는 총 염화물 이온량과 자유 염화물 이온량을 나타내며, w 는 증발 가능한 콘크리트중의 수분량(%)을 나타내고, C_b 는 구속 염화물량(%)을 나타낸다. 즉, 총 염화물 이온량은 자유 염화물 이온량의 평균값과 내부에 구속되어 있는 염화물 이온량의 합으로 정의할 수 있으며, 이때 w 는 콘크리트의 공극률을 측정하므로써 얻을 수 있다.

이온의 용적분포계수(volumetric distribution coefficient) γ 를 사용하여 구속 염화물 이온량과 자유 염화물 이온량을 표현하면 다음과 같다.

$$C_b = \gamma \cdot C_f \quad (18)$$

식(17)에 식(18)을 대입하면 다음과 같은 자유 등온식이 된다.

$$C_t = w \cdot C_f + (1-w) \cdot \gamma \cdot C_f = \alpha \cdot C_f \quad (19)$$

$$\alpha = w + (1-w) \cdot \gamma$$

여기서, α 는 자유 염화물 이온량과 총 염화물 이온량과의 관계를 나타내는 값으로서 염화물 이온이 포화된 공극 매개물에서 결합되는 양을 측정하거나 총 염화물 이온량과 자유 염화물 이온량을 측정하므로써 분석할 수 있다. α 의 값은 콘크리트의 공극률과 γ 계수에 의존하며 Atkinson과 Nickerson¹⁸⁾의 연구에서는 1~2의 범위로 Arya와 Newmann¹⁹⁾의 연구에서는 1.25~2.86의 범위에 있는 것으로 보고하고 있다.

3.3.2 오차함수

오차함수는 가우스의 분포라고도 불리우는데

실험적 오차를 수학적으로 풀기 위하여 정규 분포로서 적절히 설명한 것으로 정규 분포의 확률 밀도함수로부터 다음과 같이 유도된다.²⁰⁾

$$N(0,1) = f(x) = (2M)^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (20)$$

대응분포함수는 다음과 같이 표현할 수 있는데 이것을 오차함수(error function)라고 한다.

$$\begin{aligned} \Psi_0(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} N(0,1) dx \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\mu^2} d\mu = \text{erf}(x) \end{aligned} \quad (21)$$

오차함수는 일반적인 방법으로는 풀릴 수 없기 때문에 많은 연구자들은 컴퓨터에 의해 수치해석된 값을 멱함수(power function) 및 지수함수(exponential function)로 해결하려고 노력하였으나 실패하였고, 최근 들어 Cady와 Gannon²¹⁾ 등의 연구자들이 다항식을 사용하므로써 비교적 정확한 해법을 얻을 수 있었다. 식(22)는 1998년 Cady와 Gannon²¹⁾에 의해 제시된 비선형 회귀분석식으로 결정계수(R^2)가 0.998이다.

$$\begin{aligned} \text{erf}(p) &= m_5 p^5 + m_2 p^4 + m_3 p^3 + m_4 p^2 + m_1 p \\ m_1 &= 0.00092278, m_2 = -0.020777 \\ m_3 &= 0.17881, m_4 = -0.72907 \\ m_5 &= 1.39621 \end{aligned} \quad (22)$$

Table 1 Regression analysis results for error function by Cady²⁰⁾

Term	Coefficient	Standard Error	t-Observed
m_5	0.00092278	0.000040014	23.059
m_1	-0.020777	0.0006429	-32.313
m_3	0.17881	0.003580	49.936
m_2	-0.72907	0.008069	-90.344
m_4	1.39621	0.006247	223.486

이 식은 결정계수(R^2)가 0.998로서 매우 높은 상관성을 지니고 있는 것은 사실이지만 오차함수를 정밀하게 계산한다고는 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 오차함수의 정밀성에 대한 신뢰성을 향상시키기 위하여 비선형 회귀분석을 통하여 오차함수를 분석하였으며, 식(23)과 같은 수 계산이 가능한 회귀식을 도출하였다. 식(23)은 결정계수(R^2)가 0.9999987로서 Cady와 Gannon의 회귀분석식보다 매우 높은 상관성을 가지고 있다. Fig. 1은 컴퓨터에 의한 수치해석값과 본

