



## 조기재령에서 콘크리트의 강도 및 강성 발현 평가

홍건호<sup>1)\*</sup> · 박흥근<sup>2)</sup> · 엄태선<sup>3)</sup> · 민준수<sup>1)</sup> · 김용남<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>호서대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>서울대학교 건축학과 <sup>3)</sup>쌍용양회 기술연구소 <sup>4)</sup>삼성물산 건설부문

## Evaluation of Strength and Stiffness Gain of Concrete at Early-ages

Geon-Ho Hong,<sup>1)\*</sup> Hong-Gun Park,<sup>2)</sup> Tae-Sun Eum,<sup>3)</sup> Joon-Soo Mihn,<sup>1)</sup> and Yong-Nam Kim<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>3)</sup>Ssangyong Technology Research Center, Daejeon 305-804, Korea

<sup>4)</sup>Samsung Engineering and Construction, Housing Division, Seoul 137-857, Korea

**ABSTRACT** Recently, deflection of the slab during construction periods becoming one of the important issues because of increasing the large-span structures. Early removing the form and support of the slab to achieve the rapid construction cause falling-off in quality of the structures. To reduce these deterioration and make rapid construction, construction of strength and stiffness gain model is needed by the research about the early-age concrete properties. Previous research results indicated that concrete model in existing design codes could not provide the mechanical properties of early age concrete. This paper carried out the concrete compressive strength tests on the curing age at early age stage. Evaluation of the accuracy of compressive strength and modulus of elasticity gain formula in existing various design codes was performed based on this test results, and new design model was proposed. This new model will be useful to develop the new rapid construction methods or prevent the deterioration of the deflection at construction periods. Material tests were performed at 1, 3, 7, 14, 28 curing days, total 159 cylinder style specimens were tested. Based on analyzing the test results, the relationship between compressive strength and modulus of elasticity at early age was proposed.

**Keywords :** concrete, compressive strength, modulus of elasticity, stiffness, early age

### 1. 서 론

최근 장스팬 구조물의 건설이 증가하면서 슬래브의 시공도중 처짐이 중요한 문제 중의 하나로 대두되고 있다. 슬래브의 시공도중 처짐은 사용되는 거푸집 시스템의 종류, 동바리의 설치 간격, 거푸집 및 동바리의 존치기간, 양생 중 시공하중의 이력 및 콘크리트의 양생 조건 등 다양한 변수의 영향을 받게 되며, 초기 처짐의 증가는 변형된 상태에서 콘크리트가 경화되고 크리프 등에 영향을 미쳐 궁극적으로 장기 처짐의 양도 크게 증가하는 것으로 알려지고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 최근에는 골조공기를 단축시키기 위하여 콘크리트의 소요강도가 발현되기 이전에 거푸집을 조기 탈형함으로써 콘크리트 구조물의 품질저하를 초래할 우려가 있는 것이 사실이다. 이러한 시공하자를 없애고 공기단축을 실현하기 위해서는 콘크리트의 조기 재령에서의 강도 및 강성 발현에 관한 연구가 요

구되며, 이를 위해서는 재령에 따른 콘크리트의 강도 및 탄성계수 발현 모델의 구축이 필요하다.

현재 콘크리트구조설계기준에서 규정하고 있는 콘크리트의 탄성계수 산정식은 설계기준강도가 발현되는 재령 28일 이후를 주 대상으로 하고 있으며, 설계기준에서 제시하는 탄성계수 모델은 콘크리트의 탄성계수를 과대평가할 수 있다는 우려가 지속적으로 제기되어 왔다.<sup>3-9)</sup> 특히, 기존의 재료모델 관련 연구 결과는 대부분 경화된 콘크리트에 대한 것으로, 강도의 발현이 미성숙단계인 초기 재령에서의 콘크리트 강도발현 및 탄성계수 모델식에 대한 연구는 미흡한 것이 사실이다.<sup>9)</sup>

따라서 이 연구에서는 초기 재령에서의 재령에 따른 콘크리트의 재료실험을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 기존 국내외 설계기준에서 제시하고 있는 강도 및 탄성계수 제안식의 적합성을 평가하였다. 또한, 콘크리트가 설계기준강도에 도달하기 이전의 초기재령에서 압축강도와 강성 간의 발현 관계 모델을 구축함으로써, 향후 공기단축 공법의 개발 및 슬래브 초기 처짐에 따른 하자를 방지할 수 있는 초기 재료 모델을 제시하고자 한다.

\*Corresponding author E-mail : honggh@hoseo.edu

Received October 14, 2009, Revised December 1, 2009,

Accepted March 3, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

## 2. 강도 및 탄성계수에 대한 기준 고찰

### 2.1 재령에 따른 콘크리트 압축강도 예측모델

콘크리트의 강도 예측모델 형태는 여러 연구자가 제안 하였으나,<sup>3)</sup> 가장 대표적인 방법은 설계기준강도인 재령 28일 강도로부터 초기재령의 강도를 예측하는 방식이다.

#### 2.1.1 ACI Committee 209

ACI 209 위원회에서는 재령에 따른 콘크리트의 압축 강도 예측식을 재령 28일 압축강도와와의 관계로 다음과 같이 제안하고 있다.<sup>10)</sup>

$$(f'_c)_t = \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} (f'_c)_{28} \quad (1a)$$

$$(f'_c)_t = \frac{t}{\alpha/\beta + t} (f'_c)_u \quad (1b)$$

여기서,  $t$  : 콘크리트 재령(일)  
 $(f'_c)_t$  : 재령이  $t$ 일 때의 콘크리트 압축강도  
 $(f'_c)_{28}$  : 재령이 28일 때의 콘크리트 압축강도  
 $(f'_c)_u$  : 콘크리트 극한강도

#### 2.1.2 Euro-code 2 : design of concrete structures (BS EN 1992-1-1 : 2004)

Euro-code(이하 EC2)에서는 재령  $t$ 일의 콘크리트 압축 강도는 시멘트 종류, 온도, 양생조건에 의존하는 것으로 제시하고 있으며, 이에 따라 재령  $t$ 일에서의 콘크리트 압축강도는 다음 식과 같이 제안하고 있다.<sup>11)</sup>

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8 \text{ (MPa) for } 3 < t < 28 \text{ days} \quad (2a)$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \text{ (MPa) for } t \geq 28 \text{ days} \quad (2b)$$

이때  $f_{cm}(t)$ 는 재령  $t$ 일에서 콘크리트 압축강도의 평균값으로 다음의 방법으로 산정 가능하되, 단 재령 3 일 이하의 경우에는 실험에 의하여 산정하도록 규정하고 있다.

