

# 크리프 예측 영향요인 검토 및 국내 건설현장 콘크리트 배합을 고려한 크리프 예측 모델식 제안

## Investigation on Factors Influencing Creep Prediction and Proposal of Creep Prediction Model Considering Concrete Mixture in the Domestic Construction Field

문형재<sup>1</sup>      석원균<sup>1</sup>      구경모<sup>2</sup>      이상규<sup>3</sup>      황의철<sup>3</sup>      김규용<sup>4\*</sup>

Moon, Hyung-Jae<sup>1</sup>    Seok, Won-Kyun<sup>1</sup>    Koo, Kyung-Mo<sup>2</sup>    Lee, Sang-Kyu<sup>3</sup>    Hwang, Eui-Chul<sup>3</sup>    Kim, Gyu-Yong<sup>4\*</sup>

Senior Manager, R&D Center, Lotte E&C, Seocho-gu, Seoul, 06515, Korea <sup>1</sup>

Assistant Manager, R&D Center, Asia Cement Co., LTD. Yongin-si, Gyeonggi-do, 17118, Korea <sup>2</sup>

Doctoral course, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea <sup>3</sup>

Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 34134, Korea <sup>4</sup>

### Abstract

Recently, construction technology of RC structures must be examined for creep in concrete. The factors affecting the creep prediction of concrete and the results of creep in domestic construction field were reviewed. The longer the creep test period and the higher the compressive strength, the higher the creep prediction accuracy. The higher the curing temperature, the higher the initial strength development of the concrete, but the difference in the creep coefficients increased over time. Based on the results of creep evaluation in the domestic construction field and lab. tests, a modified predictive model that complements the ACI-209 model was proposed. In the creep prediction of real members using general to high strength concrete, the test period and temperature should be considered precisely

Keywords : high strength concrete, creep coefficient, heat of hydration, compressive strength, concrete mixture in domestic construction field

### 1. 서 론

최근의 건축물은 점차 대형화·고층화되고 있으며, 랜드마크의 성격을 갖는 100층 이상의 초고층 건축물의 건설이 증가하고 있다. 따라서 일반~고강도의 다양한 압축강도의 콘크리트가 사용되고 있으며, 이를 반영한 콘크리트 부재의 축소량 예측과 시공이 요구되는 상황이다[1]. 대표적인

부재의 축소량으로써, 콘크리트의 크리프는 지속적인 하중을 받는 부재가 탄성변형이 발생된 이후에도 추가적인 하중 작용 없이 시간 경과에 따라 콘크리트의 변형률이 증가하는 물리적 현상이다. 콘크리트는 시멘트, 골재, 물, 혼화재료 등으로 구성된 복합재료로서 내부에 공극을 갖고 있기 때문에 철 등과 같은 균질재료와 달리 크리프의 특성과 양의 변화가 다양한 요인에 의해 달라지게 된다. 특히 크리프와 같은 비탄성변형량은 탄성변형량과 유사하거나 경우에 따라서 2배 이상 발생하기 때문에 이에 대해 정밀한 계측과 예측이 필요하다.

크리프에 의한 기둥축소량은 콘크리트 부재의 하중조건, 콘크리트 배합 등에 의해 차이를 나타낼 수 있으며, 정확한

Received : October 7, 2019

Revision received : October 30, 2019

Accepted : November 11, 2019

\* Corresponding author : Kim, Gyu-Yong

[Tel: 82-42-821-5623, E-mail: gyuyongkim@cnu.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

예측 및 시공이 이루어지지 않으면 슬래브의 위치를 변화시켜 칸막이, 기계적인 장비 및 마감재 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 수직요소에 의해 지탱된 슬래브가 계획된 위치로부터 비틀어지게 되어 설계상에 고려되지 않은 응력을 발생시킴으로서 구조적인 문제를 발생시키기도 한다.

이에 시간에 따른 콘크리트 구조물의 변형거동을 예측하기 위한 다양한 모델이 제시되어 있으며, 모델들은 콘크리트의 배합 및 환경의 영향을 고려하여 표현하고 있다[2]. 그러나 기존 모델들은 재료 자체의 불확실성, 환경 등의 차이로 국내에서 사용되는 콘크리트와는 변형거동이 다소 상이하며, 고강도 콘크리트 영역에 있어서 장기재령으로 갈수록 실측값과 예측값의 차이가 커지는 경향도 확인되고 있는 실정이다[3]. 특히, 고강도 콘크리트의 경우에는 Jonasson and Persson[4] 등이 제시한 바와 같이 장기간에 걸쳐 내부에 존재하는 수분이 소모되는 특성을 나타내기 때문에, 내부 수분상태에 따른 영향을 고려한 모델이 제시될 필요성이 있다[5,6].

