

# 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구수명 평가에 관한 연구

## A Study on Service Life Evaluation for Concrete Structures Subjected to Chloride Attack

송하원\*                      백승우\*\*                      변근주\*\*\*                      성낙일\*\*\*\*  
Song, Ha-Won      Pack, Seung-Woo      Byun, Keun-Joo      Sung, Lak-II

### ABSTRACT

In order to ensure the construction of sustainable reinforced concrete structures, durability evaluation of RC structures before construction should be carried out. In this paper, a service life evaluation technique using a safety factor determined by a reliability theory for RC structures subjected to chloride attack is proposed. The life safety factor and the service life evaluation proposed in this paper can be applied consistently for the durability evaluation of recently developed Korean standard specification for durability of concrete structures which be used effectively for the evaluation before construction and maintenance for RC structures under chloride attack.

#### 1. 서론

콘크리트는 다른 건설재료에 비해 시공성, 내구성 및 경제성이 뛰어나 사회기반 시설물의 주재료 중 하나로서 사용되고 있다. 그러나 최근 염해, 탄산화, 동결융해, 알칼리골재반응과 같은 철근콘크리트 구조물의 열화인자로 인한 심각성이 널리 확산되고 있다. 최근 이러한 이유로 인해 콘크리트의 내구성에 대한 연구가 활발히 수행됨에 따라, 국내에서도 콘크리트표준시방서-내구성편-(2004)이 제정되어 시공전 콘크리트 구조물에 대한 내구성 평가기법을 제시하였다. 본 논문에서는 신뢰성 이론에 근거하여 내구수명 안전율을 도출하며, 염해에 대해 내구적인 콘크리트 구조물을 건설하기 위하여 내구수명 안전율을 적용한 내구수명 평가기법을 제안하고자 한다.

#### 2. 콘크리트 구조물의 내구수명 안전율

콘크리트 구조물의 내구수명 평가는 열화모델에 의해 평가된 수명  $t_L$ 과 요구목표수명  $t_g$ 를 비교하므로써 나타낸다. 본 절에서는 내구성 평가기법에 적용할 내구수명 안전율의 도출과정에 대해 알아 본다.

평균 열화깊이를 시간에 대한 지수함수의 형태로 간략화 하여 나타내면 다음과 같다.

$$\mu(D(t)) = at^n \quad (1)$$

\*정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

\*\*정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 대학원

\*\*\*정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

\*\*\*\*비회원, (주)유신코퍼레이션 전무

여기서,  $\mu(D(t))$ 는 열화깊이의 평균,  $a$ 는 열화깊이의 계수,  $n$ 은 그림 1과 같이 열화의 속도를 표현할 수 있는 지수를 나타낸다. 그림 2는 시간에 따른 열화깊이(D)가 정규분포 한다고 가정하였을 때  $t^n$ 에 대한 D의 변화를 나타낸 것이다. 열화깊이(D)가 정규분포를 따르므로  $t_g$ 에서 표준정규분포의 신뢰성 지수( $\beta$ )는 식 (2)와 같다(Vesikari,1995).

$$\beta = \frac{D_{lim} - D_g}{\sigma_{D_g}} = \frac{D_{lim} - D_g}{\nu_D D_g} = \frac{1}{\nu_D} \left( \frac{D_{lim}}{D_g} - 1 \right) \quad (2)$$

여기서,  $D_{lim}$ 는 한계열화깊이,  $D_g (= \mu(D(t_g)))$ 는  $t_g$ 에서 평균열화깊이,  $\sigma_{D_g}$ 는  $D_g$ 의 표준편차,  $\nu_D (= \sigma_{D_g} / D_g)$ 는 열화깊이의 변동계수이다.

그림 2에서  $D_{lim} : D_g = (\gamma_t t_g)^n : t_g^n$  이므로 이를 계산하면 다음의 식 (3)과 같다.

$$\frac{D_{lim}}{D_g} = \frac{(\gamma_t t_g)^n}{t_g^n} = \gamma_t^n \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 내구수명 안전율의 계산식은 다음과 같다.

$$\gamma_t = (\beta \nu_D + 1)^{1/n} \quad (4)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 내구수명 안전율( $\gamma_t$ )는 목표내구수명( $t_g$ )에서 신뢰성지수( $\beta$ ), 열화깊이(D)의 변동계수( $\nu_D$ ), 그리고 열화깊이 속도지수( $n$ )에 따라 변화한다.

### 3. 콘크리트 구조물의 염해 내구수명 평가

본 절에서는 2절에서 구한 내구수명 안전율로부터 염해에 대한 안전율을 결정하고, 이를 통한 내구수명 평가방법을 제안하도록 한다.