연구에서 도출한 다차항 회귀분석값을 비교한 것으로 두 값이 매우 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한, Fig. 2는 Cady 와 Gannon의 다차항 회귀분석값과 본 연구의 다차항 회귀분석값을 컴퓨터에 의한 수치 해석값과의 오차로서 표현한 것으로 본 연구의 분석값이 수치해석값에 매우 근접함을 보여주고 있다.

$$\text{erf}(p) = K_1 p^6 + K_2 p^5 + K_3 p^4 + K_4 p^3 + K_5 p^2 + K_6 p$$

$$K_1 = + 0.00946, \quad K_2 = - 0.10522$$

$$K_3 = + 0.43814, \quad K_4 = - 0.75950$$

$$K_5 = + 0.15175, \quad K_6 = + 1.10763 \quad (23)$$

Table 2 Regression analysis results for error function by the present study

Regression Analysis Results			
Multiple correlation Coefficient	0.9999993		
Determination Coefficient	0.9999987		
Modified Determination Coefficient	0.9965856		
Standard Error	0.0003210		
Sample No.	299		
Term	Standard Error	t-Observed	P-Values
K ₆	0.000601	1843.572	0
K ₅	0.002331	65.10739	2.7E-176
K ₄	0.003289	-230.93	0
K ₃	0.002131	205.6384	0
K ₂	0.000644	-163.51	6.4E-290
K ₁	7.34E-05	128.8718	4.8E-260

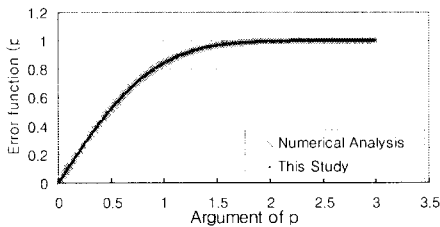


Fig. 1 The error function

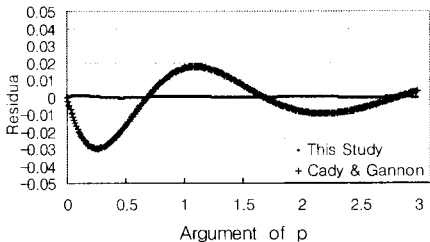


Fig. 2 Comparative of Residual

3.3.3 염화물 확산계수

염화물 이온의 확산계수를 중심으로 Fick의 제 2법칙을 정리하면 다음과 같다.^{22,23)}

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial D_e}{\partial x} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (24)$$

이 방정식은 비동차방정식(non-homogeneous equation)이므로 일반적 해법으로 풀기 불가능하게 된다. 따라서 식(24)를 Boltzmann 변수 $u = x/\sqrt{t}$ 를 사용하여 변환시키면 풀기 가능한 동차 미분방정식(homogeneous differential equation)으로 된다.

$$-\frac{u}{2} \frac{dC}{du} = \frac{d}{du} \left(D \cdot \frac{dC}{du} \right) \quad (25)$$

식(25)를 단순화시키기 위해 $C=0$ 에서부터 $C=C'(0 < C' < C_0)$ 로 적분시키면 식(26)이 된다.

$$-\frac{1}{2} \int_{C=0}^{C=C'} u \cdot dc = \left(D \cdot \frac{dC}{du} \right)_{C=0} \quad (26)$$

어떤 일정한 시간 간격에 대한 염화물 함유량 프로파일(profile)을 얻고자 하면, 식(26)은 염화물 프로파일 매개변수(parameter)의 향으로 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{2} \int_0^C x \cdot dc = D \cdot t \cdot \left(\frac{dC}{dx} \right)_{C=C'} \quad (27)$$

위의 식은 $C=0$ 일 때 $dC/dx = 0$ 인 구조물에 적용할 수 있으며, 확산계수 $D(C')$ 의 향으로 정리할 수 있다.

$$D(C') = -\frac{1}{2t} \cdot \left(\frac{dx}{dC} \right)_{C'} \cdot \int_0^C x \cdot dC \quad (28)$$

식(28)은 1979년 Gummerson²⁴⁾ 등이 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 모르타 중의 수화확산성을 평가하기 위해 처음 사용되었으며, 1995년 Tumidajski와 Chan²⁵⁾이 콘크리트중의 염화물 확산계수에 대한 해석적 방법론(Boltzmann-Matano methodology)으로서도 제안한 것으로 향후 정확한 해법을 얻기 위한 지속적인 연구가 필요하다. 한편, 염화물 확산계수는 식(9) 및 (11)을 역계산하여 컴퓨터의 수치해석을 실시하므로써도 산출할 수 있다.

