



# 100 MPa급 고강도 콘크리트의 크리프 특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Creep Characteristics of High Strength Concrete of 100 MPa

이주하\* · 최락준\*\* · 권형철\*\*\* · 민경환\*\*\*\*

Lee, Joo Ha\*, Choi, Rock Jun\*\*, Kwon, Hyung Cheol\*\*\*, and Min, Kyung Hwan\*\*\*\*

### Abstract

For the creep, which is a time-dependent behavior of concrete, each country presents the predictions through experiments, but this is not suitable for high-strength concrete because it is optimized for general strength concrete. Therefore, in this study, creep tests were performed on 40 MPa, 100 MPa high strength concrete. To determine the creep characteristics of high-strength concrete, strength, loading age and shape of specimen were set as variables. As a result, it was found that the creep was more occurred as the strength of concrete decreased, the faster loading age, and the more creep occurred in the cylinder type specimen compared to the prism type specimen. In addition, the experimental results were compared to the creep prediction models.

**Key words :** High-Strength Concrete, Creep Prediction Model, Creep Coefficient

### 요 지

콘크리트의 시간의존적 거동인 크리프에 대해서 각 나라에서는 실험을 통한 예측식들을 제시하고 있지만 이는 일반강도 콘크리트에 최적화되어 있어 고강도 콘크리트에 적용하기에는 적절하지 않다. 따라서 본 연구에서는 40 MPa, 100 MPa 고강도 콘크리트에 대한 크리프 실험을 수행하였다. 고강도 콘크리트의 크리프 특성을 파악하기 위하여 강도, 재하시기, 형상비를 변수로 설정하였다. 그 결과, 콘크리트의 강도가 작을수록, 재하시기가 빠를수록 더 많은 크리프가 발생하였으며, Prism형 공시체에 비해 Cylinder형 공시체에서 더 많은 크리프가 발생하는 경향을 나타냈다. 이에 더하여 실험 결과와 국내외 크리프계수 예측식과의 비교·분석을 수행하였다.

**핵심용어 :** 고강도 콘크리트, 크리프예측식, 크리프계수

## 1. 서 론

최근에는 구조물의 대형화, 고층화, 장대화 및 특수 구조물의 건설이 증가됨에 따라 고강도 콘크리트의 적용이 요구되고 있다. 그러나 콘크리트의 장기거동의 주요인자 중 하나인 크리프에 대한 특성이 특정되지 않아 실용화에 어려움을 겪고 있다. 콘크리트의 크리프에 대한 연구는 지금까지도

몇몇의 연구자들에 의해서 실시되어지고 있지만 크리프 현상의 발생 원인은 아직까지도 명확하게 밝혀져 있지 않은 상황이다.

대표적인 예측식으로는 KCI2011, ACI209R-92, CEB-MC 90-99, B3, GL2000 등의 식이 있다. 이러한 예측식들 사이에서도 크리프를 예측함에 있어 고려하는 인자가 각기 다르다. 따라서, 본 논문에서는 고강도 콘크리트의 적용을 위한 기초

\*정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 조교수, 하천환경기술연구소 연구소장(E-mail: [leejooha@suwon.ac.kr](mailto:leejooha@suwon.ac.kr))

Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Director, Institute of River Environmental Technology, The University of Suwon

\*\*㈜한맥기술 사원

Employee, HANMAC Engineering Co., Ltd

\*\*\*수원대학교 토목공학과 석사

Master, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

\*\*\*\*교신저자, 정회원, 충남대학교 철도연구소 연구교수(Tel: +82-42-821-7749, Fax: +82-42-821-8867, E-mail: [alskh@cnu.ac.kr](mailto:alskh@cnu.ac.kr))

Corresponding Author, Member, Research Professor, Rail Research Institute, Chungnam National University

데이터 확보를 위하여 강도, 재하시기, 형상비를 변수로 고강도 콘크리트의 장기변형 특성인 크리프 및 건조수축에 대한 실험을 수행하고 크리프계수 예측식을 사용하여 고강도 콘크리트의 장기거동 특성을 비교하였다.