**Table 1** Values of constants from eqs. (1a) and (1b)

Equation	Type of curing	Cement Type	Constants	
			$\alpha$	$\beta$
(1a)	Moist cured	I	4.0	0.85
		III	2.3	0.92
	Steam cured	I	1.0	0.95
		III	0.70	0.98
(1b)	Moist cured	I	$\alpha/\beta = 4.71$	
		III	$\alpha/\beta = 2.5$	
	Steam cured	I	$\alpha/\beta = 1.05$	
		III	$\alpha/\beta = 0.71$	

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (3)$$

여기서  $\beta_{cc}(t) = \exp\left(s\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right)$   
 $f_{cm}$  : 재령 28일에서의 평균 압축강도  
 $s$  : 시멘트 종류 계수

Class R - 0.20 (조강시멘트 계통)

Class N - 0.25 (보통시멘트 계통)

Class S - 0.38 (지연시멘트 계통)

#### 2.1.3 KCI 2007

2007년에 개정된 국내 콘크리트구조설계기준에서는 재령 28일에서 콘크리트의 평균압축강도  $f_{cu}$ 를 식 (4a)와 같이 설계기준강도에 8 MPa 더한 값을 사용하도록 규정하고 있으며, 시간에 따른 콘크리트의 강도발현식은 식 (4b)와 같이 규정한다.<sup>14)</sup>

$$f_{cu} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad (4a)$$

$$f_{cu}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cu} \quad (4b)$$

이때  $\beta_{cc}(t) = \exp\left(\beta_{sc}\left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right]\right)$   
 $\beta_{sc}$  : 1종시멘트(습윤양생 : 0.35, 증기양생 : 0.15)  
 3종시멘트(습윤양생 : 0.25, 증기양생 : 0.12)  
 2종시멘트 (0.40)  
 $t$  : 콘크리트 재령(일)

식 (4a)와 같이 콘크리트의 실제 강도를 규정하는 이유는 설계 당시에는 실제 강도를 명확히 알 수 없고, 크립 변형 및 처짐 등을 예측하는 경우에는 설계기준강도보다 실제 값에 가까운 값을 사용하는 것이 타당하기 때문이다. 또한 식 (4b)에서의  $\beta_{cc}$ 는 Euro-code와 유사하나, 유럽과 국내 시멘트의 품질기준 차이를 고려하여  $\beta_{sc}$ 의 값은 국내 시멘트를 기준으로 보정한 수치이다.

#### 2.1.4 압축강도 예측모델 비교분석

재령에 따른 설계기준별 압축강도의 발현관계를 콘크리트의 설계기준강도 24 MPa로 가정하여 살펴보면 Fig. 1과 같다. 그림에서 나타나듯이 초기재령에서는 EC2의 콘크리트 압축강도 발현율이 ACI, KCI보다 크게 평가되며, 14일 이후부터는 모든 기준이 유사한 발현성상을 나타내고 있다. ACI와 KCI 제안식은 초기재령부터 유사한 강도발현 형상을 나타내고 있으며, KCI와 EC2에서는 시멘트 종류 계수에 의한 초기 강도발현 형상의 차이가 나타나는 것으로 분석된다.

## 2.2 재령에 따른 콘크리트 탄성계수 예측 모델

#### 2.2.1 ACI Committee 209

ACI에서 규정하고 있는 콘크리트의 탄성계수는  $\sigma_c = 0$ 과 압축강도의 40% 사이를 직선으로 연결하는 할선 탄성계수(secant elastic modulus)값을 사용하고 있으며, 재

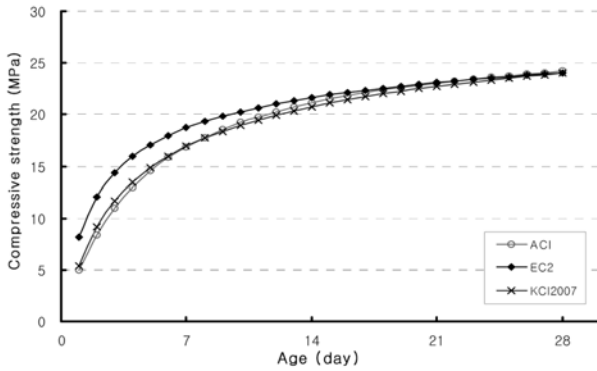


Fig. 1 Relationship between age and compressive strength

령에 따른 탄성계수의 제안식은 다음과 같다.<sup>10)</sup>

$$E_{ct} = g_{ct} \sqrt{w^3 (f'_c)_t} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

여기서  $E_{ct}$ : 재령에 따른 콘크리트 탄성계수

$g_{ct}$ : 0.043

$w$ : 콘크리트 비중( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$(f'_c)_t$ : 재령에 따른 콘크리트 압축강도

2.2.2 Euro-code 2 : design of concrete structures  
(BS EN 1992-1-1 : 2004)

Euro-code에서 제안하는 탄성계수( $E_{cm}$ )는  $\sigma_c = 0$ 과  $0.4f_{cm}$  사이의 활선계수를 사용하며, 탄성계수에 대한 골재의 영향이 큰 것을 고려하여 식에서 정의하는 탄성계수는 석영암(quartzite)을 기준으로 하고 있으며, 석회암(limestone)의 경우 10%, 사암(sandstone)의 경우 30% 정도 탄성계수를 감소시키고, 현무암(basalt)은 20% 증가시키도록 규정하고 있다.<sup>11)</sup>

$$E_{cm}(t) = \{(f_{cm})_t / f_{cm}\}^{0.3} E_{cm} \quad (6)$$

여기서  $E_{cm}(t)$ : 재령에 따른 콘크리트 탄성계수

$E_{cm}$ : 재령 28일의 콘크리트 탄성계수

$(f_{cm})_t$ : 재령에 따른 콘크리트 압축강도

$f_{cm}$ : 재령 28일 콘크리트의 평균 압축강도

2.2.3 KCI 2007

크리프 변형을 계산할 때 CEB-FIP에서는 활선탄성계수 대신에 초기 접선탄성계수를 사용하도록 되어있으며, KCI 2007 기준에서도 이와 같은 방법을 반영하였다. 활선탄성계수와 초기접선탄성계수 간의 관계는  $E_c = 0.85E_{ci}$ 로 취할 수 있으며, 크리프 변형 계산시 초기 접선 탄성계수( $E_{ci}$ )는 다음 식 (7a), (7b)와 같으며, 시간에 따른 탄성계수 변화는 식 (7c)와 같다.<sup>14)</sup>

