

콘크리트 강도대별 크리프 예측모델 평가

Evaluation of Creep Models with the Consideration of Concrete's Strength Level

문재흠^{1)*}

Moon, Jae Heum

Abstract

Recent concrete structures have been being constructed with higher strength concrete than normal strength concrete. Therefore, it is necessary to review the applicabilities of current design codes and models for the prediction of mechanical behaviors of concrete materials such as creep. To investigate the applicability of creep model with the consideration of the strength level of concrete, three current models (ACI 209R, CEB-FIP MC90 and EC2) were studied and compared with series of experimental results. It was shown that EC2 model which is the updated model of CEB-FIP MC90 better predicts creep coefficient for high strength level concretes and showed relatively good agreements with experimental data.

Keywords : Creep, Creep coefficient, Creep model, ACI 209R, CEB-FIP MC90, EC2

1. 서론

콘크리트의 크리프는 교량과 같은 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 설계 및 유지관리시 반드시 고려하여야 하는 항목이다. 이러한 크리프 거동에 따른 크리프 변형률을 설계 또는 구조 해석시에 반영하기 위하여 크리프계수를 예측하여 적용하는 방식을 취하고 있으며 크리프계수는 콘크리트의 강도, 부재의 크기 및 형상, 온습도조건, 하중재하시기 및 재하 하중크기 등과 같은 여러 변수의 영향에 따라 변화하게 된다(Neville, 1995).

한편, 현행 콘크리트 구조설계기준서상의 크리프 모델식은 CEB-FIP 1990 Model Code (1992) (이하 MC90으로 칭함)를 따른 것으로 기존의 ACI 209R (ACI 209R-02) 모델 (이하 209R로 칭함)에 기반한 예측식과는 큰 차이점을 보여주고 있다. 또한, MC90 모델식은 유럽을 중심으로 시행한 시험결과에 기반하였기 때문에 우리나라에서 사용하는 시멘트의 종류 및 그 사용량이 다르므로 오차가 존재할 수 있으며, 최근에는 유럽연합 설계기준인 EuroCode 2 (2004) 에서 형식은 비슷하나 예측값이 약간 조정된 모델식 (이하 EC2로 칭함)을 제시하고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 현행 구조설계기준(2007) 상의 크리프 모델식의 특성 검토를 위하여 상

기 모델식의 비교검토를 수행하였으며, 강도대별 콘크리트의 크리프 시험결과와의 비교를 통하여 모델의 적정성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 크리프 모델식 검토

콘크리트에 시점 t' 부터 응력 $f_c(t')$ 의 하중이 작용할 경우 t 시점에서의 총변형률($\epsilon_{cr}(t, t')$)은 기본적으로 식 (1)과 같이 탄성변형률 항목과 크리프변형률 항목의 합으로 나타낸다.

$$\epsilon_{cr}(t, t') = f_c(t') \left[\frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{ci}} \right] \quad (1)$$

$$E_{ci} = 10,000 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2)$$

여기서 E_{ci} 는 콘크리트의 초기 접선탄성계수를 나타내며 현행 구조설계기준상의 계산식은 식(2)와 같다. 한편, $\phi(t, t')$ 는 크리프계수를 나타내며, 이러한 크리프계수는 시간에 따라 변화하는 함수로서, 서론에서 밝힌 바와 같

1) 정회원, 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

* Corresponding author : mjh4190@kcl.re.kr, 02-3415-8855

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 콘크리트의 역학적 특성 뿐만 아니라 환경조건 및 하중조건 등 매우 많은 인자들의 영향을 받게 되며, 이를 예측하기 위한 많은 모델식들이 개발, 개선되어져 오고 있으며, 대표적인 모델로 209R, MC90 및 EC2 등이 있다.

