

# 성능중심형 고내구성 콘크리트의 배합설계

## Performance Based Design for High Curability Concrete

김 성 수\*   박 광 필\*\*   이 정 배\*\*\*  
S. S. Kim,   K. P. Park,   J. B. Lee

### ABSTRACT

This study was carried out to investigate the service life of reinforced concrete structures for durability design. The service life has three aspects physical service life, functional service life, and social service life, and that a structures are normally demolished to end its service life when either the functional or social service life is over before the physical service life comes to end an end. In the future, it is very important that durability design shall be performed establishing design service life and the unallowable state of deterioration in the course of design service life.

### 요 약

본 연구는 철근콘크리트 구조물의 사용을 증진하기 위한 성능중심형 고내구성 콘크리트의 배합설계를 위해 환경 조건 및 사용목적에 따른 설계요소를 알아보고 대표적인 성능검증 방법에 관하여 언급하고자 한다.

일반적인 콘크리트의 성능은 주로 강도, 내구성, 유동성의 3요소를 의미하지만 성능중심형 콘크리트는 연구자의 소견과 환경에 따라서 많은 차이를 보일 수 있다. 따라서 콘크리트 배합설계시 사용 기간 내에는 구조체 및 부재에 대하여 요구 성능을 만족하여야 하며, 콘크리트 배합설계자는 구조물의 용도, 기능 및 사회적 중요도를 바탕으로 설계 년수를 결정하여야 한다.

성능중심형 콘크리트는 반드시 배합시험을 통하여 결정하는 것을 원칙으로 하며, 사용자로부터 요구되는 내용연수 및 요구성능과 법적, 사회적 제약조건을 만족하는 설계내용연수를 설정해야 한다. 또한 현장조사를 통하여 구조물이 위치하는 환경적 요인을 충분히 고려하고 부재의 설계 강도, 타설시기, 타설물량등 제반조사 및 시험이 완료되어야 할 시점을 결정하여 전체시험 계획을 수립하여야 한다.

본 연구에서는 다양한 열화 환경요소 중 콘크리트의 내구성에 관한 기본적인 요소로서 기온, 온도, 일사열, 중성화, 동해 및 염해 등 일반적인 구조물에 작용한다고 판단되는 요인만을 산정하였다. 또한 대표적인 성능중심형 고내구성 콘크리트의 성능 검증방법으로 탄산화, 동해, 염해 및 화학약품에 대한 성능검증 방법에 대해 언급하였다.

아직까지 국내에서는 콘크리트 구조물의 성능중심형 고내구설계·시공지침으로서 표준적인 시방이 정해지지 않았으나 향후 양질의 사회자본을 축적하고 이를 계승발전하기 위해서는 국내의 콘크리트 구조물에 대한 고내구성 콘크리트의 배합설계를 위한 연구는 필수적이라고 판단된다.

### 1. 서 론

국토의 효율적인 활용과 인류 문명의 발달에 따라 최근 콘크리트 구조물의 대형화, 고층화, 고내구화가 추진되면서 콘크리트에 요구되는 성능도 고도화, 다양화 되고 있다. 이러한 고도화와 다양화에 대응하기 위해서는

\* 정회원, 대진대학교, 건설시스템공학과, 교수

\*\* 정회원, 대진대학교, 토목공학과, 박사수료

\*\*\* 정회원, 대진대학교, 토목공학과, 박사과정

구조물에 사용되는 콘크리트의 고성능화뿐만 아니라 사용 환경 및 구조물의 사용목적에 따라 콘크리트의 배합설계도 선택적으로 이루어져야 하며, 이에 대한 연구가 세계 각국에서 활발히 진행되고 있는 실정이다.

과거에는 콘크리트의 설계 및 시공시 강도, 사용성, 내구성 순으로 그 중요성을 평가해 왔다. 그러나 최근 각국에서 대두되고 있는 콘크리트의 열화 손상은 비록 국부적으로 발생하더라도 부재의 보수 및 교환이 곤란하여 결국에는 구조물 전체의 공용년수를 단축시키는 결과를 초래하기 때문에 콘크리트 재료, 설계, 시공 및 유지 관리에 있어서 내구성, 사용성, 강도의 순으로 중요성에 대한 인식이 전환되고 있다.