한편, 실제 부재에서는 온도·습도 등의 환경 차이에 의해 단면의 내측 및 외측의 변형거동이 다르게 나타난다. 그러나 현행 설계기준에서는 계산의 편리를 위해서 단면의 위치에 관계없이 동일한 크리프를 가정하여 해석하기 때문에 변형거동을 정확히 예측할 수 없는 한계가 있다[7]. 또한, 실험실에서 진행된 크리프 시험결과와 실 구조물의 크리프 변형거동은 매우 큰 차이를 나타내기 때문에 실내시험 및 현장 콘크리트의 크리프 시험 결과를 고려할 필요성이 있지만, 현장과 연계한 연구결과는 매우 부족한 실정이다[8].

따라서 본 연구에서는 축력을 고려한 보통강도에서 고강도 범위까지 다양한(24~80MPa) 콘크리트를 대상으로 크리프 시험기간에 따른 모델을 이용한 콘크리트의 크리프 계수 예측, 수화열에 따른 콘크리트의 크리프 거동, 국내 건설현장에서 사용된 현장 콘크리트의 크리프 평가결과와 기존 크리프 모델을 바탕으로 수정 모델을 제안하였다.

## 2. 크리프 모델 검토 및 기준선정

크리프 모델에 대하여 각국에서는 선행연구결과를 바탕으로 크리프 예측식을 제안 및 적용하고 있다. 대표적인 것으로 ACI-209, CEB-FIP MC90, Eurocode2 및 B3 모델 등이 있다.

ACI-209모델의 크리프계수는 식 (1) 및 (2)와 같이 하중 재하시의 재령과 환경 요인에 의해 결정되는 극한 크리프  $v_u$ 와 하중 재하 이후 시간에 따른 크리프의 발생 형상을 표현하는 식의 곱으로 표현된다. 극한 크리프는 각각의 영향인자별로 기본값 1을 기준으로 가감하는 함수이며, 여기에 보정계수 2.35를 곱하여 제시되기 때문에, 그 이상의 값을 초과하지 않는다[9].

$$v_t = \frac{t^{0.6}}{10+t^{0.6}} \cdot v_u \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$v_u = 2.35 \cdot \gamma_c \quad \text{-----} \quad (2)$$

$t$ : 하중 재하 이후 시간 (day)

$v_u$ : 극한 크리프 계수 (Ultimate Creep Coefficient)

$\gamma_c$ : 상대습도, 슬럼프, 공기량, 등 영향요인 계수

$v_t$ : 시간 재령에 따른 크리프 계수

CEB-FIP MC90모델의 크리프계수는 식 (3)과 같이 콘크리트의 재령에 따른 기온변화를 재령 28일 값을 기준으로 하여, 시간에 따른 변화함수로서 크리프의 예측인자로 적용하고 있다. 이 모델은 재하 될 때 재령의 변화에 따른 크리프 변화율의 적용이 뛰어나다[10].

$$\varnothing(t,t') = \varnothing_0 \cdot \beta_c(t-t') \quad \text{-----} \quad (3)$$

$\varnothing_0$ : 기준 크리프 계수

$\beta_c$ : 크리프 경시 변화를 나타내는 계수

$t$ : 하중 재하 이후 시간 (day)

$\varnothing(t,t')$ : 시간 재령에 따른 크리프 계수

EuroCode 2 모델은 CEB-FIP MC90모델과 유사하지만, 환경조건( $-40^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$ ,  $40\% < \text{RH} < 100\%$ )을 반영하여 크리프계수를 도출할 수 있는 것과 평균강도 35MPa 이상에 대해서 별도의 모델을 제시하고 있다. 일반적으로 EuroCode 2 모델은 CEB-FIP MC90모델과 비교하는 경우 보통강도 영역에서 거의 비슷한 크리프계 수치를 나타내지만, 고강도 영역에 있어서는 CEB-FIP MC90모델이 EuroCode 2 모델보다 낮게 평가되는 경향이 있다[11].

한편 B3 모델은 가장 최근에 발표된 건조수축 및 크리프

Table 1. Design of experiment and mix proportion of concrete

ID	W/B (%)	Slump(mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						Curing condition	Specimen size (mm)	Evaluation items	
					W	C	BFS	FA	SF	S				G
80	23.80	630 <sup>1)</sup>	1.80	45.10	155	481	0	130	39	697	874			•Creep coefficient (2 years)
40	37	150	4	43	170	230	115	115	0	721	960	Unsealed	∅ 150×300	•Prediction of creep coefficient using ACI-2019 model (3, 6 months, 2 years)
24	50	150	4.50	46	180	180	90	90	0	784	924			

1) Slump flow

모델로서, B3모델의 경우에는 압축강도에 대한 제한조건으로 재령 28일의 압축강도가 2,500~10,000Psi (17~70MPa)의 범위에서만 적용이 가능하도록 되어 있다. 또한, 골재-시멘트 중량비(a/c) (2.5~13.5), 단위시멘트량 (160~720kg/m<sup>3</sup>) 및 물-시멘트비(0.35~0.85)에 대한 제한 조건으로, 80MPa 이상 고강도 콘크리트에 대해서 검토할 경우에는 이에 대한 추가 보정이 필요하게 된다 [12].

