



## 성능중심설계를 위한 콘크리트 강도발현 상수에 관한 연구

최연왕<sup>1)\*</sup> · 정재권<sup>2)</sup> · 박만석<sup>1)</sup> · 오성록<sup>1)</sup> · 이광명<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>세명대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>한국시설안전공단 특수교유지관리센터 <sup>3)</sup>성균관대학교 건설환경시스템공학과

### A Study on Strength Development Constant of Concrete for Performance Based Design

Yun-Wang Choi,<sup>1)\*</sup> Jae-Gwon Jeong,<sup>2)</sup> Man-Seok Park,<sup>1)</sup> Sung-Rok Oh,<sup>1)</sup> and Kwang-Myong Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Korea

<sup>2)</sup>Korea Infrastructure Safety Corporation, Koyang 411-758, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

**ABSTRACT** The recent worldwide trend in construction industry tends to put emphasis on the performance based design which focuses on the suggestion of the performance of final products rather than method and procedures. A proper model should be employed when predicting the concrete strength, which reflects the material age, in order to verify the function of concrete structures and their materials. Accordingly, this paper proposes the concrete strength development constant ( $\alpha_{sc}$ ) reflecting the characteristics of domestic materials and then evaluates its suitability.

**Keywords** : performance based design, strength development constant, compressive strength

#### 1. 서 론

최근 국내의 경우 콘크리트 구조설계기준을 포함한 건설공사 기준들이 구조물의 용도 및 내구연한 등의 요구 성능과 상관없이 기존의 규정을 따르는 사양중심 기준에서 구조물의 요구성능을 반영한 성능중심 기준으로 변화하고 있는 실정이다.<sup>1,2)</sup> 이러한 성능중심 기준설계를 하기 위해서는 콘크리트 부재 및 구조물의 성능 검증을 위하여 콘크리트의 재령효과를 반영할 수 있는 적절한 모델이 사용되어야 한다.

그러나, Table 1과 같이 국내 2007년 및 개정된 2011년 콘크리트 구조설계기준(이하, KCI 기준으로 약함)에서 제시된 시간에 따른 콘크리트 강도발현 모델식은 유럽 설계기준(이하, EC2 기준으로 약함)의 모델식에 미국 설계기준(이하, ACI 기준으로 약함)에 제시되어 있는 시멘트 종류 및 양생방법에 따른  $\alpha$ ,  $\beta$ 값을 통하여 얻어진 시멘트 종류에 따른 상수값( $\beta_{sc}$ )을 사용함에 따라 국내 재료특성을 반영한 성능중심 설계를 하기에는 다음과 같은 문제점을 가지고 있는 것으로 판단된다.

첫째, 국내 건설현장에서 사용하고 있는 레디믹스트 콘크리트의 경우 고강도 및 매스 콘크리트의 대부분은 수화열 저감을 위하여 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬와 같은 혼화재료를 사용하고 있으며, 해양 콘크리트 구조물의 경우 내구성 증진을 위하여 고로슬래그 시멘트가 적용되고 있는 실정이다. 또한, 최근에는 CO<sub>2</sub>가스 배출 저감 대책으로 혼합시멘트 및 혼화재료의 사용량이 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 이러한 국내 상황에서 KCI 기준에서 사용되고 있는 시멘트 종류 및 양생방법에 따른 상수 값  $\beta_{sc}$ 는 포틀랜드시멘트를 사용할 경우만을 규정함에 따라 고로슬래그 및 플라이애쉬 등의 혼화재료를 사용할 경우 시간에 따른 콘크리트의 강도특성을 반영할 수 없다.

둘째, 미국 포틀랜드시멘트와 국내 포틀랜드시멘트의 품질이 다르기 때문에 미국 ACI 209R 기준에서 사용되고 있는 시멘트 상수 값을 수정 및 보완 없이 사용하여 콘크리트의 성능을 예측한다는 것은 신뢰성이 크게 떨어진다고 할 수 있다.

셋째, 국내의 경우 콘크리트 초기재령 압축강도가 3일을 기준으로 하고 있는 반면 유럽의 경우 2일을 기준으로 하고 있으며, 국내 시멘트와 달리 시멘트를 강도등급 및 강도발현 속도로 분류하고 있다. 현재 국내의 KCI 기준은 EC2 기준으로 변화하기 위하여 수정 보완하고 있는

\*Corresponding author E-mail : crete77@semyung.ac.kr

Received November 19, 2012, December 13, 2012,

Accepted December 22, 2012

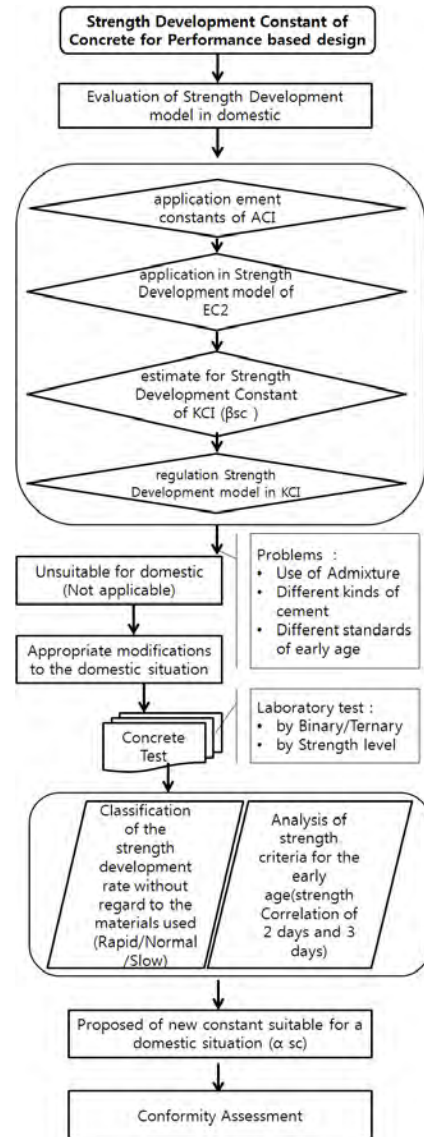
©2013 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Compressive strength models of domestic and foreign codes