일반적으로 콘크리트의 성능이라는 것은 연구자에 따라 다소 다를 수는 있지만 주로 강도, 내구성, 유동성의 3요소를 의미한다. 하지만 성능중심형 콘크리트는 연구자의 소견과 현장의 환경 요소에 따라서 많은 차이를 보일 수 있는 콘크리트 배합이다. 이러한 점에 비추어 콘크리트의 배합 설계시 내용년수의 기간 내에는 구조체 및 부재에 대하여 요구 성능을 만족하여야 하며, 설계자는 내용년수를 구조물의 용도와 사회적 중요도를 바탕으로 설계 년수를 결정하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트 구조물의 환경 조건 및 사용목적에 따라서 달라질 수 있는 콘크리트 배합에 대한 설계자의 요구성능 또는 한계 상태를 설정과 설계요소 및 성능중심형 고내구성 콘크리트의 필요성에 대한 연구 동향 등을 언급하고자 한다.

## 2. 성능중심형 고내구성 콘크리트 배합설계 흐름

### 2.1 성능중심형 콘크리트의 일반설계

성능중심형 콘크리트의 배합설계는 규정된 절차와 방법을 준수하여야 하며, 기존의 사용 실적이나 시험 배합 결과를 토대로 선정하는 경우에도 사용하는 재료의 품질에 따라 차이가 있으므로 반드시 배합 시험을 통하여 결정하는 것을 원칙으로 한다.

또한, 고내구성 성능 중심형 콘크리트는 현장조사를 통하여 구조물의 환경과 부재의 설계 강도, 타설 시기, 타설 물량등 제반조사 및 시험이 완료되어야 할 시점을 결정하여, 콘크리트의 요구 성능을 명확하게 하고, 전체 실험 계획을 수립 하여야 한다. 그림 1은 성능 중심형 콘크리트의 일반설계법의 흐름도이다.

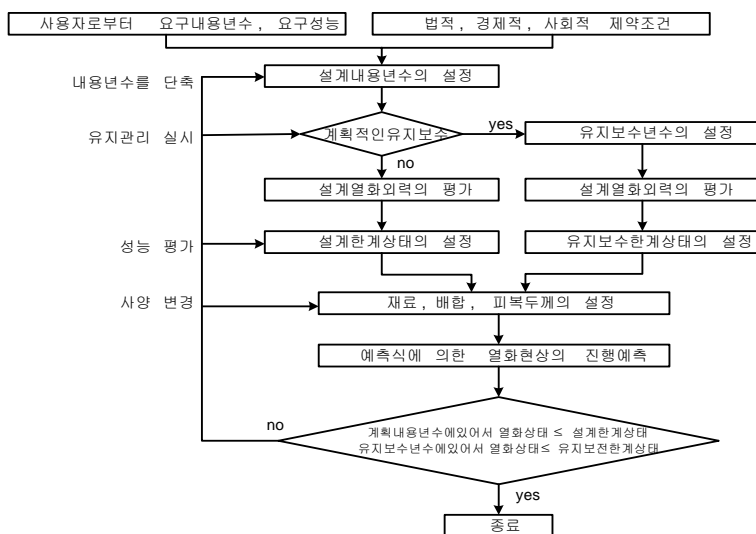


그림 1 성능중심형 콘크리트 배합설계 흐름도

## 2.2 환경 요인에 따른 성능 중심형 콘크리트의 배합설계

콘크리트 구조물에 발생하는 열화현상 및 열화 환경요소의 예를 들면 염해 위험지역, 동해 위험지역 등과 같이 주로 환경조건에 의한 영향을 받지만, 구조물의 용도·구조 등에 따라서 차이가 있으므로 설계에서 구조물의 사용조건 및 환경조건을 충분히 조사해서 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 고려하여 정할 필요가 있다.

열화 환경요소에 대해서는 구조물을 구성하는 각 재료의 종류에 따라 다양하며, 그 재료의 사용부위에 대해서도 작용하는 열화 환경요소가 다르다. 콘크리트 구조물 구체의 경우 광범위하게 보편적으로 작용하는 것과 국부적이지만 특수한 조건에서 작용하는 것이 있다. 콘크리트 구조물의 내구성에 관한 기본적인 것으로써 기온, 온도 그리고 일사열, 중성화, 동해 및 염해를 들 수 있으며, 일반적인 구조물에 작용한다고 판단되는 것만을 산정하고, 공장 등에서 발생할 수 있는 특수한 열화 환경요소는 제외하였다.

