

콘크리트 크리프 예측을 위한 유변학적 접근

A Rheological Approach on Prediction of Concrete Creep

권기연* · 민경환** · 김윤희*** · 윤영수****

Kwon, Ki-yeon · Min, Kyung-hwan · Kim, Youl-hee · Yoon, Young-soo

Abstract

The primary objective of this study is to construct more simple and reasonable rheological model and propose a methodology for predicting a phenomenon of concrete creep. Deformations of concrete under sustained stress can be expressed by the sum of immediately elastic deformation, time-dependent and time-independent short-term creep, and long-term creep according to the mechanism and time-dependency. To simulate these deformations, a rheological model having six parameters was constructed. In the composing of each parameter, the microprestress-solidification theory and design model code were incorporated together with the numerical approach for the components which can not be theoretically approached. Finally, actual test data were applied in the verification of the proposed model, and suitability of the model was confirmed by comparisons with existing predicting models and design codes.

Keywords : creep prediction, long-term creep, short-term creep, rheology, microprestress-solidification theory

요 지

본 논문은 콘크리트의 크리프 현상에 대한 보다 단순하고 합리적인 유변학적 모델을 구성하고, 크리프 예측 모델 개발에 대한 하나의 방법론을 제시하는 데에 일차적인 목표가 있다. 장기적인 응력에 의한 콘크리트의 변형은 발생 메커니즘과 시간 의존성 여부에 따라 즉각적인 탄성 변형과 시간 의존적 단기 크리프, 시간 독립적 단기 크리프, 장기 크리프의 합으로 볼 수 있으며, 이들 변형을 모사하기 위해 6개의 매개변수를 갖는 유변학 모델을 구성하였다. 각 매개변수의 구성에는 미세 프리스트레스 고체화 이론과 기존 설계기준을 활용하였고, 이론적 접근이 어려운 경우에 한해 수치적 접근을 시도하였다. 수립된 모델의 검증은 실제 실험 데이터를 사용하였고, 기존 모델 및 설계식과 비교 평가하여 그 합리성을 확인하였다.

핵심용어 : 크리프 예측, 장기 크리프, 단기 크리프, 유변학, 미세 프리스트레스 고체화 이론

1. 서 론

콘크리트의 크리프는 하중의 증가 없이 시간의 경과에 따라 변형률이 증가하는 현상으로 콘크리트의 시간 의존적 거동을 대표적으로 나타내는 인자이다(윤영수, 2008). 오늘날 콘크리트 구조물이 대형화되고 단면이 복잡해지며 다양한 시공법이 시도되면서, 크리프는 콘크리트 구조물의 시공관리 및 구조계의 변화예측이 중요한 요소로 주목받게 되었다(김성욱 등, 2005).

기존에 진행된 크리프 연구는 크리프 영향인자 고유의 특성 때문에, 물리적 이론에 근거하기 보다는 실험결과에 전적으로 의존하여 서로의 상관관계를 구성하는 방식으로 진행되었다. 이로 인해 일관된 예측식이 현재까지도 명확히 제시되지 못하고 있으며, 제시된 식들조차도 정확도가 낮고, 적

용범위도 제한되는 취약점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 Power의 모세관 응력이론이 발표된 이후부터 크리프 발생이론에 대한 연구가 꾸준히 진행되었으나, 이를 통해 얻어진 예측모델은 크리프 변형의 일부분만을 모사하여 적용의 실효성이 떨어지는 취약점을 가지고 있는 것으로 평가되었다. 물질의 변형기구를 해명하는 가장 기본적인 기구로 알려진 유변학을 이용한 크리프 예측 모델 수립 연구 역시 기존의 연구자들을 통해 다양하게 진행되나 있다. 하지만 최종 모델의 형태가 복잡하고, 기본형 도출과정에 있어서 명확한 이론을 제시하지 못하는 취약점을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 유변학 이론을 이용하여 크리프 예측 모델을 수립되되, 기본형의 도출 과정을 명확히 제시하고, 최근에 소개된 장기 크리프(long-term creep)와 단기 크리프(short-term creep)의 분리개념과 같은 크리프의 현상학적 발

*정회원 · 포항산업과학연구원 강구조연구소 위촉연구원 · 석사 (E-mail : kiyeon83@rist.re.kr)

**정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 (E-mail : alskh@korea.ac.kr)

***고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정 (E-mail : sweet0112@korea.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : ysyoon@korea.ac.kr)

생이론과 설계기준을 최대한 활용하여 계수를 추정함으로써 보다 합리적인 콘크리트의 시간 의존적 거동의 예측 모델을 제안하고자 한다. 즉 명확한 이론에 근거하면서도 효율적인 모델을 제시하여 보다 효과적인 콘크리트 크리프 예측 모델을 구성하고, 실제 FCM 교량 콘크리트 크리프 실험의 데이터와 비교 검증함으로써 성립된 모델의 합리성을 검토하고, 크리프 예측모델 개발에 대한 하나의 방법론 제안의 가능성을 평가하고자 한다.

2. 크리프 현상과 유변학

크리프 현상은 그 발생 메커니즘에 따라 단기 크리프와 장기 크리프로 구분할 수 있다(Bazant et al., 1997(a), (b); Ulm et al., 2000). 단기 크리프는 외부에서 가해진 하중이 공극을 둘러싸고 있는 클러스터에 하중이 전달되면서 야기되는 공극 내벽에 부착된 물 분자 사이의 응력 불균형에 의해 수분이 확산되면서 발생되며, 하중 재하 이후 1년 이내에 모든 변형이 완료되는 특성을 가진다. Fig. 1은 단기 크리프의 발생 메커니즘을 나타낸 것이다. 장기 크리프는 경화된 콘크리트 내부에 존재하는 미세 프리스트레스(Microprestress)가 외부에서 재하되는 하중으로 이완되고, 이로 인해 내부 결합이 소멸되면서 C-S-H sheet가 미끄러지면서 발생되며, Fig. 2를 통해 이를 도시화하였다. Fig. 3은 시간과 컴플라이언스 변화율 사이의 관계를 나타낸 것이다. 이를 통해 단기 크리프의 개략적인 종료 시점과 하중 재하 초기에는 단기 크리프의 비중이 높다가 점차 장기 크리프의 비중이 높아지는 특성을 확인할 수 있다.