$$E_{ci} = 10,000 \sqrt[3]{f_{cu}} \quad (7a)$$

$$f_{cu} = f_{ck} + 8 \quad (\text{MPa}) \quad (7b)$$

$$E_{ci}(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_{ci} \quad (7c)$$

### 2.3 압축강도와 탄성계수 관계에 대한 고찰

각 설계기준에서 제시하고 있는 콘크리트의 압축강도와 탄성계수와의 관계는 다음의 식 (8)과 같다.<sup>10-14)</sup> 이 연구에서는 국내 설계기준의 재료정수 부분이 2007년 기준에서 EC2 형태를 일부 반영하였으나 ACI에서는 2008년 기준까지 과거의 기준을 그대로 사용하고 있으며, 보통강도 이하의 조기재령 콘크리트에서는 변경된 기준보다 2003년 기준이 적합할 수 있다는 판단하에 2003년 및 2007년 콘크리트 구조설계기준의 식을 모두 분석하도록 하였다.

$$\begin{aligned} E_c &= 4,700 \sqrt[3]{f_{ck}} \quad (f_{ck} < 30 \text{ MPa}) : \text{KCI2003\_A, ACI318-08} \\ E_c &= 3,300 \sqrt[3]{f_{ck}} + 7,700 \quad (f_{ck} \geq 30 \text{ MPa}) : \text{KCI2003\_B} \\ E_c &= 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}} : \text{KCI 2007} \\ E_{cm} &= 22,000 [f_{cm}/10]^{0.3} : \text{EC2} \end{aligned} \quad (8)$$

(단 단위질량이  $2,300 \text{ kg}/\text{m}^3$ 인 콘크리트임)

ACI 318-08에서는 압축강도의 구분없이 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 탄성계수 식을 제안하였으며, KCI 2003 기준에서는 압축강도의 크기 30 MPa를 기준으로 탄성계수 식을 구분하여 제안하였으나, 최근 많은 연구결과에서는 콘크리트의 탄성계수가 압축강도  $f_{cu}^{1/3-0.4}$ 에 비례하는 것으로 보고되어 CEB-FIP 설계기준에서도  $\sqrt[3]{f_{cu}}$ 로 규정하고 있다.

기준별 압축강도와 탄성계수의 관계를 보면, Fig. 2에서 나타나듯이 압축강도가 작을 때는 KCI 2007 및 KCI 2003\_B의 탄성계수가 상대적으로 높게 평가되고 있으며, 압축강도가 높아질수록 KCI 2003\_A, ACI 318의 탄성계수가 높게 평가되고, KCI 2007 및 KCI 2003\_B의 탄성계수는 상대적으로 적어짐을 알 수 있다. EC2의 탄성계수는 압축강도에 관계없이 전반적으로 크게 나타났다.

각 기준에서 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수에 영향

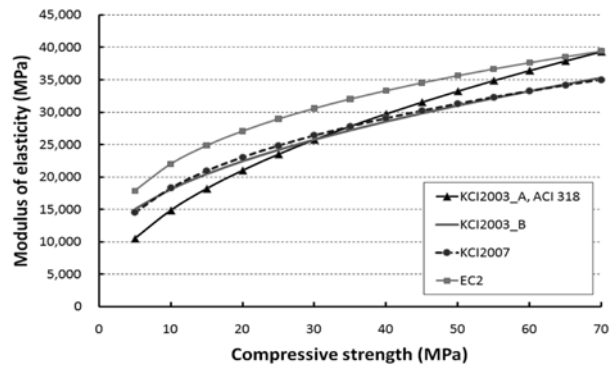


Fig. 2 Relationship between compressive strength and modulus of elasticity

을 미치는 인자들은 재령, 시멘트 종류, 골재 종류 및 양생방법의 영향 등인 것으로 나타났다.

### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 실험계획

이 연구에서는 조기재령에서 콘크리트의 강도 및 강성 발현 평가를 위하여 재령 1, 3, 7, 14, 28일에 일반콘크리트(S1), 조강콘크리트(S2) 및 플라이애쉬 20% 혼입 콘크리트(S3)의 배합설계에 대하여 압축강도 시험을 수행하였다. 보통 포틀랜드 시멘트를 대상으로 배합설계를 실시한 S1배합에 대해서는 시멘트의 종류에 따른 조기 강도특성을 살펴보기 위하여 배합에 사용된 시멘트를 준조강시멘트와 조강시멘트로 대체한 실험체를 추가로 제작하였다. 이때 콘크리트의 배합설계는 보통 시멘트와 동일하게 적용하여 순수하게 시멘트의 종류에 따른 특성만을 분석하였다. 준조강시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트의 경화특성을 보완하여 조강시멘트와 같은 성능을 발현시킬 수 있도록 분말도 등을 조절한 특수 시멘트의 일종으로 현행 국내 시멘트 분류기준으로 적절하게 분류할 수 없어 이 논문에서는 준조강시멘트로 명명하였다.

실험에 사용한 시멘트는 국내산 S사의 보통 포틀랜드 시멘트, 준조강시멘트 및 조강시멘트를 사용하였으며, 골재로는 주문진산 표준사를 사용하였다. 혼화제는 PNS계 및 PC계 고성능감수제를 사용하였다. Table 2는 이 연구에서 사용한 콘크리트 배합을 나타낸 것이다.

#### 3.2 실험체 제작 및 실험 방법

콘크리트 재료특성 평가에서는 굳지 않은 콘크리트에서 슬럼프, 슬럼프 플로우 및 공기량을 측정하였고, 경화 콘크리트에서는 재령에 따른 압축강도를 측정하도록 하였다. 실험체 제작은 철제 원주형 몰드( $\phi 100 \times 200$ )를 이용하여 제작하였으며, 실험재령까지  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  수조에서 습윤양생을 실시하였다. 유압식 만능시험기(U.T.M)로 재령 1일, 3일, 7일, 14일 및 28일에 대하여 총 159개의 실린더형 공시체에 대한 압축강도 실험(KS F 2405)을 실시하였다. 또한, 공시체의 압축강도 시험 시에 측정된 응력-변형률 곡선을 통하여 탄성계수를 산정하도록 하였다.