이러한 환경 요인들은 콘크리트 구조물의 완공 후 유지 관리가 아닌 현장 조사를 통하여 구조물에 사용되는 콘크리트의 배합설계 단계에서부터 관리가 이루어져야 한다. 아래의 그림 2는 환경 요인에 따른 성능 중심형 콘크리트의 배합설계 흐름도를 나타내었다.

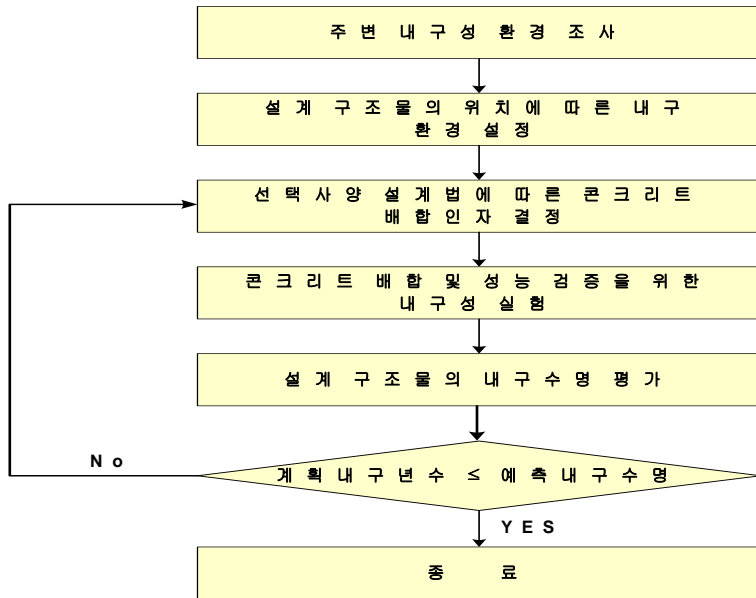


그림 2 환경 요인에 따른 성능 중심형 콘크리트 배합설계 흐름도

## 3. 성능중심형 고내구성 콘크리트의 성능 검증방법

### 3.1 탄산화에 대한 성능 검증방법

φ100×200mm 원주형 몰드로 제조한 콘크리트 공시체를 20±1℃의 수중에서 28일간 양생한 후 시험편 표면을 그라인더 및 브러시를 이용하여 정리한 후 표면 한면을 제외한 나머지 면에 콘크리트 보호코팅재료를 코팅하여 이산화탄소의 농도를 높은 탄산화 촉진시험기안에 넣어 시험을 실시한다. 탄산화에 대한 저항성 평가는 촉진 시험 후의 코팅된 공시체를 KS F 2423에 의해 콘크리트 할렬 인장 후에

할렬면에 KS M 0015에 의한 1% 페놀프탈레인 용액을 분무해서 미착색부분을 콘크리트 탄산화부분으로 추정한다. 측정시 공시체의 20곳을 측정하여 평균값을 사용하며 탄산화 측진 시험후 탄산화 깊이는 재령 28일 이후 1mm이하이어야 한다.

콘크리트 구조물의 탄산화에 대한 내구성능 평가는 목표내구수명에 도달하였을 때의 철근부식발생 탄산화 한계깊이  $y_{lim}$ 와 구조물의 열화에 따른 예측깊이  $y_p$ 에 각각 내구성 감소계수와 환경계수를 곱하여 비교함으로써 내구성 평가를 한다. 콘크리트 구조물의 탄산화에 대한 내구성능 평가는 식(6)에 의해 평가한다. 대상 구조물의 내구수명은 식(1)을 만족시키는 시간으로 결정되며, 대상 구조물의 잔존수명은 전체 내구수명에서 구조물의 현재까지의 공용연수를 뺀 값으로 정의 된다.

$$\gamma_{pc}y_p \leq \phi_{kc}y_{lim} \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $\gamma_{pc}$  : 탄산화에 대한 환경계수; 일반적으로 1.1