#### 3.1. 내구수명 안전율의 결정

염해에 대한 내구수명 안전율을 구하기 위하여 변동계수와 신뢰성지수를 결정하여야 한다.

그림 1에서 3가지의 열화깊이 함수에서 염해에 대한 열화깊이 함수의 형태는 감속형( $n=0.5$ )에 가까운 형태를 나타낸다고 판단된다. 또한, 시공 품질관리정도와 변동계수와의 관계는 콘크리트 압축강도의 경우 관리의 정도, 콘크리트의 배합, 기간 등에 의하여 달라지며 일반적으로 표 1과 같은 값을 갖게 된다(한국콘크리트학회, 1999).

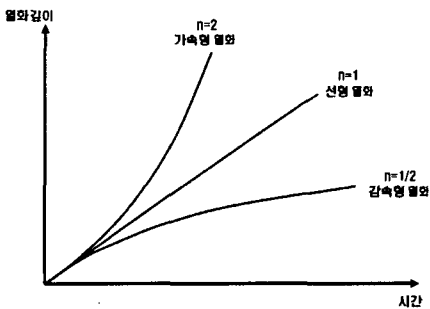


그림 1 지수 n에 따른 시간에 대한 열화속도

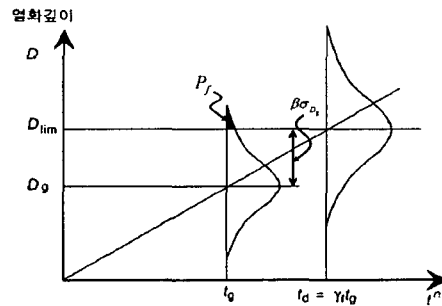


그림 2 정규 분포된 성능저하깊이(D)에 대한 내구수명 안전율

일반적으로 콘크리트의 주요 열화요인인 염해, 탄산화 등은 콘크리트 내부로 염화물을 이온이나 이산화탄소가 침투 및 확산하여 발생하며, 이러한 확산성은 콘크리트의 물-결합재비와 밀접한 관련이 있다. 또한, 콘크리트의 물-결합재비는 압축강도의 변화와 밀접한 관계가 있으므로, 열화깊이의 변동성은 재료자체의 성질인 압축강도의 변동성과 관련성이 크다고 볼 수 있다. 본 논문에서 다루는 주된 열화인자인 염해에 대한 내구수명 안전율을 결정하기 위하여 콘크리트의 품질관리에 따른 변동계수를 설정하여야 하며, 표 1의 ACI Committe 214에서 제시한 품질관리 정도에서 일반적인 콘크리트 품질관리라 판단되는 '양호 및 보통'의 중간 값인 0.15로 설정한다. 또한, 신뢰성지수는 콘크리트표준시방서-내구성편-에서 염해에 대한 신뢰성 지수로서 제안한 1.8로 선정하여 식 (4)에 따라 계산하면 내구수명 안전율은 1.61의 값을 갖게 된다.

### 3.2. 염해를 고려한 내구수명 평가기법

염해환경하에 있는 콘크리트 구조물의 내구수명을 평가하기 위한 기본식은 다음과 같다.

$$t_L \geq \gamma_i t_g \tag{5}$$

여기서,  $t_L$ 은 대상구조물의 내구수명(year),  $\gamma_i$ 은 염해에 대한 내구수명 안전율(=1.61),  $t_g$ 은 목표 내구수명(year)이다.

염해를 받는 대상구조물의 내구수명( $t_L$ )을 도출하기 위하여 Browne(1980)의 염화물이온 농도의 예측식을 이용하도록 하며 이를 나타내면 다음과 같다.

$$C_{lim} - C_i = (C_0 - C_i) \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_e t_L}}\right)\right) \tag{6}$$

여기서,  $D_e$ 은 염화물이온의 유효확산계수 ( $m^2/year$ ),  $C_0$ 은 콘크리트 표면의 염화물이온 농도( $kg/m^3$ ),  $C_i$ 은 콘크리트의 초기염화물이온 농도( $kg/m^3$ ),  $x$ 은 피복두께( $cm$ ),  $\operatorname{erf}$ 는 오차함수,  $C_{lim}$ 은 임계 염화물이온 농도이며 본 연구에서는  $1.2(kg/m^3)$ 를 사용한다.

위의 식 (6)에 위의 여러 변수(확산계수, 임계염화물이온 농도, 표면염화물이온 농도, 피복두께 등)을 적용하여 계산하면 대상구조물의 내구수명( $t_L$ )을 구할 수 있다. 또한, 콘크리트표준시방서-내구성편-에서 콘크리트 구조물의 중요도에 따라 정한 목표내구수명을 표 2에 나타내었으며, 본 논문에서는 이를 목표내구수명( $t_g$ )의 설정에 적용하도록 한다. 표 3은 해안선으로부터의 거리에 따른 콘크리트 표면에서의 염화물이온 농도( $C_0$ )를 나타낸 것이며(한국콘크리트학회, 2004), 본 논문의 내구수명 평가시에 이를 사용토록 한다.

