

# 수치해석에 의한 콘크리트 구조물의 확률론적인 내구성 해석

## Probabilistic Durability Analysis of Concrete Structures by Numerical Method

정상화\* 김주형\*\* 이광명\*\*\* 김지상\*\*\*\* 배수호\*\*\*\*\*  
Jung, Sang Hwa Kim, Joo Hyung Lee, Kwang Myong Kim, Jee Sang Bae, Su Ho

### ABSTRACT

Traditional durability analysis is not possible to provide a controlled durability and long-term performance of concrete structures. Recently, research works have shown that probabilistic approach based on the theory of structural reliability, would be very valuable for durability analysis. In this study, the probabilistic durability analysis based on a Monte Carlo Simulation was carried out using sample data selected from detailed field investigation. The probabilistic properties of some design variables, such as diffusion coefficients of concrete and surface chloride concentration, were newly determined using some experimental data. By applying a probabilistic durability analysis to an integral structural design, the durability performance of concrete structures would be remarkably improved.

### 1. 서론

현재까지 콘크리트 구조물의 내구성 설계는 물-시멘트 비, 피복두께, 사용수량 등의 제한을 통한 건전성 확보를 목표로 수행되고 있다. 그렇지만, 이러한 방법을 통해서서는 구조물의 건설 및 유지관리 비용을 합한 총비용의 관점에서 효율적인 구조물을 선정하는데 필수적인 사용수명의 정량적인 확보가 어려운 실정이다. 이 경우 콘크리트 구조물의 내구성과 관련한 최근의 연구에 의하면 구조물의 설계에 전통적으로 사용되어온 구조신뢰성 이론이 콘크리트 구조물의 정량적인 내구성 확보를 위해서도 효과적인 것을 알 수 있다.<sup>1)</sup> 본 연구에서는 기존의 내구성 해석 및 설계개념이 갖고 있는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 염해를 받는 콘크리트 구조물의 사용성 한계상태를 결정하는 모델 및 영향인자를 도출한 후 유한차분법을 통해 해를 구하였으며, 이를 바탕으로 MCS(Monte Carlo Simulation)기법을 적용하여 파괴확률 혹은 내구성에 관한 한계상태 기준을 초과하는 확률을 계산하는 방법을 정립하였다. 또한, 제시된 방법에 따라 국내 해안에 폭로한 콘크리트 시편의 조사 자료를 이용하여 내구성 해석을 수행하고 각 노출조건에 따르는 구조물의 사용수명을 예측하였다.

### 2. 확률론적인 내구성 해석과정

#### 2.1 내구성 해석모델 및 정식화

한계상태에 대한 파괴확률 혹은 부식발생 확률을 구하기 위한 한계상태함수  $g(X, t)$ 는 전통적인 구조신뢰성 이론에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다.

\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 Post Doc.

\*\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수

\*\*\* 정회원, 서경대학교 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 안동대학교 토목공학과 교수

$$g(X, t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

여기서,  $X$ 는 한계상태를 규정하기 위한 설계변수벡터를 나타내며, 염해의 경우 저항  $R(t)$ 는 철근의 피복두께로 정의되며, 하중  $S(t)$ 는 시간에 따라 변화하는 염소이온 침투깊이로 정의된다.

콘크리트 내부의 1차원적인 염소이온 확산은 확산계수가 시간에 따라 변화하는 경우 Fick의 확산 제2법칙을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>2)</sup>

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

여기서,  $C$ 는 시간  $t$  동안 염분에 노출된 콘크리트의 표면으로부터 거리  $x$  만큼 떨어진 위치에서의 염소 이온 농도,  $D(t)$ 는 시간에 따른 콘크리트 특성변화를 반영한 염소이온 확산계수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(t) = D_0 \left( \frac{t_0}{t} \right)^n \quad (3)$$

여기서,  $D_0$ 는 시간  $t_0$ 에서의 확산계수, 지수  $n$ 은 시간에 따라 염소침투에 대한 저항이 증가하는 콘크리트의 능력을 나타내는 계수이다. 한편, 식 (4)와 같이 매개변수  $T$ 를 정의하면 식 (2)를 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = \int_0^t D(\tau) d\tau \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

식 (5)를 Crank-Nicolson이 제안한 음함수 법을 사용하여 차분화하면 다음과 같다.<sup>3)</sup>

$$\frac{1}{\Delta T} (C_{i,j+1} - C_{ij}) = \frac{1}{2\Delta x^2} \{ (C_{i+1,j} - 2C_{ij} + C_{i-1,j}) + (C_{i+1,j+1} - 2C_{i,j+1} + C_{i-1,j+1}) \} \quad (6)$$

여기서,  $\Delta T$  및  $\Delta x$ 는 각각  $T$  및  $x$  축으로의 증분을 나타낸다.

