

원전 콘크리트 구조물의 염해에 의한 손상 예측 모델 개발

Development of Chloride Attack Prediction Model for Concrete Structures of N.P.P.

조명석*, 방기성*, 김도겸**, 고경택**, 이종석**

* 한국전력공사 전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16

** 한국건설기술연구원, 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

요 지

원전 구조물은 건설후 시간의 경과와 함께 각종 물리적·환경적 요인에 의해 강재부식, 콘크리트의 균열 등의 성능저하가 지속적으로 발생하여 재료의 물성 및 구조적 성능이 저하된다. 특히 원전 구조물은 해안에 위치하고 있어 염해에 의한 환경적 영향에 노출되어 있다고 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 염화물 이온의 확산과 역학적 평형상태를 반영할 수 있는 적정 지배방정식의 구성과 확산방정식의 정식화를 통하여 원전 구조물의 철근부식시기를 예측할 수 있는 손상 예측모델을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 손상예측모델은 원전 구조물의 보수·보강시기를 결정하는데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract

Material properties and structural performance of Nuclear Power Plant structures subjected to physical and environmental factors, degrade during life time due to continuous deterioration such as rebar corrosion and concrete cracking. In special, NPP structures are exposed to chloride environment since they are located in seashore area.

In this study, a chloride attack prediction model is developed to predict corrosion initiation of reinforcing bars in NPP structures, based on governing equations that take into account the diffusion of chloride ions and a mechanical steady state. It can offer the information which is used to determine an optimal time for repair and rehabilitation actions of the structure.

1. 서 론

염해란 콘크리트 중에 염화물이 존재하여 철근이 부식함으로써 콘크리트 구조물이 손상을 입는 현상을 말한다. 철근은 산소와 물에 접하면 부식되고 그 표면에 붉은 녹(Fe_2O_3)이 발생한다. 건전한 콘크리트는 pH 12~13으로 강알칼리를 띄고 있어 얇은 부동태 피막(20~60Å 두께의 수산화제 2철, $\gamma-Fe_2O_3 \cdot nH_2O$)을 생성시켜 부식되지 않는다. 그러나 이 부동태 피막도 콘크리트 중에 염화물이 침입하여 염소이온량(Cl^-)이 일정 값 이상이 되면 부분적으로 부식하게 되는데, 이 부식에 의해 발생된 붉은 녹은 강재의 단면적을 감소시키고 본래 체적의 2.5배까지 팽창하여, 그 팽창압으

로 균열을 발생시킨다. 염화물은 철근을 부식시키는데 있어 중요한 요소이지만 수분과 산소의 공급이 없으면 철근의 부식은 발생하지 않는다.

철근콘크리트 구조물에 염분이 침투하는 경로는 해양환경에 구조물이 위치하여 해수중의 NaCl이 침투하는 경우, 염화물이 함유된 해사 또는 혼화제를 사용하는 경우, 용설제, 제설제로 NaCl, CaCl₂ 등을 사용하여 콘크리트 표면으로부터 염분이 침투하는 경우 등을 들 수 있다. 그러나, 원자력 발전소 구조물의 특성을 감안할 때 두번째, 세번째 경로보다는 첫번째 경로가 가장 문제시됨을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 확산 이론 및 질량 보존 법칙에 근거한 거시적 관점에서 지배 미분 방정식(governing differential equation)을 구성하고 원전 구조물의 특성에 적합한 매개변수(媒介變數)를 적용하는 방법에 의하여 구성하므로써, 원전구조물의 염해에 의한 손상모델을 구성하고자 한다.

2. 기본 모델식 구성

2.1. 기본가정

본 연구에서는 염해에 의한 수명예측모델 구성을 위하여 다음과 같은 기본 가정을 설정한다.

- 염해에 의한 수명저하는 철근부식에 의해 발생한다.
- 염해에 의한 철근부식시기는 염화물의 확산에 의해 지배된다.
- 염화물 확산계수는 염화물의 농도 및 콘크리트 공극분포에 영향을 받는다.
- 부식발생시기는 철근부위의 콘크리트 염화물 함유량이 0.03% 이상이 되는 시점이다.

2.2. 구성방향

기본가정에서 보는바와 같이 철근 부식에 의한 수명저하 예측모델은 염화물 확산이 주요 지배요인이므로 기본 모델식을 수립하기 위해서는 염화물 확산계수를 상수 k_d 로 표현할 수 있다.