Type	Models of compressive strength (MPa)
ACI 209R	$(f'_c)_t = \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} (f'_c)_{28}$
	$\alpha: 4.0 \quad \beta: 0.85$ (Type-1, wet curing)
	$\alpha: 2.3 \quad \beta: 0.92$ (Type-3, wet curing)
	$\alpha: 1.0 \quad \beta: 0.95$ (Type-1, steam curing)
	$\alpha: 0.7 \quad \beta: 0.98$ (Type-3, steam curing)
EC 2	$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$
	$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\}$ $S =$ a coefficient which depends on the type of cement $= 0.20$ (Class R), $0.25$ (Class N), $0.38$ (Class S)
KCI	$f_{cu}(t) = \beta_{sc}(t) f_{cu}$
	$\beta_{sc}(t) = \exp\left\{\beta_{sc}\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\}$
	$\beta_{sc}$ : a coefficient which depends on the type of cement and curing conditions
	$= 0.35$ (type-1, wet curing), $0.15$ (type-1, steam curing) $= 0.25$ (type-3, wet curing), $0.12$ (type-3, steam curing), $0.40$ (type-2)

실정이지만 콘크리트를 구성하고 있는 재료 중 가장 중요한 재료인 시멘트의 경우 관련 규정이 지난 수십 년 동안 포틀랜드시멘트의 조성 성분비에 따라서만 구분할 뿐 강도등급 및 강도발현 속도를 반영하지 않고 있는 실정이다. 특히, 시간에 따른 콘크리트 강도발현 특성을 나타낸 EC2 기준 모델식의 경우 시멘트 종류에 따른 상수 S가 2일 기준강도 및 시멘트 강도발현 속도로 모델링되었기 때문에 3일 기준강도 및 시멘트 강도발현 속도가 규정되어있지 않은 국내 시멘트를 콘크리트에 적용하기 위해서는 보완이 필요하다.<sup>3,4)</sup> 이러한 문제점을 가지고 있는 국내 KCI 기준의  $\beta_{sc}$  값은 국내 재료특성 및 여건을 반영할 수 있도록 새롭게 규정되어야 한다고 판단된다.

따라서 이 연구에서는 Fig. 1과 같이 국내 KCI 기준의 시간에 따른 콘크리트의 강도발현 모델식 중 시멘트 종류 및 양생 조건에 따른 상수 값인  $\beta_{sc}$  값을 검증하기 위하여 국내 시멘트 및 혼화제를 사용한 콘크리트를 압축강도 4수준(24, 30, 40 및 60 MPa) 및 초기 강도발현 속도를 변화시켜 실험을 실시하였으며,<sup>5-7)</sup> 실험 결과 분석을 통하여 시멘트 종류 및 양생조건에 따른 상수 값인  $\beta_{sc}$  값을 시멘트 종류 및 양생조건에 상관없이 시간에 따른 콘크리트 강도발현 상수  $\alpha_{sc}$  값으로 새롭게 정의하고 그 상수 값을 제안하였다. 또한 국내 현장 레미콘의 압축강도 데이터를 분석하여 제안된 콘크리트 강도발현 상수  $\alpha_{sc}$  값에 의한 시간에 따른 콘크리트 강도발현 모델식의 적합성을 평가하였다.



**Fig. 1** Proposed process of strength development model

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 시멘트 및 혼화제

시멘트는 밀도  $3.15 \text{ g/cm}^3$  의 1종 포틀랜드시멘트(이하 OPC로 약함)를 사용하였으며, 콘크리트의 강도발현 특성을 나타내는 시멘트 상수  $\beta_{sc}$  값을 포틀랜드시멘트 종류에 따라 구분하였다. 또한 EC2 기준에서 제시되고 있는 시멘트 강도발현 속도로 분류하기 위하여 콘크리트 배합시 고로슬래그 미분말(이하 GGBF로 약함) 및 플라이애쉬(이하 FA로 약함)를 사용하였다. Table 2는 시멘트 및 혼화재료의 화학성분 및 물리적 성질을 나타낸 것이다.

#### 2.1.2 골재

잔골재는 낙동강산 강모래(이하 S로 약함)를 사용하였

**Table 2** Chemical compositions and physical properties of OPC and mineral admixtures

Item Type	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Insol. (%)	LOI (%)	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
OPC	61.4	21.6	6.0	3.4	3.1	2.5	0.2	1.12	3,540	3.15
GGBF	42.1	33.3	15.3	5.7	0.4	2.0	-	0.02	4,160	2.90
FA	6.5	58.2	26.2	1.1	7.4	0.3	-	3.20	3,550	2.18

으며, 굵은골재는 최대치수 20 mm 인 석회암질 부순골재 (이하 G로 약함)를 사용하였다.

2.1.3 혼화제

콘크리트의 유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여 국내 H사의 폴리카르본산계 고성능 감수제(이하 SP로 약함)를 사용하였다.

