

# 성능기반 설계기준 작성을 위한 콘크리트 재료모델의 개발

## Development of Concrete Material Models for Performance-Based Design Code

김 지 상\*      이 광 명\*\*      최 연 왕\*\*\*      정 상 화\*\*\*\*      문 재 흠\*\*\*\*\*  
Kim, Jee Sang   Lee, Kwang Myung   Choi, Yeon Wang   Jung, Sang Hwa   Moon, Jae Heum

---

### ABSTRACT

To strengthen the technological competitiveness of the construction market in Korea, researches have been performed to replace the prescriptive design codes (PD) to the performance-based ones (PBD). As one of the basic requirements for PBDs, development of the optimized concrete material models for domestic applications have been tried by comparing and verifying the pre-existing models with the observations and quality evaluations of ready mixed concretes that are used in the domestic market. This paper shows the summary of the present state of the research progress in the areas of compressive strength and elastic modulus.

### 요 약

국내 건설시장의 기술경쟁력 강화의 일환으로 현행 콘크리트구조 설계기준을 시방설계(Prescriptive Design) 방식에서 성능기반설계(Performance Based Design) 방식으로의 전환과 관련된 연구가 활발히 수행되고 있다. 이와 관련하여 성능기반설계 방식에 기초적으로 필요하고 국내 레디믹스트콘크리트 제품에 최적화된 콘크리트 재료모델을 개발, 구축하기 위하여 기존 외국 성능기반설계기준상의 재료모델과의 비교검증과 국내에서 생산 및 사용되고 있는 레디믹스트콘크리트 제품의 품질현황 파악 및 성능평가 등을 수행하고 있다. 이에 현재까지 진행된 연구추진 현황 중 압축강도 및 탄성계수 예측모델 부분에 대하여 정리하였다.

- 
- \* 정회원, 서경대학교, 토목공학과, 교수
  - \*\* 정회원, 성균관대학교, 건설환경시스템공학과, 교수
  - \*\*\* 정회원, 세명대학교, 토목공학과, 교수
  - \*\*\*\* 정회원, 한국건설자재시험연구원, 건설기반기술센터, 책임연구원
  - \*\*\*\*\* 정회원, 한국건설자재시험연구원, 건설기반기술센터, 선임연구원

## 1. 서 론

최근, 고강도, 고내구성, 고유동 콘크리트 등과 같이 그 물리화학적, 역학적 성능을 크게 높인 고성능 콘크리트의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이를 통해 개발되어진 고성능 콘크리트를 실제 건설시장에 새로이 적용하는 데에는 많은 어려움이 따르고 있으며, 그중 현행 시방설계(Prescriptive Design) 방식인 콘크리트구조 설계기준은 성능이 우수한 신제품을 구조물 시공에 적용하는데 제약으로 작용하고 있는 상황이다. 이와같은 제약을 해소하고 건설시장의 기술경쟁력을 강화하기 위하여 선진국에서는 기존의 시방설계 방식에서 성능기반설계(Performance-Based Design) 방식으로 전환하고 있으며, 이에 국내에서도 성능기반설계기준을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행중인 실정이다. 한편, 콘크리트구조물의 성능기반설계를 위하여서는 기본적으로 콘크리트 재료모델이 필요하며 이러한 재료모델은 실제 적용되는 콘크리트 제품의 물성을 반영하여야 한다. 본 연구에서는 국내에서 생산, 적용되고 있는 레디믹스트콘크리트 제품의 물성을 반영한 재료모델을 개발하고자 현행 구조설계기준상의 재료모델과 기존 외국 재료모델과의 비교 및 국내 레디믹스트콘크리트 제품의 품질현황 파악 및 성능평가 등을 통한 검증작업을 거친 재료모델 구축을 수행하고 있으며 현재까지 진행된 연구수행 결과 및 향후 추진계획에 대하여 다음과 같이 정리하였다.

