

# 염해환경 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석

권기준<sup>†</sup> · 김동백<sup>\*</sup> · 정상화<sup>\*\*</sup> · 채성태<sup>\*\*</sup>

한경대학교 안전공학과 · <sup>\*</sup>한경대학교 토목공학과 · <sup>\*\*</sup>한국건설자재시험연구원  
(2007. 3. 29. 접수 / 2007. 5. 30. 채택)

## A Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures in Chloride Containing Environments

Ki-Jun Kwon<sup>†</sup> · Dong-Baek Kim<sup>\*</sup> · Sang-Hwa Jung<sup>\*\*</sup> · Seong-Tae Chae<sup>\*\*</sup>

Department of Safety Engineering, Hankyong National University

<sup>\*</sup>Department of Civil Engineering, Hankyong National University

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Construction Materials

(Received March 29, 2007 / Accepted May 30, 2007)

**Abstract** : In recent years, many research works have been carried out in order to obtain a more controlled durability and long-term performance of concrete structures in chloride containing environments. In particular, the development of new procedures for probability-based durability analysis/design has proved to be very valuable. Although there is still a lack of relevant data, this approach has been successfully applied to some new concrete structures. In this paper, the equation used for modelling of the chloride penetration was based on Fick's Second Law of Diffusion in combination with a time dependent diffusion coefficient. The probability analysis of the durability performance was performed by use of a Monte Carlo Simulation. The procedure was applied to an example based on limited data gathered in this country. The influences of each parameter on the durability of concrete structures are studied and some comments for durability design are given. The new procedure may be very useful in designing an important concrete structures in chloride containing environments. Also it may help to predict the service life of concrete structures under a given probability of failure.

**Key Words** : durability, probability of failure, monte carlo simulation, chloride penetration, service life

### 1. 서 론

#### 1.1. 연구 배경

콘크리트 구조물은 강재(鋼製) 구조물과 비교하여 사용 기간 동안 성능 저하 발생 및 유지보수의 필요성이 상대적으로 매우 낮은 것으로 알려져 왔었다. 그러나 최근 들어 해양 및 해안구조물, 환경 처리 시설물 등 콘크리트 구조물의 사용 환경이 열악하여지고, 요구되는 사용 수명이 상대적으로 늘어나고 있어 콘크리트 구조물에 있어서 성능저하 또는 열화로 불리는 내구성 문제에 대한 관심을 불러일으키게 되었다. 국내의 경우 특히 해사 사용, 해수 또는 해양대기에 의한 염분 침투, 결빙제의 사

용 등에 따라 염해를 받는 부재의 내구성이 문제가 되고 있다. 따라서 지금까지 구조물의 파괴와 관련하여 안전도를 결정하는 내하 능력에 대하여만 이루어지던 명시적인 설계 절차를 간접적인 방법으로 이루어진 내구성분야의 문제에도 적용할 필요성이 대두되게 되었다. 그런데, 현재의 콘크리트구조물의 내구성설계는 사용 재료의 선정, 재료의 구성, 작업 조건, 단면 치수에 대한 암묵적인 규칙의 적용(DEEM-TO-SATISFY Rule)에 그치고 있는 실정이다. 즉, 명시적인 사용수명(service life)의 정의 없이 일반적인 콘크리트의 건전성 확보를 목적으로 하여 설계 및 시공을 하고 이를 통하여 간접적으로 내구성을 보증하고 있어, 그 적용에는 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, 현재 선진외국의 새로운 설계 기준들이 채택하고 있는 성능기반설계기법(performance based