2.2 실험 방법

시간에 따른 국내 콘크리트의 강도발현 특성을 나타내는 시멘트 상수  $\beta_{sc}$  값을 포틀랜드시멘트 종류에 따라 구분하지 않고 EC2 기준에서 제시되고 있는 시멘트 강도 발현속도 Class R(조강), Class N(보통) 및 Class S(완강)로 분류하기 위하여 콘크리트 배합을 포틀랜드시멘트와 혼화제를 혼합한 1, 2 및 3성분계로 계획하였으며, 목표 강도 수준을 보통강도 영역(24 및 30 MPa) 및 고강도 영역(40 및 60 MPa)으로 제조한 후 재령 2, 3 및 28일 콘크리트의 압축강도 실험을 실시하였다. 또한, 측정된 재령 2일 및 3일 콘크리트 압축강도 값을 통하여 보통강도 및 고강도 영역의 콘크리트 강도발현율( $\beta_{cc}(2)$  및  $\beta_{cc}(3)$ )에 대한 상관성을 측정하여 시간에 따른 콘크리트 강도발현 상수  $\alpha_{sc}$  값으로 새롭게 정의하고 그 상수 값을 제안하였다.

시간에 따른 콘크리트의 압축강도를 평가하기 위하여 콘크리트 강도수준 및 혼화제의 혼합률을 변화하여 배합을 실시하였다. 콘크리트의 공시체는 각 재령별로 5개 이상을 제작하여 신뢰성을 확보하였으며, 총 1132개의 공시체에 대하여 KS F 2405에 준하여 실험을 수행하였다. 목표 슬럼프 및 목표 공기량은 각각 150±20 mm 및 4.5±1.5%로 선정하여 실험을 실시하였다. Table 3은 콘크리트 배합을 나타낸 것이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 강도발현속도와 시멘트 종류에 따른 상수

시간에 따른 콘크리트 강도발현 속도( $\beta_{cc}$ )와 시멘트 종류에 따른 상수( $\beta_{sc}$ )의 분포범위를 알아보기 위하여 보통강도 및 고강도 영역 전 범위에서 KCI 모델식을 통하여

**Table 3** Mixing proportions

Strength (MPa)	Type (W/B%)			The number of data
	W/B 50%	W/B 42%		
24	OPC	OPC		1132
	GGBF 25	GGBF 25		
	GGBF 50			
	FA 15			
	FA 30			
Strength (MPa)	Type (W/B%)			1132
	W/B 42%	W/B 37%		
30	GGBF 50	OPC		
	FA 15	GGBF 25		
	FA 30	GGBF 50		
		FA 15		
Strength (MPa)	Type (W/B%)			1132
	W/B 37%	W/B 35%	W/B 28%	
40	FA 30	GGBF 50 FA 15	OPC	
	GGBF 50 FA 15	GGBF 40 FA 20	GGBF 25	
	GGBF 40 FA 20			
Strength (MPa)	Type (W/B%)			1132
	W/B 28%	W/B 25%		
60	GGBF 50	GGBF 50 FA 15		
	FA 15	GGBF 40 FA 20		
	FA 30			
	GGBF 50 FA 15			
	GGBF 40 FA 20			

언어진 콘크리트 재령 3일 평균압축강도( $f_{cu}(3)$ )와 28일 평균 압축강도( $f_{cu}$ )와의 관계에 대한  $\beta_{cc}(3)$ 와  $\beta_{sc}$ 의 분포범위를 나타낸 것이 Fig. 2이다.

Fig. 2의 결과  $\beta_{cc}$  및  $\beta_{sc}$  는 0.2~0.8 및 0.1~0.8 범위로 넓은 범위에 걸쳐 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 시멘트 및 혼화제 종류 및 혼합률에 따라 세분화시켜 정리한 것이 Fig. 3이다.

1종 포틀랜드시멘트(OPC)만을 결합재로 사용한 배합을 나타낸 Fig. 3(a)의 결과 기존 KCI 기준에서 제시한 1종

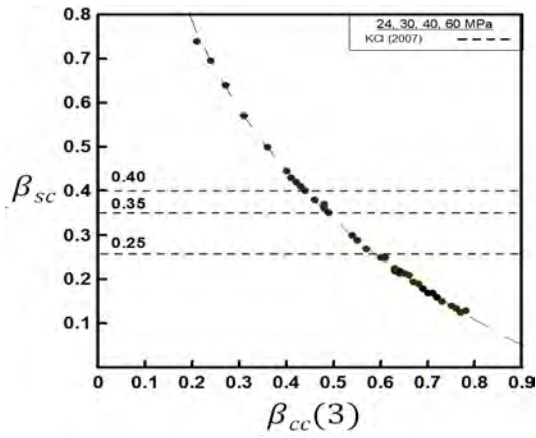
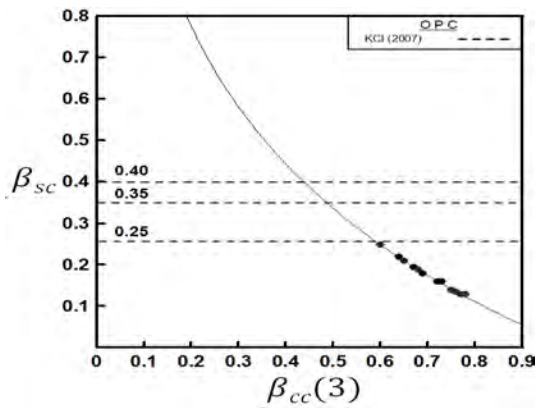
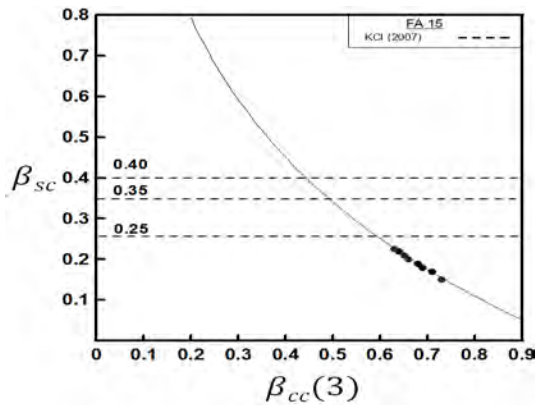