209R 모델은 크리프계수 ν_t 를 예측함에 있어서 식(3)을 제시하고 있으며, 하중재하기간 t에 따른 극한크리프계수 ν_u 를 적용하고 있다.

$$\nu_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \nu_u \quad (3)$$

$$\nu_u = 2.35 \gamma_c \quad (4)$$

$$\gamma_c = \gamma_{la} \times \gamma_\lambda \times \gamma_h \text{ (or } \gamma_{vs}) \times \gamma_s \times \gamma_\psi \times \gamma_\alpha \quad (5)$$

이때, 보정계수 γ_c 는 재하재령(γ_{la}), 상대습도(γ_λ), 부재평균두께(γ_h 또는 γ_{vs}), 슬럼프(γ_s), 잔골재율(γ_ψ) 및 공기량(γ_α)과 관련된 항목으로 구성되어져 있다.

MC90 모델은 식(6)과 같이 ϕ_o 및 $\beta_c(t, t_o)$ 의 함수로 구성되어져 있으며, 각 함수는 식(7) 및 (8)로 구성되어져 있다.

$$\phi(t, t_o) = \phi_o \beta_c(t, t_o) \quad (6)$$

$$\phi_o = \phi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_o) \quad (7)$$

$$\beta_c(t, t_o) = \left[\frac{(t - t_o)/t_1}{\beta_H + (t - t_o)/t_1} \right]^{0.3} \quad (8)$$

여기서, ϕ_{RH} 는 상대습도, 부재평균두께 및 부재평균강도와 관련된 함수로 구성되어있으며, $\beta(f_{cm})$ 은 부재평균강도(f_{cm})의 함수, $\beta(t_o)$ 는 하중재하시기의 함수 t_o 로 구성되어 있으며, 하중재하시기의 함수 t_o 는 하중재하시기 및 시멘트의 종류를 고려하고 있다. 또한 식(8)상의 β_H 는 부재평균두께, 상대습도 및 부재평균강도의 함수로 구성되어져 있다.

EC2 모델의 경우에 있어서는 우선적으로 일반적인 환경($-40^\circ\text{C} < T < 40^\circ\text{C}$, $40\% < \text{RH} < 100\%$)에서의 최종 크리프계수($\phi(\infty, t_o)$)를 구할 수 있는 Chart를 제시하고 있으며, 공식 또한 별도로 제시하고 있다. 제시된 공식은 MC90 모델과 거의 유사하나, 중요한 차이점으로는 ϕ_{RH} 및 β_H 함수를 구하는데 있어서 부재평균강도의 크기를 고려, 평균강도가 35 MPa 이상인 경우 별도의 공식을 제시하고 있다는 점이다.

이와 같이 상기의 모델들은 각각 주요한 고려대상 인자 및 변수를 정하여 크리프계수를 예측하고 있으며, 209R의 경우는 식(4)에 보이는 바와 같이 크리프계수의 극한값을 2.35로 주기 때문에 근본적으로 크리프계수가 그 이

상의 값을 가지는 것을 인정하지 않고 있다. 또한 209R 모델은 사용한 콘크리트의 강도와는 무관하게 크리프계수를 예측하는 방식을 취하고 있다. 이에 반하여 MC90 및 EC2 모델은 콘크리트의 평균강도를 기준으로 상대습도, 부재형상, 재하재령, 온도, 시멘트의 종류 등을 고려하여 예측값을 산정하는 방식으로 ACI의 제안모델인 209R과는 근본적인 접근방식에서 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

한편, 우리나라의 경우, 콘크리트 구조설계기준서상의 크리프 예측모델은 2007년도 개정 이전에는 ACI의 209R 모델에 기반한 예측식을 적용하였으나, 개정 이후에는 MC90모델에 기반한 예측식을 사용하고 있는 실정으로서 그 이유로는 국내 교량구조물의 대부분이 CEB-FIP 설계기준을 따르기 때문이다. (한국콘크리트학회, 2007)