## 2.2 확률론적인 내구성 해석절차

본 연구에서는 확률변수들의 결합 확률밀도함수를 이용하여 각 확률변수의 분포특성이 반영된 난수를 추출하여 충분한 수의 확률변수 표본 집단을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수의 값을 차례로 한계상태식에 대입하여 구조물이 안전한지 파괴되는지를 판단하는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)을 사용하여 확률론적인 내구성 해석을 수행하였다. 이 경우 파괴확률은 한계상태함수 값이 음으로 되는 횟수를 전체 시뮬레이션 횟수  $N$ 으로 나누어 결정되며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(r_j, s_j)] \quad (7)$$

여기서,  $g(r_j, s_j)$ 는 한계상태함수,  $I[\ ]$ 는 내구성 파괴가 발생한 횟수를 나타낸다.

### 3. 폭로실험 자료를 통한 해석결과

#### 3.1 실험과정

콘크리트의 물-시멘트 비에 따른 염소이온 확산계수 및 표면염소이온 농도의 통계적 성질을 평가하기 위하여 물-시멘트 비 31.5% 및 50%에 대해서 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라 원주형 공시체( $\phi 100 \times 200$  mm)와 장기폭로 실험용 각주형 공시체( $150 \times 150 \times 250$  mm)를 제작하였다. 이 경우 공시체의 목표 슬럼프는  $18 \pm 2$  cm, 목표 공기량은  $4.0 \pm 1.5\%$ 로 설정하였으며 원주형 공시체는 총 40개, 각주형 공시체는 12개를 제작하였다. 제작된 공시체는 성형 후 24시간 경과하여 몰드를 제거한 후 표준양생 공시체는 시험 전까지  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도로 습윤양생 하였으며, 현장 폭로양생 공시체는 재령 14일까지 실험실(약  $25^\circ\text{C}$ )에서 기건 양생 후 해안가 비말대에 폭로하였다.

원주형 공시체의 경우에는 28일까지 양생한 후 Tang과 Nilsson이 제안한 전기적인 촉진법을 이용하여 확산실험을 수행하였다. 한편, 각주형 공시체의 경우 1년간 폭로 후 공시체 1개당 6개소에서 표면으로부터의 거리에 따른 염소이온 농도를 구하였으며, 이를 이용하여 유효확산계수 및 표면 염소이온 농도를 linear curve fitting법을 사용하여 추정하였다.

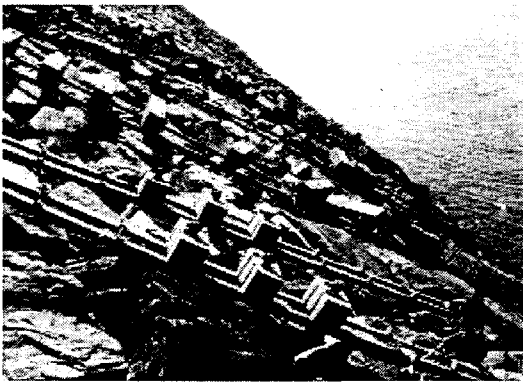


그림 1 장기 폭로실험 시편

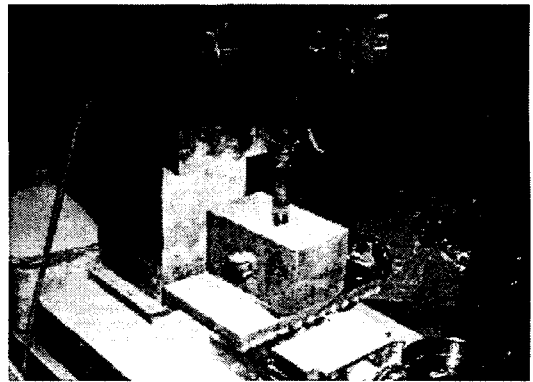


그림 2 자동화 프로파일 그래인더에 의한 샘플 채취

#### 3.2 초기 확산계수 및 1년 노출 후 표면염소이온 농도

표 1에는 재령 28일의 공시체에 대해서 물-시멘트 비 및 양생조건에 따라 Tang과 Nilsson 방법을 통해 각각 20개씩 측정된 염소이온 확산계수의 평균 및 표준편차가 나타나있다. 이 경우 물-시멘트 비가 감소함에 따라 평균 염소이온 확산계수와 표준편차는 작아지는 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 동일한 물-시멘트비의 경우에는 표준양생한 공시체의 평균 염소이온 확산계수 및 표준편차가 해안가에 폭로한 공시체의 경우보다 작은 것으로 나타났는데, 이것은 전자가 후자보다 양생조건이 유리하여 보다 좋은 품질의 콘크리트가 얻어지기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 표 1에 제시되어 있는 1년간 해안가에 폭로된 시편의 표면염소이온 농도를 보면 W/C 비가 31% 및 50%인 경우 각각 변동계수가 7.0 및 8.7%로 나타나 비교적 변동성이 작은 것을 알 수 있다.