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kjkwon@hknu.ac.kr

design method)을 적용하는 경우 해당 성능과 구조물의 사용수명간에 명시적인 관계가 정의 또는 설정되어야 하는데 종래의 방법은 이를 충족시키지 못한다. 둘째, 1990년대에 들어서 총비용의 개념을 이용한 투자결정 방법 정립에 따라 구조물 사용 수명에 대한 명시적인 규정 설정의 필요성이 대두되게 되면서 구조적 안전도의 상실이라는 극한 파괴 상태에 의한 수명 평가 외에 사용성능의 미달성이라는 사용성 한계상태에 대한 수명 평가가 이루어지게 되었다. 이 때 내구성 상실의 관점에서 본 사용수명에 대한 정의 또는 내구성능과 사용수명의 명시적 관계에 대한 수학적 모델이 필요한데 기존의 내구성 해석 방법으로 이를 표현할 수 없는 한계가 있다. 마지막으로 최근 들어 콘크리트 구조물의 성능저하 과정에 대한 연구 성과가 축적됨에 따라 내구성에 대한 다양한 수학적 모델이 콘크리트 구조물의 설계 또는 해석에 직접 적용될 수 있도록 개발되었으나 기존의 방법들이 이를 적절하게 활용하지 못하는 문제점을 보이고 있다<sup>1,2)</sup>.

## 1.2. 연구 내용

본 연구에서는 기존의 내구성 해석 및 설계개념이 갖고 있는 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 사용수명과 내구성의 관계를 명시적으로 고려하고, 그 관계식을 구성하는 각 설계변수의 내재적 불확실성을 체계적으로 포함할 수 있게 확률론에 기초한 합리적인 콘크리트 구조물의 내구성 해석 방법을 제시하고자 한다. 즉, 염해환경하에서 사용성 한계상태함수식을 구성하는 각 설계변수(design variable)를 도출하고 그 통계적 성질을 조사하였으며, 이를 바탕으로 MCS(Monte Carlo Simulation)기법을 이용하여 파괴확률 혹은 내구성에 관한 한계상태 기준을 초과하는 확률을 계산하는 방법을 정립하였다. 제시된 방법에 따라 실제 국내에 건설된 교량에 대한 기존 조사 자료를 이용하여 내구성 해석을 수행하고 각 노출조건에 따르는 구조물의 사용수명을 예측하였다. 또한, 한계상태함수식을 구성하는 주요 설계변수의 변화에 따른 파괴확률의 변화를 조사하여 각 변수의 영향을 파악하여 향후 내구성 설계의 기본 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

## 2. 내구성 해석

### 2.1. 사용성 한계상태

콘크리트 구조물의 설계법으로서 현재 선진외국

에서 가장 널리 적용되고 있는 한계상태설계법은 구조물의 파괴 또는 기능의 상실을 각각 내하력이 한계에 도달하여 파괴가 일어나는 극한한계상태와 구조물이 소요의 기능 및 목적의 달성에 실패하는 사용성 한계상태로 구분하여 검토하는 방법이다. 종래의 강도설계법에서는 먼저 극한 한계상태에 대하여 검토하여 이에 따라 구조물을 설계하고 내구성은 2차적인 문제로 간주하여 사용재료 선정, 재료의 배합, 철근 덮개 및 배근 상세의 제한 값 설정 등의 간접적인 방법으로 고려하여 왔다. 그러나, 실제 구조물의 내구저항 능력 상실에 따른 문제가 발생하게 되면서 내구성 문제를 별도의 사용성 한계상태의 하나로 고려하고자 하는 시도가 이루어지고 있다<sup>2,3)</sup>.