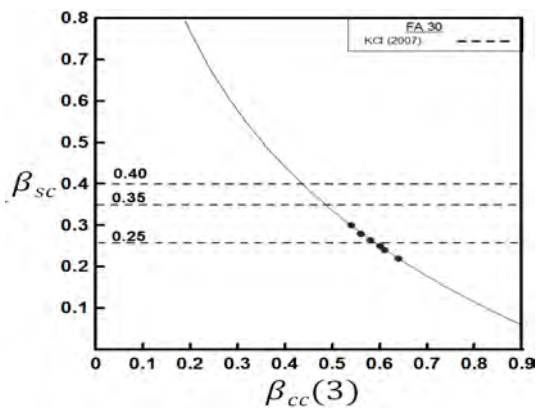
Fig. 2 The distribution of  $\beta_{cc}(3)$  and  $\beta_{sc}$  in all strength level



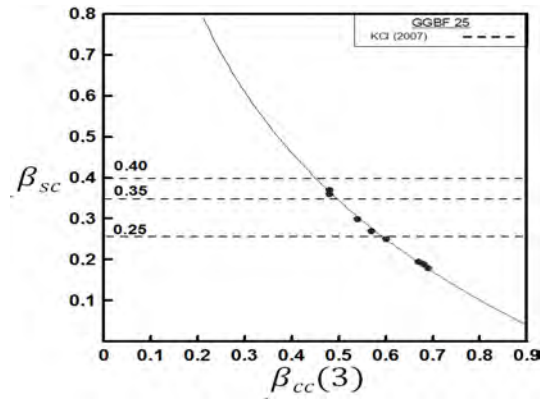
(a) OPC



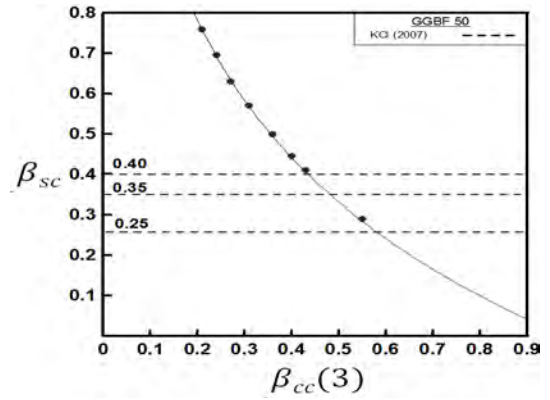
(b) FA 15



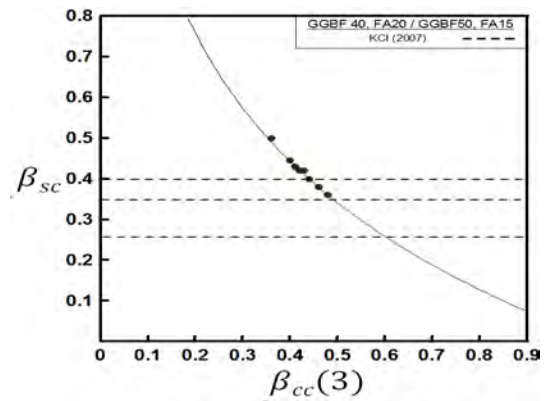
(c) FA 30



(d) GGBF 25



(e) GGBF 50



(f) OPC+FA+GGBF

Fig. 3 The distribution of  $\beta_{cc}(3)$  and  $\beta_{sc}$  with mineral admixture

포틀랜드시멘트  $\beta_{sc}$  값 인 0.35보다 크게 낮은 값을 나타내고 있으며, 오히려 3종 포틀랜드시멘트  $\beta_{sc}$  값 0.25보다도 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 현재 국내에서 생산되고 있는 1종 포틀랜드시멘트의 경우 미국의 1종 포틀랜드시멘트 보다 채령 3일의 초기강도가 채령 28일 강도에 대비하여 강도발현 속도가 보다 빠르다는 것을 의미하며, 이러한 경향은 시멘트 광물 조성 중 초기강도발현에 가장 큰 영향을 미치는  $C_3S$ 가 차지하는 비율이 국내 1종 포틀랜드시멘트가 일반적으로 미국 1종 포틀랜드시멘트에 비해 크기 때문인 것으로 판단된다.

따라서, 미국 ACI 규격에서 차용된 국내규격 1종 포틀

랜드시멘트  $\beta_{sc}$  값은 현재 국내에서 사용되고 있는 1종 포틀랜드시멘트와 크게 다르기 때문에  $\beta_{sc}$  값을 국내 시멘트 품질에 맞게 수정해야 할 것으로 판단된다.

다음은 국내 KCI 기준에서 포함하지 않은 혼화재를 사용한 콘크리트의 시간에 따른 강도발현 특성을 알아보기 위하여 대표적으로 FA 혼합률 2수준(15 및 30%), GGBF 2수준(25 및 50%) 및 FA와 GGBF를 동시에 혼합한 3성분계 2수준(GGBF40%-FA20% 및 GGBF50%-FA15%)에 대한  $\beta_{cc}(3)$  와  $\beta_{sc}$ 의 분포범위를 나타낸 것이 Fig. 3(b)~(f)이다.