## 2. 실험변수

실험변수로는 강도, 재하시기, 형상비를 선정하였으며 Table 1에 나타내었다. 실험변수의 표기는 강도-재하시기-공시체형상 순으로 표기하였으며 강도변수로 40 MPa, 100 MPa로 선정하여 고강도 콘크리트의 크리프 데이터를 확보하고자 하였다. 재하시기 변수로는 7일, 28일을 선정하여 건설현장에서 주로 사용되는 증기양생 1~3일에 해당하는 강도발현 상태에서의 크리프특성을 관찰하고자 하였으며, 형상비변수로는  $\Phi 100$  Cylinder형과  $88.5 \times 88.5 \times 177$  mm의 Prism형으로 나누어 공시체의 부피와 외기와 접하는 면을 같게 설정하여 공시체 형상에 대한 크리프 특성을 관찰하고자 하였다.

**Table 1.** Parameter of Creep Test

Division	Strength (MPa)		Loading Time (Days)		Volume Surface (mm)	
	40	100	7	28	Cylinder	Prism
					50	44.25
40-28-Cy	•			•	•	
100-7-Cy		•	•		•	
100-28-Cy		•		•	•	
100-28-Pr		•		•		•

## 3. 배 합

예비배합 후 목표 강도발현이 이루어졌다고 판단되어 본 배합을 실시하였다. 본 배합에 실시된 배합표를 Table 2에 나타내었다. 배합에 사용된 잔골재는 세척사를 이용하였으며, 굵은골재는 치곡 13 mm치수의 골재를 사용하였다. 결합재의 구성 재료로는 보통포틀랜드 시멘트(밀도:  $3.15 \text{ g/cm}^3$ )와 플라이애쉬(밀도:  $2.20 \text{ g/cm}^3$ ), 지르코니아 실리카흙(밀도:  $2.20 \text{ g/cm}^3$ ), 무수석고( $3.00 \text{ g/cm}^3$ )가 사용되었으며 고성능감수제로는 국내 D사의 제품을 사용하였다.

**Table 2.** Binder Ratio

Strength (MPa)	W/B (%)	W ( $\text{kg/m}^3$ )	C:Fa:ZSF*:BFS**	S/a (%)
40	50.0	170	85 : 15 : 0 : 0	46
100	17.0	155	65 : 0 : 15 : 20	40

\*Zirconia Silica Fume

\*\*Anhydrite

## 4. 실험 방법

크리프 실험은 국내 표준시험법 규정에 따라 KS F 2453에 준하여 수행되었으며, Cylinder형과 Prism형 공시체 제작을 위하여 압축강도용 몰드( $\Phi 100 \times 200$ )와 목재거푸집( $88.5 \times 88.5 \times 177$ )에 매립게이지를 설치하였다. 매립게이지는 몰드의 정중앙에 위치시켰으며, 타설시 매립게이지의 수직도에 유의하며 타설을 실시하였다. 타설 후 탈형 전까지 ( $20 \pm 2$ ) °C의 온도를 유지하고, 수분의 증발을 방지하기 위하여 습윤 상태로 보관하였다. 탈형 후 항온수조에 변수별로 각각 7일과 28일 동안 수증양생을 실시하였다. 양생 후 압축강도와 탄성계수 측정 실험을 실시하고 측정된 압축강도의 40%의 하중을 재하여 크리프실험을 진행하였다. 크리프실험은 온도 ( $20 \pm 2$ ) °C와 상대습도 ( $50 \pm 4$ ) %가 유지되는 항온항습실에서 230일 동안 진행되었으며 180일 이후에는 하중을 제거하고 50일간 크리프회복을 측정하였다. 또한 매립게이지의 보정을 위하여 크리프 시험체 측면에 데택게이지를 150 mm간격으로 부착하였다. 순수크리프량 측정을 위하여 건조수축 실험을 동시에 수행하였으며 크리프와 건조수축이 함께 일어나는 시간의존적 변형과 시간의존적 변형에서 건조수축량을 제외한 순수크리프량으로 장기거동 특성을 파악하고자 하였다.

