

# 콘크리트 구조물의 내구성 설계시스템 개발

## Development of Durability Design System for Concrete Structures

변근주\*  
Byun, Keun-Joo

권성준\*\*  
Kwon, Seung-Jun

송하원\*\*\*  
Song, Ha-Won

---

### ABSTRACT

The concrete structures designed and constructed by conventional design concept based on structural performance consideration show sometimes serious durability problem when the structures are exposed to aggressive environment. Because present design system focuses on the structural safety and considers durability indirectly by the concrete mix design and cover depth, the durability of concrete structure cannot be ensured.

As the first step to develop the durability design for concrete structure, durability index which represents internal concrete resistance and environment index which represents external environmental exposure are derived quantitatively. In the next step, the durability design system is developed by checking durability limit state with computed two indexes under service life condition by considering of the reliability of the structure. Finally, the proposed system is verified with a model problem.

---

### 1. 서론

사회기반 시설물의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트 구조물은 그동안 경제적이고 반영구적인 구조물로 생각되었으나 재료, 설계, 시공, 유지관리, 하중 및 환경조건등의 이유로 공용기간에 이르기 전에 자체의 성능을 발휘하지 못하고 다양한 성능저하를 보이게 된다.<sup>1)</sup> 이런 성능저하는 대부분 방치되어 단순한 미관의 변화에서 결함의 발생으로 인한 강성의 감소, 단면의 감소, 내부 강재의 부식등으로 전파되며 결국은 구조적인 문제로 확대되어 구조물에 치명적인 피해를 야기하게 된다.<sup>1),2)</sup>

최근까지도 구조물 자체에 대한 문제는 설계나 시공등의 오류로 평가되었을 뿐이나 설계 당시에 이미 모든 설계조건을 만족시켰음에도 불구하고 구조물이 성능저하를 보이는 것은 현재까지의 설계개념인 구조성능위주의 안전성 설계이외에도 또다른 설계개념이 도입되어야 함을 시사하고 있다.<sup>3),4),5)</sup>

---

\*정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

\*\*정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

본 논문에서는 콘크리트 구조물의 내구저항성을 물리적지표로 표현한 내구지수와 콘크리트 외부로부터의 열화작용을 물리적 지표로 표현한 환경지수를 이용하여, 확률론적인 접근을 통한 내구성 설계 개념을 도출하였으며 이에따른 내구성 설계시스템을 제안하였다.

## 2. 내구성 설계시스템의 개념

콘크리트 구조물이 소요성능을 유지하기 위해서는 구조성능, 시공성능, 내구성능 등이 각각의 독립적이고 유기적인 연관성을 유지하며 전체 구조물의 소요성능을 만족시켜야 하는데 현재의 안전성 위주의 구조설계 시스템은 내부에 시공성능과 내구성능을 하나의 보조적 성능으로 간주하고 있는 실정이다. 이중 내구성능을 정량화하는 것은 어렵고 아직도 한계를 가지고 있지만 단순한 재료의 배합의 제한수준을 벗어나 내구저항성이나 환경 영향의 등급화를 통하여 하나의 내구성 설계시스템을 구축하는 것은 차세대 설계개념으로서 매우 중요하다. 즉 구조설계에 의해 확보되는 안전성 뿐 아니라 내구설계를 통해 확보되는 안전성이 같이 고려되는 시스템으로 구조물 설계가 발전되어야 한다.

### 2.1 공용기간을 고려한 내구지수와 환경지수

콘크리트 구조물은 동일한 공용기간을 가지더라도 지배적인 열화인자 영향이 노출환경에 따라 다르게 누적되므로 다양한 내구저하의 형태를 보이게 된다. 구조물의 내구저하에 저항하는 정도를 내구지수( $D_T$ ), 열화인자에 의한 내구저하정도를 환경지수( $E_T$ )라 정의하고 내구지수와 환경지수를 시간의 함수로 나타낸다고 가정하면 구조물의 노출환경에 따라 공용기간을 예측할 수 있다.