계절에 따라 온도가 변화하지만 이러한 변화까지 기본 모델식에서 모사할 수는 없으므로 시간의 항을 t_y 로 표현하여 일정하다고 보면, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다¹⁾.

$$A_d = k_d \cdot t_{yn} \quad (1)$$

$$\log A_d = \log K_d + n \log t_y \quad (2)$$

여기서, A_d : 시간에 따른 열화량

t_y : 재령(년)

n : 상수

n 값은 열화 메카니즘에 따라 달라지며, 염해와 같이 확산이 열화를 지배하는 경우에는 1/2, 동결융해와 같이 반응이 열화를 지배하는 과정일 경우에는 1이 된다. 또한, 황산염 침해와 같이 열화 메카니즘이 반응과 확산에 의해 지배된다면, n 값은 1/2~1의 값이 된다²⁾.

따라서, 염해에 의한 손상 예측 기본 모델식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A_d = k_d \cdot \sqrt{t_y} \quad (3)$$

3. 모델식의 정식화

3.1. 염화물 함유량 예측모델

부분적으로 포화되어있는 구조물의 경우와 같이 콘크리트가 경계조건이 변화하는 불안정상태(non-stationary condition)에 있고 콘크리트 표면에 일정량의 염화물이 존재하고 있다고 가정하면, 염화물 침투 메카니즘은 Fick의 제 2법칙(Fick's second law)과 에너지 보존법칙(law of energy conservation)에 의해 설명할 수 있다³⁾.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial I}{\partial x} = D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4)$$

식 (4)로부터 Tuutti의 기법 개념을 사용하여 염화물 이온 확산계수와 피복두께로부터 초기기간 (initiation period)을 산정하면 철근 콘크리트 요소에 대하여 Fig. 1로부터 구할 수 있다. C_0 는 콘크리트 외부 표면에서 염화물 이온이 응집한 양이며, C_i 는 콘크리트깊이에 대한 염화물 응집량인데 초기에는 0으로 계산할 수 있다.

따라서, 부식발생이 없는 초기기간은 C_i 가 부식임계치(threshold concentration)의 농도 C_t 와 같아질 때까지의 기간이 되며, 이 기간은 Fick의 제 2 확산 방정식으로부터 다음과 같은 일반적 해를 구할 수 있다⁴⁾.

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\text{erf} \left(\frac{(2n+1)-y}{2\sqrt{r}} \right) \right] \quad (5)$$

여기서, $y = (L-x)/L$
 $r = D_e t/L^2$
 $x =$ 피복깊이 (cm)
 $L =$ 콘크리트 요소의 두께 (cm)

위의 공식에서 $n=0$ 인 조건을 고려한다면, 식 (5)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{C_{(x,t)}}{C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{1-y}{2\sqrt{r}} \right) \quad (6)$$

식 (6)에 $y=(L-x)/L$ 과 $r = D_e t/L^2$ 를 대입하면, Browne⁵⁾, Crank⁶⁾ 및 Laylor⁷⁾가 얻은 미분방정식 해법과 유사한 표현인 식 (7)이 된다.

초기조건 : $C_x = 0, x>0, t=0$
 경계조건 : $C_x = C_0, x=0, t>0$

$$\frac{C_x}{C_0} = 1 - \text{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4D_e t}} \right] \quad (7)$$

여기서, C_{\max} : 콘크리트 표면의 최대염분량 (%)
 C_{\min} : 콘크리트 내부의 최소염분량 (%)
 C_x : 거리 x 에서의 염화물량 (%)

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, $C_{(x,t)}$: 콘크리트 표면에 C_0 의 염화물량이 존재할 때, 재령 t 에서 콘크리트 표면으로부터 x 깊이에서의 염화물량 농도(%)
 erf : 오차함수(error function)

