

염소이온에 의한 철근부식에 관한 콘크리트 구조물의 내구년한 예측을 위한 수학적 모델

Mathematical Models for Predicting Service Lives of Concrete Structures on Chloride Induced Corrosion of Steel Reinforcement

오병환* 정원기** 강승희*** 장승업****
Oh, Byong Hwan Chung, Won Ki Kang, Seung Hee Jang, Seung Yup

Abstract

Recently, to utilize country effectively, many concrete structures such as Young Jong Do New Airport, Seollae Bridge are being constructed. Therefore, Corrosion of steel reinforcement of concrete structures become more and more serious, and prediction of service lives of concrete structures considering steel corrosion is needed much more. The methodologies of predicting service life have been studied for various views, but mathematical modelling based on diffusion theory is generally applied. The purpose of this paper is to investigate current mathematical models, and suggest theoretical basis on estimation of service lives of concrete structures in marine environment. Thus, the procedures for selecting variables such as threshold chloride concentration, diffusion coefficient, etc are suggested, and the service lives calculated through these procedures for various diffusion coefficients and cover depths are presented.

1. 서 론

염소이온에 의해 유발되는 철근의 부식은 콘크리트 구조물의 성능저하를 유발하는 가장 중요한 요인의 하나이다. 특히 최근 들어 간척시설물이나 해안구조물등과 같이 해수환경에 직접 노출되는 토목 구조물의 건설이 점차 활발해지고 있어 염해에 의한 철근의 부식은 더욱 더 심각한 문제가 되고 있다.

* 정희원, 서울대 토목공학과 교수, 공학박사
** 정희원, 동아건설산업(주) 선임연구원, 공학박사
*** 동아건설산업(주) 선임연구원
**** 서울대학교 토목공학과 석사과정

따라서, 이러한 철근부식을 고려한 구조물의 내구년한을 합리적으로 예측하여 설계, 시공 및 유지관리 의 각 단계에서 내구년한 개념을 도입하기 위한 노력이 계속되고 있으며 이 같은 노력의 하나로 여러 연구자들에 의해 주로 확산법칙에 근거한 수학적 예측모델이 개발되었다. 본 연구는 이러한 기존의 수학적 모델을 검토하여 해양환경하에 있는 콘크리트 구조물의 합리적인 내구년한 산정을 위한 이론적 기초를 제공하는 데 그 목적을 두고 있다.

2. 부식발생기구

일반적으로 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트는 시멘트의 수화에서 발생된 다량의 수산화칼슘에 의해 강한 알칼리성을 띠고 있기 때문에 부식의 활성화에 대해 우수한 저항력을 가진다. 그러나, 콘크리트 구조물이 주기적, 장기적으로 염해환경에 노출되면 철근주위의 이러한 부동태피막은 파괴되며, 철근의 부식은 철근 자체의 단면손실에 의한 구조물의 내하력 감소와 철근 리브의 손상에 의한 부착성능의 감소를 유발하고 결국 철근의 부피팽창에 의해 균열을 유발하여 전반적으로 구조물의 성능을 떨어뜨리게 된다.

염소이온에 의한 철근의 부식현상은 염소이온, 산소, 수분등의 콘크리트 내에서의 확산현상과 일련의 전기화학적 반응(Electrochemical Reaction)으로 설명될 수 있다. 먼저, 일정량의 염소이온이 간극수를 통해 철근주변까지 확산되면 철근주위의 부동태피막이 파괴된다. 이 때, 콘크리트 내의 각종 결함이나 밀실정도의 차, 염분과 알칼리 농도의 차와 같은 불균일성과 강재표면의 화학적 불균일성으로 인해 강재표면의 전위가 마이크로적으로 불균일해지게 되어 양극과 음극으로 분극되고 이러한 국부전지를 통해 전류가 흘러 부식이 시작된다. 이러한 전기화학적 반응을 살펴보면 다음과 같다.