3.3.4 염화물 이온의 철근부식임계치

현재까지 염화물 이온의 철근부식임계치에 관하여 많은 연구가 진행되었으나 아직까지 명확한 정의가 이루어 지지는 못하였다.

부식임계치에 관련하여 지금까지 수행된 연구 결과^{26~33)}를 정리한 Table 3을 보면 많은 연구자들이 부식임계치로서 다양한 값을 제시하고 있음을 알 수 있다. 한편, Nilsson³⁴⁾은 실험실 및 현장 실험자료로부터 콘크리트 구조물의 사용환경에 따른 부식임계치를 제시하고 있는데, 이 값은 부식의 주요인자인 산소와 물의 확산을 고려한 것으로서 가장 신뢰성이 있는 값이라고 판단되므로 본 연구에서는 Nilsson이 제시한 염화물 이온의 철근부식임계치를 사용하였다. 부식임계치의 적용에 있어서는 ACI⁴²⁾에서 제시하고 있는 식(29) 및 콘크리트 표준시방서⁴³⁾에서 제시하고 있는 식(30)에 의해 구조물의 콘크리트 강도로부터 시멘트-물비를 계산한 후, Table 4를 회기분석한 식(31)~(33)으로부터 부식임계치를 산출하였다.

$$f_c(t) = \frac{t}{0.4 + 0.85 \cdot t} f_{28} \quad (29)$$

$$f_{28} = -210 + 215 \cdot C/W \quad (30)$$

• Submerged Zone :

$$C_{cr1} = -0.525 \cdot C/W + 0.495 \quad (31)$$

• Tidal Zone :

$$C_{cr2} = -0.3 \cdot C/W + 0.24 \quad (32)$$

• Atmospheric Zone :

$$C_{cr3} = -0.3 \cdot C/W + 0.21 \quad (33)$$

Table 3 Threshold chloride ion concentration

Researcher(s)	Year	Threshold Value	
		kg/m ³	% by Con'c wt.
Lewis ²⁶⁾	1962	0.7	0.030
Hausmann ²⁷⁾	1967	0.2~2.8	0.009~0.122
Berman ³³⁾	1972	0.77	0.034
Clear & Hay ²⁹⁾	1973	0.6~0.9	0.026~0.039
Clear ²⁹⁾	1974	0.66	0.029
Stratfull ³⁵⁾	1975	0.66	0.029
Cady ³³⁾	1978	0.6~1.3	0.026~0.057
NRC ³¹⁾	1979	-	0.028~0.041
Browne ³¹⁾	1980	1.33	0.058
Pfeifer ³³⁾	1986	0.5	0.022
Brian ³²⁾	1987	-	0.014~0.022

Table 4 The critical threshold values³⁴⁾

Condition	Cl ⁻ % by Concrete Weight		
	W/C=0.3	W/C=0.4	W/C=0.5
Submerged Zone	0.33	0.3	0.225
Tidal Zone	0.15	0.12	0.09
Atmospheric Zone	0.12	0.09	0.06

4. 철근부식 예측 기법의 개발

4.1 기법의 구성

본 장에서는 질량보존법칙과 Fick의 제2법칙으로부터 구조물의 사용환경별 염화물 함유량 예측 방정식의 구성, Freundlich 구속등온식으로 부터 자유 염화물 이온 등온식의 구성, 비선형 회귀분석을 통한 오차함수 다항식의 구성 및 Nilsson³⁴⁾의 연구결과로부터 부식임계치의 구성을 통하여 철근의 부식시기 및 재령에 따른 염화물 함유량의 변화를 예측할 수 있는 철근부식 예측시스템을 구성하였다. 또한, 콘크리트 중의 염화물 확산속도 평가를 통하여 콘크리트의 배합특성 및 물리적 특성에 따른 염화물 확산 예측모델을 구성한 후, 여기서 도출된 예측모델식을 본 시스템에 결합시킴으로써 콘크리트의 배합, 피복두께 및 사용환경에 따른 철근부식시기를 예측할 수 있도록 구성하였으나, 본 논문에서는 이에 대한 내용을 생략하기로 한다.