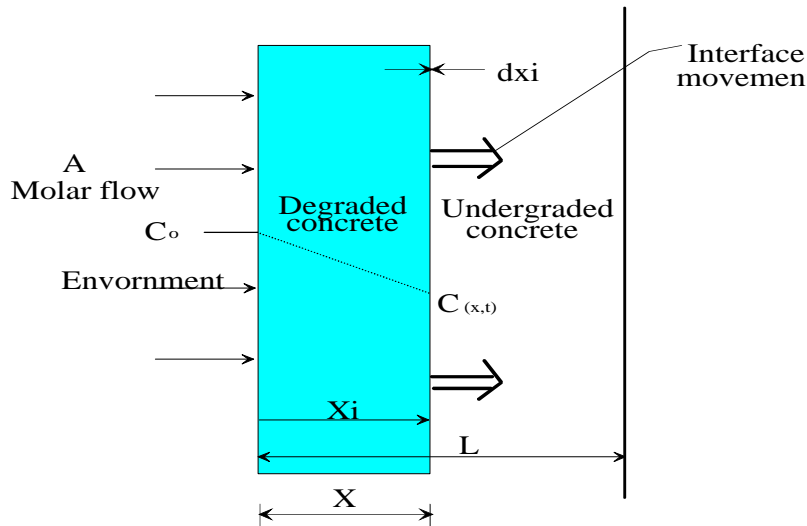


Fig.1 콘크리트에서의 염화물 침투 개념도

3.2. 표면 염화물 농도 예측 모델

원전 안전성 관련 콘크리트 구조물과 같이 비래염화물에 의해 영향을 받는 해안구조물의 경우에는 대상 구조물의 비래염화물량을 정확히 평가하여야 하지만, 우리나라에는 아직까지 비래염화물량 평가방법이 정립되지 않은 상황이며, 비래염화물량에 대한 조사·분석자료도 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Uji와 Weyers⁸⁾가 제안한 콘크리트 표면의 염화물 응집계수(S)를 사용하여 표면 염화물 이온 농도 예측모델을 다음과 같이 구성하였다.

$$C_0 = S\sqrt{t} \quad (9)$$

고리 1호기의 실측결과를 바탕으로 할 때, 고리의 $S = 6.28\text{g/m}^2/\text{day}$ 이며, t 의 단위는 일(day)이다.

3.3. 자유 염화물 이온 등온식

콘크리트 중의 염화물 이온은 크게 자유 염화물 이온과 고정 염화물 이온으로 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.

일반적으로 자유 염화물 이온은 가용성 염화물 이온 또는 수용성 염화물 이온과 동일하게 표현되기도 하며, 전 염화물 이온량은 산에 녹는 염화물 이온량과 동일하게 표현되기도 한다.

따라서, 본 연구에서는 자유 염화물 이온이 가용성(수용성)염화물 이온과 동일하고 전 염화물 이온이 산에 녹는 염화물 이온과 동일하다고 가정하고 가용성 염화물 이온과 전 염화물 이온의 관계를 정의하기 위하여 이론적 검토를 실시하였다.

콘크리트 미세구조에서의 물리화학적 조건은 정상상태 (Steady-state condition)로 가정할 수 있으며, Fick의 제1법칙으로부터 공극내의 이온확산은 다음과 같이 표현 할 수 있다⁹⁾.

$$J_{Cl} = -D_i \cdot \nabla(C_f) \quad (10)$$

여기서, J_{Cl} : 단위시간당 단위면적을 통한 이온의 흐름 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}$)

C_f : 용해 농도 (solution concentration, kg/m^3)

D_i : 콘크리트 내부에서의 이온 확산계수(m^2/sec)

식 (10)을 염화물 질량 이동 방정식으로 변환시키면,

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \text{div}(J_{Cl}) \quad (11)$$

여기서, C_t : 공극 단위용적당 총 염화물 함유량

식 (11)에 대하여 콘크리트가 완전히 포화되어 있다고 가정하면 총 염화물 이온량 C_t 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_t = w \cdot C_f + (1-w) \cdot C_s \quad (12)$$

여기서, w : 증발가능한 콘크리트중의 수분량(%)

C_s : 내부 고착 염화물량 (%)

즉, 총 염화물 이온량은 자유 염화물 이온량의 평균값과 내부에 고착되어있는 염화물 이온량의 합으로 정의할 수 있다. 이때, w 는 콘크리트의 공극률(porosity)을 측정하므로써 얻을 수 있다. 만일 이온의 용적 분포 계수(volumetric distribution coefficient) γ 를 사용하여 내부 고착 염화물 이온량과 자유 염화물 이온량을 표현하면 다음과 같다.

$$C_s = \gamma \cdot C_f \quad (13)$$

식 (13)은 다음과 같은 선형 등온식으로 표현할 수 있다.

$$C_t = w \cdot C_f + (1-w) \cdot \gamma \cdot C_f = \alpha \cdot C_f \quad (14)$$

$$\alpha = w + (1-w) \cdot \gamma \quad (15)$$

여기서, α 는 가용성 염화물 이온량과 전 염화물 이온량과의 관계를 나타내는 값으로서 염화물 이온이 포화된 공극 매개물에서 결합되는 양을 측정하거나 총 염화물 이온량과 가용성 염화물 이온량을 측정하므로써 분석할 수 있다.