$\phi_{kc}$  : 탄산화에 대한 내구성감소계수; 일반적으로 0.92

$y_{lim}$  : 철근부식이 발생할 수 있는 탄산화 한계깊이(mm)

$$y_{lim} = c - c_k$$

$c$  : 피복두께(mm)

$c_k$  : 한계 탄산화 깊이 여유치로서, 자연환경하에서는 10 mm, 심한 염해환경 하에서는 25 mm

$y_p$  : 탄산화 깊이의 예측값(mm)

### 3.2 동해에 대한 성능 검증방법

동해에 대한 콘크리트의 성능 검증은 콘크리트의 동결융해 반복 시험방법 중 하나인 ASTM C 666(1984) 에서는 콘크리트의 동결융해 시험을 수중동결 수중융해의 A방법과 기중동결 수중융해의 B방법으로 나누고 있으며,  $-18^{\circ}\text{C}$ 에서  $4^{\circ}\text{C}$ 까지를 1 사이클로 하여 시험을 실시한다. 또한 매 30 사이클씩 동탄성계수를 측정하고, 400 사이클 이후는 60 사이클씩 측정한다. 측정된 값은 동결융해 작용을 받은 콘크리트와 동결융해 작용을 받기 전의 콘크리트의 상대동탄성계수에 대한 소정의 사이클에서의 상대동탄성계수를 다음의 식(2)에 의하여 산출한다.

$$E_d = \left( \frac{n_1}{n} \right)^2 \times 100 (\%) \quad \text{식(2)}$$

여기서,  $E_d = c$  사이클에서 콘크리트의 상대동탄성계수 (%)

$n_1 = c$  사이클의 동결융해작용을 받은 콘크리트의 공명진동수 (Hz)

$n =$  동결융해작용을 받기 전 콘크리트의 공명진동수 (Hz)

측정된 값을 바탕으로 설계된 콘크리트의 성능 검증은 다음의 방법에 따라 검증한다.

- ① 콘크리트 구조물의 이력강도 조사에 따른 초기 동탄성계수 산정
- ② 콘크리트 구조물의 시료채취에 의한 평균 상대동탄성계수 산정
- ③ 콘크리트 구조물의 사용연수에 따른 지역별 평균 동결융해 사이클 수의 추정
- ④ 상대동탄성계수가 한계치에 도달하는 사이클 수
- ⑤ 예측 모델식에 의한 내구수명 산정

$$t = \frac{C_{Lim}}{C_{ave}} \quad \text{식(3)}$$

여기서,  $t$  : 상대동탄성계수가 60% 이하로 떨어진 내구 수명 (years)

$C_{Lim}$  : 상대동탄성계수가 60%일때 사이클 수

$C_{ave}$  : 상대동탄성계수가 60%일때 사이클 수

### 3.3 염해에 대한 성능 검증방법

염해에 대한 성능 검증형 고내구성 콘크리트의 성능 검증을 위한 시험방법은 전위차에 의한 염소이온 침투확산시험 방법을 실시하여 통과전류 및 통과전하량, 염소이온 농도, 전압강하량을 식(4)와 같이 염소이온 확산 계수를 산정하여 아래의 순서와 같이 성능 검증을 실시한다.

$$D_{eff} = \frac{RT}{nF^2} A_{Cl} = \frac{RT}{nF^2} \cdot \frac{a}{\Delta E} \cdot \frac{l}{A} \cdot \frac{1}{z C_1} \quad \text{식(4)}$$

여기서,  $D_{eff}$  : 확산계수 ( $m^2/sec$ )

$F$  : 패러데이 상수 (96,485 J/volt · mol)

$R$  : 가스농도 (8.314 J/mol · K)

$T$  : 절대온도 (K)

$A_{Cl}$  : equivalent conductivity of chloride ions( $ohm^{-1} \cdot m^2 \cdot eq^{-1}$ )

$A$  : 시편의 단면적 ( $m^2$ )

$l$  : 시편의 두께 (m)

$C_1$  : 셀 1의 이온농도 ( $kg/m^3$ )

$i$  : 총 통과 전류(total passing current, amperes)

$t_{Cl}$  : 염소이온의 통과량

$z$  : 전하량

$E$  : 전위(V)

①콘크리트의 염소이온 침투확산계수를 시험에 의해 측정된 후 평균염소이온 확산계수를 산출한다.

②콘크리트의 표면염화물량을 결정한다.