앞서 기술한 바와 같이 콘크리트 크리프에 대해 많은 연구자들이 예측 모델을 제시하여 왔으며, 예측에 고려되는 기준은 다양한 실정이다. 이 때 본 연구에서는 실제 초고층 구조물의 기동 수축량 해석에 있어서의 적용성과 모델수정에 따른 일치성 및 국내 주요 기동 축소량 해석 전문회사들의 장기 거동 예측을 위한 프로그램 적용 등을 기준으로 하여 ACI-209모델을 선정하였다[9].

### 3. 크리프 시험기간에 따른 모델을 이용한 콘크리트의 크리프 계수 예측

#### 3.1 실험계획 및 방법

크리프 시험기간에 따른 모델을 이용한 콘크리트의 크리프 예측 특성을 평가하기 위한 실험계획 및 콘크리트 배합을 Table 1에 나타내었다. 설계압축강도 24, 40, 80MPa급 일반~고강도 콘크리트에 대하여 2년간 실내 크리프 시험을 진행했다. 또한, 각 3개월, 6개월, 2년간의 크리프 데이터를 ACI-209모델에 적용하여 2년간의 크리프 계수를 예측하여 비교하였다.

Table 2에 콘크리트에 적용된 사용재료의 물리적 특성을 내었으며, 콘크리트는 목표 슬럼프(플로우) 및 공기량을 만족하여 980L 용적배합으로 제조하였고, 유동성 확보를 위해 폴리카르본산계 고성능감수제를 약 1.5~2.0% 혼입하였다.

Table 2. Mechanical properties of material

Material	Properties
Cement	Ordinary Portland cement (Density 3.15g/cm <sup>3</sup> , Blaine 3,770cm <sup>2</sup> /g)
Blast furnace slag powder	Density: 2.97g/cm <sup>3</sup> , Blaine : 6,000 - 7000cm <sup>2</sup> /g
Fly ash	Density 2.30g/cm <sup>3</sup> , Blaine 3,228cm <sup>2</sup> /g
Silica fume	Density 2.26g/cm <sup>3</sup> , Blaine 200,000cm <sup>2</sup> /g
Sand	Sea sand (Maximum size 5mm, Density 2.58g/cm <sup>3</sup> , Absorptance 1.01%, Fineness modulus 3.05)
Gravel	Crushed limestone (Maximum size 20mm, Density 2.66g/cm <sup>3</sup> , Absorptance 1.39%, Fineness modulus 6.02)
High range water reducing agent	Polycarboxylic

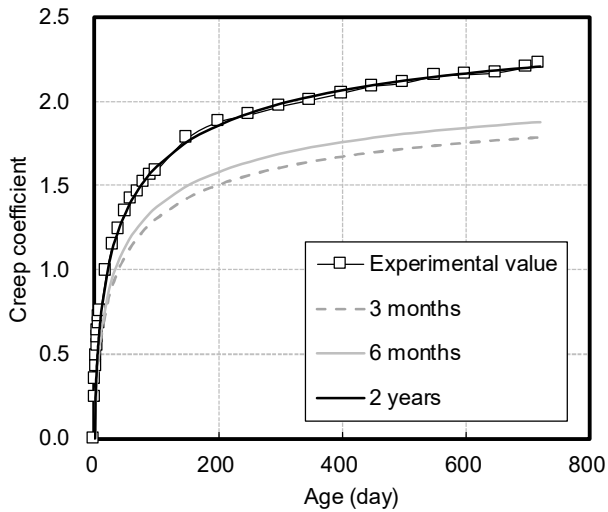
콘크리트 시험체는 KS F 2453 「콘크리트의 압축 크리프 시험방법」에 준하여 ∅ 150×300mm로 제작하였고, 타설 직후 20±2℃의 온도조건에서 24시간 동안 기건양생하였다. 이후 시험체를 탈형하여 재령 7일까지 20±2℃의 조건에서 습윤양생하고 재하재령 28일까지 상대습도 50±10%의 조건에서 기건양생하였다.

크리프 시험의 재하량은 재령 28일 측정된 압축강도의 40%로 설정하였으며, 재하 후 2년간 측정하였다. 크리프 시험에 의해 도출된 총 변형량에서 수축변형량 및 순간탄성 변형량을 제하여 크리프 변형량을 계산하였다[9].