철근부식 예측 시스템(Corrosion Prediction System, 이하 CPS)은 공학자가 손쉽게 사용할 수 있도록 윈도우즈 환경하에서 GUI(Graphic User Interface) 방식에 따라 프로그램을 작성하였으며, 제공된 정보에 따라 개인용 컴퓨터로 필요 정보를 수치해석하므로써 기존 해안 구조물의 유지관리 및 신규 해안 구조물의 설계시에 필요한 유용한 정보를 제공하도록 하였다. CPS는 현장 점검자료로부터 염화물 확산계수, 재령에 따른 염화물 농도의 변화 및 철근의 부식시기를 예측하므로써 기존 구조물의 적정 보수 및 보강시기 결정에 유용한 정보를 제공할 수 있으며, 콘크리트의 배합, 표면 염화물의 농도 및 사용환경에 따른 콘크리트 중의 염화물 농도를 예측하므로써 신설 구조물의 콘크리트의 배합 및 피복두께의 결정 등에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

화면구성을 위한 프로그래밍시에는 가능한 한 사용자 편의를 위하여 운용에 필요한 키(key)를 최소화하도록 하였으며 기존자료의 조회, 수정, 출력, 도구의 설치 및 결과의 그래픽 처리등으로 사용자의 의사결정에 도움을 주는 각종 운영프로

그램을 작성하였다. 또한, 시스템의 효율적 운용을 위하여 운영체제로서 윈도우즈 98을 채택하였다. 시스템의 Application은 Borland Delphi 4.0을 사용하였고 Data Base는 Paradox Local Table을 사용하였으며, 검색 엔진은 Borland Data Base Engine을 사용하였다.

Fig. 3은 CPS의 구성 흐름도를 나타낸 것이다.

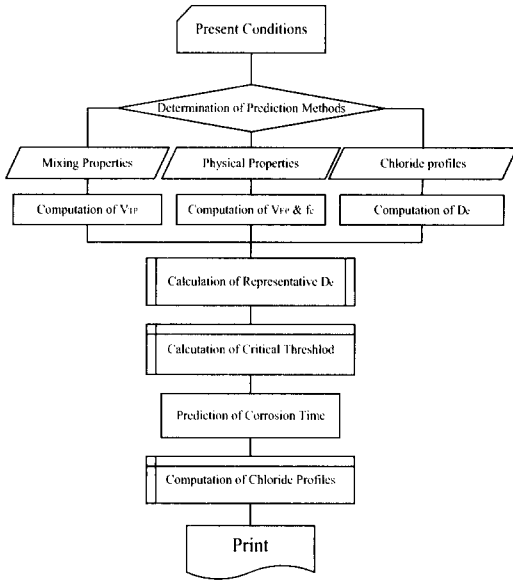


Fig. 3 Flow Chart of CPS

4.2 자료의 입력

본 연구에서 개발한 철근부식 예측기법을 이용하여 철근의 부식시기를 예측하기 위해서는 구조물 현황자료를 필수적으로 입력하여야 하며 콘크리트의 배합특성, 콘크리트의 물리적 특성 또는 깊이별 염화물 함유량 측정 자료 중 한가지를 입력하는 것이 필요하다.

구조물 현황자료 입력창에서는 구조물의 조건, 철근의 직경 및 피복두께, 해수의 염화물 농도, 비례 염화물량 및 구조물의 해안으로부터의 거리를 입력하며, 콘크리트의 배합특성자료 입력창에서는 콘크리트의 배합설계 및 염화물량 프로파일을 알고싶은 재령을 입력하도록 구성되어 있다. 또한 깊이별 염화물 함유량 자료 입력창은 시료 채취시의 재령, 측정방법, 측정깊이, 측정간격, 측정회수 및 측정 염화물 함유량을 입력하도록 구성되어 있다.

4.3 CPS의 연산

CPS는 구조물의 사용환경 및 물리적 특성에 따라 3장에서 제시한 적합 방정식으로부터 깊이별 염화물 함유량 및 철근부식 시기를 수치 해석하도록 구성되어 있다.

5.1 철근 부식 예측 기법의 검증

5.1 검증 방법

본 연구에서 제시한 철근부식 예측기법에 의한 해석과의 비교를 위하여 김은겸³⁵⁾ 및 문한영³⁶⁾의 학술논문을 이용하였다. 김은겸 논문의 자료는 표면으로부터 깊이 10cm까지 2cm 간격으로 수용성 염화물 함유량을 측정한 자료이며 문한영 논문의 자료는 깊이 12cm까지 3cm 간격으로 수용성 염화물 함유량을 측정한 자료이다.