## 4. 실험 결과 및 분석

### 4.1 재령에 따른 압축강도 발현 특성

재령에 따른 압축강도 시험결과는 Table 3 및 Figs. 3~4에 나타내었다. Table에서 재령에 따른 콘크리트 압축강도의 표현은 각각  $f_{c1}$ ,  $f_{c3}$ ,  $f_{c7}$ ,  $f_{c14}$ ,  $f_{c28}$ 로 탄성계수는  $E_{c1}$ ,  $E_{c3}$ ,  $E_{c7}$ ,  $E_{c14}$ ,  $E_{c28}$ 로 표기하였다. 이 연구의 실험 결과로 측정된 압축강도가 Table 2의 배합표를 고려할 때 전반적으로 높게 나타난 것은 실험실 내에서 최적의 상태로 배합 및 양생을 실시하고 양질의 골재를 사용함에 따른 것으로 분석된다. 재령에 따른 압축강도의 발현 특성을 살펴볼 때, 보통시멘트인 경우 28일 압축강도 대비 재령 1일에는 20%, 3일 54%, 14일에는 84%의 강도가 발현된 반면, 준조강시멘트의 경우에는 재령 1일에 32%, 3일 62%, 14일에는 94% 이상으로 나타나 보통시멘트보다 강도발현율이 우수한 것으로 분석되었다. 조강

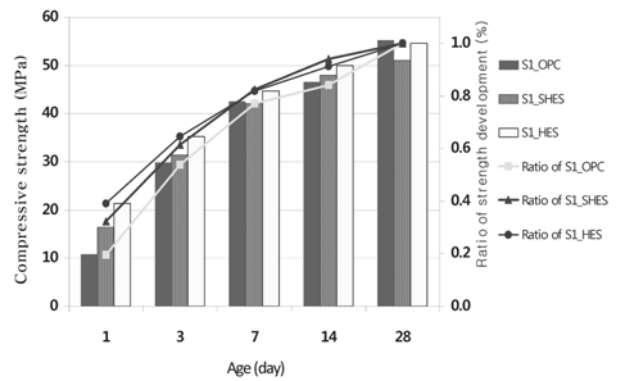


Fig. 3 Compressive strength development (S1)

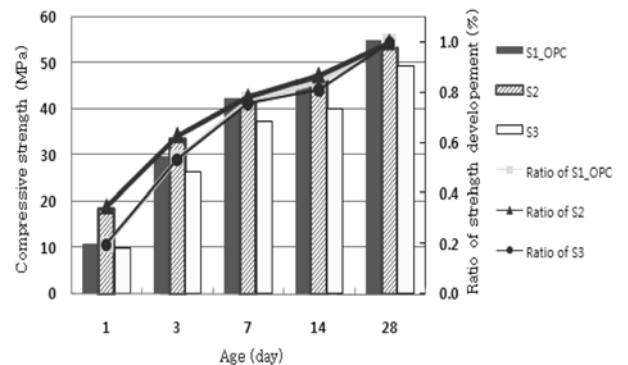


Fig. 4 Compressive strength development (test variables)

Table 2 Mix proportions of concrete

	Cement	W/B (%)	S/A (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						Admixture
				W	C	FA	S	G	AD	
S1	OPC, SHES, HES	42.0	46.5	160	362	19	824	959	C × 1.2%	Nomal type
S2	HES	44.0	47.0	160	327	36	837	954	C × 0.7%	Early strength type
S3	OPC +FA 20%	42.0	46.5	160	305	76	832	930	C × 0.7%	Early strength type

OPC : ordinary portland cement, SHES : semi-high early strength cement  
HES : high early strength cement FA : fly ash

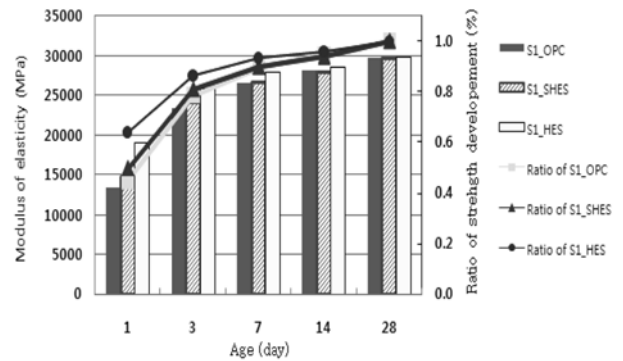
**Table 3** Test results of the compressive strength and modulus of elasticity

		Compressive strength (MPa)					Modulus of elasticity (MPa)				
		$f_{c1}$	$f_{c3}$	$f_{c7}$	$f_{c14}$	$f_{c28}$	$E_{c1}$	$E_{c3}$	$E_{c7}$	$E_{c14}$	$E_{c28}$
S1	OPC	12.1	29.4	42.4	46.5	54.6	14,788	22,978	26,823	28,189	29,479
		9.6	30.2	42.7	-	55.8	11,866	23,691	26,379	-	30,025
	Average	10.9	29.8	42.6	46.5	55.2	13,327	23,335	26,601	29,479	29,752
	SHES	17.2	30.8	43.4	48.0	53.0	17,693	24,445	27,041	27,866	29,399
		15.6	32.0	40.6	-	49.0	17,380	25,352	26,741	-	29,943
	Average	16.4	31.4	42.0	48.0	51.0	17,537	24,899	26,891	27,866	29,671
	HES	20.7	33.6	41.4	-	51.3	-	-	-	-	-
		21.6	34.6	44.5	49.9	56.5	19,010	25,739	27,451	28,531	29,430
		21.8	37.6	48.2	-	55.9	18,985	25,745	28,174	-	30,088
Average		21.4	35.3	44.7	49.9	54.6	18,998	25,742	27,813	28,531	29,759
S2	HES	18.6	31.7	40.5	46.4	53.4	18,148	22,186	25,952	29,009	29,239
		18.6	35.6	43.2	-	53.3	16,341	25,105	27,234	-	-
	Average	18.6	33.7	41.9	46.4	53.4	17,245	23,646	26,593	29,009	29,239
S3	OPC+FA20	11.3	29.5	39.6	-	51.3	-	-	-	-	-
		9.4	24.2	36.5	40.0	48.1	12,008	20,699	24,980	27,734	28,071
		8.7	25.4	35.9	-	48.4	11,023	22,444	25,362	-	28,450
	Average	9.8	26.4	37.4	40.0	49.3	11,516	21,572	25,171	27,734	28,260