구조물의 내구저항성은 시간의 증가에 따라 감소하게 되고 열화인자의 누적으로 인해 열화외력은 증가하게 되므로 사용개시후 환경지수와 내구지수의 곡선이 만나는 교점으로부터 공용기간을 예측할 수 있을 뿐 아니라 임의의 측정시점 이후 공용기간까지의 시간을 잔존수명으로 예측할 수 있으므로 내구지수와 환경지수가 정량화만 된다면 이를 통한 보수·보강의 시점의 예측 등 설계에 직접적인 이용이 가능하다. 그림 1은 공용기간을 고려한 내구지수와 환경지수를 나타낸 것으로 그림 1에서 ②, ③을 보통의 환경지수와 내구지수라고 각각 가정하면 이로인한 공용기간을  $t_1$ 으로 예상할 수 있다. 반면 극심한 환경조건에 노출되어 있을때의 환경지수는 ①로 나타날 수 있는데 ②보다 큰 기울기를 가지고 있으므로 같은 내구지수를 가지고 있어도 공용기간이  $t_0$ 로 기존의  $t_1$ 보다 짧게 평가되는 것을 알 수 있다. ④의 경우는 내구저항능력을 증가시킨 경우로 공용기간이  $t_2$ 로 증가되는 것을 나타내며 내구저항정도가 정량화된다면 그래프의 전체적인 이동과 기울기도 조절할 수 있을 것이다. 그림 2는 보수·보강을 통하여 공용기간이  $t_3$ 에서  $t_4$ 로 증가를 가져온 경우의 개념을 보여준다.

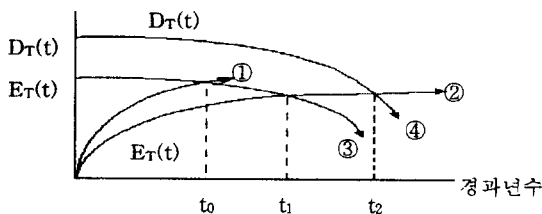


그림 1. 공용기간을 고려한 내구지수와 환경지수

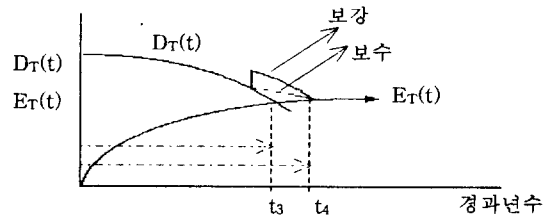


그림 2. 보수·보강에 따른 공용기간의 증가

## 2.2 내구성 평가의 개념

노출환경에 의한 열화외력을 구조성능평가시의 외력으로, 구조물이 가지고 있는 내구저항성을 내부저항용력으로 고려하면 현재의 구조성능평가와 같이 정량화된 관계를 도출할 수 있다. 공용기간이 산정되면 그 기간중의 환경지수의 최대값과 내구지수의 최소값을 비교하는 방법을 생각할 수 있으며 현재의 WSD나 USD에서 고려하는 안전율이나 하중계수의 조합을 통해 실제 외력보다 큰 내부저항력을 유도하듯이 내구설계에서도 구조물계수를 통하여 실지 외력으로 평가되는 환경지수보다 큰 내구지수를 도출할 수 있다. 이 구조물계수는 설계이전에 내구적 불안적 확률과 목표신뢰도 지수 등을 고려하여 정해야 하며  $r_T$ 를 구조물계수로 정의할 때 구조성능평가시 안전·불안전의 판단과 마찬가지로 내구성 평가식을 다음 식(1)로 제안할 수 있다.

$$\frac{D_T}{E_T} \geq r_T \quad (1)$$

그림3은 구조설계와 비교한 내구적 불안전 확률의 함수로 나타낸 내구설계의 개념을 나타낸다.