구조물의 현장점검 자료로부터 철근의 부식시기를 예측하는 방법은 현장시료로부터 측정된 깊이별 염화물 함유량 프로파일로부터 깊이별 염화물 확산계수를 산출하고 평균 염화물 확산계수를 결정한 다음 수치해석에 의해 철근부위에서의 염화물 함유량이 부식 임계치에 도달되는 시점을 계산하는 것이다. 따라서 해안 구조물의 실측결과에 의한 검증은 실측 가용성 염화물 함유량 프로파일과 CPS에 의해 산출된 염화물 함유량 프로파일과의 비교 분석으로 이루어져 있다

5.2 검증 대상 모델

검증대상 구조물은 사용년수가 17~48년이 경과한 RC 파일 및 해안 교량으로 구조물의 제원 및 사용 환경은 Table 5와 같다.

5.3 검증 결과

Fig. 4은 RC 파일에 대하여 실측값과 해석값을 비교한 것이며 Fig. 5는 해양 교량에 대하여 실측값과 해석값을 비교한 것으로 CPS에 의한 해석 결과가 표면부를 제외하고는 대부분 일치하는 것으로 나타나고 있어 CPS에 의한 염화물 확산 해석 방법이 유용함을 입증하고 있다.

이를 고찰하여 보면, 콘크리트의 표면부에서 실측값이 해석값에 비하여 매우 작게 나타나고 있는데 이것은 표면부에서 염화물의 용출 및 이동이 자유롭기 때문에 확산이론만으로는 정의할 수 없기 때문^{35,37)}으로 생각되며 이러한 현상을 고려한 예측 방정식을 구성하기 위해서는 표면부에서의 염화물 확산, 용출 및 물리·화학적 결합을 정의할 수 있는 수학적 모델을 구성하여야 하므로 본 연구에서는 이들 영향을 고려하지 않고 이에 대한 연구를 향후의 연구 과제로 한다.

Table 5 Structural Properties^{35,36)}

Structure Name	Age (Year)	Environmental Conditions	f_c (kg/cm ²)
RC Pile (1) ³⁵⁾	30	Submerged	-
RC Pile (2) ³⁵⁾	30	Submerged	-
Gerjae Big Bridge ³⁶⁾	24	Tidal	164
Sumjingang Bridge ³⁶⁾	22	Tidal	267
Samchuk Bridge ³⁶⁾	29	Tidal	195
Yongdu Bridge ³⁶⁾	17	Atmospheric	205
Sukpo Bridge ³⁶⁾	30	Atmospheric	187
Byensang Bridge ³⁶⁾	48	Tidal	155
Sangseo Bridge ³⁶⁾	33	Tidal	184
Jupo Bridge ³⁶⁾	24	Tidal	152

Table 6 Chloride diffusion coefficients

Structure Name	$D_e(10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s})$
RC Pile (1)	0.9076
RC Pile (2)	2.2824
Gerjae Bridge	2.5712
Sumjingang Bridge	3.215
Samchuk Bridge	1.4894
Yongdu Bridge	1.213
Sukpo Bridge	1.1368
Byensang Bridge	1.085
Sangseo Bridge	1.0283
Jupo Bridge	1.44