FA를 15% 혼합한 2성분계 배합인 Fig. 3(b)의 결과는 기존 KCI에서 사용되고 있는 3종 포틀랜드시멘트  $\beta_{sc}$  값보다 낮은 범위에 존재하고 있으며, FA 30% 및 GGBF 25%를 혼합한 2성분계 배합인 Fig. 3(c) 및 (d)의 경우  $\beta_{sc}$  값이 0.25와 0.35 범위사이에 사이에 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 GGBF 50%의 2성분계 Fig. 3(e) 및 GGBF 40%-FA 20% 및 GGBF 50%-FA 15%의 3성분계 Fig. 3(f) 배합의 경우 기존 KCI의 2종 포틀랜드시멘트  $\beta_{sc}$  값이 0.40 이상의 영역에 분포하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 통하여 국내 KCI 기준의  $\beta_{sc}$  값은 국내 시멘트 품질에 맞지 않으며, 최근 CO<sub>2</sub>가스 배출 저감 대책으로 혼합시멘트 및 혼화재의 사용량이 지속적으로 증가하고 있는 현시점에서 시간에 따른 콘크리트 강도발현을 예측할 수 없다는 문제점을 가지고 있음을 알 수 있다.

다음은 콘크리트 강도등급에 따른 재령 28일에 대한 재령 3일의 강도발현율  $\beta_{cc}(3)$  값을 나타낸 것이 Table 4이다. Table 4의 결과 강도등급에 따라 강도발현율이 다르게 나타났으며, 콘크리트의 강도등급이 커질수록  $\beta_{cc}(3)$  값은 증가하는 경향이 나타났다. 또한 보통강도(24 및 30 MPa) 및 고강도 영역(40 및 60 MPa)의 콘크리트에 대한 강도발현율은 보통강도 보다 고강도 영역의 콘크리트가 평균 8% 정도 높게 나타났다. 이러한 연구 결과를 통하

**Table 4** Development ratio of strength of concrete at 3 days

Strength	$\beta_{cc}(3)$ (%)						
	OPC	FA15	FA30	GGBF 25	GGBF 50	GGBF 40 FA20	GGBF 50 FA15
24 MPa	60	63	54	48	36	-	
30 MPa	65	65	60	57	40		
Normal strength aver.	63	64	57	53	38		
40 MPa	77	73	64	69	43	45	45
60 MPa	77	66	60	67	55	44	45
High strength aver.	77	70	62	68	49	45	45
Total aver.	70	67	60	61	44	45	45

여 보통강도 및 고강도 영역의 강도 범위를 고려한  $\beta_{sc}$  값이 반영되어야 할 것으로 판단된다.

이러한 결과는 국내 KCI 기준의 모델식이 유럽의 EC2 모델식을 인용하였지만 Table 1에서와 같이 EC2의  $\beta_{sc}$ 는 시멘트의 강도발현 속도로 규정되어 있는 것을 국내 시멘트 규격에는 시멘트의 강도발현 속도에 대한 분류가 없기 때문에 시멘트의 종류 및 양생조건에 따라  $\beta_{sc}$ 를 규정한 것이 가장 큰 원인이라고 판단된다.

따라서, 현재 국내 시멘트 규격이 유럽의 시멘트 규격 처럼 강도등급 및 강도발현속도를 포함하는 규격으로 개정되지 않으면  $\beta_{sc}$  값은 보다 많은 실험 결과를 통하여 국내 포틀랜드시멘트 종류 및 품질에 맞게 수정되어야 하며, 혼합시멘트 및 혼화재를 사용한 2성분계 및 3성분계 결합재에 대한  $\beta_{sc}$  값을 제시하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 그러나 이러한 작업은 많은 시간과 노력이 필요하기 때문에 이 연구에서는 성능중심 설계의 한 방안으로 시간에 따른 콘크리트 강도발현 속도  $\alpha_{sc}$ 를 Class R, N, S로 구분함으로써 국내에서 사용되고 있는 포틀랜드시멘트, 혼합 시멘트 및 특수 시멘트 뿐만 아니라 혼화재료를 사용한 콘크리트의 경우에도 적용 가능한 시간에 따른 콘크리트의 강도발현 속도  $\alpha_{sc}$  를 제안하고자 한다.

### 3.2 콘크리트 재령 2일 및 3일 압축강도 상관성

유럽의 시멘트 규격(EN197)의 초기재령 기준일은 재령 2일이지만 국내 시멘트 초기재령은 3일을 기준으로 하기 때문에 재령 2 및 3일 콘크리트 압축강도의 상관성을 분석하기 위하여 재령 28일 콘크리트 압축강도에 대한 재령 2 및 3일의 강도발현율을 정리한 것이 Table 5이다.

Table 5의 결과 각 강도 등급에 따라 다양한 강도발현율이 나타났으며, 재령 2일 강도와 3일 강도의 강도발현율의 차이는 약 10% 증가하는 것으로 나타났다.