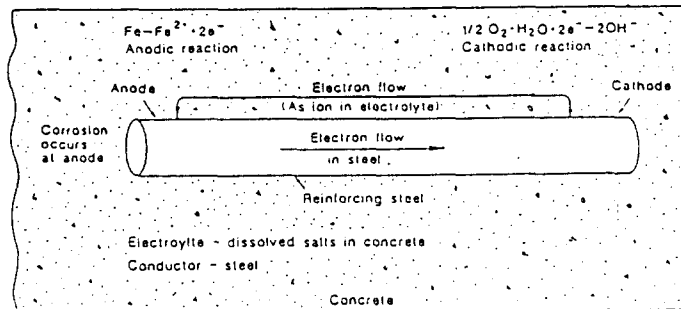
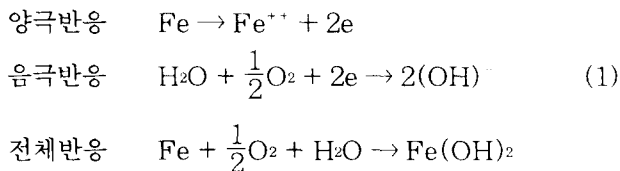


그림 1 철근의 부식과정

따라서, 철근의 부식현상은 염소이온의 확산속도, 콘크리트의 알칼리도와 함께 수분의 침투, 산소의 확산등과도 밀접한 연관성을 갖는다.

3. 철근부식에 관한 기존의 내구년한 예측모델

3.1 Tuutti의 모델

Tuutti는 염소이온에 의한 철근부식을 고려한 수학적 모델을 개발하기 위해 다음 그림 2와같이 부식과정을 휴지기(Initiation Period)와 부식진전기(Propagation period)로 나누어 설명하고 있다.

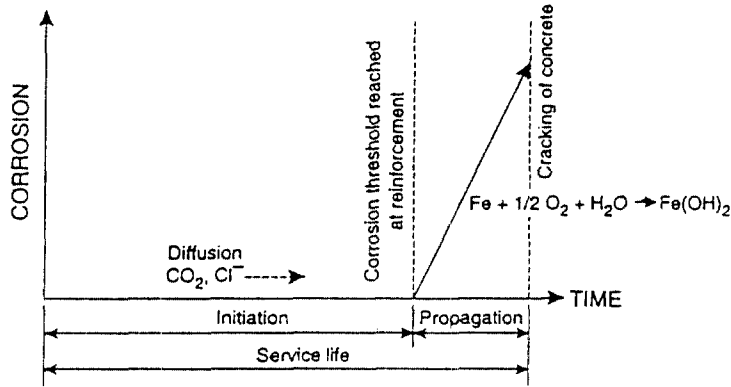


그림 2 Tuutti 모델의 개념도

그의 모델에 따르면 염소이온의 확산에 의해 철근의 부식이 활성화되기 이전의 단계, 즉, 휴지기는 철근위치까지 염소이온이 일정량이상 확산되는 시간이며 염소이온의 확산은 다음과 같은 Fick의 1차원 확산법칙을 따른다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

여기서, D_{eff} 는 콘크리트 내에서 구속되는 염소이온의 양을 고려한 염소이온의 유효확산계수(Effective Diffusion Coefficient)이며, x 는 확산거리이고, t 는 확산시간을 의미한다.

한편 부식진전기(propagation period)에서의 부식발생율(corrosion rate)은 음극에서의 산소 확산속도, 공극내 용액의 저항성등에 의해 영향을 받으며, 산소 확산저항성은 콘크리트 덮개의 포화정도와 포화되지 않은 단면의 공극구조와 상대습도등에 의해 결정된다.

3.2 Clifton의 접근방법

Clifton등은 콘크리트 표면에서의 염소량과 염소이온의 확산계수가 일정하다는 가정에서 Tuutti 모델에서의 휴지기를 산정하는 방법을 다음과 같이 제시하였다. 즉, Fick의 확산방정식의 일반해를 이용하여 일정량의 염소이온이 철근까지 도달하는데 걸리는 시간(t_P)을 다음과 같이 산정하였다.

$$\frac{C_t}{C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{d}{2\sqrt{D_{eff} \cdot t_P}}\right) \quad (3)$$

여기서, d 는 철근이 묻힌 깊이이며, C 는 철근이 활성화되는 염소이온의 농도이고, erf 는 잔류에러 함수이다. Clifton에 의하면 일반적으로 휴지기는 부식이 활성화되는 기간에 비해 매우 길기 때문에 이를 최소내구년한으로 간주할 수 있다.