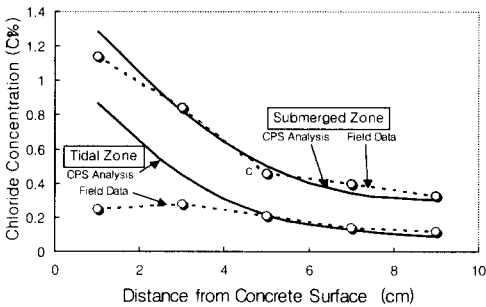


Fig. 4 Variation of Water soluble chloride profiles for RC Piles

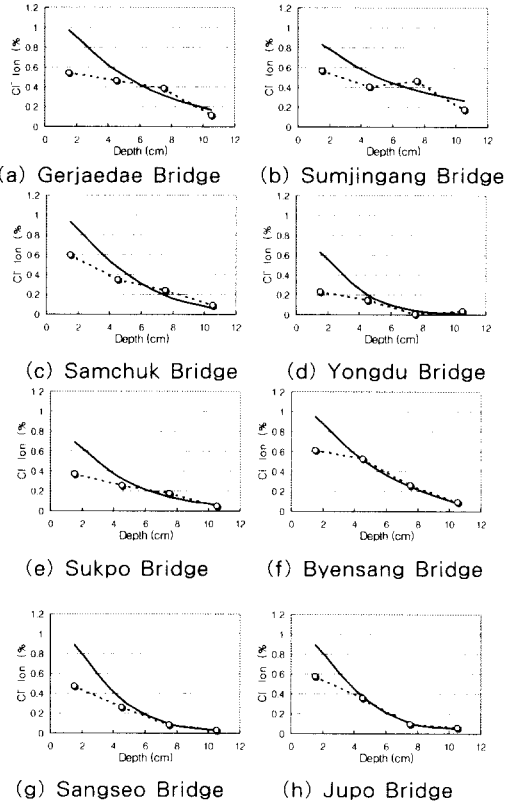


Fig. 5 Water soluble chloride profiles for RC Bridges by field data and CPS Analysis

Table 7 Predictions of corrosion times

Structure Name	Corrosion time (Year)
RC Pile (1)	7.16
RC Pile (2)	2.85
Gerjae Big Bridge	2.53
Sumjingang Bridge	1.95
Samchuk Bridge	4.36
Yongdu Bridge	5.36
Sukpo Bridge	5.71
Byensang Bridge	5.99
Sangseo Bridge	6.32
Jupo Bridge	5.51

5.4 철근 부식 시기 및 염화물 함유량 예측

Table 7은 현장 조사 자료를 근거로 계산된 염화물 확산 계수로부터 철근의 부식시기를 예측한 것으로 철근 부식 시기는 1.95~7.16년으로 예측되었다. 한편, Fig. 6는 RC Pile의 재령에 따른 염화물 함유량의 변화를 예측한 그래프로서

재령 초기에는 염화물 함유량의 분포 곡선의 경사가 매우 급하게 나타나고 있으나 재령의 경과와 함께 염화물 함유량의 분포 곡선이 완만해지면서 직선적으로 변화하는 것을 알 수 있다.

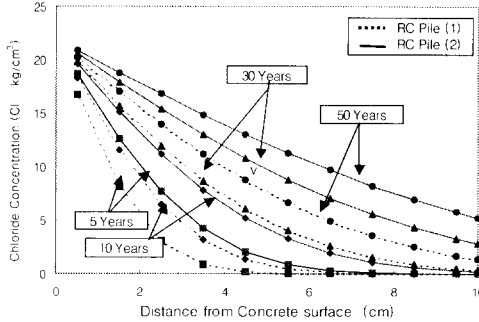


Fig. 6 Prediction of total chloride profiles for RC Pile

6. 결 론

본 연구에서는 이론적 접근을 통하여 구조물의 사용환경에 따른 수학적 지배방정식을 구성함으로써 콘크리트 중의 염화물 확산속도 및 철근의 부식시기를 예측하고자 하였다. 본 연구에서 수행한 연구결과를 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 콘크리트 구조물의 사용환경별 재령에 따른 염화물 함유량의 변화를 예측할 수 있는 염화물 함유량 예측 알고리즘을 구성하였고, 예측 알고리즘의 주요 구성요소인 고정 염화물 이온과 자유 염화물 이온의 관계, 오차함수, 염화물 확산계수 및 철근부식 임계치를 정식화하였다. 본 논문에서 제시한 오차함수식은 결정계수가 1.0에 근접하며, Gannon이 제시한 식보다 오차함수를 더욱 정밀하게 표현하고 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 염화물 확산알고리즘을 정식화하고 실험결과를 반영하는 염화물 확산 예측모델을 조합하여 철근부식 예측 시스템(CPS)을 개발하였다. 검증결과, CPS는 염화물 확산속도를 비교적 정확히 예측할 수 있음이 확인되었고, 깊이에 따른 염화물 함유량의 예측에 있어서도 표면부를 제외하고는 해석값이 실측값과

대부분 일치하고 있어 염화물 확산을 해석하고 예측하는데 매우 유용함을 입증하였다.