## 4. 콘크리트 강도발현 상수 제안 및 검증

### 4.1 콘크리트 강도발현 상수 제안

이 연구 결과를 통하여 기존의 KCI 기준에서 사용되고 있는 시멘트 종류 및 양생방법에 따른 상수 값  $\beta_{sc}$  가 국내 재료특성을 충분히 반영하지 못하고 있는 것으로 분석되기 때문에 시간에 따른 콘크리트의 강도발현을 보다 정확히 예측하기 위해서는  $\beta_{sc}$ 를 EC2 기준과 같이 시멘트 강도발현 속도에 따라 조강, 보통 및 완강의 3단계로 구분하는 것이 바람직하다고 판단된다.<sup>8,9)</sup>

그러나 국내의 시멘트 규격은 시멘트 강도발현 속도로 구분하고 있지 않고 있으며, 이러한 시멘트 관련 규정을 개정한다는 것은 여러 가지 선행될 문제를 해결 하여야 하기 때문에 이 연구에서는 기존의 시멘트 규격변경 없

**Table 5** Development Ratio of strength of concrete at 2 and 3 day

Type	Development ratio of strength with age (%)							
	24 MPa		30 MPa		40 MPa		60 MPa	
	2 days	3 days	2 days	3 days	2 days	3 days	2 days	3 days
OPC	49	60	60	65	66	79	75	77
FA15	49	63	55	65	58	73	60	66
FA30	43	54	45	60	50	64	46	60
GGBF25	38	48	46	57	52	69	54	67
GGBF50	27	36	33	40	33	43	43	55
GGBF40 FA20	-				30	42	34	44
GGBF50 FA15					26	39	32	45
Strength aver.	10.8	13.6	15.4	18.4	18.1	23.5	28.7	34.4
Standard deviation	0.95	1.46	1.04	1.49	1.10	1.64	2.28	2.37
Development ratio of concrete (t/28)	41	52	48	57	45	58	50	60

이 콘크리트의 강도발현 속도로  $\alpha_{sc}$ 를 결정하는 방법을 제안하고자 한다. 특히, 국내여건을 감안하여 콘크리트 3일 강도를 초기강도 기준으로 선정함에 따라 기존의 시멘트 및 콘크리트 관련 기준과 혼란을 피할 수 있을 것으로 판단된다.

이러한 콘크리트의 강도발현 속도로  $\alpha_{sc}$ 를 결정하는 단계를 나타낸 것이 Fig. 4이다.

Fig. 4에서 재령 28일에 대한 재령 3일의 강도발현율은 2일 강도 보다 연구 결과를 통하여 10% 높게 설정함에 따라 유럽의 콘크리트 강도발현(BS, EN 206-1:2000)에

관한 규정식의 28일에 대한 강도발현비는 rapid, medium 및 slow 등급에 대하여 각각 0.6 이상, 0.6 미만~0.4 이상 및 0.4 미만으로 증가시켰다. 또한 증가된  $\beta_{sc}$ 를 KCI 기준식에 재령 3일에 대한  $\beta_{sc}$ 로 역추정하여 제안한 콘크리트 강도발현 속도인  $\alpha_{sc}$  값에 따라 3단계 Class R, Class N 및 Class S에 대하여 각각 0.25, 0.34 및 0.45로 규정하였다.

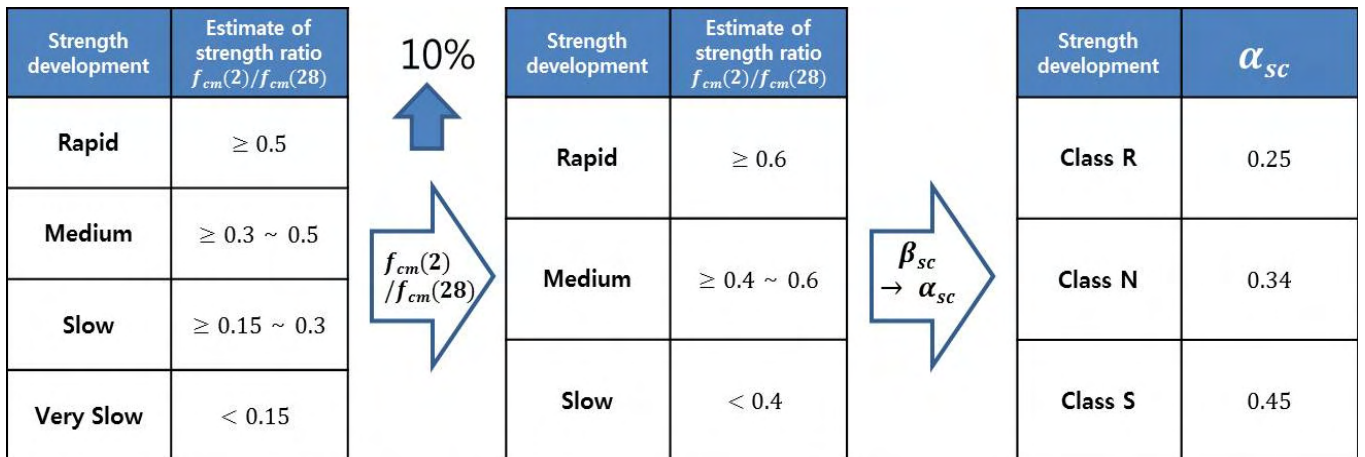
따라서, 이 연구에서 제안된  $\alpha_{sc}$  값이 콘크리트 강도 발현속도로 규정되기 때문에 국내에서 사용되고 있는 포틀랜드시멘트, 혼합시멘트 및 특수시멘트 뿐만 아니라 혼화재료를 사용한 콘크리트의 경우에도 시간에 따른 콘크리트강도 예측이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4.2 콘크리트 강도발현 상수 검증

이 연구에서 제안된 시간에 따른 콘크리트의 강도발현 상수 값  $\alpha_{sc}$ 를 검증하기 위하여 기후, 기온, 지역조건 및 실험시기를 고려하여 국내 레미콘 공장에서 설계기준강도 2수준(24 및 30 MPa), 콘크리트의 재령 7일 및 28일 현장압축강도 데이터 668개를 수집하였다.