③콘크리트 중의 철근의 부식임계염화물량을 결정한다.

④환경조건에 따른 철근부식개시시기는 식(5)를 이용하여 예측한다.

$$C_{\sigma} = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{d}{2\sqrt{D_{eff} t_p}} \right) \quad \text{식(5)}$$

여기서,  $\eta = \operatorname{erfc}^{-1} \left( \frac{C_{\sigma} - C_i}{C_0 - C_i} \right)$ 라 정의하면, 부식발생시간  $t_p$ 는

$$t_p = \frac{d^2}{4 \eta^2 D_{eff}} \quad \text{식(6)}$$

### 3.4 화학약품에 대한 성능 검증방법

화학약품에 대한 성능 검증은 화학 약품의 농도에 따른 시멘트 경화체의 성능저하 특성을 단기간에 알아보기 위한 수단으로 물 및 황산용액을 시험용액으로 사용하며, 황산의 농도는 95% 황산용액을 증류수로 희석하여 제조하며 재령이 증가함에 따라 황산용액의 pH가 증가하는 점을 고려하여 2주마다 새롭게 제조한 용액으로 교체하여 실시한다.

이에 대한 열화 평가 방법은 화학 약품의 침식 깊이, 중량변화, 압축강도 감소율, 시멘트 페이스트의 XRD, SEM, EDS분석 등을 이용하여 열화 정도를 평가한다.

이에 대한 내구성능 검증 및 평가는 아래의 식(7)에 의하여 평가를 실시한다.

$$d = k \cdot t^n \cdot p^m \quad \text{식(7)}$$

여기서,  $d$  : 시멘트 경화체의 침식 깊이(mm)

$t$  : 용액에 침지된 시간(days)

$p$  : 용액의 pH

$k$  : 시멘트 경화체의 특성 및 노출환경을 고려한 계수

$n$  : 시간에 대한 지수

$m$  : 재령에 대한 지수

#### 4. 결 론

위와 같이 콘크리트 구조물의 성능중심형 고내구성 콘크리트의 배합설계를 위해 필요한 배합설계 흐름도와 검증방법에 대하여 살펴보았다. 열화 환경요소에 대해서는 구조물을 구성하는 각 재료의 종류 및 재료의 사용부위에 대해서도 작용하는 열화 환경요소가 다르며, 콘크리트 구조물 전체에 보편적으로 작용하는 것과 국부적이지만 특수한 조건에서 작용하는 것으로 구분할 수 있다. 아직까지 국내에서는 콘크리트 구조물의 성능중심형 고내구설계·시공지침으로서 어떠한 표준적인 시방도 정하지 않은 설정이기 때문에 구체적인 열화 환경요소를 구분한다는 것이 시기상조라고 해도 과언은 아니다. 공용년수는 각종 요인을 고려하여 구조물 발주자(또는 설계자)의 의지에 의하여 정하는 것이지만, 양질의 사회자본을 축적하고 이를 후세에 계승하려고 하면 현시점에서의 내구성 관련 연구를 종합하고 산·학·연 및 관공서가 각각의 역할에 대하여 최선을 다하는 것이 건설기술자의 책임이며 사명이라고 판단된다. 따라서 대표적인 열화환경을 구분하고 국내의 콘크리트 구조물에 대한 고내구성 콘크리트의 배합 설계를 위한 연구는 필수적이라 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 “건설핵심연구개발사업(05건설핵심D11) 고성능 콘크리트 배합설계, 시공지침 및 매뉴얼 작성”의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 岸谷孝一외, 콘크리트 구조물의 내구성 시리즈, 鹽害( I ), 技報堂, 1986.5
2. 福島海夫, 材料テクノロジー 12 構造材料[Ⅱ] 非金屬系, 東京大學出版會, p.232, 1985
3. 日本建築學會, 鐵筋콘크리트 造建築物의 내구성調査·診斷および補修指針(案)·同解説, 1997
4. (社) 日本콘크리트 工學協會, 콘크리트 구조물의 構造·耐久設計境界問題研究委員會報告書, 1998.7
5. D. R. Moorehead, Cement and Concrete Research, 16, pp. 700~708, 1986
6. CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1993
7. ACI 201.2R-1992, Guide to durable concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan, 1994, 41 pp.