염해에 의한 콘크리트의 내구성 상실은 염분의 침투에 따라 철근 위치의 염소이온 농도가 한계값을 넘어가면서 콘크리트 내부에 있는 철근 주위의 부동태 피막이 파괴되고 철근의 부식이 진행되어 그 팽창압에 의한 콘크리트의 박리 또는 탈락이 일어나는 것을 의미한다. 따라서 엄밀한 의미의 내구성 상실은 염분 침투 및 염소이온 농축 이후 철근위치에서 염소이온의 농도가 임계값을 넘게 되고, 철근의 부식 개시와 추가적인 진행이 이루어져서 철근의 단면 감소에 이은 단면 내하력의 저하가 일어나는 것을 말한다. 그런데, 철근의 부식 개시 이후 콘크리트의 균열 또는 박리와 같이 육안에 의하여 철근 부식의 징후가 나타날 때까지는 3-5년 정도의 시간이 걸리고, 구조물 전체의 저항능력을 감소시킬 때까지는 또한 추가적인 기간이 필요하다. 그러나, 철근 부식 개시 시기 자체로서 내구성 상실의 한 단계로 볼 수 있으며 설계자의 입장에서 정의하기 간편하므로 내구성 해석에 있어서 철근의 부식개시 시기, 즉 철근 주위의 염화물 농도가 한계치를 넘는 시점을 내구성 해석에서 사용성 한계상태에 도달한 것으로 보는 것이 적절할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 철근의 부식 개시시기를 염해에 의한 부재의 내구성 파괴로 정의하며, 이때 그 발생확률을 파괴확률(probability of failure)로 규정하기로 한다.

### 2.2. 내구성 해석 모델

콘크리트의 염해를 해석하는 방법으로 가장 간편하고 널리 쓰이는 방법은 콘크리트 내부의 염분 확산문제를 Fick의 확산제2법칙(Fick's Second Law of Diffusion)을 이용하여 염분침투율을 깊이의 함수로 나타내는 방법으로 기본방정식을 식 (1)과 같이 쓸

수 있다.

$$\frac{dC(x,t)}{dt} = D_c \frac{d^2 C(x,t)}{dx^2} \quad (1)$$

여기서,  $C(x,t)$  = 시간  $t$  동안 염분에 노출된 콘크리트의 표면으로부터 거리  $x$  만큼 떨어진 위치에서의 염소 이온 농도,  $D_c$  = 염소이온확산계수이다. 이 미분 방정식에 경계조건을 대입하여 풀고, 확산계수가 시간 의존함수임을 고려하면, 시간의존확산계수에 기초한 특정위치에서의 염소이온 농도 수준의 예측이 가능하다<sup>4)</sup>.

$$C_x = C_s \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( 0.5x / \sqrt{D_0 \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^n} \right) \right] \quad (2)$$

여기서,  $C_s$  = 콘크리트 표면의 염소이온농도,  $\operatorname{erf}$ 는 error function,  $D_0$  = 시간  $t_0$ 에서의 확산계수, 지수  $n$ 은 시간에 따라 염소침투에 대한 저항이 증가하는 콘크리트의 능력을 나타내는 계수이다.

### 2.3. 확률론적 해석

#### 2.3.1. 사용수명의 확률론적 해석

콘크리트 구조물의 염분에 의한 파괴 즉, 콘크리트 내의 철근 부식 개시시기를 확률론적으로 추정하는 방법은 암묵적인 방법(implicit method)과 명시적인 방법(explicit method)으로 구분할 수 있다<sup>5)</sup>.

암묵적인 방법은 염소이온 확산방정식을 구성하는 각 설계변수를 확률변수로 보고 각 변수의 확률밀도함수를 대입하여 이를 직접 적분하는 방법을 말한다. 이 방법은 주어진 시간에 대하여 파괴확률, 철근의 부식개시확률, 을 직접 나타내는 방정식 형태의 결과를 주는데, 직접적인 확률을 계산할 수 있고 확률함수의 형태를 명시적으로 파악할 수 있는 장점이 있으나, 복잡한 구성 방정식 때문에 이를 푸는데 수학적인 어려움이 있다.

명시적인 방법은 식 (1)과 같은 지배방정식의 직접적인 변형이 필요하지 않은데, 1계 신뢰성방법(FORM, First-order reliability method), 2계 신뢰성 방법(SORM, Second-order reliability method) 등이 그 대표적인 방법이다. 이 방법은 요구조건 또는 하중(demand)과 저항능력 또는 내하력(capacity)의 차이를 정의하는 한계상태함수(limit state function, g-function)를 사용하는 것으로서 철근 콘크리트 구조물의 염해 문제에 있어서는 요구조건이 주어진 시

점에서 콘크리트 내부 철근 위치에서의 농축된 염소이온농도가 되고, 저항능력은 철근 주위의 부동태 피막이 파괴되고 부식이 시작되는 임계염소이온농도가 된다. 또, 하나의 대표적인 명시적 방법으로는 전통적인 Monte Carlo Simulation Method(MCSM)를 들 수 있다.