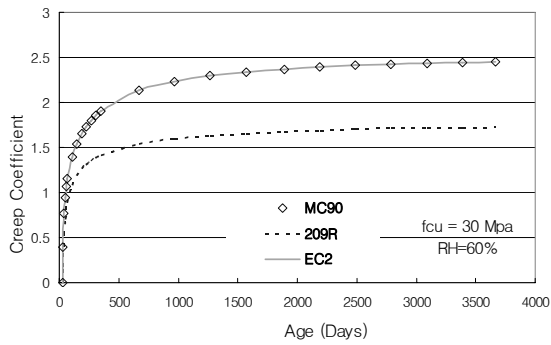
그러나 MC90 모델의 경우, 국내에서 사용하는 재료(즉, 시멘트 및 골재)의 종류 및 그 사용량이 고려되지 않은 모델이기 때문에 어느정도의 오차가 있을 것으로 예상되며, 특히 최근들어 유럽의 경우에 있어서도 MC90의 개선모델인 EC2 모델을 사용하고 있기 때문에 MC90 모델에 기반한 국내 설계기준 모델에 대한 재검토를 수행하여야 하는 시점이라고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 우선적으로 상기에 밝힌 각 크리프계수 예측 모델식을 가지고 강도대별 크리프계수를 예측한 결과를 검토하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 이때 가정된 사항은 하중재하시점 재령 28일, 상대습도 60%, 시험체는 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 원주형 공시체, 평균강도는 각각 30, 40, 50 및 60 MPa를 적용하였다. 또한 209R 모델의 경우 부가적인 가정사항으로 슬럼프 150mm, 잔골재율 0.47, 공기량 5%를 적용하였다. 한편, 국내 구조설계기준상의 모델은 MC90과 거의 동일한 모델인 관계로 비교검토에서는 생략하였다.

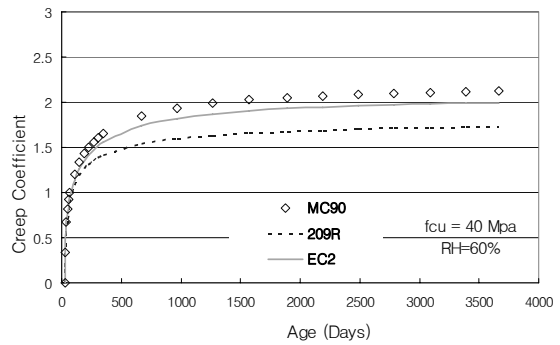
Fig. 1에 보이는 바와 같이 209R 모델의 경우 강도와 관련된 항목이 존재하지 않기 때문에 모든 강도대별로 동일한 크리프계수값을 예측함을 알 수 있으며, MC90과 EC2 모델은 강도가 증가함에 따라 크리프계수 예측치가 감소함을 알 수 있다. 또한, 보통강도영역의 경우에 있어서는 구조설계기준상의 모델과 EC2 모델이 209R 모델보다 높은 크리프계수를 가지며, 고강도대의 경우에는 점차적으로 반대의 경우를 가지게 됨을 확인할 수 있다. 한편, MC90과 EC2 모델은 보통강도 영역에서는 거의 비슷한 크리프계수 예측치를 제시하지만 고강도대에 있어서는 EC2 모델이 MC90보다 낮은 크리프계수 예측치를 제시함을 알 수 있다.

Fig. 2는 보통강도 30MPa과 고강도 60MPa 두가지 영역대에 있어서 상대습도의 변화(40 및 80%)에 따른 크리프계수 예측치를 비교한 결과를 보여주고 있다.

