

# 열화인자별 변동계수 변화에 따른 콘크리트 구조물의 신뢰성 지수에 관한 연구

## Study of Reliability Index in Concrete Structures Considering Coefficient of Variation of Degradation Factors

김 주 형\*    정 상 화\*\*    김 태 상\*\*\*    이 광 명\*\*\*\*

Kim, Joo Hyung    Jung, Sang Hwa    Kim, Tae Sang    Lee, Kwang Myoung

### ABSTRACT

Recently, a variety of researches has been carried out to estimate the reliability-based analysis and design method of concrete structures and is attracted by probabilistic-based durability analysis/method of concrete structures subjected to chloride containing environment using MCS (Monte Carlo Simulation). Probabilistic-based durability analysis/method was proposed by lots of researches, but there is the lack of data for degradation factors for the calculation of probability distribution. The reliability based durability analysis method represents that the service life and reliability index varies with the probability distribution and coefficient of variation of each factor. Therefore, in this paper, the importance of experiment data for the degradation factors is confirmed and the study of reliability index in RC structures under chloride attack environments is performed considering the variation coefficient of degradation factors.

### 요 약

최근 많은 연구자들에 의해 철근 콘크리트 구조물에 대한 신뢰성 이론에 바탕으로 해석 및 설계 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 염해환경 콘크리트 구조물의 내구성에 대한 확률론적인 이론에 바탕을 둔 MCS(Monte Carlo Simulation) 기법을 이용한 해석방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 확률론적인 해석 방법에 대한 많은 이론과 시험방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 열화인자별 확률분포를 산정하기에는 데이터가 부족하고 신뢰성 이론을 이용한 내구성 해석방법은 데이터의 확률분포와 변동계수에 따라 사용수명과 신뢰성 지수가 다르게 나타나는데 그 영향 정도에 대한 연구가 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 확률 분포를 산정하기 위한 실험 데이터의 중요성을 확인하고, 이를 바탕으로 철근 콘크리트 구조물의 염해에 대한 열화인자별 변동계수의 변화를 고려한 신뢰성 지수에 대한 연구를 수행하였으며, 각 인자별에 대한 영향정도를 분석하였다.

\*정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터 연구원

\*\*정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터 구조재료팀장

\*\*\*정회원, 한국건자재시험연구원 건설기반기술센터 선임연구원

\*\*\*\*정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수

## 1. 연구배경 및 목적

최근 들어 국내외에서 철근 콘크리트 구조물의 염해에 대한 내구성 평가방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>1)</sup>. 특히, 염해에 대한 내구성 평가방법 중 염화물 침투의 열화 메카니즘에 대하여 목표내구수명동안 구조물이 일상적인 유지관리 하에서 충분한 안전도를 확보할 수 있으며, 구조설계 방법론인 하중저항계수설계법과 일관성을 유지할 수 있도록 구조신뢰성이론에 기초한 확률론적 사용연한설계 해석방법에 관심이 높아지고 있다. 그러나, 신뢰성 이론을 이용한 내구성 해석방법은 구조물의 열화인자별 확률분포와 변동계수에 따라 영향을 받는데, 국내·외에서 아직까지 충분한 실험 및 데이터를 확보하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 확률론적인 내구성 해석방법을 바탕으로 열화인자별 확률분포의 변동계수 변화에 따른 신뢰성 지수에 영향을 미치는 정도를 알아보고 추후 데이터 확보의 중요성을 인식해보고자 한다.

## 2. 해석에 대한 이론적 배경

### 2.1 한계상태설계법을 적용한 확률론적 해석

콘크리트 구조물의 확률론적 해석을 위하여 기존 연구에서 보고되었던 염소이온 확산계수를 산정하기 위해 Fick의 확산 제2법칙을 이용하였으며, 철근 부식시기, 파괴시점을 추정하는 방법으로 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)을 사용하였다. 이 방법은 확률변수들의 결합 확률밀도 함수를 이용하여 확률변수 분포의 난수를 추출하여 충분한 수의 확률변수 표본 집단을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수들의 값을 차례로 한계상태식에 대입하여 구조물의 안전성을 판단하는 방법이다. 한계상태함수 값이 음으로 되는 경우를 내구성 파괴가 일어나는 경우로 하여 그 회수를 측정 한 후 전체 시뮬레이션 회수  $N$ 으로 나누어 파괴확률을 계산하였다.