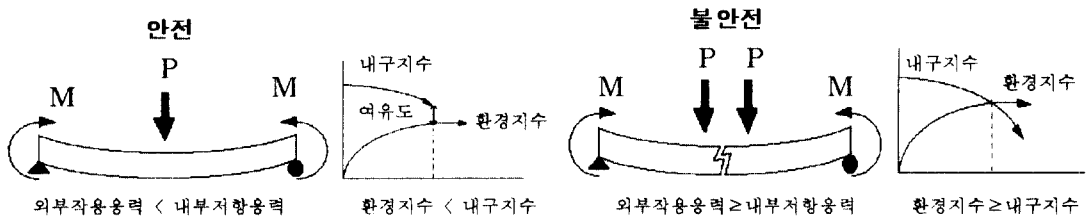


그림 3 구조설계과 내구설계의 평가비교

## 2.3 내구지수와 환경지수의 평가

### 2.3.1 내구지수의 평가

구조물의 내구저항성을 정량적으로 나타내는 내구지수는 재료의 선택부터 구조설계 및 시공까지 이어지는 일련의 과정을 모두 포함하여야 하고 각각의 과정에서 내구영향인자들을 선정된 후 체계적으로 분류하는 것이 중요하다. 또한 노출환경하에서의 환경지수 설정시의 기준값인 상한치와 하한치를 고려하여 분류된 인자들의 조정이 필요하다.

실제로 시간에 따른 내구지수의 감소를 고려하기에는 현단계에서 무리가 있으므로 재료, 구조, 시공 각 분야의 내구지수 산정시 일정한 내구지수를 갖는다고 가정하는 것이 현재로서는 합리적이다. 일본의 콘크리트 구조물의 내구설계지침<sup>4)</sup>에서 제안한 것 같이 내구지수를 다음식(2)로 제안하였다.

$$D_T = D_0 + \sum D_T(I, J) \quad (2)$$

여기서  $D_0$ 는 구조물이 가지고 있는 기본내구지수, I는 재료, 구조, 시공의 3개 분야를, J는 각 분야의 내구지수를 그룹화한 소항목을 의미한다.

### 2.3.2 환경지수의 평가

구조물의 지배적인 열화인자의 파악과 이로 인한 피해치의 등급화가 선행되어야 하는데 이를 위해 다양한 구조물을 대상으로한 실측자료를 기반으로 열화정도를 파악하고 이를 기준으로 극심한 환경에서도 적용할 수 있도록 환경지수의 증분치를 도입하였다. 환경지수의 설정은 내구지수와와의 상관관계를 고려하여 설정하며 각각의 지배적인 열화인자를 선정한 후 시간에 따른 열화정도를 분석하여 환경지수를 정량화할 수 있다. 본 논문에서는 일본의 콘크리트 구조물의 내구설계지침<sup>4)</sup>의 환경지수식을 채용하여 다음식(3)과 같이 환경지수를 제안하였다.

$$E_T = (E_0 + \sum \Delta E_T) \sqrt{\frac{(t-10)}{40}} \quad (3)$$

여기서  $E_0$ 는 기본환경지수,  $\Delta E_T$ 는 환경지수의 증분치,  $t$ 는 공용기간을 나타낸다.

그림 4는 환경지수의 정량화 과정을, 그림 5는 내구지수의 정량화 과정을 나타낸 것이다.