총 염화물 이온과 자유 염화물 이온과의 비로서 표현되는 콘크리트의 염화물 이온 구속능력(binding capacity)은 구속 등온식(binding isotherm)이라고 하며 다음과 같은 일정한 함수로 표현할 수 있다¹⁰⁾.

$$\text{Langmuir binding isotherm : } C_b = \frac{\alpha C_t}{1 + \beta C_t} \quad (16)$$

$$\text{Freundlich binding isotherm : } C_b = \alpha C_t^b \quad (17)$$

$$\text{Linear binding isotherm : } C_b = \alpha C_t \quad (18)$$

따라서, 염화물 확산에 의한 철근 및 PS 강선의 수명저하 예측모델을 구성하기 위해서는 Fick의 제 2 법칙으로부터 유도된 식 (8)과 위의 구속 등온식을 사용하여 방정식을 구성하여야 하며 이를 정리하면 다음과 같다.

$$C_{(x,t)} = C_o \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (19)$$

Modified linear binding isotherm :

$$C_f = (1 - \alpha) C_t = aC_t \quad (20)$$

$$C_t = \frac{1}{a} C_f$$

Arya 와 Newmann¹¹⁾는 염화물 이온량이 콘크리트 대비 0.87%(20kg/m³)이하에서는 총염화물 대비 자유염화물 이온이 55%이며 이후에는 다소 증가한다고 보고하고 있으며, Dhir¹²⁾은 총염화물 이온량 0.5%이하에서는 약 65%가 가용성 염화물 이온량이며, 총염화물량이 3%일 경우에는 84% 까지 가용성 염화물량이 증가하는 것으로 보고하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 이들의 연구결과와 촉진시험결과를 근거로 식 (21) 및 식 (22)의 자유 등온식을 구성하였다.

$$C_t = 1.8255 \cdot C_f \quad (21)$$

$$C_t = 0.0441 \cdot C_f^3 - 0.3687 \cdot C_f^2 + 1.8359 \cdot C_f \quad (22)$$

3.4. 오차 함수(error function)

오차 함수는 일반적인 방법으로는 풀릴 수 없기 때문에 많은 연구자들은 컴퓨터에 의해 수치 해석된 값을 멱 함수(power function) 및 지수 함수(exponential function)로 해결하려고 노력하였으나 실패하였고, 최근 들어 Cady 와 Gannon¹³⁾등의 연구자들이 다항식(polynomial expression)을 사용하므로써 비교적 정확한 해법을 얻을 수 있었다. 식 (23)은 1998년 Cady와 Gannon에 의해 제시된 비선형 회귀 분석식(nonlinear regression)으로 결정 계수(R²)가 0.998이다.

$$\text{erf}(p) = \int_{-\infty}^{\infty} N(0,1)dp = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^p e^{-y^2} dy \quad (23)$$

$$p = \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \quad (24)$$

$$\text{erf}(p) = m_1 p^5 + m_2 p^4 + m_3 p^3 + m_4 p^2 + m_5 p \quad (25)$$

$$(R^2 = 0.998)$$

$$m_1 = 0.00092278, \quad m_2 = -0.020777, \quad m_3 = 0.17881$$

$$m_4 = -0.72907, \quad m_5 = 1.39621$$

이 식은 결정 계수(R²)가 0.998로서 매우 높은 상관성을 지니고 있는 것은 사실이지만 오차 함수를 정밀하게 계산한다고는 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 오차 함수의 회귀식에 대한 신뢰성을 향상시키기 위하여 비선형 회귀 분석을 통하여 오차 함수를 분석하였으며, 식 (26)과 같은 수 계산이 가능한 회귀식을 도출하였다. 식 (26)는 결정 계수(R²)가 0.9999987로서 Cady 와 Gannon의 회귀 분석식보다 매우 높은 상관성을 가지고 있다.

또한, 식 (26)은 기존 구조물의 깊이별 염화물 함유량을 알 경우 수 계산에 의해 염화물의 확산 계수를 계산하는데 사용할 수 있으며, 본 연구에서는 이 식을 염화물의 확산 계수를 산출하는데 적용하였다.

$$\text{erf}(p) = K_1 p^6 + K_2 p^5 + K_3 p^4 + K_4 p^3 + K_5 p^2 + K_6 p \quad (26)$$

$$(R^2 = 0.9999987)$$

$$K_1 = + 0.00946.. \quad K_2 = - 0.10522.. \quad K_3 = + 0.43814..$$

$$K_4 = - 0.75950.. \quad K_5 = + 0.15175.. \quad K_6 = + 1.10763..$$

3.5. 철근부식 임계치

철근부식 임계치(corrosion threshold values)란 철근부식이 활성화되는 콘크리트 중의 염화물 이온 농도(critical chloride concentration)를 말하는 것으로 많은 연구가 진행되었으나, 아직까지 명확히 정의되지는 못하였다.