## 5. 실험 결과 및 분석

### 5.1 압축강도 및 탄성계수

압축강도와 탄성계수를 7일과 28일 재령에서 측정하였다. 압축강도는 각 재령에서 압축강도용으로 3개의 시험체가 제작되었다. 단, Prism형 시험체는 하중재하 시점인 28일 재령에서의 시험체만 제작되었다. 압축강도의 측정은 200 t급 UTM으로 측정되었다. 탄성계수는 공시체의 양쪽 측면에 콘크리트용 스트레인게이지를 부착하고 공시체와 UTM의 사이에 로드셀을 위치시켜 압축강도시험과 동시에 종방향 변형률과 하중을 측정한 후 ASTM에서 제시하는 Eq. (1)로 계산되었다.

$$E_c = \frac{f_2 - f_1}{\epsilon_2 - 0.000050} \quad (1)$$

여기서,

$f_1$  = 종방향변형률  $50 \times 10^{-6}$ 에 대한 응력

$f_2$  = 극한하중의 40% 하중에 대한 응력(MPa)

$\epsilon_2$  = 응력  $f_2$ 로 생긴 종방향변형률

압축강도는 7일, 28일, 90일에 측정되었으며 각 시험체에서 28일 시점에서 목표 배합강도에 모두 만족하였다. 압축강도와 탄성계수 측정결과를 Tables 3과 4에 나타내었다.

**Table 3.** Comp. Strength

Age (Days)	Comp. Strength(MPa)		
	40-28-Cy	100-28-Cy	100-28-Pr
7	24.76	90.66	-
28	37.37	98.97	108.65
90	40.28	108.59	-

**Table 4.** Modulus of Elasticity

Age (Days)	Modulus of Elasticity(MPa)		
	40-28-Cy	100-28-Cy	100-28-Pr
7	23121	37766	-
28	26521	43847	45235
90	25294	44199	-

## 5.2 시간의존적 변형

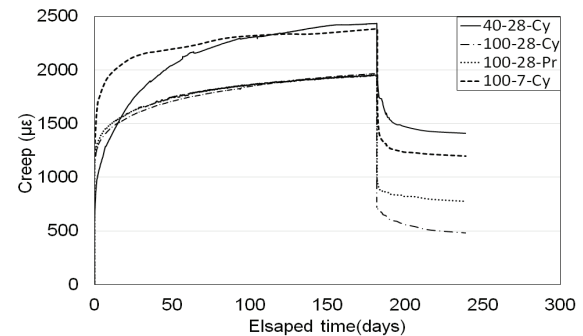
Fig. 1에 각각의 시험체별 하중재하 이후 180일까지의 시간의존적 변형을 나타내었으며 180일 이후의 크리프회복 (creep recovery) 또한 같이 나타내었다. 하중재하 이후 180일간 최종 시간의존적 변형은 40-28-Cy 시험체와 100-7-Cy 시험체 각각 2434  $\mu\epsilon$ 과 2381  $\mu\epsilon$ 로 50  $\mu\epsilon$  정도로 미세한 차이를 보였다. 이는 100-7-Cy 시험체가 완전히 경화되지 않아 하중재하 초기에 많은 변형이 일어난 것으로 판단된다. 그 외에 100-28-Cy와 100-28-Pr 시험체의 최종 시간의존적 변형은 각각 1966  $\mu\epsilon$ 과 1943  $\mu\epsilon$  정도로 비슷한 수준의 변형이 일어났다. 하중을 제거하였을 때 탄성회복(elastic recovery)은 40-28-Cy, 100-7-Cy, 100-28-Cy, 100-28-Pr 시험체 모두 탄성 변형과 유사하게 나타났다.