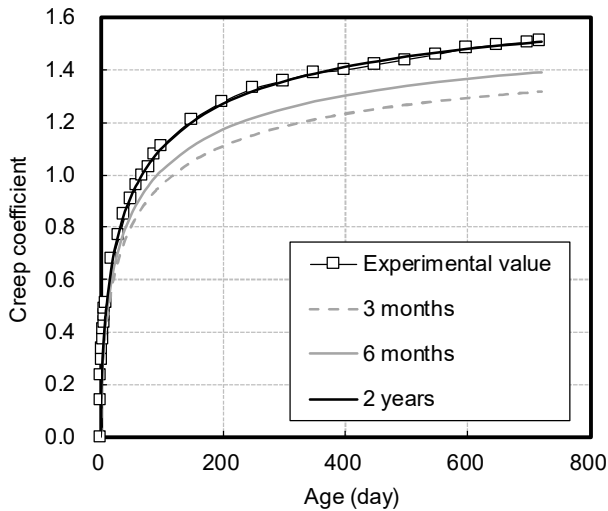
#### 3.2 실험결과 및 고찰

크리프 시험기간에 따른 모델을 이용한 콘크리트의 크리프 계수 예측 결과를 Figure 1에 나타내었다. 24, 40, 80MPa급 콘크리트에 대하여 2년 동안 측정된 크리프 계수의 결과와 3개월, 6개월 동안 측정된 콘크리트의 크리프 계수를 이용하여 ACI-209모델을 통하여 2년간의 크리프 계수를 예측한 결과를 비교하였다.

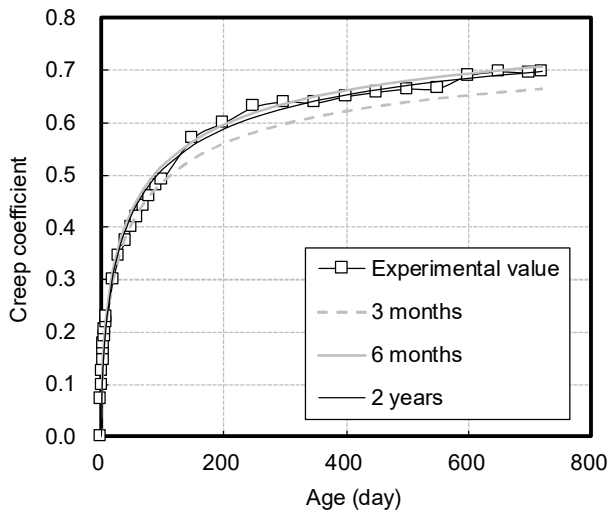
실험에 의한 24, 40 80MPa급 콘크리트 시험체의 크리프 계수값은 재령 2년을 기준으로 2.23, 1.49, 0.70으로



(a) 24MPa



(b) 40MPa



(c) 80MPa

Figure 1. Prediction using actual creep coefficient of concrete with measurement period

Table 3. Accuracy of prediction of creep coefficient of concrete

Measuring time	Prediction accuracy (%)		
	24	40	80
3 Months	80.85	87.18	94.98
6 Months	85.11	92.31	101.25
2 years	100	100	100

나타났으며, ACI-209모델을 통하여 예측하는 경우에도 실측값과 매우 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

하지만, 3개월, 6개월 동안 측정된 크리프 계수를 이용하여 ACI-209 모델을 통하여 2년간의 크리프 계수를 예측한 경우 전체적으로 실측값에 미치지 못하는 결과를 나타내었다. 24MPa급 콘크리트의 경우에는 3개월 기준 1.79, 6개월 기준 1.89, 40MPa급 콘크리트의 경우에는 3개월 기준 1.32, 6개월 기준 1.39, 80MPa급 콘크리트의 경우에는 3개월 기준 0.66, 6개월 기준 0.70으로 나타났다. 콘크리트의 크리프 시험기간이 길어질수록 ACI-209모델을 통하여 예측하는 크리프 계수가 2년간의 실측값과 유사하게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다.

또한, 압축강도가 커질수록 크리프 측정기간에 따른 예측값과 실측값의 차가 작아지는 현상이 나타났는데, 이는 콘크리트의 압축강도가 높아질수록 보다 이른 재령에서 크리프 계수가 수렴하기 때문인 것으로 판단된다.

ACI-209모델을 이용한 콘크리트의 크리프 계수 예측 정확도를 Table 3에 나타내었다. 2년의 실측값 및 예측값을 기준으로 6개월 측정값을 이용하는 경우에 보다 높은 정확도를 나타내, 크리프 계수를 예측하는 경우 최대한 장기간의 실험데이터를 확보하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

#### 4. 수화열에 따른 콘크리트의 크리프 거동

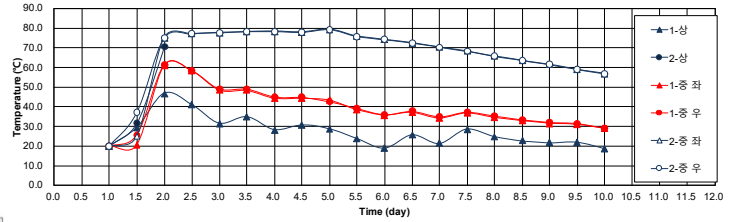
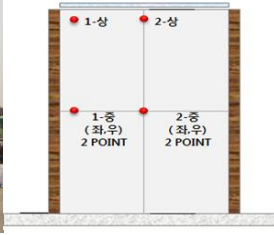
##### 4.1 실험계획 및 방법

매스 콘크리트 등 같은 대단위 부재는 결합재 수화반응으로 인해 내부에 높은 수화열이 발생하게 되며, 수화열은 콘크리트의 양생에 영향을 미치고 콘크리트의 수화반응을 촉진시켜 재령 초기에 압축강도가 발현되는 현상이 나타난다[10].