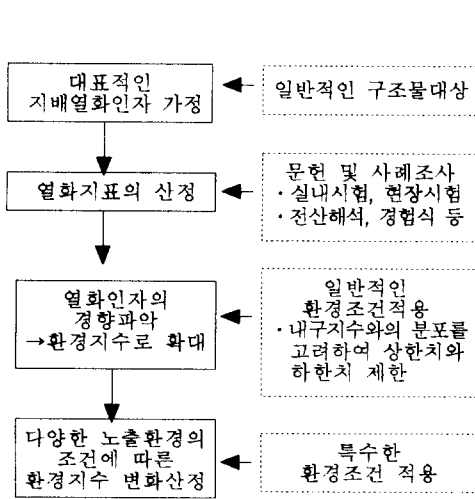


그림 4 환경지수의 정량화 과정

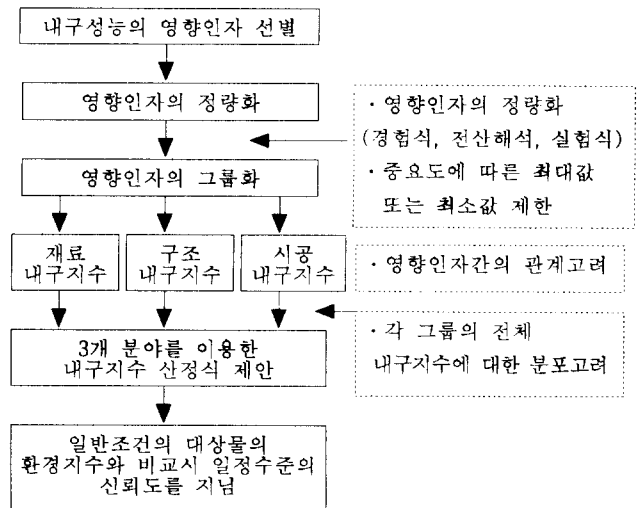


그림 5 내구지수의 정량화 과정

## 3. 확률론적 분석을 도입한 내구성 설계시스템의 도출

### 3.1 내구성 설계시스템의 도출

공용기간동안 내구지수는 항상 환경지수보다 커야하며 다음과 같은 기본식(4)를 만족해야 한다<sup>5)</sup>.

$$p_f = p \{D_T - E_T < 0\} < p_{ft} \quad (4)$$

여기서  $p_{ft}$ 는 목표신뢰도지수에 따른 내구적 불안정확률,  $D_T$ 는 내구지수,  $E_T$ 는 환경지수를 나타낸다. 구조성능의 안전성 평가를 위한 신뢰도지수의 도출시 FOSM(first-order-second-moment)방법을 주로 이용하는데<sup>6)</sup> 내구지수와 환경지수를 각각 내력과 외력으로 고려하여 정규분포를 가정하면 식(5)

와 같이 내구적 불안전 확률과 신뢰도 지수와의 관계를 나타낼 수 있고<sup>7)</sup> 식(6)에 의해 환경지수에 따른 임계내구지수를 산정할 수 있다.

$$\phi(\beta_{ft}) = 1 - p_{ft} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta_{ft}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

$$\beta_{ft} = \frac{\overline{D_{req}} - \overline{E_T}}{\sqrt{\sigma_{D_T}^2 + \sigma_{E_T}^2}} \quad (6)$$

$\overline{D_{req}}$ 는 임계내구지수의 평균,  $\overline{E_T}$ 는 환경지수의 평균,  $\sigma_{D_T}^2$ 는 내구지수의 표준편차,  $\sigma_{E_T}^2$ 는 환경지수의 표준편차,  $\beta_{ft}$ 는 목표 신뢰도지수를 나타낸다. 공용기간을 50년으로 설정하고 일반적으로 구조설계시 콘크리트 구조물에 쓰이는 신뢰도지수인 1.75~3.2 범위에서 신뢰도지수가  $\sqrt{\text{시간}(t)}$ 에 반비례한다고 가정하며 공용개시직후는 3.2, 공용연한에 이르는 50년에서는 1.75로 감소한다고 가정하는 경우, 목표신뢰도지수와 공용기간에 따른 임계내구지수와 환경지수는 그림 6과 같은 경향을 가진다. 이때 내구지수와 환경지수는 정규분포를 따르고 변동계수는 0.1로 가정하였고 그림 7은 도출된 내구성 설계시스템의 개념을 나타낸 것이다.