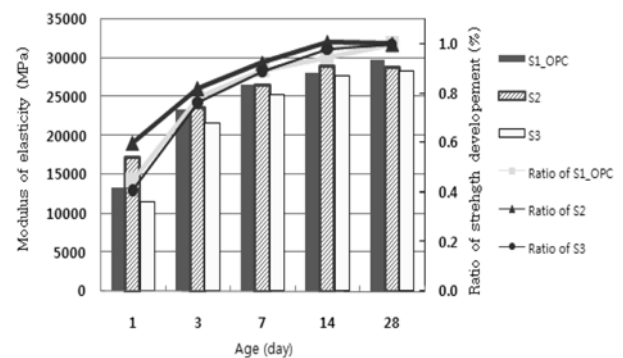
시멘트인 경우는 1일 39%, 3일 65%정도로 조기 강도발현율은 준조강보다 우수하나 7일 이후는 준조강과 비슷한 발현율을 나타내었다. 전반적으로 콘크리트의 강도발현은 재령 1일에서의 압축강도는 조강시멘트가 보통 시멘트보다 약 2배 정도의 압축강도를 발현하였으며, 재령 3일 이후에는 그 비율이 점차 감소되는 것으로 나타났다. 배합에 관계없이 재령 7일까지 28일 강도의 약 80% 정도까지 비교적 급격하게 강도가 발현되고, 이후 강도의 증진비율이 감소되는 것을 알 수 있다. 동일 배합조건에서는 조강시멘트를 사용한 배합이 보통 시멘트를 사용한 경우보다 조기강도의 획득률이 크게 나타났으며, 준조강시멘트의 경우에는 조강시멘트와 유사한 강도 발현율이 나타났다. 콘크리트의 설계기준강도에 해당하는 재령 28일의 압축강도는 모든 배합에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. S1, S2 배합은 ACI 및 KCI기준곡선과 유사한 형상을 나타내며, 플라이애쉬가 20% 혼입된 배합(S3)의 경우는 혼화재의 특성으로 인해<sup>15)</sup> 다른 배합보다 낮은 강도 발현이 나타났다.

**4.2 재령에 따른 탄성계수 발현 특성**

재령에 따른 탄성계수의 발현특성은 Table 3 및 Figs. 5~6과 같다. 보통 시멘트인 경우 재령 28일 탄성계수에 대한 비율로 보면 1일 강성발현율은 45%, 3일 78%, 14일에는 95%의 탄성계수가 발현되는 것으로 나타났다. 준조강시멘트인 경우 1일 50%, 3일 81%, 14일 94%, 조강시멘트인 경우 1일 64%, 3일 87%, 14일 96%로 나타내고 있어 조강시멘트 사용시 강성발현율이 타 배합보다



**Fig. 5** Modulus of elasticity development (S1)



**Fig. 6** Modulus of elasticity development (test variables)

매우 우수하였다. 배합에 관계없이 재령 3일까지 28일 강성대비 약 80% 정도까지 비교적 급격하게 발현되고, 7일 이후에는 약 90%, 14일에는 거의 100% 강성발현이 되는 것으로 나타나, 강성의 발현비율은 강도의 비율보

다 급격히 증가하는 것으로 분석되었다. 모든 배합에서 7일 이후에는 균일한 탄성계수형상이 나타났으며, S1배합에서는 조강 및 준조강시멘트를 사용한 배합은 재령 1일부터 비교적 균일한 탄성계수 발현 경향을 나타내었으나, 보통 시멘트의 경우에는 재령 3일이 경과한 이후부터 안정적인 탄성계수의 발현을 나타내었으며, 재령 1일에는 상당히 저조한 탄성계수가 발현되는 것으로 측정되었다. S2배합의 경우에는 2번의 배합이 유사한 경향을 나타내었으며, 전체적인 탄성계수의 절대값은 조강시멘트가 가장 우수한 것으로 나타났다.

ACI 318-08 및 KCI 2007의 탄성계수 발현식과 실험 결과를 비교한 결과, 탄성계수의 정량적인 값은 모든 기준식이 과대평가하고 있으며, 발현비율로 보면 조기재령의 강성은 ACI식보다 KCI 2007이 훨씬 과대평가하고 있는 것으로 나타났다.

### 4.3 압축강도와 탄성계수의 관계

설계기준에서는 콘크리트의 탄성계수를 압축강도와와의 상관관계식으로 추정할 수 있도록 규정하고 있다.

ACI 318-08에서는 콘크리트의 탄성계수와 압축강도와와의 상관관계식을 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하도록 규정하고 있으며, 국내의 콘크리트구조설계기준에서도 2003년도 기준까지는 ACI와 유사한 규정을 적용하였으나, 2007년 설계기준에서는 탄성계수와 압축강도의 상관관계식을 CEB-FIP의 기준을 참고하여 압축강도의 세제곱근에 비례하는 것으로 수정하였다. 그러나, 설계기준에서 제시하고 있는 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 간의 상관관계식은 대부분 재령 28일 이후의 콘크리트 t 실험체를 대상으로 도출된 실험식으로서 조기 재령에서의 상관관계는 정확하게 추정하지 못한다는 의견이 대두되고 있다.<sup>9)</sup> 이에 따라 이 연구의 실험 결과를 재령 28일을 기준으로 압축강도와 탄성계수의 발현비율을 정리한 것은 Table 4와 같으며, 압축강도와 탄성계수간의 관계를 도식한 것은 Figs. 7~8과 같다. 그림에서 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 간의 관계는 시멘트의 종류에 큰 관계없이 유사한 경향을 나타내었으나, 기존 설계식에서 제안하고 있는 상관관계식은 대부분 콘크리트의 탄성계수를 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 특히 국내의 개정 콘크리트구조설계기준의 상관관계식은 콘크리트의