그러나 이 모델에서는 확산계수를 상수로 표현하고 있어서 재령, 양생온도, 상대습도, 온도 등에 따른 확산계수의 변화를 고려할 수 없다는 문제가 있다. 최근의 연구에서는 이러한 확산계수의 변동성을 고려하고자 하는 시도가 계속 되고 있다. 만일 확산계수를 위의 몇가지 영향인자에 대한 함수로 표현해 낼 수 있다면 보다 정확한 내구년한 예측이 가능할 것이다.

3.3 Bazant의 모델

해수에 깊이 잠긴 콘크리트의 철근 부식에 대한 내구년한을 예측하는 Tuutti 모델과 유사하지만, 좀 더 복잡한 모델이 Bazant에 의해 제시되었다. 그는 부식과정을 염소이온만의 확산이 아니라 1)공극 속에서의 모세관수(Capillary Water)의 확산 및 대류현상과 이에 따른 산소와 염소이온의 확산, 2)염소이온에 의한 철근의 활성화(Depassivation), 3)양극과 음극의 전위차와 분극에 대한 산소와 제이산화철의 영향, 4)철근 표면에서의 제이산화철(Ferrous Hydroxide, Fe(OH)₂)의 확산, 5)공극의 전해질을 통과하는 전류의 흐름, 그리고 6)부식발생에 의한 산소와 제이산화철의 질량감소와 반응 동역학(Reaction Kinetics)에 기초한 녹의 생성을 등에 대해 표현하고 있다.

이로부터 그는 전체적인 부식현상을 이론으로부터 논리적으로 기술하고자 하였으나, 그 해를 구하기 위해서는 많은 가정조건이 필요하고 각 변수를 정확히 산정하기 힘들기 때문에 완전하지 못하다. 따라서, 보다 합리적인 가정과 변수의 산정이 뒷받침되어야만 좀 더 정확한 내구년한의 산정에 이용할 수 있을 것으로 보인다.

4. 염소이온의 확산에 기초한 내구년한의 예측과정

확산계수(D)의 결정

T.Zhang과 O.E.Gjølrv 등의 몇몇 연구자들은 염소이온 투과시험(ASTM 1202-91)을 변형하여 확산계수를 측정하였다. 이 연구에 따르면 염소이온 투과시험법에서의 전위차에 의한 염소의 확산은 오직 온도, 전위차와 농도차의 함수이고, 따라서 확산계수는 다음 식과 같다.

$$D = \beta_0 \frac{300kT}{\epsilon \epsilon_0 A \Psi} \frac{HV}{C_{NaCl} A_0} \frac{dC}{dt} \quad (4)$$

여기서, β_0 : Boltzman 상수(1.38×10^{-16} ergs/K), T : 절대온도(K)

H : 시편의 두께(cm), V : NaOH용액이 담긴 셀의 부피(cm^3)

C_{NaCl} : NaCl의 농도(mol/l), A_0 : 시편의 면적(cm^2)

ϵ : 이온의 원자가, ϵ_0 : 전자의 전하량(4.8×10^{-10} e.s.u)

$A \Psi$: 전위차(Volt), dC/dt : 염소이온의 농도증가율(mol/l/sec)

위 식으로부터 일정온도와 전위차로 염소이온 투과시험을 수행한다면 염소이온의 농도증가율(dC/dt)만이 확산계수를 결정하는 유일한 변수임을 알 수 있다. 따라서 통과전하량 대신 농도의 변화율을 측정함으로써 확산계수를 계산할 수 있다.

콘크리트 표면의 염소이온 농도(C_0)의 결정

콘크리트 노출면에서의 염소이온농도는 콘크리트가 위치한 환경조건을 나타내는 변수이다. 구조물이 어느정도의 염해에 노출되는가는 현장조사를 통해 결정되어야 하는데 일반적으로 해수 중에 포함된 염소이온의 양은 3.3%정도이고, 이를 몰농도로 환산하면 0.9~0.95 mol/l 정도가 된다.