이러한 현상은 Figure 2와 같이 Mock-up test를 통해서도 확인할 수 있다. 또한, 단면에서의 위치에 따라서



(a) specimen



(b) hydration heat measurement result

Figure 2. Mock-up test

Table 4. Design of experiment and mix proportion of concrete

ID	W/B (%)	Slump flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					Curing temp. (°C)	Specimen size (mm)	Evaluation items	
					W	C	FA	SF	S				G
80	23.80	630	1.80	45.10	155	481	130	39	697	874	20, 50, 80	∅ 150×300	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Compressive strength (MPa)</li> <li>•Creep coefficient (180 days)</li> </ul>

발생하는 수화열의 온도가 다르게 나타나는데, 중심부에 가까울수록 높은 수화열을 나타내게 되며 Figure 2의 경우 최대 80°C까지 온도가 상승하는 것을 실험적으로 확인할 수 있다.

따라서 콘크리트에서 발생한 수화열이 압축강도 발현에 미치는 영향 및 그에 따른 크리프 거동을 검토할 필요성이 있다.

수화열 작용에 따른 콘크리트의 크리프 거동을 확인하기 위한 실험계획 및 콘크리트 배합을 Table 4에 나타내었다. 설계압축강도 80MPa급 고강도 콘크리트를 대상으로 수화열을 받는 조건을 설정하기 위해 시험체의 양생온도를 20, 50, 80°C로 하였다. 시험체는 실내에서 제작되었으며, 그 외의 조건은 3.1 실험계획 및 방법에서 기술한 바와 같다. 양생방법은 Figure 3에 나타난 바와 같이, 1일 재령에 시험체를 탈형한 후 20, 50, 80°C의 양생조에서 약 4일간 습윤양생을 진행하였다. 이후 재하재령 28일까지 온도 20±2°C, 상대습도 50±10%의 조건에서 기건양생 하였다. 또한, 크리프 시험도 3.1 실험계획 및 방법에서 기술한 바와 동일한 조건에서 진행되었다.

#### 4.2 실험결과 및 고찰

양생방법에 따른 콘크리트의 압축강도 측정 결과를 Table 5에 나타내었다.

80MPa급 콘크리트의 28일 재령 압축강도는 양생온도 20°C에서 87.0MPa, 50°C에서 90.8MPa, 80°C에서 93.5MPa로 나타났다. 양생온도가 높아질수록 28일 재령의 압축강도가 높아졌다. 특히, 양생온도 50, 80°C에서는

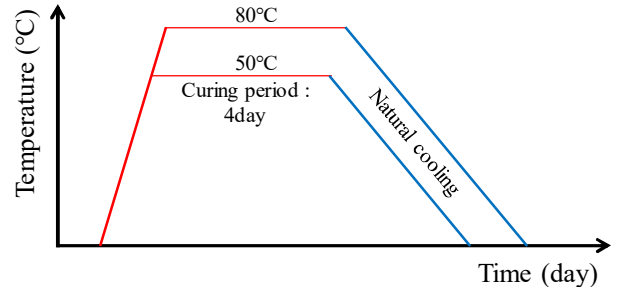


Figure 3. Curing method of concrete

Table 5. Compressive strength of concrete by curing method

ID	Curing temp. (°C)	Curing period (Day)					
		3	7	14	28	56	91
80	20	42.64	63.70	76.44	87.00	92.82	95.49
	50	67.80	80.00	87.00	90.80	91.10	91.40
	80	75.00	86.00	93.00	93.50	93.80	94.00

초기재령의 압축강도 발현율이 높게 나타났지만, 56, 91일 재령에서는 28일 재령의 압축강도와 큰 차이를 없는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 초기에 높은 온도에 의해 콘크리트의 수화반응이 촉진되어 나타나는 현상인 것으로 판단된다[10].

양생방법에 따른 콘크리트의 압축강도를 28일 재령을 기준으로 하여 Figure 4에 나타내었다. 콘크리트 시험체의 압축강도 발현율은 양생온도의 영향을 크게 받았다. 양생온도가 높아질수록 초기재령에서 압축강도 발현율이 높아졌으며, 80°C의 경우 초기재령인 3일에서의 압축강도는 28일 재령의 압축강도의 약 80%의 발현율을 나타냈다.