- 3) 따라서 CPS는 기존 구조물의 적정 보수 및 보강시기의 결정에 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 콘크리트의 배합, 표면 염화물의 농도 및 사용환경에 따른 콘크리트 내부의 염화물 농도를 예측함으로써 설계시 콘크리트 구조물의 배합 및 피복두께 결정 등에도 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. James R. Clifton, "Predicting the Remaining Service Life of Concrete", NISTIR 4712, National Institute of Standards and Technology, p.73, Nov. 1991
2. P. A. M. Basheer, S. E. Chidiact and A. E. Long, "Predictive models for deterioration of concrete structures", Construction and Building Materials, Vol.10, No.1, pp.27-37, 1996
3. C. Andrade, "Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements", Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.724~742, 1993.
4. H.J.V. Tyrrell and K.R. Harris, "Diffusion in Liquids - A theoretical and experimental study", U.K. Butterworths Monographs in Chemistry, pp.61~72, 1984
5. Gordon, A.R., "The Diaphragm Cell Method of Measuring Diffusion", Annual N.Y. Academy Science, Vol.46, p.285, 1945
6. Ushiyama, H. and Gota, S., "Diffusion of Various Ions in Hardened Portland Cement Paste", in Preceeding 6th International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, Vol. II-1, pp. 331~337, 1974
7. J.R. Clifton, L.I. Knab, E.J. Garboczi, and L.X. Xiong, "Chloride Ion Diffusion in Low Water-To-Solid Cement Pastes", NISTIR 4549, National Institute of Standards and Technology, Apr. 1991.
8. J.R. Clifton, "Predicting the Service Life of Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 90, No.6, pp.611~617, Nov.-Dec. 1993
9. R.D. Browne, "Mechanisms of Corrosion of Steel in Relation to Design, Inspection, and Repair of Dffshore and Coastal Structure",

- ACI SP-65, U.S. Detroit, 1980.
10. J. Crank, "The Mathematics of Diffusion", Clarendon Press, Oxford, England, 1983
 11. Lator, H.M., "Chloride Sealant on the Columbia River Bridge", Contract No.C 09738 ,Materials and Research Section, Oregon State Highway Division, Oregon Department of Transportation, Feb. 1989.
 12. Arne B. Ripple and Bruce A. Suprenant, "Colorado Department of Highways Chloride Content Evaluation Program for Reinforced Concrete Bridge Decks", CDOT-DTD-R-92 -7, Univ. of Colorado Department of Civil Engineering, p.37, Jun. 1992.
 13. Uji, K., Y. Matsuoka and T. Maruta, "formulation of an Equation for Surface Chloride Concentration of Concrete due to Permeation of Chloride from Corrosion of Reinforcement in Concrete", Society of Chemical Industry, Elsevier Applied Science, pp.258~267, 1990
 14. R.E. Weyers, "Concrete Bridge Protection and Rehabilitation, Chemical Physical Techniques, Service Life Estimates", SHRP-S-668 ,National Research Council, Washington, D.C, p 357, 1994
 15. Atkins, P.W., "Physical chemistry - 5th edition", Oxford University Press, Oxford, U.K., 1994
 16. Mills, R., and Lobo,V.M.M, "Self-diffusion in electrolyte solutions : Physical sciences data 36", Elsevier Applied Science, New York, 1989
 17. Collepardi, M, Marciallis, A., and Turriziani, R., "Penetration of Deicing Agents in Cement Pastes", Industria Italiana del Cemento, Vol. 69,pp.143~150, 1972
 18. Atkinson, A., and Nickerson, A.K., "Diffusion of Ions through Water Saturated Cement ", Journal of Material Science, Vol. 19, pp.3068~3078, 1984
 19. Arya, C., and Newman, J.B., "Assessment of Four Methods of Determining the Free Chloride Content of Concrete", Materials and Structures, Vol.23, pp.319~330, 1990.
 20. Rudolf K. Bock, "http://ikpel1101.ikp.kfa-juelich.de/briefbook_data_analysis", Internet, Apr. 1998.
 21. Edward J. Gannon, "A Life Cycle Cost Model for Use in The Optimization of Concrete Bridge Deck Repair and Rehabilitation", Thesis of Ph.D, The Pennsylvania State Univ., p.175, May. 1998
 22. N.R. Buenfield and J.B. Newman, "Examination of Three Methods for Studying Ion Diffusion in Cement Pastes, Mortars and Concrete", Materials and Structures Journal, No. 20, pp.3~10, 1987
 23. P.S.Magnet and B.T.Molly, "Prediction of long term chloride concentrations in concrete", Materials and Structures Journal, No. 20, pp.3~10, 1987
 24. R.J.Gummerson, and V.S.Ramachandran, "Water flow within porous materials observed by NMR imaging", J. of Natural, No.281, pp.56~57, 1979.
 25. P.J.Tumidajski, G.W.Chan, R.F.Feldman and G.Strathdee,"A Boltzmann-Matano Analysis of Chloride Diffusion", Cement and Concrete Research, Vol.25, pp.1556~1566, 1995
 26. Lewis, D.A., "Some Aspects of the Corrosion of Steel in Concrete", In Proceedings 1st International Conference of Metal Corrosion, London, pp.547~555, 1962
 27. D.A. Hausmann, "Steel Corrosion in Concrete", Materials Protection, pp.19~23, Nov. 1967
 28. Clear, K.C."Evaluation of Portland Cement Concrete for Permanent Bridge Deck Repair", Interim Report No. FHWA-RD-74-5 , 1974
 29. Clear,K.C."Time-to-Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs", FHWA-RD-76-70, FHWA, p.30, Apr. 1976
 30. National Research Council, "Durability of Concrete Bridge Decks", National Cooperative Highway Research Program, Synthesis of Highway Practice 57, Transportation Research Board, 1979
 31. Browne, R.D., "Mechanisms of corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structure", ACI SP-65, p.179, 1980
 32. Brian, B. Hope, and Alan K.C.Ip, "Chloride Corrosion Threshold in Concrete", ACI Materials Journal, pp.306~314, Jul.-Aug., 1987