콘크리트 내부의 초기 염소이온 농도(C_i)의 결정

콘크리트 내부의 염화물은 제조시 시멘트, 골재, 혼합수 및 혼화제등이나 그 외에 다른 경로로부터 콘크리트 내로 도입된다. 이 염화물의 양은 재령에 따른 큰 변화는 없으나 철근의 부식 및 기타 콘크리트의 물성에는 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 콘크리트 중의 염화물은 철근이 부식을 일으키지 않는 한계량이하가 되도록 관리해야 한다. Hausmann은 부식을 유발하는 내부염화물의 농도에 대한 연구에서 약 0.02 mol/l 이하일 때 강의 부식이 발생하지 않는다고 제안하였다. 만약 내부 염화물이 존재한다면 식 (3)은 다음 식 (3a)와 같이 바뀌게 된다.

$$\frac{C_t - C_i}{C_0 - C_i} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t_p}}\right) \quad (3a)$$

부식이 시작되는 염소이온 농도(C_i)의 결정

부식이 시작되는 염소이온의 양은 콘크리트의 내부 pH와 깊은 관련이 있다. Hausmann등은 Cl⁻와 OH⁻의 비가 철근의 부식에 미치는 영향에 대한 연구에서 [Cl⁻]/[OH⁻]가 0.61이하야 부식이 발생하지 않는다고 하였으나 최근의 연구(Lambert et al.)에 따르면 그 값이 3이하일 때도 부식이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이 결과를 신뢰한다면 pH가 12.5~13.0이상인 일반 콘크리트 중에서의 부식시작농도 C_i는 약 0.1~0.3 mol/l 이상일 것으로 보인다.

부식이 시작되는 시간(t_p)의 산정

이상의 과정에 따라 변수값을 산정하면 식(3)에 의해 부식이 시작되는 시간을 계산할 수 있고 이를 계략적으로 최소내구년한으로 간주한다. 그림 3은 덮개와 확산계수에 따른 내구년한 산정결과를 보여 준다.

5. 결론 및 향후 연구방향

이상과 같이 내구년한 예측을 위한 기존의 수학적 예측모델을 검토하였고 이에 근거하여 내구년한을 산정하는 과정을 제시하였다. 그러나, 이렇게 계산된 내구년한은 엄밀한 의미의 내구년한이라 보기 어렵고 단지 각 배합특성에 따른 상대적인 비교의 기준으로만 이용될 수 있을 것이다.

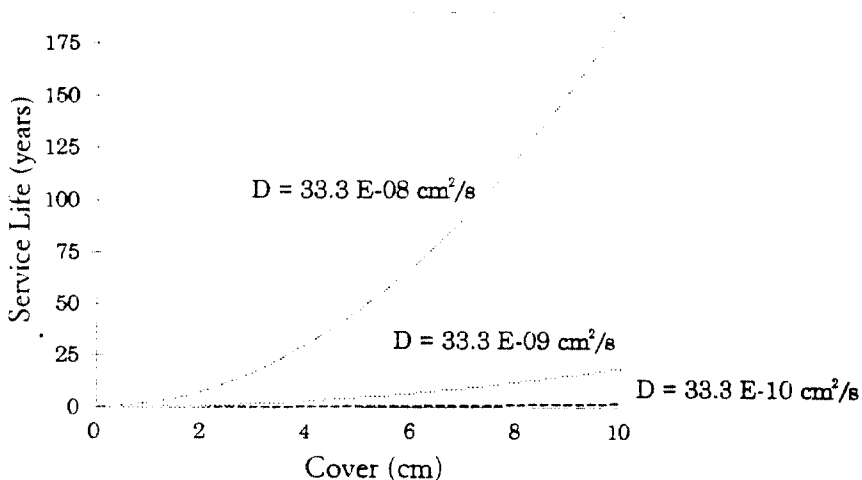


그림 3 덮개와 확산계수에 따른 내구년한 계산값(Years)
(C_i=0.1 mol/l, C₀=0.9 mol/l, C=0)

보다 정확한 내구년한의 예측을 위해서는 향후 지속적인 연구를 통해 기존의 예측모델을 보완해야 할 것으로 보이며 이는 다음과 같은 내용을 포함해야 한다.

첫째, 염소이온의 침투는 단순한 확산이 아니라 더 복잡한 영향인자가 관여하는 현상이므로 이를 수학적으로 기술할 수 있어야 한다.

둘째, 확산계수의 콘크리트 배합특성, 깊이, 재령 및 외부환경등에 대한 변동성을 고려해야 한다.

셋째, 장기적인 실험연구를 통해 이를 검증하고 보완할 수 있어야 한다.