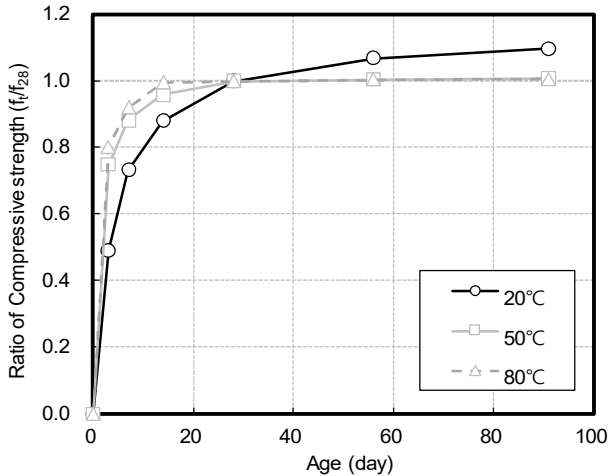


Figure 4. Ratio of compressive strength of concrete by curing method

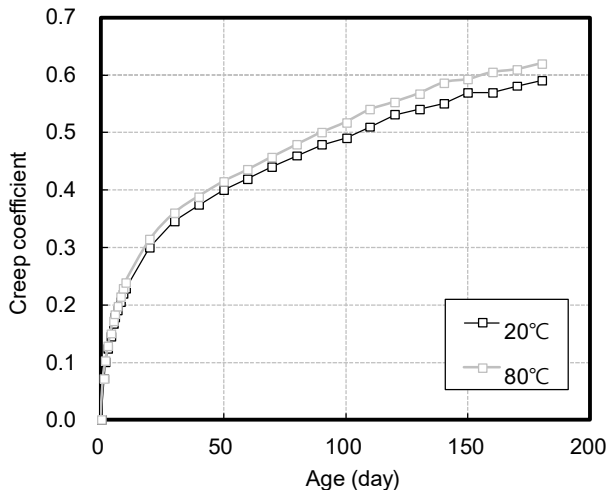


Figure 5. Differences in creep coefficients of concrete according to curing methods (180 days)

하지만, 양생온도 50, 80°C의 경우, 재령 28일 이후에는 압축강도의 발현율이 거의 없이 수렴하는 경향을 나타내어 양생온도 20°C의 압축강도가 더 높아지는 경향을 나타내었다.

양생온도에 따른 콘크리트의 크리프 계수 차이에 대해서 Figure 5에 나타내었다. 크리프 계수는 재령 180일 까지 측정된 결과값을 비교하였다. 양생온도 50°C는 80°C와 유사한 결과를 나타내었지만, 양생온도 80°C의 경우 20°C에서 양생된 경우보다 크리프 계수가 크게 측정되었다. 재령 180일에서 0.03의 차이를 나타내었으며, 크리프 변형이 수렴되기 이전까지는 재하재령이 지날수록 차이가 커질 것으로 생각된다.

이처럼 양생온도에 따라서 콘크리트의 압축강도 발현특성 및 크리프 계수는 차이가 발생하는 것을 실험적으로 확인하였다. 이는 같은 설계압축강도의 콘크리트에서도 차이를 나타낼 가능성이 있기 때문에, 대단위 부재에서는 수축량에 대한 예측에 있어서 수화열을 고려할 필요가 있다고 생각된다.

## 5. 국내 건설현장 콘크리트를 고려한 예측모델식 제안

### 5.1 실험계획 및 방법

콘크리트의 크리프 예측이 있어서 중요한 문제점 중 한 가지는 현장과 연계된 연구결과가 부족한 것이라고 생각된다. 실내시험을 통해 측정된 크리프 결과와 실구조물에 적용된 콘크리트의 크리프 거동이 큰 차이를 나타내고 있는 상황이다. 따라서 국내 건설현장에서 사용된 콘크리트를 통해 측정된 크리프 결과와 실내시험을 통해 측정된 크리프 결과를 이용하여 ACI-209모델을 수정할 필요성이 있다고 판단된다.

국내 건설현장 콘크리트를 고려하여 ACI-209모델을 수정하기 위한 실험의 콘크리트 배합을 Table 6에 나타내었다. 콘크리트 배합 중 일부는 실내에서 시험을 진행하였고, 그 외의 배합은 국내 서울, 부산, 인천, 대구, 고양, 아산 등에서 사용된 현장 레미콘 배합으로 현장에서 시험체를 제작하여 크리프 시험을 진행하였다. 압축강도에 따른 결과를 도출하기 위해 일반~고강도 콘크리트를 대상으로 선정하였으며, 시험체 제작과 크리프 시험은 3.1 실험계획 및 방법에서 기술한 바와 동일한 조건으로 진행되었다.