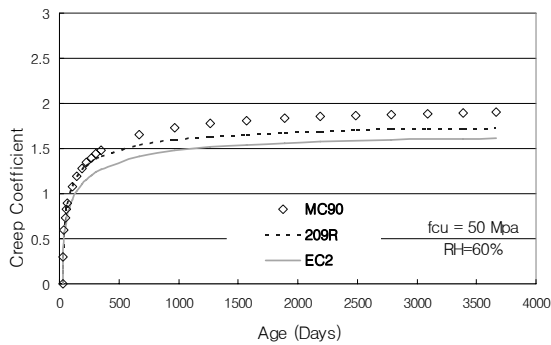
Fig. 2에서 보이는 바와 같이 모든 모델에 있어서 상대습도의 증가에 따라 크리프계수 예측치가 감소함을 알 수



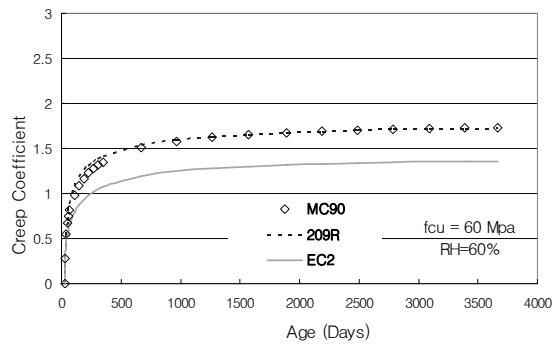
(a) Creep coefficient (fcu: 30MPa, RH: 60%)



(b) Creep coefficient (fcu: 40MPa, RH: 60%)

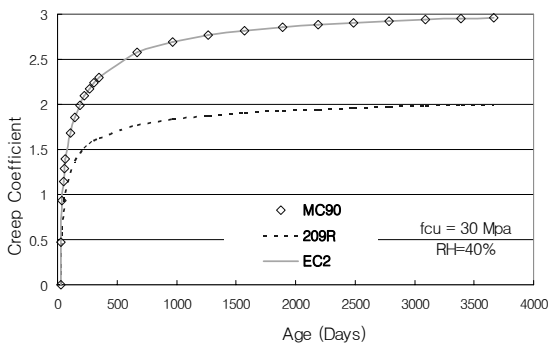


(c) Creep coefficient (fcu: 50MPa, RH: 60%)

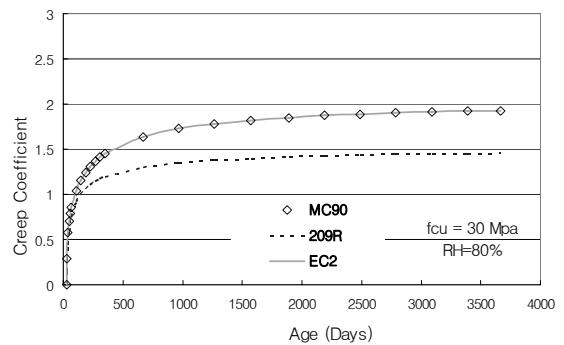


(d) Creep coefficient (fcu: 60MPa, RH: 60%)

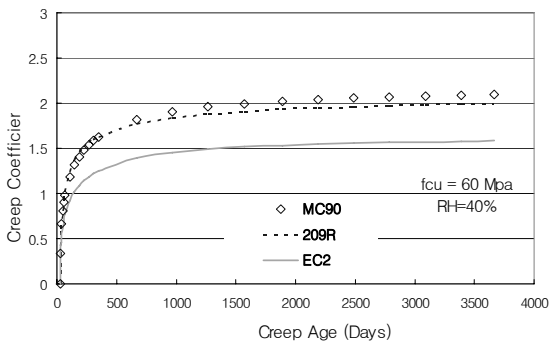
Fig. 1 Comparisons of Creep Models (with strength levels)



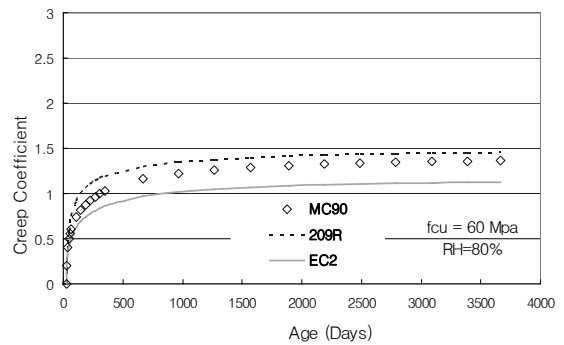
(a) Creep coefficient (fcu: 30MPa, RH: 40%)