## 2. 재료모델 개발항목 선정

본 연구에서는 성능기반 구조설계시 기본적으로 필요한 재료모델의 개발 및 검증에 중점을 두었으며, 대상으로 선정된 재료모델은 표1과 같다. 현행 구조설계기준은 크리프 및 건조수축과 관련된 경우에 재령별 재료모델을 제시하고 있으나, 이들 모델들은 ACI 209R, CEB-FIP MC90 및 EC2에 제시된 모델들을 참조한 것으로, 국내에서 생산되는 레디믹스트 콘크리트의 품질과의 상관성을 검증할 필요가 있다. 또한, 향후 예상되는 재령별 물성변화를 고려한 비선형 구조설계 및 해석을 위하여서는 표1에 나타난 바와 같은 재료모델들이 필수적으로 요구되는 실정으로서, 현행 구조설계기준상의 재료모델의 검증 및 미반영 되어있는 모델의 개발 및 구축을 수행하고 있으며, 본 논문에서는 이 중 콘크리트의 재령별 압축강도 및 탄성계수 예측모델과 관련된 내용을 다음과 같이 정리하였다.

표1. 개발대상 콘크리트 재료모델 항목

재료모델	현행 구조설계기준 반영여부	콘크리트구조 설계기준상의 현황/문제점	비고
재령별 탄성계수 $E(t)$	미반영	크리프 계산에 필요한 초기집진 탄성계수 예측모델에만 존재	
재령별 압축강도 $f_c(t)$	반영	EC2 모델에 기반, 시멘트종류 및 양생조건 고려	
재령별 인장강도 $f_t(t)$ 및 압축강도와의 관계식	미반영	균열모멘트 계산시 필요한 휨인장강도만 압축강도와의 관계식으로 반영 (재령미고려)	
건조수축 (자기수축)	반영	총수축량에서 자기수축 미반영	
압축 응력-변형률 관계	미반영	비선형 구조설계 및 해석에 필요	

### 3. 재령별 압축강도 및 탄성계수 예측모델

국내 콘크리트구조 설계기준의 경우, 재령별 압축강도 예측모델은 표2에 나타난 바와 같이 EC2 모델에 기반하고 있으며, 차이점은 EC2는 시멘트의 강도 및 강도발현 속도에 기반한 반면, 국내기준은 시멘트 종류별, 양생별로 상수값을 적용하고 있는 점이다. 한편, 탄성계수 예측모델의 경우 국내 설계기준에서는 크리프 계산시에 필요한 초기접선 탄성계수 예측모델만 제시되고 있다.

표2. 재령별 압축강도 및 탄성계수 예측모델 비교

설계기준	압축강도 모델 (MPa)	탄성계수 모델 (GPa)
ACI 209R	$(f'_c)_t = \frac{t}{a + \beta \cdot t} (f'_c)_{28}$ <p>a : 4.0, <math>\beta</math> : 0.85 (Type-1, 습윤양생)            a : 2.3, <math>\beta</math> : 0.92 (Type-3, 습윤양생)            a : 1.0, <math>\beta</math> : 0.95 (Type-1, 증기양생)            a : 0.7, <math>\beta</math> : 0.98 (Type-3, 증기양생)</p>	$E_{ci} = 0.000043 [\omega^3 (f'_c)_t]^{1/2}$ <p><math>\omega</math> : 단위중량 (kg/m<sup>3</sup>)  <math>E_{ci}</math> : 재령 t 일에서의 현탄성계수</p>
EC 2	$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$ $\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}$ <p>s : 시멘트 종류에 따른 상수            = 0.2 (Class R)            = 0.25 (Class N)            = 0.38 (Class S)</p>	$E_{cm}(t) = \left[ f_{cm}(t) / f_{cm} \right]^{0.3} E_{cm}$ $= \beta_{cc}^{0.3}(t) E_{cm}$ $E_{cm} = 22 [f_{cm} / 10]^{0.3}$ <p><math>E_{cm}(t)</math> : 평균할선탄성계수(재령t일)  <math>E_{cm}</math> : 평균할선탄성계수(재령28일)</p>
구조설계기준 (2007년도)	$f_{cu}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cu}$ $\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ \beta_{sc} \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\}$ <p><math>\beta_{sc}</math> : 시멘트 종류 및 양생조건에 따른 상수            = 0.35 (1종, 습윤양생)            0.15 (1종, 증기양생)            0.25 (3종, 습윤양생)            0.12 (3종, 증기양생)            0.40 (2종)</p>	$E_{ci}(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_{ci}$ $E_{ci} = 0.000077 m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}$ <p><math>E_{ci}(t)</math> : 초기접선탄성계수 (재령t일)  <math>E_{ci}</math> : 초기접선탄성계수 (재령28일)  <math>m_c</math> : 단위중량 (kg/m<sup>3</sup>)            ※ 현탄성계수(KS F 2438)와 관련된            수식 미반영</p>