Table 6. Mix proportion of concrete

ID	W/B (%)	Slump (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )						
					W	C	BFS	FA	SF	S	G
80*	23.80	630 <sup>1)</sup>	1.80	45.10	155	481	0	130	39	697	874
80	23.80	640 <sup>1)</sup>	1.60	45.10	155	481	0	130	39	697	874
70*	27.20	660 <sup>1)</sup>	1.70	47.90	158	443	0	114	23	768	863
60*	29.60	650 <sup>1)</sup>	1.80	48.00	163	418	0	110	22	776	868
60	27	600 <sup>1)</sup>	2.50	45	163	392	121	91	0	702	864
50	29.60	580 <sup>1)</sup>	3.50	45.90	168	453	57	57	0	738	866
40	33.10	180	4.50	43.70	164	380	0	95	0	730	947
40	37	150	4	43	170	230	115	115	0	721	960
30	40.40	160	4.70	48.10	166	329	40	40	0	834	942
24*	50	150	4.50	46	180	180	90	90	0	784	924

\* Lab. test  
1) Slump flow

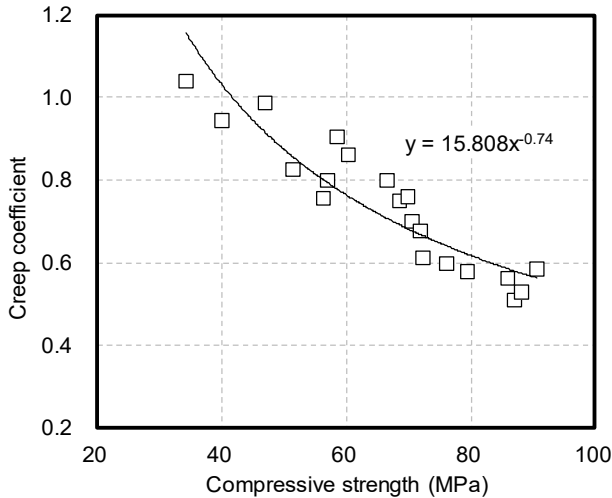


Figure 6. Creep coefficient (90days) of concrete

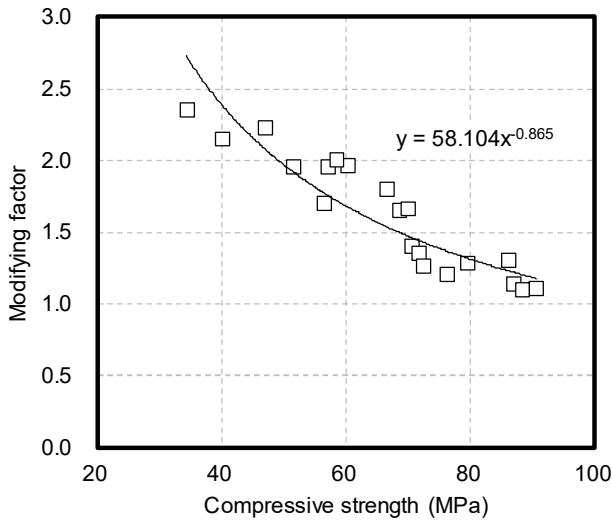


Figure 7. Modified factor of creep coefficient (at 28days)

## 5.2 실험결과 및 고찰

콘크리트의 압축강도에 따른 재하재령 90일에서의 크리프 계수를 Figure 6에 나타내었다. 실내시험 및 현장 레미콘 배합에 관계없이 압축강도가 높을수록 재하재령 90일에서의 크리프 계수가 크게 작아지는 경향을 나타냈다. 이러한 현상은 기존연구에서 제시하고 있는 결과와 유사하다. 압축강도가 높을수록 크리프 계수가 작게 나타나고, ACI-209모델에 통해 분석할 경우 실측값에 비해 높게 평가되는 결과를 나타내는 것으로 보고하고 있다[9].

재하재령 90일에서의 크리프 실측값은 ACI-209모델 분석값과 차이가 있다는 것을 확인할 수 있었으며, 기존 ACI 모델을 기동축소량 해석에 그대로 적용하기에는 국내

현장 레미콘 배합의 특성을 반영하는 것이 한계가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 ACI-209모델에서 사용되는 극한 크리프계수 2.35에 대해 일반~고강도 콘크리트의 크리프 실측값을 바탕으로 국내 건설현장 및 실내데이터를 고려한 최적값으로 수정 도출하였고, 최종 예측모델로 제안하고자 하였다. 이를 식으로 도출하면 Figure 7 및 식 (4), (5)와 같다.

$$v_u = \alpha \cdot \gamma_c \quad \text{-----} \quad (4)$$

$$\alpha = 15.828(f_{28})^{-0.74} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$v_u$  : 수정제안된 극한 크리프 계수 (예측 제안 모델)

$\alpha$  : 수정된 상수 (압축강도 반영)

$f_{28}$  : 28일 압축강도 (MPa)

## 6. 결 론

콘크리트의 크리프 예측에 대한 요인으로 크리프 시험기간, 양생온도의 영향을 검토하고 국내 건설현장에서 사용된 현장 콘크리트의 크리프 평가결과를 이용하여 기존 크리프 모델을 검토한 결과 다음과 같다.