#### 2.3.2. Monte Carlo Simulation의 적용

본 논문에서는 전술한 방법 중 MCSM을 적용하여 확률론적인 신뢰성 해석을 수행하였다. MCSM이 유의할 정도의 충분한 반복횟수를 갖는 지를 각 설계변수에 대하여 검증하였으며, 한계상태함수 식 (2)를 다시 정리하여 다음과 같이 정의하였다. 전통적인 구조신뢰성 이론에 따라 설명하면, 하중  $s$  염소이온의 침투깊이로 정의하였으며 저항  $r$ 은 철근의 덮개로 정의하여  $g(r, s) < 0$ 가 구조물의 내구성 파괴가 일어나는 것으로 모델링하였다.

$$x(t) = 2\operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{CR}}{C_s} \right) \cdot \sqrt{D_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^n} \cdot t \quad (3)$$

여기서,  $C_{CR}$  = 철근의 부동태 파괴가 시작되는 염소이온농도의 임계값을 나타낸다. 각 simulation 경우에 대하여 입력변수는 가해진 확률밀도함수로부터 임의로 추출되었으며, 한계상태함수 값이 결정되었다. 즉, 한계상태함수 값이 음으로 되는 경우를 내구성 파괴가 일어나는 경우로 하여 그 횟수를 측정한 후 이 값을 전체 simulation 횟수로 나누어 파괴 확률을 결정하였다. 따라서, 파괴확률은 다음 식으로 결정할 수 있다.

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n I[g(r_j, s_j)] \quad (4)$$

### 3. 확률해석

한계상태함수를 구성하는 각 설계변수(design variable)는 별도의 확률분포를 갖는 확률변수로 모델링하여 입력하여야한다. 정확한 파괴확률의 산정을 하기 위하여는 각 설계변수의 통계량(statistics)이 실제 통계조사 또는 실험결과를 반영하여 결정되어야하나, 특히 국내의 경우 축적된 연구 자료가 전무한 실정이므로 외국 문헌 자료를 중심으로 각 설계변수의 통계적 성질을 모델링하였다.

### 3.1. 확률해석 절차

본 논문에서는 전술한 절차에 따라 확률론적 내구성 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 작성하였는데, 그 절차는 다음과 같다.

1) 각 설계 변수에 대하여 가정된 확률분포함수를 이용하여 random sampling을 수행하고 이를 각 설계변수의 입력값으로 한다.

2) 하나의 설계변수 조합에 대하여 식 (3)을 이용하여 한계상태함수값을 계산한다.

3) 한계상태함수값이 음으로 나온 경우의 수를 내구성 파괴가 일어난 경우로 고려하고 이를 누적하고 계산이 끝난 후 전체 simulation 횟수로 나누어 파괴 확률을 계산한다.

4) 이 과정을 반복하여 식 (4)를 이용하여 전체 사용수명(service life) 동안 특정 시점에서의 파괴확률, 철근 부식 개시 확률을 구한다.

### 3.2. 설계변수의 통계적 성질

한계상태함수에 포함된 설계변수의 통계적 성질은 실측자료 또는 실험결과에 바탕을 두어야하나, 기왕의 문헌 결과를 참고하여 모두 정규분포로 가정하였으며, 각 변수의 평균과 표준편차는 적절한 가정을 하여 합리적인 범위 내에서 변화시키며 그 영향을 고찰하였다.