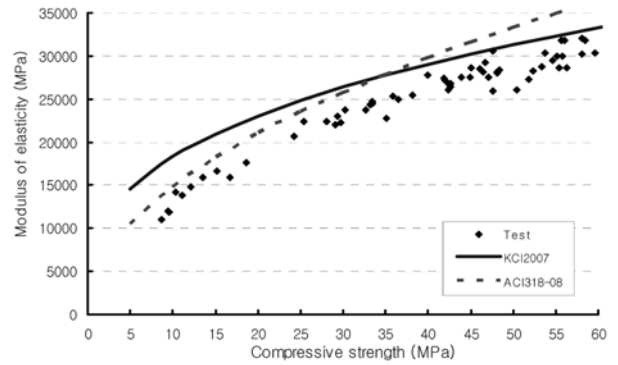


Fig. 7 Comparison of test and codes (OPC)

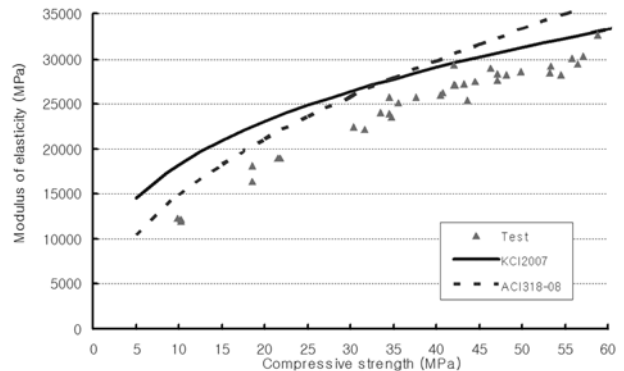


Fig. 8 Comparison of test and codes (HES)

강도가 높지 않은 조기 재령에서 탄성계수를 약 50~55% 정도 지나치게 과대평가하는 것으로 판명되었으며, 콘크리트가 양생되어 강도를 확보함에 따라 과대평가하는 비율이 점차 감소(약 15~20%)되는 것으로 나타났다.

ACI 318-08의 상관관계식은 재령에 따른 콘크리트의 강도 발현과는 관계없이 대체적으로 압축강도와 탄성계수의 상관관계를 유사하게 추정하나, 약 6~10% 정도 탄성계수를 과대평가하는 것으로 분석된다.

### 4.4 조기 재령에서 강도 및 탄성계수 간의 관계식 제안

기존 연구에서 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 간의 상관관계를 추정할 때 주로 사용되는 방법은 압축강도를 독립변수로 탄성계수를 종속변수로 하여 두 변수간의 상관관계를 유추하였다. 이 연구에서는 이 실험 결과를 이

Table 4 Ratio of compressive strength and modulus of elasticity development for 28 days

		Comparison each day (1, 3, 7, 14 days) with 28 days (MPa)									
		fc1 /fc28	fc3 /fc28	fc7 /fc28	fc14 /fc28	fc28	Ec1 /Ec28	Ec3 /Ec28	Ec7 /Ec28	Ec14 /Ec28	Ec28
S1	OPC	0.197	0.540	0.771	0.842	55.20	0.448	0.784	0.894	0.991	29,752
	SHES	0.322	0.616	0.824	0.941	51.00	0.591	0.839	0.906	0.939	29,671
	HES	0.392	0.646	0.819	0.914	54.57	0.638	0.865	0.935	0.959	29,759
S2	HES	0.349	0.631	0.784	0.870	53.35	0.590	0.809	0.910	0.992	29,239
S3	OPC+FA20	0.199	0.535	0.758	0.812	49.27	0.407	0.763	0.891	0.981	28,260

용하여 시멘트의 종류와 재령에 따라서 탄성계수와 압축강도의 상관관계에 대한 제안식을 제시하도록 하였다.

압축강도와 탄성계수 간의 상관관계를 형성하는 수학적 지수를 확인하기 위하여 다양한 차수의 콘크리트 압축강도로 탄성계수를 나눔으로써 압축강도의 영향을 제거시킨 결과를 정리하면 Table 5 및 Figs. 9~11과 같다. 표 및 그림에서 콘크리트의 강도  $f_c$ 는 각 재령별 실제 콘크리트 압축강도의 평균값을 의미한다.

Fig. 9에서 탄성계수를 압축강도로 나눈 비율( $E_c/f_c$ )은 재령 7일까지는 급격한 감소를 나타내나, 7일 이후에는 비교적 안정화된 경향을 나타내고 있다. 한편, 탄성계수를 압축강도의 제곱근으로 나눈 Fig. 10에서는 ACI 및 2003년 국내의 설계기준에서 규정하고 있는 상수값보다는 작으나, 재령에 관계없이 대체적으로 일정한 값을 나타내어 재령의 효과를 제거할 수 있을 것으로 분석된다. 이때, 실험의 결과로 나타난  $E_c/\sqrt{f_{ck}}$ 는 대체적으로 4,000~4,500 정도의 값이 나타나므로, ACI 318-08에서 제시하고 있는 상관관계식의 상수값(4,700)은 조기재령에서의 탄성계수를 과대평가하는 것으로 판단된다.

개정된 국내 설계기준에서 사용하고 있는 압축강도의 제곱근에 대한 관계를 도식하면 Fig. 11과 같다. 그림과 같이  $E_c/\sqrt[3]{f_{ck}}$ 의 관계는 재령 14일 이후에는 설계기준에서 제시하고 있는 관계 상수 8,500에 미흡하나마 근접하게 되나, 재령 7일 이전의 조기재령에서는 그 값이 현저하게 미달하는 것을 알 수 있다. 특히, 재령 3일 이전의 변화폭은 상당히 크게 나타나며, 재령 7일 이후의  $E_c/\sqrt[3]{f_{ck}}$ 는 7,500~8,000 내외의 값을 나타내어 KCI 2007식의 상수가 과대평가하고 있는 것으로 볼 수 있다.

이상의 분석 결과를 종합할 때, 재령 28일 이전의 조기재령에서 콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 상관관계식은 압축강도의 제곱근과의 관계식을 수립하고 이에 조기에 강도를 획득할 수 있는 시멘트의 종류를 반영하는 것이 가장 타당한 것으로 평가된다.