(b) Creep coefficient (fcu: 30MPa, RH: 80%)



(c) Creep coefficient (fcu: 60MPa, RH: 40%)



(d) Creep coefficient (fcu: 60MPa, RH: 80%)

Fig. 2 Comparisons of Creep Models (with strength level and RH)

있다. 또한 209R 모델의 경우에는 상대습도의 변화에 따른 크리프계수 예측치가 1.5에서 2 정도 사이에서 변화하

지만 구조설계기준 및 EC2의 경우는 매우 큰 변화를 보임을 알 수 있다. 특히 보통강도 영역 및 낮은 상대습도

(RH=40%) 에서는 MC90 및 EC2 모델에서는 크리프계수 예측치가 3에 근접하는 매우 큰 값을 보임을 확인할 수 있으며, 이는 상기에서 밝힌바와 같이 209R 모델의 한계치인 2.35를 넘는 값을 알 수 있다.

이와 같이 209R 모델식의 경우 콘크리트 강도의 영향을 무시하며, 상대습도의 영향을 고려하는데 있어서 MC90 모델 및 EC2 모델에 비하여 상대적으로 변동성을 낮게 보고 있음을 알 수 있다.

2.2 크리프 시험결과 검토

콘크리트의 크리프시험과 관련된 국내 규격으로는 KS F 2453이 있으며, 시험체의 규격은 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 의 원주형 공시체를 사용하도록 되어있다. 하중재하시점은 재령 28일 기준이며, 재하하중은 재령 28일 평균압축강도의 40%로 제시되어 있다. 또한 시험 수행중에 발생하는 총변형률 중에 순수 크리프변형률을 구하기 위하여 하중이 재하되지 않은 동일 사이즈($\phi 15 \times 30\text{cm}$)의 시험체에 대한 건조수축 변형률을 측정하여 크리프 시험수행 중에 발생한 총변형률에서 빼주는 방식을 취하고 있다. Photo 1은 전형적인 콘크리트 압축크리프 시험장치를, Photo 2는 동일 온습도조건에서의 건조수축시험 예를 보여주고 있다.

본 연구에서는 앞에서 살펴본 각 크리프계수 예측모델

의 검증을 수행하기 위하여 Table 1과 같은 강도대별 배합(설계기준강도 24, 30, 40 및 60 MPa)을 선정하여 KS F 2453에 준하여 크리프시험을 수행하였다. Table 1의 CREEP1 배합은 보통포틀랜드시멘트(OPC) 만을 사용한 배합으로서 KS F 2453에 준하여 재령 28일 평균 압축강도의 40%를 크리프하중으로 재하하였으며, CREEP2 배합은 결합재 중량의 50%를 고로슬래그미분말로 치환한 배합으로서 낮은 크리프하중 재하조건에서의 크리프 거동을 확인하기 위하여 재령 28일 평균압축강도의 약 17.8%를 하중으로 재하하였다. CREEP1 및 CREEP2 배합 모두 크리프 시험은 상대습도 60%, 실내온도 20°C를 기준으로 하는 항온항습실에서 수행하였으며, 시험수행 기간동안 시험체 표면에 부착한 스트레인게이지를 통하여 변형률을 지속적으로 측정하였다. 이러한 크리프 시험결과로부터 구하여진 값에서 건조수축변형률을 뺀 값이 식(1)의 총변형률($\epsilon_{cr}(t, t')$)로서 이 값을 가지고 하중재하 직후의 순간탄성변형률 $f_c(t')/E_{ci}(t')$ 과 Table 2에 나타난 재하하중 및 초기접선탄성계수를 식(1)에 대입하여 크리프계수를 구하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이 시험측정결과 구하여진 크리프계수는 강도값이 증가할수록 상대적으로 EC2 모델식과 근접하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉,