부식 임계치에 관련하여 지금까지 수행된 연구 결과를 정리한 Table 1.을 보면 많은 연구자들이 부식 임계치로서 다양한 값을 제시하고 있음을 알 수 있다.

한편, Nilsson¹⁴⁾은 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 사용하였으며, 식 (27)은 Nilsson이 제시한 부식 임계치를 회기 분석한 것이다.

$$C_{cr} = -6.9 \cdot w/c + 5.52 \quad (\text{단 } C_{cr} \geq 0.69\text{kg/m}^3) \quad (27)$$

Table 1. 기존 연구에서의 철근부식 임계치¹⁵⁾

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

4. 축진시험

4.1. 개요

염화물에 의한 철근 부식 예측 실험은 원전 구조물의 사용환경을 고려하여 완전침적시험, 건습 반복시험 및 염수분무시험으로 하였으며, 축진실험을 통하여 원전 구조물의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트 구조물의 향후 철근부식에 대한 정량적인 예측, 구조물 수명의 손상 요인에 대한 시간의존성 수명저하 모델 및 이를 바탕으로 정량적인 잔존수명 예측기법을 개발하기 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

본 시험에서는 강도 및 재령의 변화에 따른 염화물량을 측정하므로써 예측 모델의 주요 매개변수인 염화물 확산계수를 산출하고자 하며, 본 시험에서 산출되는 강도별 사용특성별 염화물 확산계수는 원전 구조물의 철근 부식시기를 예측하는데 사용될 것이다.

4.2. 시험방법

4.2.1. 배합

본 시험에 사용한 5종 시멘트, 굵은골재, 잔골재, 고성능감수제, AE제는 현재 영광 5,6호기의 건설에 사용중인 재료로 하였으며, 시멘트의 영향을 분석하기 위하여 1종 시멘트에 대하여도 동일배합의 공시체를 제작하였다.

Table 2. 공시체 배합표

강도 (psi)	W/C (%)	S/a	W (lb)	C (lb)	S (lb)	G (lb)	WRA (ml)	AEA (ml)	배합근거
5500	42	46	285	678	1275	1505	923	16	영광 3,4호기
4000	48	46	300	625	1303	1505	852	16	"
3000	62	45	278	448	1359	1657	813	31	월성 2,3,4호기

4.2.2. 시험조건

본 실험에서는 NaCl 3.6%농도의 염화물 용액을 제조하여 사용하였으며, 시험조건은 염수분무, 건습반복 및 염수침적조건으로 하였다. 염수분무시험은 대기중의 비래염분이 콘크리트 중으로 침투되는 조건을 가정한 것으로, 분무조건은 0.36ml/cm²/day로 하였으며, 2분 분무후 20분 자연건조 조건으로 하였다.

건습반복시험은 해양환경에서 조석대와 비말대의 조건을 인위적으로 형성하고 콘크리트 구조물이 해수중에 침지 또는 건조되는 것과 같은 조건을 모사하였으며, 건습반복조건은 12시간 침적후 12시간 자연건조 조건으로 하였다. 한편, 해수중 침적시험은 원자력 발전소 취수구조물의 하단부와 같은 조건을 모사하였다.

4.2.3. 측정항목

측정항목은 다음과 같다.

- 압축강도 : ASTM C 39 [Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens]
- 콘크리트 실험공극률 : ASTM C 642 [Standard Test Method for Specific Gravity, and Voids in Hardened Concrete]
- 콘크리트 이론공극율 : Neville⁶⁾이 제시한 방법
- 깊이별 염화물 함유량 및 염화물 확산계수 : 일본 콘크리트 공학협회 표준(안) “경화한 콘크리트 중의 염분량 측정방법”

4.3. 시험결과

4.3.1. 압축강도

Table 3.은 원전 배합 공시체에 대한 28일 평균 압축강도를 나타낸 것으로 표준양생 공시체의 28일강도는 설계강도의 1.17~1.26배로 나타났다.