수집된 압축강도 데이터에 대하여 제안된 콘크리트 강도발현 상수를 적용하여 국내 현장여건의 적합성 여부를 평가하였다. 현장에서 수집된 압축강도 데이터를 나타낸 것이 Table 6이며, 수집된 압축강도 데이터를 기존의 KCI 기준, EC2 기준 및 이 연구에서 제안된  $\alpha_{sc}$  값을 사용한 강도발현 모델에 적용하여 나타낸 것이 Fig. 5 및 6이다.

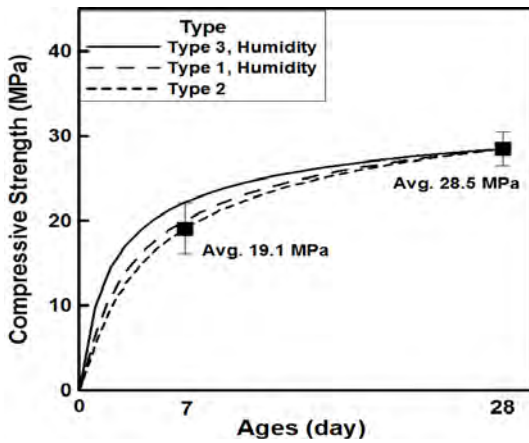
Fig. 5 및 6의 결과, KCI 기준 및 EC2 기준에서 규정한 강도발현 모델에 실제 국내 현장 데이터를 적용할 경우  $\beta_{sc}$  값은 설계기준강도 24 MPa의 경우 0.40으로 나타나 KCI 기준의 2중 포틀랜드시멘트 0.40 이상 및 EC2 기준의 Class S 0.38이상의 영역에 분포하였으며, 30 MPa의 경우 0.22로 나타나 KCI 기준의 3중 포틀랜드시멘트 습윤 양생 및 EC2 기준의 Class N 0.25의 영역에 분포하는 것으로 나타났다.



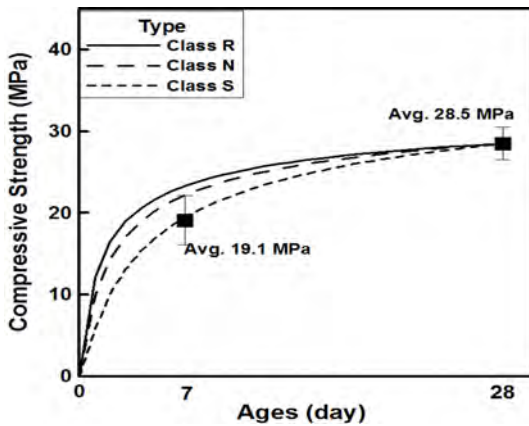
**Fig. 4** The proposed process of  $\alpha_{sc}$  value through development ratio of strength of concrete at 3 days

**Table 6** Compressive strength data collected in-situ

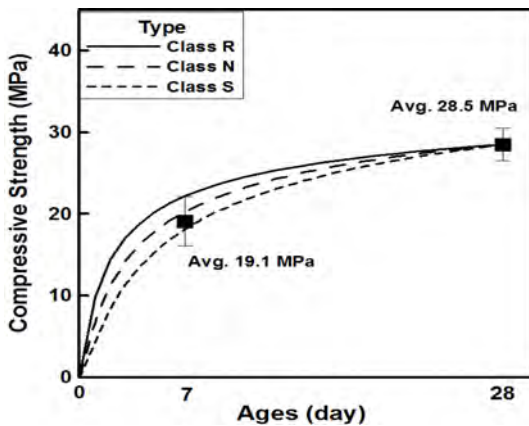
Strength (MPa)	Season	The number of data
24	- Spring, Autumn : 243 EA	668
	- Summer : 174 EA	
	- Winter : 136 EA	
30	- Spring, Autumn : 50 EA	668
	- Summer : 33 EA	
	- Winter : 32 EA	