- 1) ACI-209모델을 이용한 콘크리트의 크리프 계수 예측결과는 크리프 측정기간의 영향을 크게 받으며, 재령 28일에 측정된 압축강도의 40%를 재하하는 경우 압축강도가 높아질수록 실측값과 예측값의 차이가 작아지는 것을 확인했다.
- 2) 양생온도는 콘크리트의 내부구조 형성에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 이는 크리프 거동에 직접적인 영향을 주기 때문에 수축량 예측에 있어서 수화열에 대한 고려가 필요하다고 생각된다.
- 3) 기존의 ACI-209모델은 실내시험 및 국내 현장 레미콘 배합의 특성을 반영하기는 어려운 것으로 판단되며, 일반~고강도 콘크리트의 크리프 실측값을 통하여 모델에서 사용되는 극한크리프계수의 제안식을 도출하였다.

## 요 약

최근 RC 구조물의 건설기술에서는 콘크리트의 크리프

에 대한 검토가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 콘크리트의 크리프 예측 및 국내 건설현장의 크리프 결과에 영향을 미치는 요인을 검토했다. 크리프 테스트 기간이 길고 압축 강도가 높을수록 크리프 예측 정확도가 높아졌다. 경화 온도가 높을수록 콘크리트의 초기 강도가 높아지지만 크리프 계수의 차이는 시간이 지남에 따라 증가했다. 국내 건설현장 및 실험실에서의 크리프 평가 결과를 기반으로 ACI-209모델을 보완하는 수정된 예측 모델을 제안했다. 일반~고강도 콘크리트를 사용한 실제 부재의 크리프 예측에서는 테스트 기간과 온도를 정확하게 고려해야 한다.

**키워드** : 고강도 콘크리트, 크리프 계수, 수화열, 압축 강도, 국내 건설현장의 콘크리트 배합

## Funding

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant 19SCIP-B146646-02).

## ORCID

Hyung-Jae Moon, <http://orcid/0000-0003-3965-619X>

Won-Kyun Seok, <http://orcid/0000-0002-6120-7350>

Kyung-Mo Koo, <http://orcid/0000-0003-1264-8077>

Sang-Kyu Lee, <http://orcid/0000-0003-2318-3949>

Eui-Chul Hwang, <http://orcid/0000-0002-8503-671X>

Gyu-yong Kim, <http://orcid/0000-0002-8662-8899>

## References

- Kim SW, Koh KT, Song YC, Park HS. Estimation method of drying shrinkage and creep in concrete structures, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2005 Jul;17(4):25-33. <https://doi.org/10.22636/MKCI.2005.17.4.25>
- Bazant ZP, Baweja S. Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage 1- Statistics and sensitivity, Materials and structures, 1995 Aug;28(7):415-30. <https://doi.org/10.1007/BF02473078>
- Moon JH, Evaluation of creep models with the consideration of concrete's strength level, Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2010 Jul;14(4): 154-9. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2010.14.4.154>
- Jonasson JE, Persson B. The consortium for research of hpc structures. Creep design handbook, Sweden: Lulea Technical University; 1998. p. 7-17.
- Persson B. Hydration and strength of high performance concrete, Advanced Cement Based Materials, 1996 Apr-May;3(3-4):107-23. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90043-7](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90043-7)
- Persson B. Self-desiccation and its importance in concrete technology, Materials and Structures, 1997 Jun;30(5):293-305. <https://doi.org/10.1007/BF02486354>
- Persson B. Correlating laboratory and field tests of creep in high-performance concrete, Cement and concrete Research, 2001 Mar;31(3):389-95. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00455-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00455-0)
- Oh BH, Lee MG, Yoo SW, Baik SH. A study on the strength and drying shrinkage crack control characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, 1996 Dec;8(6):151-61. <https://doi.org/10.22636/MKCI.1996.8.6.151>
- ACI Committee 209R-92, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, American Concrete Institute; 1997. 47 p.
- CEB-FIP model code, Comite euro-international du beton & Fédération internationale de la précontrainte, 1993.
- European Committee for Standardization, EN 1992-1-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- Bazant ZP, Murphy WP. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures-model B3, Matériaux et constructions, 1995 Jul;28(180):357-65.
- Moon HJ, Koo KM, Kim HS, Seok WK, Lee BG, Kim GY. Suggestion of the prediction model for material properties and creep of 60~80MPa grade high strength concrete, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2018 Oct;18(6): 517-25. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2018.18.6.517>
- Mun JS, Yang KH, Kim DG. Evaluation on in-site compressive strength of high-strength concrete mass elements under cold weather, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2015 Aug;15(6):589-95. <http://doi.org/10.5345/JKIBC.2015.15.6.589>