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

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

구조신뢰성이론에 의한 구조물 설계는 목표신뢰수준을 확보하는 방법을 사용하며, 신뢰성 지수(reliability index,  $\beta$ )는 다음의 관계에 의해 계산될 수 있다<sup>2)</sup>.

$$p_f = \int_{-\infty}^{-\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \Phi(-\beta) \quad (2)$$

### 2.2 확률분포에서의 변동계수

변동계수는 상대적 표준편차 혹은 변이계수라 표현할 수 있으며, 단위가 다른 두 데이터의 분포군의 산포도를 비교하거나 단위가 같더라도 분포의 평균이 크게 차이가 나는 자료의 산포도를 비교하는데 적합하다. 또한, 변동계수를 사용하는 목적으로는 표준편차가 절대치 크기로 표현되기 때문에 데이터의 단위가 서로 다른 값들의 분포를 비교할 수 없기 때문에 단위에 영향을 받지 않는 변동계수를 사용하게 된다. 그림 1에서 보면 평균값이 같으나 분포가 다른 두 데이터를 볼 수 있는데, 분포 1이 분포 2보다 분포의 넓이가 작음을 알 수 있으며 분포 1이 분포 2보다 변동계수가 작

음을 의미한다. 이는 분포 1이 분포가 밀집되어 있어 고르고 변량이 고름을 의미한다<sup>3)</sup>. 다시 말해 변동계수의 값이 적을수록 산포가 크지 않고 특성의 차이가 없는 균일한 것을 의미한다. 이를 통해 확률론적 해석을 통해 콘크리트 구조물의 열화에 영향을 미치는 인자들의 확률 분포 특성을 확인하고 파괴확률의 변화를 파악함으로써 구조물에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다.

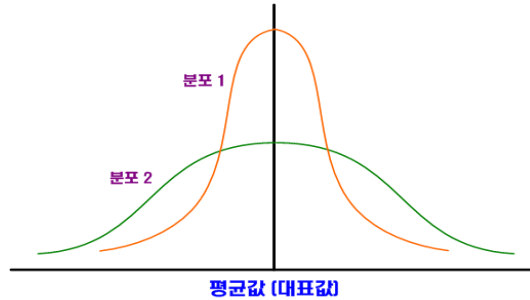


그림 1. 평균값은 같으나 분포가 다른 두 데이터

### 3. 해석 조건

철근 콘크리트 구조물의 열화인자는 크게 염소이온 확산계수, 피복두께, 시간 의존성지수, 임계염소이온농도, 표면염소이온농도로 5가지로 구분할 수 있으며, 각 인자별에 따른 해석 조건은 표 1과 같다.

표 1. Parameter values for analysis

| Parameters                                    | Mean                     | COV (Base case) | Range of COV      | Distribution type |
|---|--------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 확산계수( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ) | 3.0                      | 10              | 5, 15, 20, 25, 30 | normal            |
| 피복두께(mm)                                      | 80                       | 10              | 5, 15, 20, 25, 30 | log normal        |
| 시간의존성 지수 (n)                                  | 0.3                      | 10              | 5, 15, 20, 25, 30 | log normal        |
| 표면염소이온도                                       | 0.1875% by wt. of binder | 10              | 5, 15, 20, 25, 30 | normal            |
| 임계염소이온농도                                      | 0.05% by wt. of binder   | 10              | 5, 15, 20, 25, 30 | normal            |
| 초기염소이온농도                                      | 0.001% by wt. of binder  | 20% (Fixed)     | 20% (Fixed)       | normal            |
| 목표내구수명  | 100 years                |                 |                   |                   |

위의 표 1에서 보는 바와 같이 기존의 연구<sup>4)</sup>를 통해 해안으로부터 거리가 약 100 m 거리에 있는 구조물로서 표면염소이온농도는 0.188%(4.5 kg/m<sup>3</sup>)를 적용하였으며, 임계염소이온농도는 시방서에서 정하고 있는 시멘트량의 0.05%(1.2 kg/m<sup>3</sup>)를 적용하였다.