Photo 1 Apparatus for Creep Test

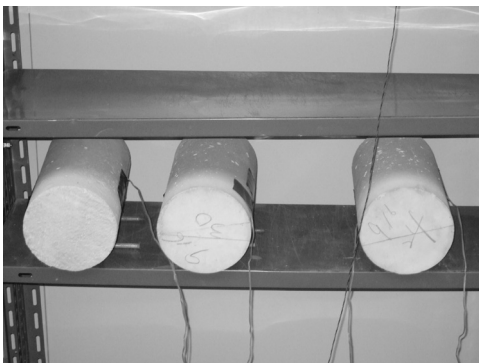


Photo 2 Measurement of Drying Shrinkage

Table 1 Mixture proportions of concrete

Types	Unit mass (kg/m ³)					SP (P×%)	
	W	P			S		G
		OPC	SG	FA			
24-Creep1	180	360	-	-	798	907	
24-Creep2	180	180	180	-	792	931	
30-Creep1	175	398	-	-	764	923	
30-Creep2	175	209	209	-	646	1065	
40-Creep1	170	425	-	-	735	943	
40-Creep2	170	229	229	-	637	1051	
60-Creep1	160	500	-	-	687	956	
60-Creep2	170	303	303	-	588	970	

Table 2 Mechanical properties of concrete mixtures

Types	f_{cm} (MPa)	$f_c(t')$ (MPa, 28th day)	Eci (GPa)
24-Creep1	34.3	13.7	32.5
24-Creep2	26.2	4.7	29.7
30-Creep1	39.2	15.7	34.0
30-Creep2	33.7	6.0	32.3
40-Creep1	57.0	22.8	38.5
40-Creep2	45.9	8.2	35.8
60-Creep1	69.9	28.0	41.1
60-Creep2	68.6	12.2	40.9