표 1 콘크리트 압축강도의 관리정도과 변동계수(한국콘크리트학회, 1999)

발표자	품질관리정도에 따른 변동계수			
	우수	양호	보통	불량
ACI Committe 214	0.1 이하	0.1~0.15	0.15~0.20	0.2 이상
Graham and Martin	0.09~0.12	0.12~0.16	0.16~0.18	-
Stanton Walker	0.1~0.12	0.15	0.18~0.20	0.25

표 2. 콘크리트 구조물의 목표내구수명(한국콘크리트학회, 2004)

구조물의 내구등급	구조물의 내용	목표내구수명
1등급	특별히 높은 내구성이 요구되는 구조물	100년
2등급	일반 구조물	65년
3등급	비교적 짧은 내구수명이 요구되는 구조물	30년

표 3. 콘크리트 표면에서의 염화물이온 농도  $C_0$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )(한국콘크리트학회, 2004)

비말대	해안선으로부터의 거리(km)				
	해안선근처	0.1	0.25	0.5	1.0
13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5

### 3.3. 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구수명

본 논문에서는 철근 위치에서의 염화물이온 농도가 철근 부식을 일으키는 한계농도에 도달하는 기간, 즉 사용개시 이후 잠복기가 끝나는 시점까지를 내구수명이라 정의하도록 한다.

### 3.4. 내구수명 평가 절차

지금까지의 내용을 바탕으로 염해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구수명 평가 절차흐름을 다음의 그림 3에 나타내었다. 식 (6)을 통해 계산된 구조물의 내구수명( $t_L$ )이 식 (5)의 내구수명 평가식을 만족하지 않는다면 여러 설계조건을 변경하여 재평가를 실시하여야 한다.

### 4. 결론

염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구수명 평가기법 개발에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 구조물의 합리적인 내구성 평가를 위한 내구수명 안전율을 확률론적 접근방식을 통해 도출하였다. 내구수명 안전율은 열화깊이 함수의 형태, 신뢰성지수, 변동계수에 따라 변화함을 알 수 있다.
- (2) 내구수명 안전율을 결정하는데 있어서 열화깊이 함수의 형태는 선형, 가속형, 감속형의 3가지로 분류할 수 있으며, 본 논문에서의 염해에 대한 열화깊이 함수의 형태는 감속형으로 결정하여 1.61의 내구수명 안전율을 도출하였다.
- (3) 염해를 받는 콘크리트 구조물의 요구 내구수명 확보를 위해 구조물의 열화예측에 근거하여 정량적으로 내구성을 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 이는 최근 제정된 콘크리트 표준시방서-내구성편-의 염해에 대한 내구성 평가에 일관되게 적용가능한 내구수명 평가방법이라 판단된다.

### 5. 참고문헌

- (1) Browne, R. D. (1980), "Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection and Repair of Offshore and Coastal Structures", *ACI SP-65*, pp. 154-178.
- (2) Sarja, A. and Vesikari, E. (1996), *Durability Design of Concrete Structures*, Rilem Report 14, E & FN Spon, London, pp. 33-57.
- (3) Vesikari, E.(1995), "Betoni rakenteiden käyttöikämitoitus (Service life design of concrete structures)", *Proc of Finnish Civil Engineers*, Helsinki, pp. 120.
- (4) 日本土木學會 (2000), 콘크리트標準시방書[施工編], 콘크리트 라이브러리, 第99号, 12.
- (5) 한국콘크리트학회 (1999), 최신콘크리트공학
- (6) 한국콘크리트학회 (2004), 콘크리트표준시방서 -내구성편-

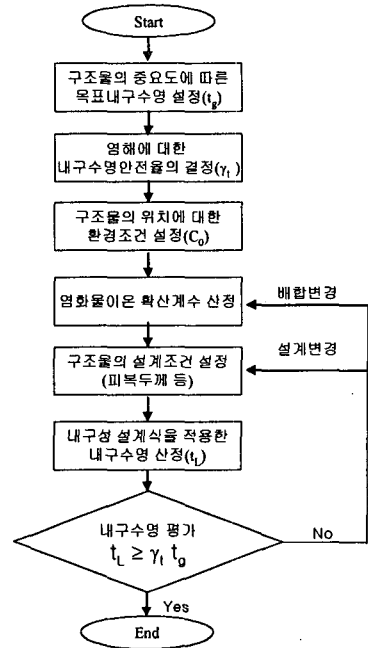


그림 3. 염해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구수명 평가 절차