Table 3. 공시체의 28일 압축강도

시료 No.	압축강도(kg/cm ²)	시료 No.	압축강도(kg/cm ²)
1종 - 5500psi	466.12	5종 - 5500psi	460.89
1종 - 4000psi	345.48	5종 - 4000psi	329.02
1종 - 3000psi	255.29	5종 - 3000psi	266.51

4.3.2. 콘크리트 공극율 측정

ASTM C 642에 의해 측정된 공극율과 이론적 공극율과의 관계는 Table 4.와 같다. 표에서 보는 바와 같이 실험 공극율과 이론 공극율은 직선적인 관계를 가지고 있었으며 실험 공극율은 이론 공극율의 85%수준으로 나타났다.

Table 4. 각 배합별 실험 공극율과 이론 공극율

시료 No.	실험공극율	이론공극율	시료 No.	실험공극율	이론공극율
1종 - 5500psi	12.08%	14.82%	5종 - 5500psi	12.82%	14.82%
1종 - 4000psi	13.81%	16.19%	5종 - 4000psi	13.60%	16.19%
1종 - 3000psi	13.97%	16.68%	5종 - 3000psi	14.71%	16.68%

4.3.3. 가용성 염화물 이온량과 총 염화물 이온량

가용성 염화물 이온량과 총 염화물 이온량은 비례적인 관계로서 총염화물 이온량의 약 53.4%가 가용성 염분량인 것으로 분석되었는데 이 결과는 Arya 와 Newmann⁶¹⁾의 연구 결과와 일치하는 것으로서 이들의 연구결과를 보면 염화물 이온량이 콘크리트 대비 0.87%(20kg/m³)이하에서는 총 염화물 대비 자유염화물 이온이 55%이며 이후에는 다소 증가하는 것으로 되어 있다. 한편 Dhir⁶²⁾은 총염화물 이온량 0.5%이하에서는 약 65%가 가용성 염화물 이온량이며, 총염화물량이 3%일 경우에는 84%까지 가용성 염화물량이 증가하는 것으로 보고하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 가용성 염화물 이온량과 총염화물 이온량과의 관계식 구성을 위하여 이들의 연구와 본 실험 결과를 종합하여 회기 분석을 실시하였으며, 그 결과는 식 (28)과 같다.

$$C_t = 0.0441 \cdot C_f^3 - 0.3687 \cdot C_f^2 + 1.8359 \cdot C_f \quad (28)$$

$$(0 < C_t \leq 3.6 \%)$$

4.3.4. 깊이별 염화물 함유량

염화물 확산계수는 Fick의 제 2 법칙에 따라 총 염화물량의 이동 비율로부터 계산되어야 하므로 본 연구에서는 Arya 와 Newmann의 연구결과⁵⁸⁾ 및 Dhir의 연구결과⁵⁹⁾로부터 도출된 식 (28)을 사용하여 가용성 염화물량을 총 염화물량으로 변환하여 염화물 확산계수를 도출하였다. 재령 365일에서의 공시체 종류별 평균 염화물 확산계수는 Table 5와 같으며, 재령의 증가에 따른 염화물 확산계수의 감소를 나타낸 재령 90일에서의 확산계수에 대한 재령에 따른 시간 의존적 비확산계수는 식 (29) 및 Fig. 2와 같다.

$$D_{(t)} = 6.6253 \cdot D_e \cdot \left(\frac{90}{t}\right)^{0.4271} \quad (29)$$

Table 5. 장기재령에서의 염화물 확산계수 (단위 : $\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$)

공시체 No.	침적 조건	건습 반복 조건	분무 조건
1종-5500psi	2.59	3.47	3.03
1종-4000psi	4.09	5.09	4.63
1종-3000psi	5.45	6.15	5.69
5종-5500psi	3.14	3.56	3.46
5종-4000psi	4.58	5.32	4.94
5종-3000psi	6.26	6.11	6.29

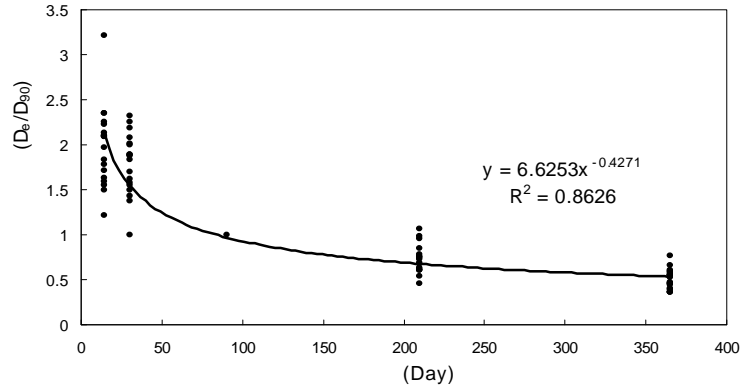


Fig. 2. 재령 90일에 대한 각 재령별 염화물 확산계수비

4.4. 손상 예측 모델로의 적용

4.4.1. 축진계수

본 연구에서는 축진계수의 산출을 위하여 고리 1호기의 안전성 관련 콘크리트 구조물에서 6종의 시료를 채취하였으며, 염화물 응집량 분석 결과는 Fig. 3.에 나타내었고, 분석된 확산계수는 Table 6.과 같다.