그림1은 각 모델에 있어서의 재령별 압축강도 및 탄성계수의 변화를 보이는 예이며, 압축강도 및 탄성계수 모두 ACI 209R 모델과 거의 흡사한 결과를 보였다. 한편, EC2 모델의 경우는 초기재령에서부터 높은 강도증진 및 탄성계수 발현을 적용하고 있는 바, 국내 레디믹스트콘크리트 제품의 일반적인 물성을 고려할 때 그대로 적용하기에는 무리가 있음을 확인할 수 있었다. 한편, 콘크리트 28일 압축강도대비 탄성계수의 경우 그림2와 같이 강도대별 실내실험 결과와 최근 10여년간의 국내학술지로부터 구하여진 실험데이터와 비교시 현행 구조설계기준상의 모델이 적합함을 확인할 수 있었으나, 40 MPa 이상의 고강도콘크리트 영역에 있어서는 보다 많은 검토가 필요함을 확인할 수 있었다.

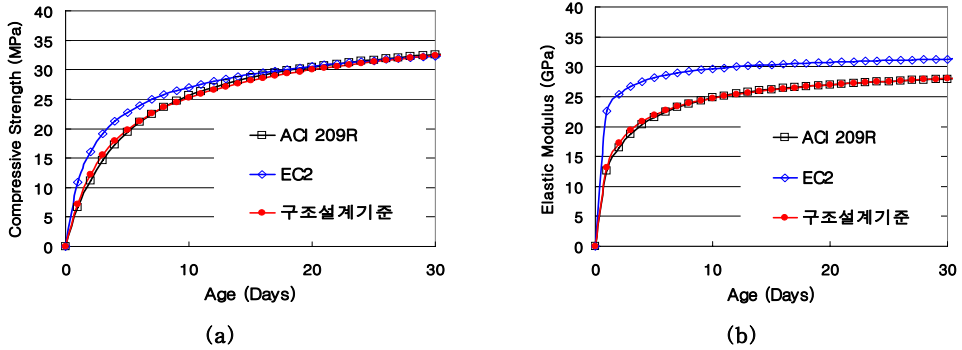


그림1. 압축강도 및 탄성계수 예측모델 비교

(가정: 1종시멘트, 습윤양생, 재령28일 평균압축강도=32 MPa, 콘크리트 단위중량= 2,350 kg/m<sup>3</sup>)

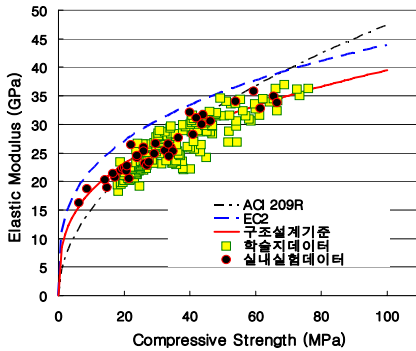


그림2. 압축강도 대비 탄성계수 관계

#### 4. 결론

본 연구는 국내에서 생산되고 있는 레디믹스트콘크리트 제품의 물성 및 품질현황이 반영된 콘크리트 재료모델의 개발 및 구축을 통해, 성능기반 콘크리트구조 설계기준 수립의 기반을 마련코자 표1에서 나타난 각 모델별로 지속적인 연구를 수행중에 있다.

#### 감사의 글

본 논문은 “건설교통R&D정책·인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화과제(06기반구축A01)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. ACI 209R-92 (Reapproved 2008), *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures Properties of concrete*, Manual of Concrete Practice Part 1, American Concrete Institute, pp. 209R-4~209R-5.
2. CEB-FIP Model Code 1990 (1993), Thomas Telford. Pp. 34~53.
3. BS EN 1992-1-1(2004), *Eurocode2*, The British Standards Institution, pp. 27~