크리프회복은 실제 콘크리트 구조물에서 응력의 감소가 발생하는 경우 나타나며 지속하중이 간헐적으로 제거되거나 또는 장대교량의 시공중에 나타나게 된다. 예를 들어 하중재하 이후의 시공시의 가설재의 제거에 따른 응력 감소와 PSC연속교량의 연속적인 긴장력도입에 의한 응력감소를 들 수 있다(Kim et al., 1999). 본 크리프실험에서는 콘크리트 강도 차이에 따른 크리프회복의 차이를 확인하기 위하여 실시하였으며 50일간 측정된 크리프회복을 Table 5에 나타

**Table 5.** Elastic Strain, Recovery and Creep Recovery

Division	Total Time Dependent Deformation ( $\mu\epsilon$ )	Elastic Strain ( $\mu\epsilon$ )	Elastic Recovery ( $\mu\epsilon$ )	Creep Recovery ( $\mu\epsilon$ )	Recoverable Strain (Recovery/Total)
40-28-Cy	2434	566	688	335	0.42
100-7-Cy	2381	1019	1053	220	0.53
100-28-Cy	1966	1107	1162	225	0.70
100-28-Pr	1943	1081	977	131	0.57

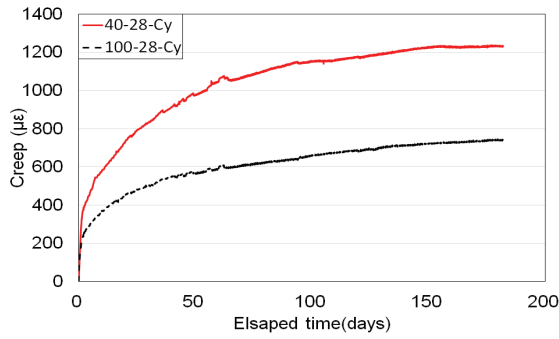
내었으며 각각 40-28-Cy, 100-7-Cy, 100-28-Cy, 100-28-Pr 시험체에서 335  $\mu\epsilon$ , 220  $\mu\epsilon$ , 225  $\mu\epsilon$ , 131  $\mu\epsilon$ 씩 크리프 회복이 발생하였다. 따라서 총 시간의존적변형 대비 42 %, 53 %, 70 %, 57 %의 크리프회복이 발생하였다. 기존의 50 MPa급 콘크리트에서 50~60 %의 크리프회복이 발생한다는 연구결과(Tang et al., 2014)와 비슷한 양상을 보였으나 고강도 콘크리트에서는 70%의 크리프회복이 발생하였다. 이는 고강도 콘크리트가 상대적으로 탄성계수가 높기 때문에 회복 또한 많이 발생한 것으로 판단된다.

**Fig. 1.** Time Dependent Deformation

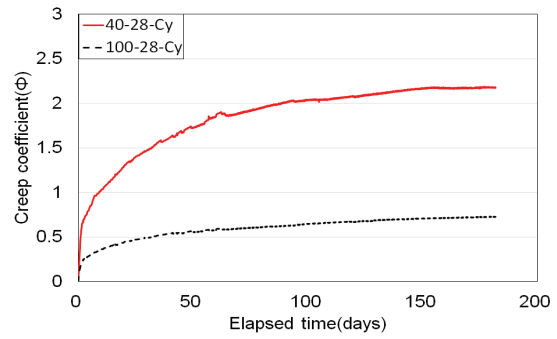
## 5.3 강도변수

변수별 실험 결과는 하중 재하이후 180일간의 크리프거동을 관찰하였으며 앞서 서술하였던 바와 같이 순수크리프량을 측정하였고 순수크리프량을 탄성변형률과 탄성계수로 나눈 크리프계수에 대하여 비교분석이 이루어졌다. 시험체 별로 크리프량과 크리프 계수 비교 그래프를 Fig. 2에 나타내었다. 하중재하 이후 180일 경과 시점에서 크리프량 비교시 40-28-Cy 시험체가 100-28-Cy 시험체보다 순수크리프량이 1.6배 더 크게 발생하였다. 발생크리프량 비교시 기존의 100 MPa 이하의 90 MPa급 콘크리트의 크리프 연구결과와 유사한 값을 나타내고 있었다(Townsend, 2003). 크리프계수 비교시 40-28-Cy 시험체가 100-28-Cy 시험체보다 3.2배 더 크게 크리프계수가 발생하고 있었다.