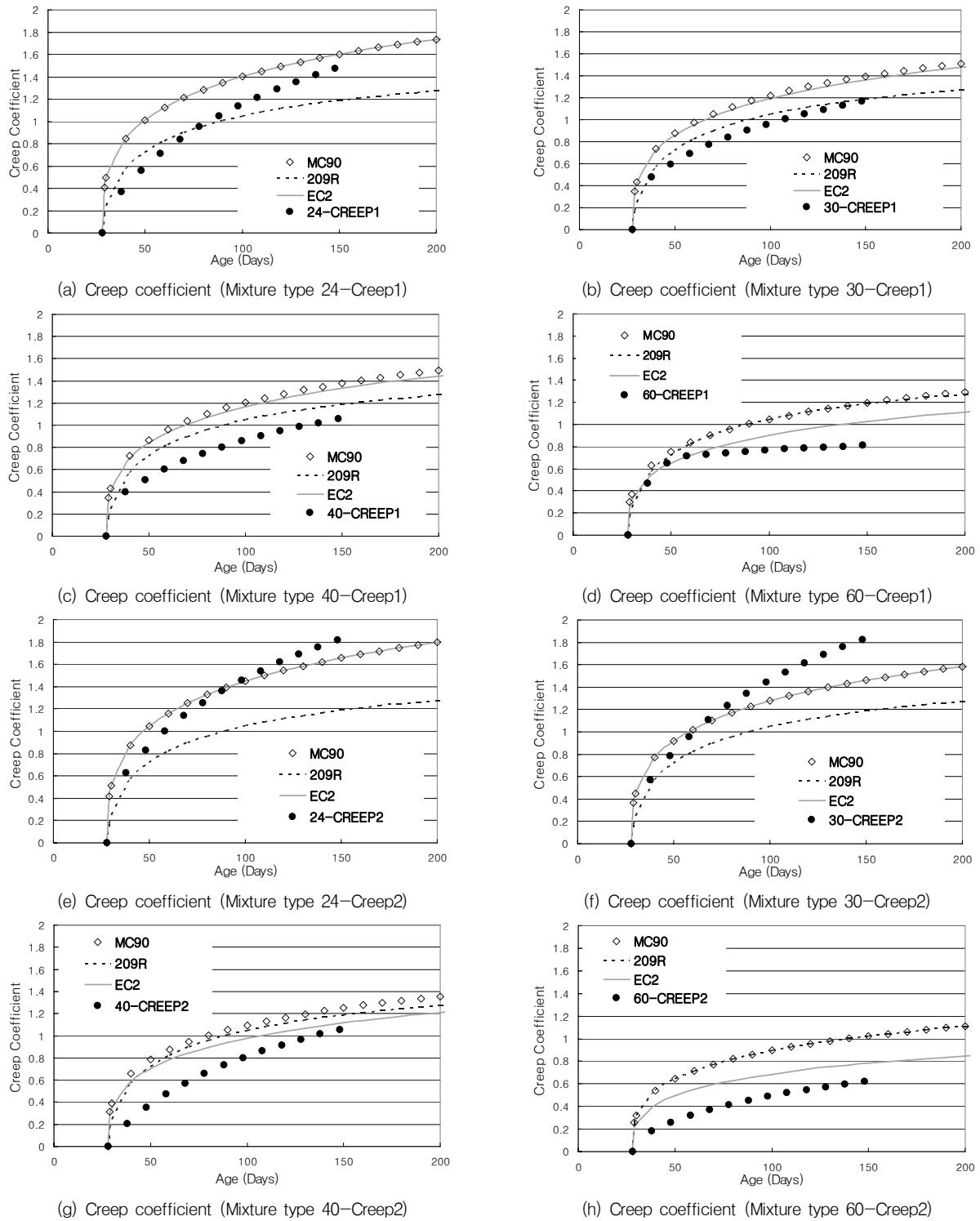


Fig. 3 Comparisons of Experimental data vs. Creep Models

기존의 MC90 및 209R 모델의 경우 강도의 증가에 따른 크리프계수 감소영향이 충분히 반영되어지지 않고 있다는 예로서, 최근의 콘크리트 제품의 고강도화 추세인 점을 고려할시 참고하여야 할 부분이라고 판단된다.

또한, 본 연구에서 수행한 시험결과만을 가지고 보았을

때, 재령 28일 평균강도의 40% 값을 하중으로 재하한 Creep1 배합의 경우 강도영역과 상관없이 모두 MC90 및 EC2 모델 예측치를 하회함을 확인할 수 있었다. 이에 반하여 평균강도의 17.8% 값을 하중으로 재하한 Creep2 배합의 경우는 보통강도 영역인 24 및 30강도 배합은

MC90 및 EC2 모델 예측치를 상회한 반면, 40 및 60강도 배합은 하회하는 경향을 보여주었다. 이는 고강도대 영역에서 MC90 모델보다 낮은 크리프계수를 예측하는 EC2 모델의 경우에 있어서도 실제 고강도대 콘크리트의 크리프거동보다는 상회하는 크리프계수를 예측한다고 볼 수 있으며 이는 EC2를 적용하는 유럽국가와 국내의 콘크리트배합에 사용하는 재료의 종류 등이 다른 점도 영향을 미치고 있으리라 사료된다.