표 1. 염소이온 확산계수의 표준편차 및 변동계수(28일 양생)

일련번호	W/C=31%			W/C=50%		
	$D_c(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$		$C_s(\%)$	$D_c(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$		$C_s(\%)$
	표준양생	현장양생		표준양생	현장양생	
평균	5.1	6.4	0.354590	13.7	17.0	0.374247
표준편차	0.4	1.0	0.024982	0.7	3.5	0.032624
변동계수(%)	7.8	15.6	7.045233	5.1	20.6	8.717141

### 3.3 내구성에 기초한 사용수명의 산정

표 2에는 3.2절에서 언급한 실험 자료에 기초하여 추정된 염해와 관련된 주요 설계변수가 제시되어 있다. 이 경우 확률론적인 내구성 해석을 위해 철근위치에서의 임계염소이온 농도는 평균  $1.2 \text{ kg/m}^3$ , 변동계수 20%를 가정하였으며, 피복두께는 평균 100 mm, 변동계수 10%로 가정하였다.

표 2 내구성 해석을 위한 주요 설계변수

w/c	$D_0(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	COV of $D_0(\%)$	$C_s(\text{kg/m}^3)$	COV of $C_s(\%)$	시간의존성 지수(n)
31%	6.4	15	8.5	10	0.4
50%	17.0	25	8.5	10	

그림 3 및 그림 4에는 시간경과 및 100년 시점에서의 피복두께에 따른 파괴확률 그래프가 각각 나타나 있다. 이 경우 주어진 조건하에서 종래의 결정론적인 방법에 의해서는 구조물의 사용수명이 물-시멘트 비가 50%, 31%인 경우 각각 28년, 107년으로 나타나지만 파괴확률을 10%로 할 경우 각각 10년 및 46으로 사용수명이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 4의 경우 100년 사용수명을 확보하기 위해서는 필요한 피복두께가 각각 158 mm 및 98 mm에서 220 mm 및 139 mm로 증가되는 것을 알 수 있다.

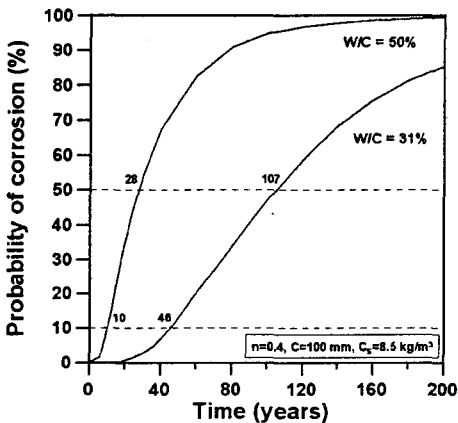


그림 3 시간경과에 따른 파괴확률 변화

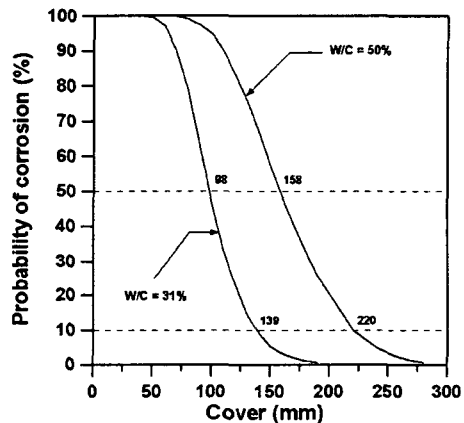


그림 4 100년 시점에서 피복두께에 따른 파괴확률 변화

### 4. 결론

폭로실험 자료를 통한 확률론적인 내구성 해석결과 10% 파괴확률을 목표로 할 경우 종래의 결정론적인 방법에 비해 사용수명이 1/2 이하로 작게 평가되었으며, 이를 통해 구조물의 사용수명을 안정적으로 확보하기 위해서는 확률론적인 내구성 평가과정의 필수적일 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부의 지원사업인 교량설계핵심기술연구단의 콘크리트 교량의 내구성 설계기술 개발과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Duracrete Final Report. 2000. *Duracrete probabilistic performance based durability design of concrete structure*
- 2) Crank, J. 1975. *The mathematics of diffusion*. London: Arrowsmith: 11-24, 104.
- 3) Kreyszig, E. 1983. *Advanced engineering mathematics*. New York: John Wiley & Sons: 861-865