(a) KCI 2007

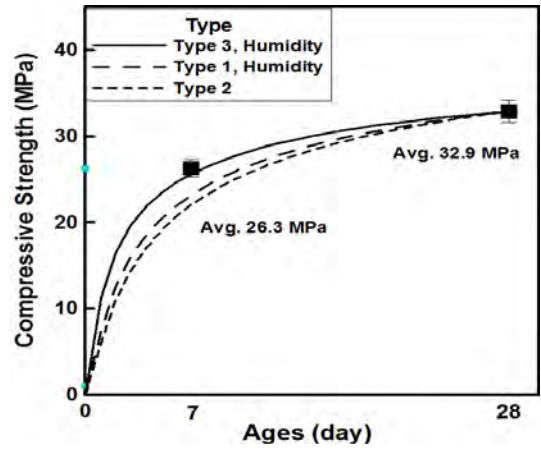


(b) EC2

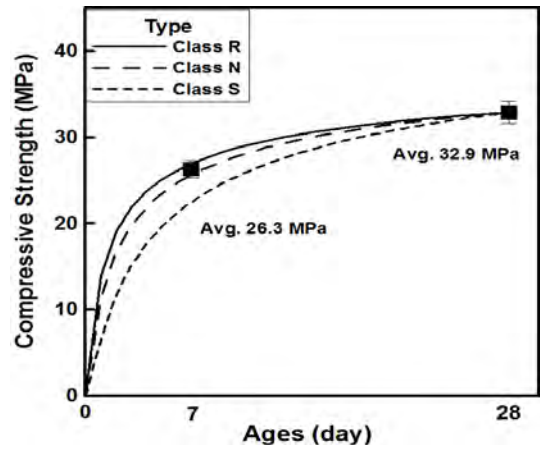


(c) Proposed  $\alpha_{sc}$  value

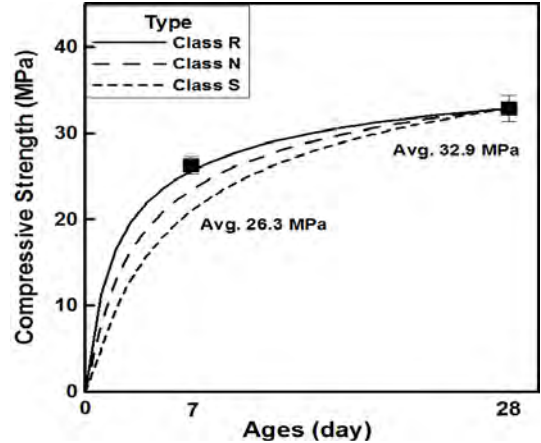
**Fig. 5** Verification of prediction model of strength development in  $f_{ck} = 24$  MPa



(a) KCI 2007



(b) EC2



(c) Proposed  $\alpha_{sc}$  value

**Fig. 6** Verification of prediction model of strength development in  $f_{ck} = 30$  MPa

한편, 이 연구에서 제안된 강도발현 모델식의 경우  $\alpha_{sc}$  는 설계기준강도 24 MPa의 경우 0.40으로 Class N 영역에 포함되는 것으로 나타났으며, 30 MPa의 경우 0.22로 Class R로 나타났다.

이상의 결과를 통하여 이 연구에서 제안된 콘크리트 강도발현 상수  $\alpha_{sc}$  를 시멘트 종류에 따른  $\beta_{sc}$  와 대체하여 KCI 모델식에 적용 가능할 것으로 판단된다.

이 논문에서는 국내 KCI 기준의 시간에 따른 콘크리트 강도발현 모델식 중 시멘트 종류에 따른 상수값인  $\beta_{sc}$  값을 검증하고, 국내 재료 특성이 반영된 시간에 따른 콘크리트 강도발현 상수  $\alpha_{sc}$ 를 제안하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 국내 콘크리트 구조설계기준의 시멘트 종류 및 양생 조건에 따른 상수 값  $\beta_{sc}$ 를 적용한 강도발현 모델식은 국내 시멘트 품질에 맞지 않으며, 혼합시멘트 및 혼화재를 사용할 경우 강도발현 속도를 예측하기 위한 모델로 적합하지 않은 것으로 판단된다.
- 2) 재령 28일에 대한 재령 3일의 강도 발현비를 0.6 이상, 0.6 미만~0.4 이상 및 0.4 미만으로 구분하여 각각을 rapid, medium 및 slow 등급으로 나누는 것이 적합한 것으로 판단된다.
- 3) 콘크리트 강도발현 속도  $\alpha_{sc}$ 값은 0.25, 0.32 및 0.45로 구분하여 각각을 class R, class N 및 class S 등급으로 나누는 것이 적합한 것으로 판단된다.
- 4) 이 연구에서 제안된 콘크리트 강도발현 상수  $\alpha_{sc}$ 를 강도발현 모델식에 적용할 경우 국내에서 사용되고 있는 시멘트 및 혼화재료의 종류에 상관없이 콘크리트의 시간에 따른 콘크리트 강도 예측이 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 건설교통 R&D 정책-인프라사업 성능중심의 건설기준 표준화과제(06기반구축A01)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

1. Choi, J. W., Kim, W., and Jung, H. S., "Performance Based Design Code for Concrete Structures," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No.1, 2008, pp. 27-31.
2. Kong, J. S., Lee, H., Lee, D. H., Park, S. K., and Park, D. H., "Performance Based Design Codes and Examples," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 2, 2006, pp. 921-924.
3. Kim, J. S., Lee, K. M., Choi, Y. W., Jung, S. H., and Moon, J. H., "Development of Concrete Material Models for Performance-Based Design Code," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, 2008, pp. 975-978.
4. Choi, Y. W., Jeong, J. G., Lee, K. M., Kim, J. S., Jung, S. H., and Moon, J. H., "A Study on Appropriacy of Cement Constant Considering Strength Development of Domestic Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 321-322.
5. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, 2007, 327 pp.
6. ACI, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI318R-05)*, Framington Hills, American Concrete Institute, 2005, 107 pp.
7. BS EN 1992-1-1, *Eurocode2*, The British Standards Institution, 2004, pp. 27-28.
8. Choi, Y. W., Jeong, J. G., Lee, K. M., Choi, W., Eom J. H., and Park, M. S., "The Properties of Early Strength of Concrete for the Performamance Based Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 2, 2009, pp. 253-254.
9. Choi, Y. W., Jeong, J. G., Kim, K. H., Park, M. S., Lee, K. M., and Kim, J. S., "The Field Suitability Evaluation of Concrete Strength Development Constant," *Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. , No. , 2011, pp. 1380-1383.

**요 약** 최근 건설시장의 세계적인 흐름은 방법 및 수행 절차보다는 최종 성과물의 성능을 제시하는데 초점을 맞춘 성능중심 설계기준으로 변화하고 있는 실정이다. 또한, 콘크리트 재료 및 구조물의 성능 검증을 위하여 재령효과에 따른 콘크리트 강도를 검토할 경우 적절한 모델을 사용하여야 한다. 따라서 이 논문에서는 국내 재료 특성을 반영한 콘크리트 강도발현 상수를 제안하고, 그 적합성을 평가하였다

**핵심용어** : 성능중심 설계, 강도발현 상수, 압축강도