위에서 살펴본 바와 같이 현행 구조설계기준상의 크리프모델은 MC90 모델을 기반으로 하고 있다. 또한, 보통강도 영역에서는 MC90 모델과 EC2 모델이 결과값에 큰 차이를 보이지는 않았지만 고강도 영역에 있어서는 EC2 모델이 실제 본 연구에서 수행한 실험결과와 보다 근접한 예측값을 보임을 알 수 있었다. 이는 EC2 모델이 강도값이 증가함에 따라 MC90 모델 보다는 낮은 크리프계수값을 예측하기 때문이며, EC2 모델이 고강도대에서는 보다 현실적인 예측값을 제시하기 위하여 MC90 모델을 개선한 모델이기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 크리프 실험은 장기적인 실험기간이 소요되는 문제점과 본 연구에서 수행한 실험결과는 한정적인 관계로 보다 명확한 결과를 도출하기 위해서는 장기적인 데이터 취득 및 다양한 배합에 대한 비교검토가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 현행 국내 구조설계기준상의 크리프모델의 적용 적정성을 판단하기 위하여 기존의 제안 모델식인 ACI 209R, CEB-FIP MC90 및 EC2 모델식에 대한 검토 및, 실험결과와의 비교검토를 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) ACI 209R 모델의 경우, 크리프계수를 예측함에 있어서 극한 크리프계수값을 2.35로 제한하고 있기 때문에 그 이상의 크리프계수를 인정하지 않음으로서 한정적인 예측값만을 제시함을 알 수 있다. 또한 크리프계수 예측시 콘크리트의 강도에 대한 고려를 하고 있지 않은 반면, CEB-FIP MC90 및 EC2 모델은 평균강도를 고려함으로써 보다 현실적인 예측값을 제시함을 확인할 수 있었다.

2) CEB-FIP MC90 및 EC2 모델의 경우, 콘크리트의 평균강도를 고려하여 크리프계수를 예측하고는 있으나 고강도대로 갈수록 EC2 모델이 보다 낮은 크리프계수 예측값을 제시함을 확인하였으며, 실험결과와도 상대적으로 좋은 상관성을 보여주었다.

3) 크리프실험결과와 EC2 모델을 비교해 보았을 때, 고강도 영역에 있어서는 실험결과로부터 도출한 크리프계수는 EC2 모델로부터 구한 예측치보다 낮은값을 보였다. 이는 국내에서 사용되고 있는 콘크리트 배합재료가 유럽에서 사용되는 재료와 다른점을 원인으로 볼 수 있다. 그러나 보다 명확한 관계를 규명하기 위하여서는 국내에서 사용 및 적용되고 있는 다양한 배합 및 하중재하 조건을 반영한 추가적인 실험데이터의 축적 및 평가가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 산하 한국건설교통기술평가원의 「성능중심의 건설기준 표준화 연구단」에 의해 수행되는 2006 건설교통R&D 정책 및 인프라 사업(06-기반구축-A-01)의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 기문당, 2007.
2. ACI 209R-02, Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures.
3. Comite Euro-International Du Beton, CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, June 1992.
4. Eurocode 2, Design of concrete structures, part 1-1: General rules and rules for buildings, BS EN 1992-1-1, 2004.
5. FIB (CEB-FIP), Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance, Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990, Vol. 1, 1999.
6. Neville, A. M., Properties of Concrete, Addison Wesley Longman Limited, 4th ed., 1995.

(접수일자 : 2010년 4월 21일)
(심사완료일자 : 2010년 6월 22일)

요 지

최근들어 구조물공사에 적용되는 콘크리트가 고강도화 되어가는 추세로서 크리프와 같은 콘크리트의 역학적 거동에 대한 기존 설계 예측식에 대한 전면적인 검토가 필요한 시점이다. 이에, 본 연구에서는 현행 국내 철근콘크리트 구조설계기준상의 크리프계수 예측 모델식에 대한 강도대별 적용 타당성을 검토하기 위한 일환으로 기존의 제안 모델식인 ACI 209R, CEB-FIP MC90 및 EC2 모델식을 검토 하였으며, 실험결과와 비교검토를 수행하였다. 모델식 검토결과, CEB-FIP MC90 모델의 개선식인 EC2 모델이 고강도대의 콘크리트에 대한 크리프계수를 보다 현실적으로 예측함을 확인할 수 있었으며, 실험결과와도 상대적으로 좋은 상관성을 보임을 확인하였다.

핵심 용어 : 크리프, 크리프계수, 크리프모델, ACI 209R, CEB-FIP MC90, EC2