#### 3.2.1. 염소이온 확산계수

콘크리트의 염소이온확산계수는 시멘트량, 시멘트 종류, 실험 방법 등 많은 변수의 영향을 받는데, 우리나라 시방서<sup>6)</sup>에서는 실제실험 또는 실측에 의하여 구하는 것을 원칙으로 하되 신뢰할 만한 자료를 확보하지 못한 경우 사용할 수 있도록 보통포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그분말 시멘트의 두 종류에 대하여 기존 자료에 대한 회귀분석식을 규정하고 있다. Bentz<sup>9)</sup>의 연구에 따르면, 동일한 실험실의 연구결과에서는 분산계수가 17% 정도인데 반하여 여러 실험실의 연구결과를 종합한 경우 37%에 이르는 분산계수를 보인다. 따라서, 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단되며, 본 논문에서는 기왕의 문헌자료에 기초한 값으로부터 일정한 범위내에서 평균값을 변화시키며 25%의 분산계수를 적용하였다.

#### 3.2.2. 확산계수의 시간의존성 지수

콘크리트의 염소이온확산계수는 시간에 따라 변화하는데, 이는 시간이 경과에 따라 염소침투에 저

항하는 콘크리트의 능력이 증가하는 경향을 반영하는 것으로서 일반적으로 지수 함수의 형태로 모델링되며, 이를 반영하는 설계변수가 시간의존성 지수  $n$ 이다. 이 값은 0.20에서 0.60 또는 0.37에서 0.60 등 연구자<sup>5,7)</sup>에 따라 많은 차이를 보이고 있으며, 실험 방법에 대한 명확한 규정이 없는 실정이다. 또한, 각 시간 단계별 분산계수의 변화가 최종단계에는 고려되고 있으나, 그 변화양상이 누적되어 표현되지는 못하고 있는 단점이 있으므로 추후 검토가 필요하다고 판단된다. 본 논문에서는 보통포틀랜드 시멘트를 기준으로 분산계수를 25%로 정의하고 평균값을 변화시켰다.

#### 3.2.3. 표면염소이온 농도 및 임계염소이온농도

설계변수 중 지역적인 변동이 가장 심하고, 동일한 구조물 내에서도 위치에 따라 가장 큰 분산을 보이는 것이 표면염소이온농도라 할 수 있는데, 특히 해상 교량 등 해안에 위치하고 있는 구조물의 경우 동일 부재에 대하여도 수중, 비탈대, 대기 중 등의 위치 변화에 따른 영향이 가장 큰 설계변수이다. 국내 연구결과<sup>8)</sup>를 분석하면 동일구조물의 경우에도 위치에 따라 전체 콘크리트 중량비로 0.066%에서 0.004%까지의 변화를 보인다. 임계염소이온농도는 이를 계량화할 표준시험방법이 존재하지 않으며, 콘크리트 중량의 0.03에서 0.07%로 보고된 연구결과<sup>9)</sup>가 있으며, Life-365<sup>9)</sup>와 같은 프로그램에서는 0.05%를 기준으로 한다. 우리나라 시방서에는 임계염화물 이온농도값을  $1.2\text{kg/m}^3$ 으로 하고 있다. 본 연구에서는 다양한 임계농도값에 대하여 20%의 분산계수를 적용하였다.

#### 3.2.4. 콘크리트 덮개

철근의 덮개는 시공품질, 철근의 기하형상, 설계품질 등에 따라 변화하는데,  $\pm 10\text{mm}$  정도의 편차를 갖는 것으로 보는 것이 일반적이다.