시험체의 크리프계수와 예측식과의 비교를 Fig. 3에 나타내었다. 크리프계수에 대해서는 B3, GL2000, KCI2012의

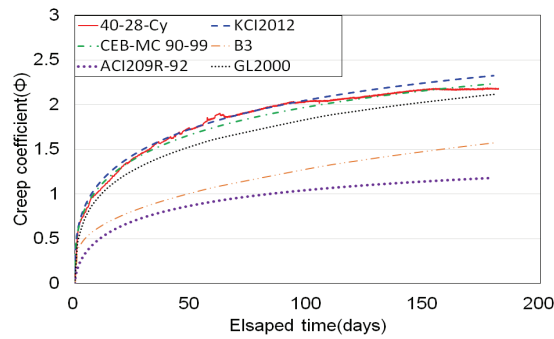


(a) Creep Result

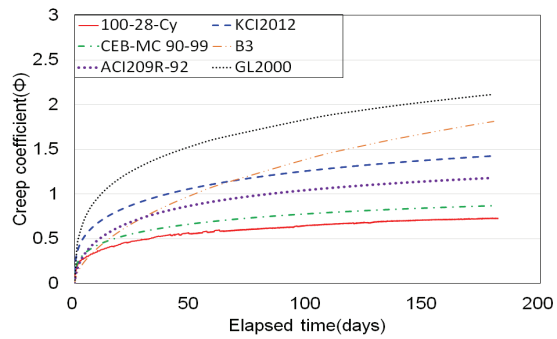


(b) Creep Coefficient Result

Fig. 2. Comparison of Strength Variables



(a) Creep Coefficient Results of 40-28-Cy



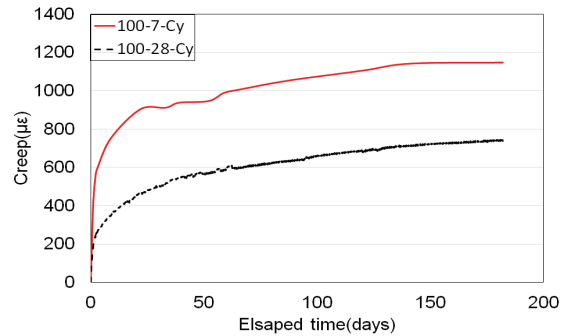
(b) Creep Coefficient Results of 100-28-Cy

Fig. 3. Comparing with Prediction Models

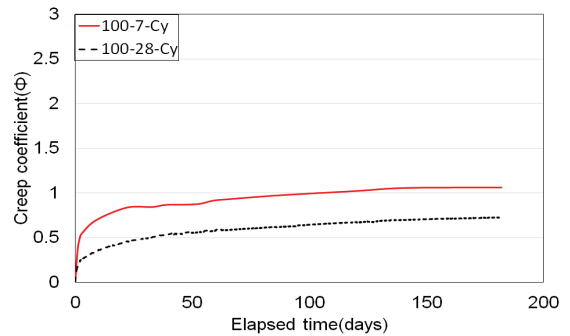
크리프 예측식과 고강도에 대한 보정계수가 추가된 CEB-MC 90-99 및 ACI209R-92 예측식간의 비교가 이루어졌다. 비교 결과 40-28-Cy 시험체에서는 GL2000 예측식도 유사하게 예측하고 있었지만 KCI2012 및 CEB-MC 90-99 예측식이 거의 유사하게 예측하고 있었다. 반면에 ACI209R-92 및 B3 예측식은 타 기준들에 비해 약 50 % 수준으로 예측하고 있었다. 100-28-Cy 시험체의 크리프 예측식 비교시 CEB-MC 90-99 예측식이 가장 유사하게 예측하고 있으며, 반면에 KCI2012, ACI209R-92, B3, GL2000 예측식은 모두 보수적으로 예측하고 있음을 확인할 수 있었다. 고강도 콘크리트에 대해서는 비교적 최신모델인 B3, GL2000 예측식이 180일 시점에서도 예측크리프계수가 계속 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 5.4 재하시기변수

재하시기에 따른 하중재하 이후의 발생한 크리프량과 크리프 계수 비교 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 재하시기에 대하여 하중재하 이후 발생 순수크리프량은 100-7-Cy 시험체가 100-28-Cy 시험체보다 1.5배 더 크게 발생하였다. 재하 시기별 크리프 계수 비교시 100-7-Cy 시험체가 100-28-Cy 시험체보다 1.6배 더 크게 크리프계수가 발생하고 있었다.