### 4. 열화인자별 변동계수 변화에 따른 신뢰성 지수

위에서 언급한 바와 같이 열화인자별 변동계수 변화에 따른 신뢰성 지수의 특성을 파악하기 위해 신뢰성 기반 확률론적인 내구성 해석 기법을 이용하였다. 표 1의 해석조건에 따라 내구성 해석을 수행한 결과는 표 2에 나타내었다. 그림 2는 열화인자별 변동계수 변화에 따른 신뢰도 지수 변화 추이를 나타내었다.

표 2. 열화인자별 변동계수에 따른 신뢰성 지수의 변화

| 열화인자      | 변동계수에 따른 신뢰성 지수 |      |      |      |      |      |
|-----------|-----------------|------|------|------|------|------|
|           | 5%              | 10%  | 15%  | 20%  | 25%  | 30%  |
| 염소이온 확산계수 | 1.24            | 1.20 | 1.15 | 1.10 | 1.04 | -    |
| 피복두께      | 1.47            | 1.20 | 0.95 | 0.75 | 0.60 | 0.48 |
| 시간의존성 지수  | 1.35            | 1.20 | 1.03 | 0.87 | 0.74 | 0.64 |
| 표면염소이온농도  | 1.23            | 1.20 | 1.14 | 1.09 | 1.04 | 0.98 |
| 임계염소이온농도  | 1.27            | 1.20 | 1.12 | 1.01 | 0.91 | 0.81 |

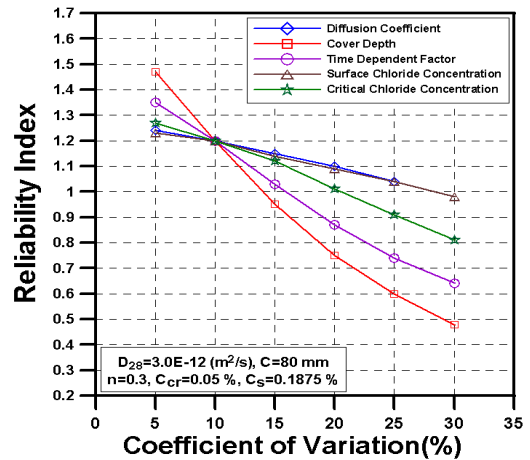


그림 2. 열화인자별 변동계수에 따른 신뢰성 지수

## 5. 결론

본 연구로부터 도출된 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 확률론적인 내구성 해석 기법을 이용하여 콘크리트 구조물에 영향을 미치는 열화인자들의 변동계수를 5~30%까지 변화시켜 신뢰도 지수에 미치는 정도를 알아보았다.
- 2) 콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 모든 열화인자는 변동계수가 증가할수록 신뢰도 지수가 낮아지는 것으로 나타났다. 피복두께의 변동계수가 신뢰도 지수에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 시간의존성 지수, 표면염소이온농도, 표면염소이온농도와 염소이온 확산계수 순으로 영향이 줄어들었다.
- 3) 향후 보다 실질적이고 많은 실험 결과를 통해 열화인자의 분포 특성을 파악하고 신뢰할 수 있는 데이터의 확보를 위한 실험 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년 건설교통부의 지원사업인 고성능 콘크리트 연구단의 열화인자별 고저항성 콘크리트의 개발 및 실용화 개발과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다..

## 참고문헌

1. Duracrete Final Report. 2000. Duracrete probabilistic performance based durability design of concrete structure
2. 신경준, 김주형, 이광명, 김지상, 배수호 “신뢰성 지수를 이용한 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 해석”, 한국콘크리트학회 봄 학술 발표 논문집 제18권 1호(통권 제36집), 2007. 5. pp. 689~692.
3. Alfredo H-S. Ang and Wilson H. Tang "Probability concepts in engineering", pp. 254~258.
4. 김기현, 차수원, 최종권, 장승필 “목표 신뢰도 확보를 위한 염해에 대한 내구성 설계변수 제안”, 대한토목학회 학술발표회, 2006.