따라서 이 연구에서는 이 실험 결과를 바탕으로 재령 28일 이전의 콘크리트 압축강도 60 MPa 이하에 대하여 다음 식 (9)와 같은 탄성계수 모델식을 제안한다.

$$E_c = k_1 \sqrt{f_c} \quad (9)$$

여기서  $E_c$ : 탄성계수

$f_c$ : 콘크리트의 평균 압축강도

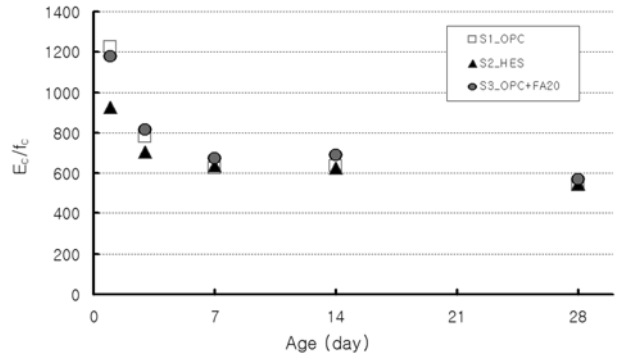


Fig. 9 Analysis of  $E_c/f_c$

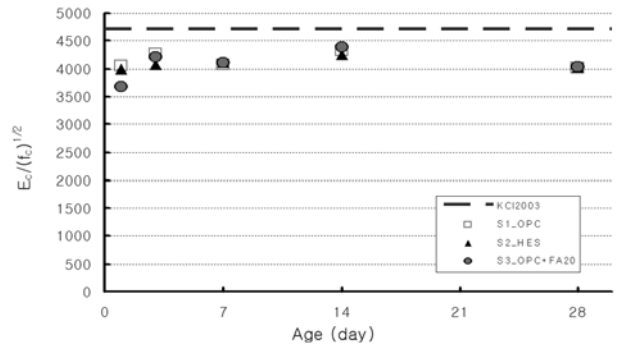


Fig. 10 Analysis of  $E_c/\sqrt{f_c}$

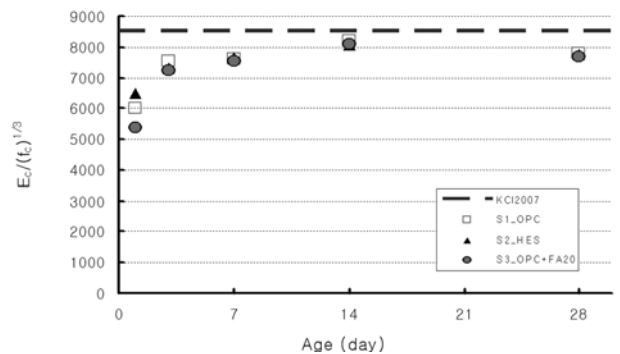


Fig. 11 Analysis of  $E_c/\sqrt[3]{f_c}$

$k_1$ : 시멘트 종류에 의한 비례상수

OPC: 4,050, SHES: 4,150, HES:4,200

이 연구에서 제안한 식 (9)와 실험 결과와의 비교 결과는 Figs. 12, 13과 같으며, 그림에서 나타났듯이 이 연구의 제안식은 조기재령에서 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 간의 관계를 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

Table 5 Analysis of relationship for  $f_c$  and  $E_c$

		$E/f_c$					$E/\sqrt{f_c}$					$E/\sqrt[3]{f_c}$				
		$f_{c1}$	$f_{c3}$	$f_{c7}$	$f_{c14}$	$f_{c28}$	$f_{c1}$	$f_{c3}$	$f_{c7}$	$f_{c14}$	$f_{c28}$	$f_{c1}$	$f_{c3}$	$f_{c7}$	$f_{c14}$	$f_{c28}$
S1	OPC	1228.29	783.04	625.17	633.96	538.99	4045.92	4274.55	4078.01	4323.01	4004.48	6019.90	7526.50	7619.59	8197.76	7813.94
	SHES	1069.30	792.95	640.26	580.54	581.78	4330.33	4443.33	4149.37	4022.11	4154.77	6902.32	7892.17	7736.13	7667.63	8000.96
	HES	889.12	729.92	622.20	571.76	545.37	4109.87	4334.71	4159.93	4038.93	4028.60	6846.22	7849.72	7836.78	7749.67	7845.90
S2	HES	927.12	702.69	635.44	625.19	548.06	3998.47	4076.20	4110.74	4258.67	4003.09	6508.48	7324.09	7659.53	8072.85	7766.96
S3	OPC+FA20	1175.05	818.14	674.22	693.35	573.62	3678.49	4201.00	4119.57	4385.13	4026.27	5381.14	7247.62	7531.27	8109.47	7708.95

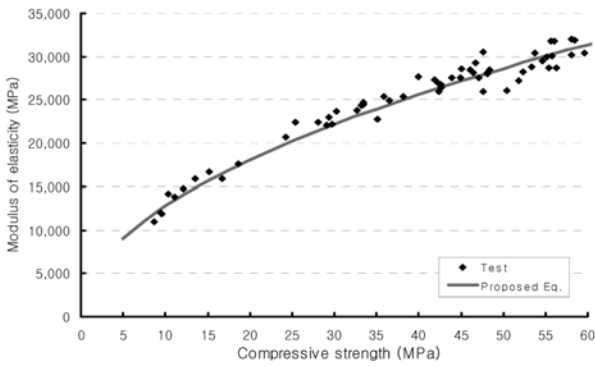


Fig. 12 Evaluation of proposed equation (OPC)

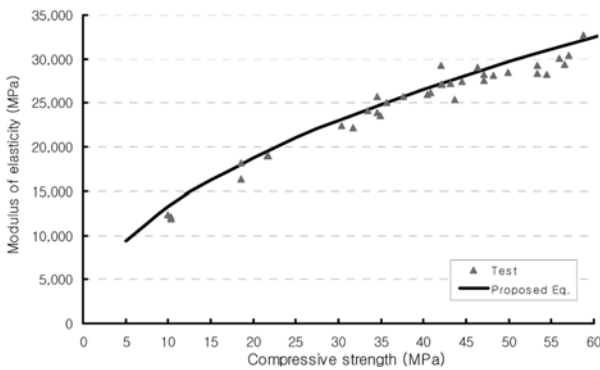


Fig. 13 Evaluation of proposed equation (HES)