33. J.Zemajtis, "Modeling the Time to Corrosion Initiation for Concretes with Mineral Admixtures and/or Corrosion Inhibitors in Chloride-Laden Environments", Thesis of Ph. D., Virginia Polytechnic Institute and State Univ., p.139, Jan. 1998
34. L.O. Nilsson et al, "HETEK, A System for Estimation of Chloride Ingress into Concrete. Theoretical Background", The Danish Road Directorate, Copenhagen, Denmark, Report No. 83, 1997
35. 김은겸, 신치범, 이운환, "콘크리트 구조물의 염화물 이온 침투거동해석", 콘크리트학회지 제 9권 6호, 1997
36. 문한영, 김성수, 류재석, 김성섭 "해양환경하에 있는 콘크리트 구조물의 염해에 대한 고찰", 한국콘크리트학회 봄학술발표회, 제8권 1호, pp.83~88
37. J.G.M. Wood, "Prediction of Concrete Durability : Achieving Durable Concrete", E& FN SPON, The Geological Society, London, U.K., pp.39~50, Nov. 1995
38. 石原金盛 "沖縄本島における大氣中の海鹽粒子量と金屬の腐食速度", 沖縄と防蝕 創刊號, 1983.3
39. Browne, R.D. "Design Prediction of the Life for Reinforced Concrete in Marine and Other Chloride Environments", Durability of Building Materials, Vol. 1, 1982.
40. Poulsen,E., "The Chloride Diffusion Characteristics of Concrete - Approximative Determination by Linear Regression Analysis", Nordic Concrete Research, Research Project, Trondheim, 1990
41. S.K.Roy, L.K.Chye and D.O.Northwood, "Chloride Ingress in Concrete as Measured by Field Exposure Tests in the Atmospheric, Tidal and Submerged Zones of a Tropical Marine Environment", Cement and Concrete Research, Vol23, pp.1289~1306, 1993
42. American Concrete Institute, "Design for Effects of Creep, Shrinkage and Temperature in Concrete Structure", ACI SP-27, American Concrete Institute, 1971
43. 건설교통부, "콘크리트 표준 시방서", 건설교통부, pp.58, 1996

요 약

해양 구조물과 같이 염화물에 의한 환경적 성능저하에 노출되어 있는 콘크리트 구조물의 사용수명은 염화물 이온에 의한 철근 부식에 의해 결정된다. 염화물은 이온의 형태로 주변 환경으로부터 콘크리트 내부 구조속으로 지속적으로 이동하며 확산 속도는 역학적 평형상태에 의해 지배받는다.

본 연구에서는 염화물 이온의 확산과 역학적 평형상태를 반영할 수 있는 적정 지배방정식의 구성과 확산방정식의 정식화를 통하여 재령에 따른 염화물 함유량의 변화 및 철근의 부식시기를 예측할 수 있는 기법을 개발하였다. 본 연구에서 개발한 철근부식예측기법(CPS)은 기존 구조물의 보수·보강시기 결정에 유용한 정보를 제공할 수 있을 뿐만 아니라 콘크리트의 배합, 노출 염화물의 농도 및 사용환경에 따른 콘크리트중의 염화물 농도를 예측하므로써 신규구조물의 콘크리트 배합 및 피복두께의 결정등에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

(접수일자 : 1999. 10. 7)