축진계수는 영광 3,4호기 및 월성 2,3,4호기의 적용 배합으로 제조된 실험실 제조 공시체에서의 염화물 확산계수와 실제 원전 구조물에서의 염화물 확산계수를 분석한 후 식 (30)에 따라 계산하여 산출하였다.

$$K_1 = \frac{R_{LT}}{R_{AT}} \quad (30)$$

여기서, R_{LT} : 구조물의 실제 염화물 확산계수

R_{AT} : 실험실 실험에서의 염화물 확산계수

축진계수의 산출은 4000psi의 실험실 제조 공시체 및 현장채취코어에 대하여 염수분무조건에서의 확산계수 비교로서 이루어 졌으며, 축진계수는 0.31로 나타나 실험실 실험이 현장조건보다 3.23 배의 축진환경인 것으로 분석되었다.

한편, 염화물 확산계수는 시료에 따라 다소간의 차이가 있었으나, 평균 $1.525 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났으며, 비래염화물량은 $6.28 \text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 분석되었다.

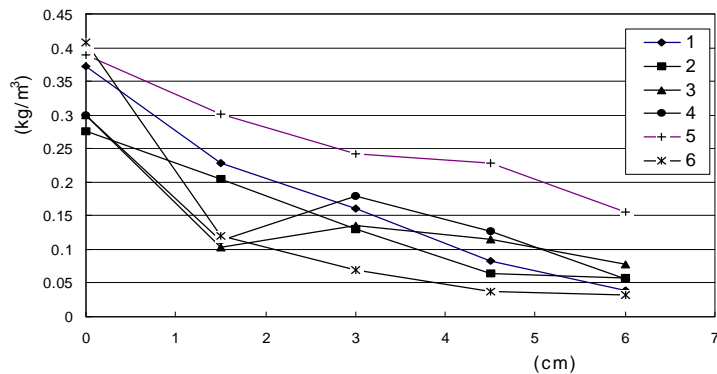


Fig. 3. 깊이별 염화물 응집량(원전 채취 시료)

Table 6. 염화물 확산계수(원전 채취 시료)

시료명	확산계수 ($10^{-8}\text{cm}^2/\text{sec}$)	시료명	확산계수 ($10^{-8}\text{cm}^2/\text{sec}$)
No. 1	1.999	No. 4	2.239
No. 2	1.041	No. 5	2.100
No. 3	1.323	No. 6	0.449

4.4.2. 시험계수

시험계수는 영광 3,4호기 및 월성 2,3,4호기의 적용 배합으로 제조된 실험실 제조 공시체에서의 염화물 확산계수와 실제 원전 구조물에서 채취한 코어의 염화물 확산계수를 분석한 후 식 (31)에 따라 계산하여 산출하였다.

$$K_2 = \frac{R_{AT}}{RT_{AT}} \quad (31)$$

여기서, R_{AT} : 실험실 제조 공시체의 염화물 확산계수
 RT_{AT} : 원전 채취코어의 염화물 확산계수

시험계수의 산출은 4000psi의 실험실 제조 공시체 및 현장채취코어에 대하여 염수분무조건에서의 확산계수 비교로서 이루어 졌다.

Table 7.에서 보는 바와 같이 실험재령 365일 공시체에 대한 시험계수는 고리의 경우 0.977, 영광의 경우 0.822, 울진의 경우 1.162로 나타났다.

Table 7. 현장 코어와 실험실 공시체의 염화물 확산계수 비교

공시체 No.	확산계수	시험계수
5종-4000psi	$4.94 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$	1
고리채취코어	$4.83 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$	0.977
영광채취코어	$4.06 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$	0.822
울진채취코어	$5.74 \times 10^{-8}\text{cm}^2/\text{s}$	1.162

4.4.3. 발전소별 염화물 확산계수의 산출

염해에 의한 철근의 부식시기를 분석하는데 필수요소인 발전소별 염화물 확산계수는 촉진시험에서 도출한 강도별 염화물 확산계수, 촉진계수 및 시험계수를 사용하여 산출하였으며, 그 결과는 Table 8.과 같다.