### 3.3. 해석 예제

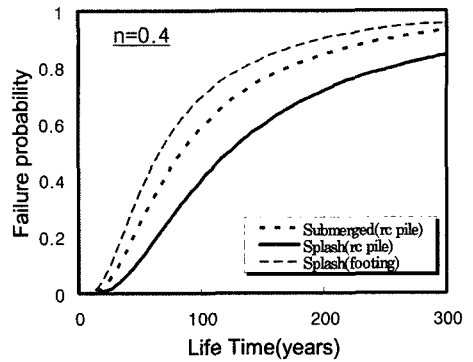
본 절에서는 국내 측정 자료<sup>8,10)</sup>를 이용하여 표면 염소이온 농도 및 확산계수를 산정하고 이를 이용하여 본 연구에서 제시된 절차에 따라 확률론에 기초한 콘크리트 구조물의 내구성 해석을 수행하였다. 사용된 통계자료는 RC 파일을 교각으로 사용한 돌핀구조물 및 해상 교량으로부터 얻어진 깊이별 염소이온 양을 이용하여 계산한 비탈대에서의 표면염소

이온농도 및 확산계수이다. 그 밖의 설계변수들은 관련 국내 자료가 부족하여 외국의 연구결과<sup>5,7)</sup>를 참고하여 설정하였으며(Table 1 참조), 이에 따른 대상교량의 각 위치별 내구성 파괴확률은 Fig. 1~2에 나타나있다. Fig. 1은 송유관을 위해 설치된 구조물의 RC 파일 및 파일상부 기초에서 얻어진 자료를 이용하여 계산된 염해에 의한 파괴확률을 보여주었고 있으며, 이 경우 철근덮개를 50mm로 가정한 경우에는 100년 시점에서 파괴확률이 각각 수중 및 비말대 두 지점의 자료에 대해 0.58, 0.391, 0.686으로 비교적 높게 나타나고 있다. 단, 수중의 경우 임계염소이온 농도를 국내 콘크리트시방서에서 규정한 1.2 kg/m<sup>3</sup>의 2배에 해당하는 값으로 가정하였지만 수중 콘크리트의 경우에는 철근위치에서 산소의 공급이 원활하지 않기 때문에 실제 염해에 의한 파괴확률은 이것보다 낮을 것으로 판단된다. 한편 Fig. 1(b)의 경우에는 동일한 조건에서 철근덮개를 85mm로 가정한 경우의 파괴확률을 나타내고 있으며, 이에 따르면 100년 시점에서의 염해에 의한 파괴확률이 0.017, 0.006, 0.041로 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다.

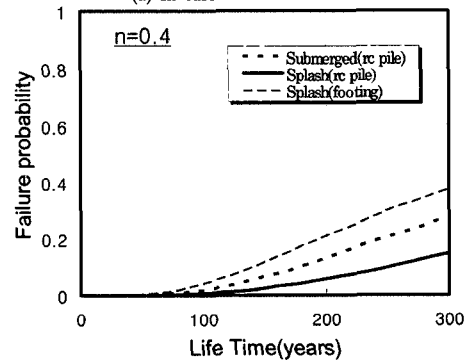
Fig. 2는 서해상에 위치한 교량의 교각 비말대 부위에서 얻어진 자료를 이용한 내구성 파괴확률이 나타나있다. 이 경우 시간의존성지수 및 철근덮개는 Fig. 1(a)와 동일하게 0.4 및 50mm를 적용하였으며, 이때 100년 시점에서의 파괴확률은 비말대 두 지점에 대해서 각각 0.088 및 0.197로 앞서의 경우에 비해 12.8에서 34.0% 정도로 작게 나타나고 있다. 이로부터 국내에 건설된 교량의 경우 그 설치위치 및 설계방법(철근덮개)에 따라 염해에 의한 파괴확률 및 피해는 상당히 큰 편차를 보일 것으로 판단되며, 향후 본 연구에서 도입한 내구성 설계요인과 관련된 추가적인 연구를 통해 안정적인 내구수명 확보가 시급한 것으로 사료된다.

Table 1. Parameters of durability design

위치	확산계수 (m <sup>2</sup> /s)	표면염소 이온농도 (% of con'c wt.)	임계염소 이온농도 (% of con'c wt.)
RC pile (수중)	2.59×10 <sup>-12</sup>	1.20	0.10
RC pile (비말대)	2.25×10 <sup>-12</sup>	0.49	0.05
footing (비말대)	3.18×10 <sup>-12</sup>	0.51	0.05
교각 1 (비말대)	1.28×10 <sup>-12</sup>	0.56	0.05
교각 2 (비말대)	2.20×10 <sup>-12</sup>	0.33	0.05



(a) In case of 50mm cover



(b) In case of 85mm cover

Fig. 1. Failure probabilities of dolphin structure at various exposure conditions.