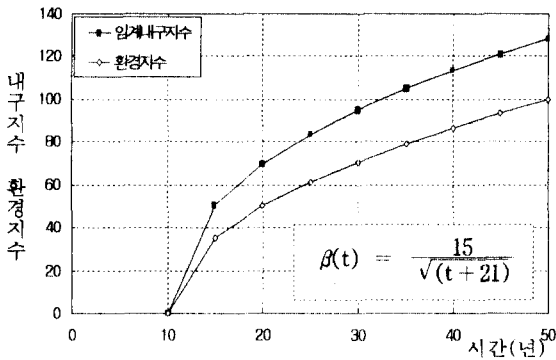


그림 6 목표신뢰도지수를 만족시키는  
환경지수와 임계내구지수의 관계

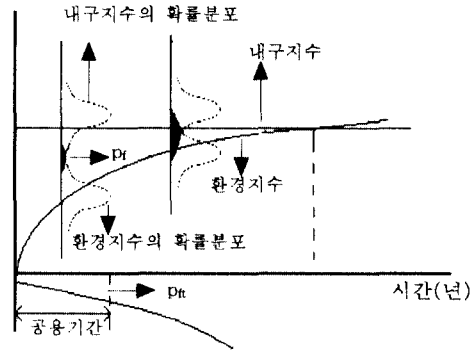


그림 7 내구성 설계시스템의 개념

### 3.2 대상구조물의 평가

제안된 시스템에 의한 내구성 평가대상 구조물은 일반적인 강도설계로 건설된 교각으로서 일본 콘크리트 내구설계지침<sup>4)</sup>의 적용에이다. 식(2)와 식(3)의 내구지수와 환경지수의 변동계수는 0.1로 가정하였다. 기본내구지수인 30과 기본환경지수인 100에 대해 산정된 내구지수는 99이며 이때의 내구적 불안전 확률은 53%이므로 공용기간 50년의 목표 신뢰도지수에 따른 내구적 확률인 4%보다 크게 상회함을 알 수 있다. 이에 재료분야, 구조분야, 시공분야의 내구지수를 각각 +5, +6, +50을 증가시키면 구조물의 전체 내구지수를 160으로 개선할 수 있다. 이때의 내구적 불안전 확률은 0.07%이므로 식(4)의 기본식을 만족한다. 한편 공용기간 50년의 내구적 불안전확률 4%를 만족하는 임계내구지수는 128이었

본식을 만족한다. 한편 공용기간 50년의 내구적 불안전확률 4%를 만족하는 임계내구지수는 128이었다. 그림 8은 환경지수와 임계내구지수와의 관계를, 표 1은 대상구조물 적용시의 결과를 나타낸다.

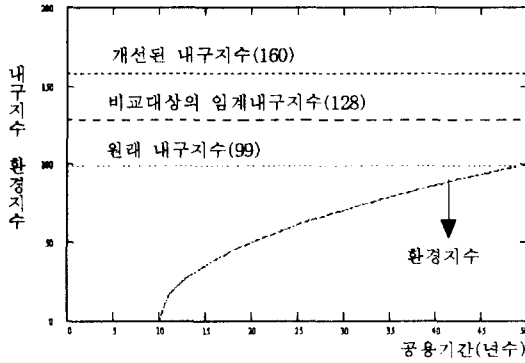


그림 8 환경지수와 임계내구지수와의 관계

표 1. 대상구조물 적용시의 결과

목표신뢰도지수 : 1.75 목표 내구적 불안전 확률 : 4% 임계내구지수 : 128		
	개선전	개선후
내구지수	99	160
내구적 불안전확률	53%	0.07%

#### 4. 결론

콘크리트 구조물의 열화작용에 대해 정량적으로 저항정도를 표현한 내구지수와 외부환경인자의 열화작용을 정량적으로 표현한 환경지수를 이용하여 확률론을 도입한 내구성 설계시스템을 개발하였다. 개발된 내구성 평가시스템에 따라 콘크리트 교각의 내구성 평가를 시도하였다.

#### 5. 참고문헌

1. CEB General Task Group 20, "Durable Concrete Structure - Design Code", *CEB*, Thomas Telford, 1989, pp. 27-57
2. ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete", *ACI Material J.* Vol.88, No.5 Sep.-Oct. 1991
3. *콘크리트 구조물의 내구성 설계지침(試案)*, 日本土木學會, 콘크리트라이브러리, 第65号, 1989, 8
4. *콘크리트 구조물의 내구성 설계지침(案)*, 日本土木學會, 콘크리트라이브러리, 第82号, 1995, 11
5. CEB Task Group 5.1, 5.2, "New Approach to Durability Design", *CEB*, Sprint-Druck, Stuttgart, May, 1997
6. Edward G. Nawy, *Reinforced Concrete - A Fundamental Approach*, Prentice Hall, Inc. 2nd Edition, 1990, pp. 69-72
7. 土木學會構造工學委員會, *構造物の安全性・信頼性*, 土木學會, 1977, pp. 42-48