(a) Creep Result



(b) Creep Coefficient Result

Fig. 4. Comparison of Loding Age Variables

시험체의 크리프계수와 예측식과의 비교를 Fig. 5에 나타내었다. 100-7-Cy 시험체의 크리프예측식 비교시 KCI2012 예측식보다 CEB-MC 90-99 및 ACI209R-92 예측식이 더 유사하게 예측하고 있었다. 따라서 국내 KCI2012 예측식은 재하시기에 대하여 타 기준들보다 보수적으로 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

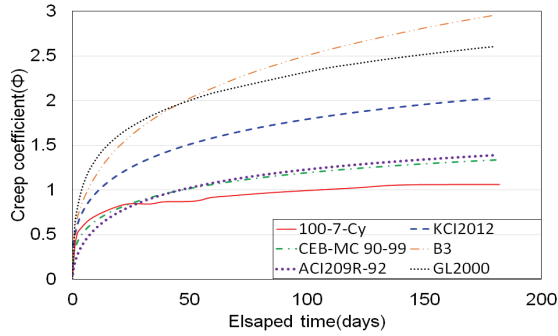
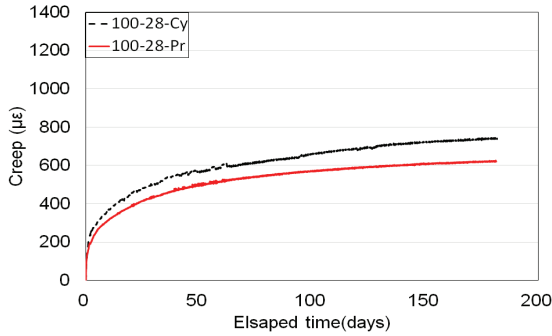


Fig. 5. Comparing Creep Coefficient Results of 100-7-Cy with Prediction Models

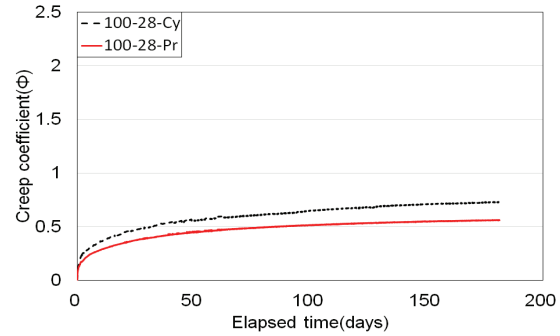
## 5.5 형상변수

공시체형상에 대한 하중재하 이후의 발생한 크리프량과 크리프 계수 비교 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 발생 순수크리프량은 100-28-Cy 시험체가 100-28-Pr 시험체보다 1.1배 더 크게 발생하고 있었다. 크리프계수 비교시 100-28-Cy 시험체가 100-28-Pr 시험체보다 1.3배 더 크게 발생하고 있었다. 크리프계수 예측식과 비교시 CEB-MC 90-99 예측식이 가장 유사하게 예측하고 있음을 확인할 수 있었으며, 국내 예측식과 ACI예측식이 모두 보수적으로 예측하고 있었다.

Prism형 공시체와 Cylinder형 공시체의 형상비는 각각 44.25 mm, 50 mm로 Cylinder형에서 미소하지만 더 많은 크리프가 발생하였다. 이러한 결과는 Pan의 연구결과와 유사한 경향으로 나타났다(Pan and Meng, 2016). 반면에 Fig. 8과 같이 Prism형 시험체는 하중을 받는 유효면적이 Cylinder형보다 작기 때문에 동일한 하중에서 유효하중을 더 많이 받게 되어 Prism형이 Cylinder형보다 상대적으로 더 높게 크리프가 발생한다는 기존연구(Ham et al., 2012)와는 상이한 경향을 나타냈으나 형상변수에 따른 결과값 차이는 강도 및 재하시기에 비하여 큰 차이를 보이지 않았다고 판단하였다.