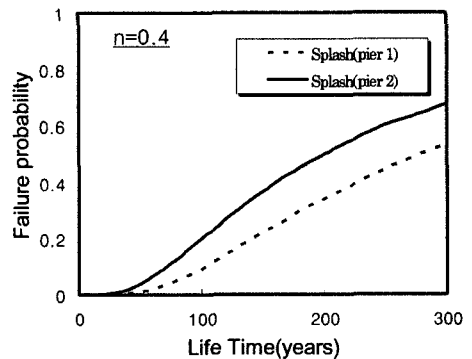


Fig. 2. Failure probabilities of marine bridge at various exposure conditions.

#### 4. 결론

본 연구에서는 해양환경 등의 열악한 조건하에 있는 철근 콘크리트 구조물의 내구성 해석 및 설계를 확률론적 이론에 근거하여 수행하는 합리적인 방법을 제안하였다. Fick의 확산 제2법칙에 근거한 염분 침투이론을 이용하여 한계상태함수식을 세우고, 각 설계변수의 통계적 성질을 산정하여 Monte

Carlo Simulation 기법에 의한 내구성해석을 수행하여 각 조건별 파괴확률(철근의 부식 개시 확률)을 계산하였다. 이를 바탕으로 일정한 파괴확률(신뢰도)에 대하여 적절한 철근 덮개를 제안하였으며, 확산계수의 값을 제시하므로 적합한 배합설계를 수행할 수 있는 근거를 또한 제시하였다.

국내 측정자료에 대한 확률론적 해석 결과에 따르면 현행 시방서 규정은 100년 사용 후 각 위치에 따라 다양한 편차의 내구성 파괴확률을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 각 위치별로 균일한 내구성 안전도를 확보하기 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시된 방법은 향후 콘크리트 구조물의 내구성 해석 및 설계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 구조물의 보수보강 시점의 결정 및 대개체 여부를 결정짓는 합리적인 판단자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 한경대학교 2006학년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

### 참고문헌

- 1) RILEM, "Durability Design of Concrete Structures", Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, RILEM, 1996.
- 2) DuraCrete Final Report, "DuraCrete Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures", May 2000.
- 3) Miguel Ferreira, Vemund Åskorg, Said Jalali, and Odd E. Gjφrv, "Probability-Based Durability Analysis of Concrete Harbor Structures", Concrete under Severe Conditions, CONSEC'04, Seoul, Korea, 2004.
- 4) Takewaka, K. and Matsumoto, S., "Quality and Cover Thickness of Concrete Based on the Estimation of Chloride Penetration in Marine Environments", ACI SP 109-17, American Concrete Institute, pp. 381~400. 1988.
- 5) Evan C. Bentz, "Probabilistic Modeling of Service Life for Structures Subjected to Chlorides", ACI Material Journal, Sep.-Oct., pp. 391~397, 2003.
- 6) 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서 내구성 편", pp. 56~57, 2003.11.
- 7) Miguel Ferreira, Said Jalali, and Odd E. Gjφrv, "Software for Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures", Concrete under Severe Conditions, CONSEC'04, Seoul, Korea, 2004.
- 8) 김은경, 신치범, 조원일, 이윤환, "해안 콘크리트 구조물의 염화물이온이동 및 철근부식에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집 18권 I-4 호, pp. 447~455, 1998.
- 9) Thomas, M.D.A. and Bentz, E.C., Life-365 Manual, released with program by Master Builders at www.Masterbuilders.com, pp. 55, 2000.
- 10) 한국콘크리트학회, "염해 및 탄산화에 관한 국내 실태 조사 보고서," 2001.