## 5. 결 론

콘크리트가 완전히 성숙되지 않은 조기재령에서 콘크리트의 강도 및 강성 발현 평가에 대한 연구 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재령에 따른 압축강도 발현 특성은 재령 1일에서의 압축강도는 시멘트 종류별 차이가 크게 나타나며, 재령 3일 이후에는 그 비율이 점차 감소되는 것으로 나타났다. 조강시멘트(HES)를 사용한 배합이 보통 포트랜드 시멘트(OPC)를 사용한 경우보다 조기 강도의 획득률이 크게 나타났으며, 준조강시멘트(SHES)의 경우에는 조강시멘트와 유사한 강도 발현율이 나타났다.
- 2) 재령에 따른 탄성계수의 발현특성은 배합에 관계없이 재령 3일까지 28일 강성대비 약 80% 정도까지 비교적 급격하게 발현되고, 14일에 거의 100% 강성 발현이 되는 것으로 나타났다. 탄성계수의 발현율은 강도의 비율보다 급격히 증가하였다.
- 3) 콘크리트의 압축강도와 탄성계수 간의 관계는 시멘트의 종류에 큰 관계없이 유사한 경향을 나타내었으나, 기존 설계식에서 제안하고 있는 상관관계식은 대부분 조기재령의 콘크리트에서 탄성계수를 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 특히 KCI 2007 기준의 상관관계식은 콘크리트가 완전히 성숙되지 않은 조기재령에서는 탄성계수를 지나치게 과대평

가할 수 있는 것으로 나타났다.

- 4) 조기재령에서 압축강도와 탄성계수의 관계식은 시멘트종류와 재령에 관계하여 압축강도의 제곱근의 관계가 가장 합리적인 것으로 분석되었다.
- 5) 이 연구의 실험결과에 근거하여 조기 재령에서의 콘크리트 압축강도와 탄성계수 간의 관계식을 제안하고, 시멘트의 종류에 따른 비례상수 값을 제시하였다.
- 6) 압축강도 및 탄성계수 평가 시 플라이애쉬 등의 혼화재를 사용할 경우에는 조기재령에서 강도 및 강성을 저감시키기 위한 보정계수의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 삼성물산 건설부문의 연구비 지원과 쌍용양회공업(주) 기술연구소의 적극적인 실험지원으로 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 오재근, 강수민, 김옥중, “시공단계에 따른 RC공동주택의 동바리 하중 예측,” 한국콘크리트학회 봄학술대회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 117~120.
2. 강수민, 이지웅, 오재근, 김옥중, 이도범, 박홍근, “시공 영향을 받는 플랫플레이트의 장기처짐,” 한국콘크리트학회 가을학술대회 논문집, 18권, 2호, 2006, pp. 149~152.
3. 장일영, 박훈규, 윤영수, “국내의 실험자료를 이용한 고강도 및 초고강도 콘크리트의 탄성계수식 제안,” 콘크리트학회 논문집, 8권, 6호, 1996, pp. 213~222.
4. 김무한, 정수영, 윤석천, 한천구, “고강도콘크리트의 개발과 공학적 특성에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 5권, 2호, 1989, pp. 153~163.
5. Shah, S. P. and Ahmad, S. H., *High Performance Concrete and Applications*, St. Edmundsbury Press, London, 1994, pp. 27~60.
6. Noguchi, T., Tomosawa, F., Nemati, K. M., Chiaia, B. M., and Fantilli, A. P., “A Practical Equation for Elastic Modulus of Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol. 106, No. 5, 2009, pp. 690~696.
7. Mesbah, H. A., Lachemi, M., and Aitcin, P. C., “Determination of Elastic Properties of High-performance Concrete at Early Ages,” *ACI Materials Journal*, Vol. 99 No. 1, 2002, pp. 37~41.
8. Logan, A., Choi, W., Mirmiran, A., Rizkalla, S., and Zia, P., “Short-term Mechanical Properties of High-strength Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 106, No. 5, 2009, pp. 413~418.
9. 홍건호, 신영수, 정일영, “콘크리트의 강도 및 강성 발현 평가에 대한 기초적 연구,” 대한건축학회논문집, 12권, 7호, 1996, pp. 229~236.
10. ACI Committee 209, “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures,” *ACI Manual of Concrete Practice*, ACI 209R-92, 2008.
11. Euro-code 2, *Design of Concrete Structures (BS EN 1992-1-*



- 1), BSI, 2004, pp. 27~37.
12. ACI Committee 318, *Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, 2008, pp. 107~108.
  13. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2003, pp. 66~68.
  14. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준 해설, 한국콘크리트학회, 2007, pp. 39~68.
  15. 이진용, 최수홍, 강석화, 이광명, “플라이애쉬 함유량이 콘크리트의 굳기 전 성질 및 역학적 특성에 미치는 영향,” 콘크리트학회 논문집, 11권, 6호, 1999, pp. 25~33.

---

**요 약** 최근 장스팬 구조물의 건설이 증가하면서 슬래브의 시공도중 처짐 문제가 중요한 이슈 중의 하나로 대두되고 있다. 특히, 건축물의 경우 골조공기를 단축하기 위하여 콘크리트의 소요강도가 발현되기 이전에 거푸집을 조기 탈형함으로써 구조물의 품질저하를 초래하고 있다. 이러한 시공하자를 없애고 공기단축을 실현하기 위해서는 콘크리트의 조기 재령에서의 강도 및 강성 발현에 관한 연구를 수행하여 재령에 따른 강도 및 탄성계수 발현 모델의 구축이 필요하다. 기존의 설계기준에서 제시하고 있는 콘크리트 모델은 미성숙단계인 조기재령 콘크리트의 역학적 특성을 제대로 반영하지 못한다는 연구결과들이 있다. 따라서, 이 연구에서는 조기 재령에서의 재령에 따른 콘크리트의 재료실험을 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 기존 국내외 설계기준에서 제시하고 있는 강도 및 탄성계수 제안식의 적합성을 평가하며, 최종적으로 조기재령에서의 콘크리트 강도와 강성간의 발현 관계 모델을 구축함으로써, 향후 공기단축 공법의 개발 및 슬래브 처짐에 따른 하자를 방지할 수 있는 초기 재료 모델을 제시하도록 하였다. 재료실험은 재령 1, 3, 7, 14, 28일에 실시하였으며, 총 159개의 실린더형 공시체의 실험 결과를 분석하여 콘크리트의 조기재령에서 압축강도와 탄성계수 간의 상관관계를 제안하였다.

**핵심용어** : 콘크리트, 압축강도, 탄성계수, 강성, 조기 재령