Table 8. 발전소별 강도별 염화물 확산계수

발전소	사용시멘트	강도	확산계수 ($\times 10^{-8}$ cm/s)
고리	Type I	3000 psi	1.723
		4000 psi	1.402
		5500 psi	0.918
	Type V	3000 psi	1.905
		4000 psi	1.496
		5500 psi	1.048
영광	Type I	3000 psi	1.450
		4000 psi	1.180
		5500 psi	0.772
	Type V	3000 psi	1.603
		4000 psi	1.259
		5500 psi	0.882
울진	Type I	3000 psi	2.050
		4000 psi	1.668
		5500 psi	1.091
	Type V	3000 psi	2.266
		4000 psi	1.779
		5500 psi	1.246

5. 결론

본 연구에서는 확산 이론 및 질량 보존 법칙에 근거한 거시적 관점에서 지배미분방정식을 구성하고, 축진시험에 의하여 원전 구조물의 특성에 적합한 매개변수(媒介變數)를 적용함으로써 원전 구조물의 염해에 의한 손상모델을 구성하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 염해에 의한 수명예측모델을 확산 이론 및 질량 보존 법칙에 근거한 거시적 관점에서의 염화물 함유량 예측 방정식으로 구성하고, 수명예측모델의 정식화를 위하여 표면염화물 농도 예측모델의 구성, 자유염화물 이온등온식의 구성, 오차함수 회귀식 구성 및 철근부식 임계치의 정의를 실시하였으며, 축진시험결과로부터 원전 구조물의 특성에 적합한 매개변수를 적용하였다.
- (2) 염화물 함유량 예측 방정식은 Fick의 확산방정식으로부터 구성하였으며, 표면 염화물이온농도 예측모델은 콘크리트 표면의 염화물 응집계수를 사용하여 시간경과에 따른 표면염화물 이온농도를 예측할 수 있도록 구성하였다. 또한, 전 염화물 이온량과 자유염화물 이온량의 관계를 축진시험 및 Freundlich binding isotherm으로부터 유도하였으며, 오차함수는 비선형 회귀분석을 통하여 구성하였다.
- (3) 축진시험은 원전 구조물의 사용환경을 고려하여 완전침적시험, 건습반복시험 및 염수분무시험으로 하였으며, 재령의 변화에 따른 염화물량을 측정함으로써 예측모델의 주요 매개변수인 배합특성별 염화물 확산계수 및 시간의존적 비확산계수를 산출하였다.
- (4) 원전 구조물에 대한 현장시료를 채취하여 분석한 결과, 축진계수는 9.644로 분석되었으며, 고리 1호기의 비래염화물량은 $6.28\text{g/m}^2/\text{day}$ 로 분석되었다.
- (5) 본 연구의 결과는 원전 콘크리트구조물의 사용수명을 예측하는데 유용한 도구로 사용될 수 있으며, 현장 실무자에게 구조물의 적정 보수·보강시기 등과 같은 구조물의 수명관리에 필요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 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) J.R. Clifton : Predicting the Service Life of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 90, No.6, pp.611~617, Nov.-Dec. 1993
- 5) 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.
- 6) J. Crank : The Mathematics of Diffusion, Clarendon Press, Oxford, England, 1983
- 7) Layor, H.M. : Chloride Sealant on th Columbia River Bridge, Contract No. C09738, Materials and Research Section, Oregon State Highway Division, Oregon Department of Transportation, Feb. 1989.
- 8) 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
- 9) C. Andrade : Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements, Cement and Concrete Research, Vol.23, pp.724~742, 1993.
- 10) Collepardi, M, Marciallis, A., and Turriziani, R. : Penetration of Deicing Agents in Cement Pastes, Industria Italiana del Cemento, Vol. 69,pp.143~150, 1972
- 11) 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.
- 12) R.K. Dhir, M.R. Jones and H.E.H. Ahmed :Determination of Total and Soluble Chlorides in Concretes, Cement and Concrete Research, Vol.20, pp.579~590, 1990
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 金棹謙 : 콘크리트 中の 鹽化物 擴散速度에 따른 鐵筋腐食 豫測에 關한 研究, 忠南大學校 博士學位 論文, 2000. 2
- 16) A.M. Neville, "Properties of Concrete-Third Edition", Pitman Publishing INC., p.269~270, 1981