(a) Creep Result



(b) Creep Coefficient Result

Fig. 6. Comparison of Shape of Specimen Variables

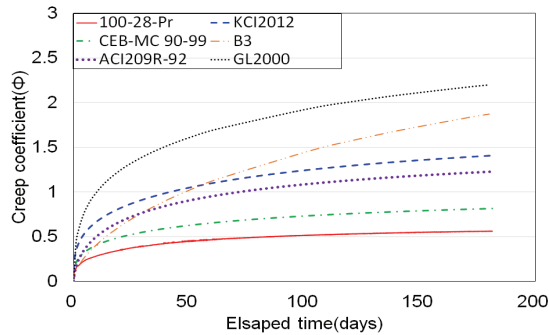


Fig. 7. Comparing Creep Coefficient Results of 100-28-Pr with Prediction Models

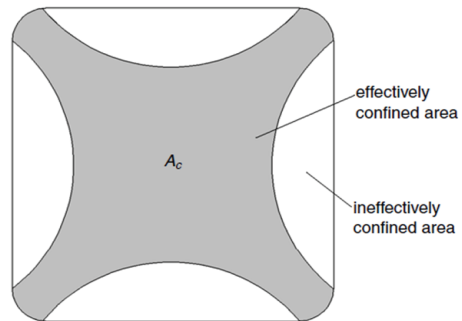


Fig. 8. Effectively Confined Area



## 6. 결 론

본 연구에서는 고강도 콘크리트의 적용을 위한 장기거동 기초 데이터 확보를 위하여 실시된 강도 재하시기, 형상비에 대한 크리프 실험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 크리프 실험결과 고강도로 갈수록 국내의 크리프 예측식보다 고강도에 대한 보정이 이루어진 CEB-MC 90-99 예측식이 더 정확하게 예측하고 있었다. 따라서 향후 고강도 콘크리트의 시공이 이루어지려면 국내 크리프 예측식에서도 고강도 콘크리트에 대한 보정으로 더 정확한 크리프 예측식이 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 재하시기에 대한 크리프 실험결과 ACI209 R-92 및 CEB-MC 90-99 예측식이 결과값과 유사하게 예측하고 있었으며, KCI2012 예측식은 재하시기에 대하여 타 기준보다 보수적으로 예측하고 있었다. KCI2012 예측식에서도 재하시기에 대하여 추가적인 보정이 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 부피와 외기와 맞닿는 면적을 같게 제작한 공시체형상 변수 크리프 실험결과 공시체형상에 의한 크리프, 크리프계수는 각각 1.1배, 1.3배로 나타났으며 큰 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 기존의 연구자들과 같은 결과이며 공시체형상에 따른 건조수축의 영향이 크리프의 차이를 만드는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ham, E.Y., Kim, G.Y., Koo, K.M., Moon, H.J., Kim, G.D., and Heo, J.U. (2012) Evaluation of the Properties of Creep on High Strength Concrete according to Loading and Curing Condition. *Proceedings of 2012 Korea Concrete Institute Conference*, Vol. 24, No. 2, pp. 463-464.
- Kim, S.H., and Oh, B.H. (1999) Time-dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Structures Incorporating Creep Recovery Function. *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 11, No. 1, pp. 279-288.
- KS F 2453. Standard Test Method For Creep of Concrete in Compression, Korean Standards Service Network.
- Pan, Z., and Meng, S. (2016) Three-Level Experimental Approach for Creep and Shrinkage of High-Strength High-Performance Concrete. *Engineering Structures*, Vol. 120, pp. 23-36.
- Tang, W.C., Cui, H.Z., and Wu, M. (2014) Creep and Creep Recovery Properties of Polystyrene Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 51, pp. 338-343.
- Townsend, B.D. (2003) *Creep and Shrinkage of a High Strength Concrete Mixture*. Master's thesis, The Virginia Polytechnic Institute and State University.

---

Received	October 10, 2017
Revised	October 13, 2017
Accepted	October 27, 2017