유변학(Rheology)이란 힘과 흐름과의 관계를 규명하여 물질의 기계적 성질을 규명하는 학문으로, 물질의 변형기구를 해명하는데 많은 도움이 된다(강창구, 1995). 콘크리트는 다공성의 구조적 특징으로 고체의 변형특성인 탄성과 유체의 변형특성이 공존하는 점탄성 재료로 다루어져야 하며, 이러한 물질에 관한 변형예측은 유변학이라는 학문적 도구를 이

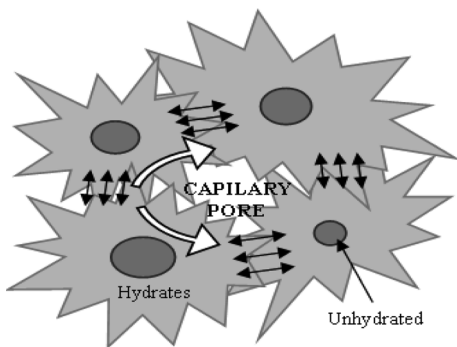


Fig. 1 Mechanism of Short-term Creep

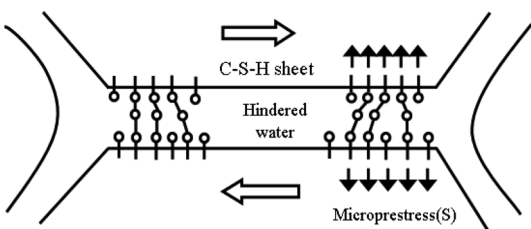


Fig. 2 Mechanism of Long-term Creep

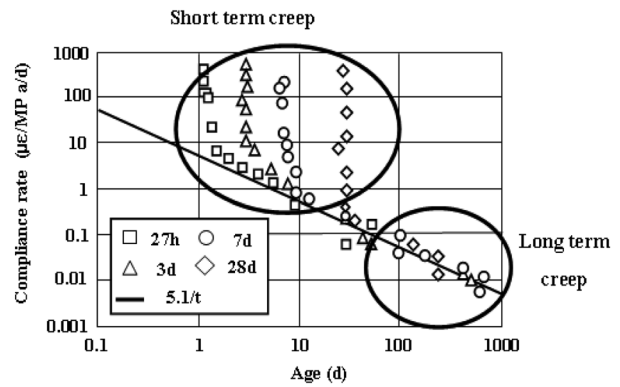


Fig. 3 Experimental Compliance Rate for the Normal Strength Concrete ($w/c = 0.5$)(Ulm et al., 2000)

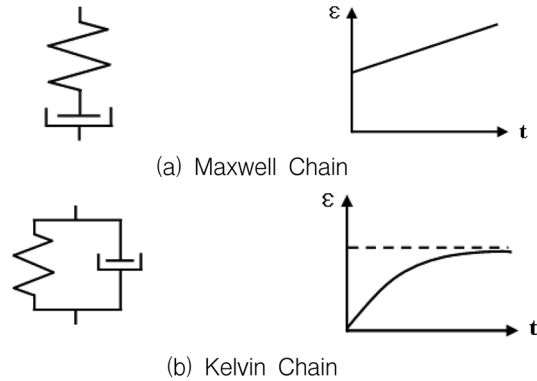


Fig. 4 Basic Rheological Model (Shames and Cozzarelli, 1992)

용해 이해성이 높은 결과를 이루어낼 수 있다. 가장 기본적인 유변학 모델로는 Maxwell chain과 Kelvin chain이 있으며, 그 형태와 시간에 따른 변형 특성은 Fig. 4에 나타내었다(Shames and Cozzarelli, 1992).

3. 예측모델 수립

3.1 모델 구성의 전제조건 수립

유변학 이론에만 근거하여 크리프 예측모델을 수립할 경우, 최종 모델의 공학적 의의나 실효성 등이 떨어질 우려가 있으므로, 본격적인 모델 구성에 앞서 일련의 전제조건을 수립할 필요가 있다. 이에 본 연구에서 다음과 같은 전제조건을 수립하였고, Table 1을 통해 정리하였다. 첫째, 스프링과 대시포트만을 이용하여 최종 모델을 구성한다. 둘째, Maxwell chain과 Kelvin chain의 조합을 우선적으로 고려한다. 셋째, 유변학 대상, 즉, 점탄성 재료의 변형 특성에 관한 기준을 적용하여 모델을 구성한다(Shames and Cozzarelli, 1992).

Table 2는 구성 인자들의 변형 특성 조합에 따른 전체 모델의 변형 특성을 정리한 것이다. 점성 재료의 경우에는 응

Table 1. Precondition for Model Development

Precondition	Details
1	The model consists with spring and dashpot.
2	Maxwell model and Kelvin model are prior to all other combination.
3	Rules of rheological objects should be considered.

Table 2. Inferring Rules of Rheological Objects

Objects	Type	A	B	Result
Residual deformation	Series	Residual	Residual	Residual
		Residual	Non residual	Residual
		Non residual	Non residual	Non residual
	Parallel	Residual	Residual	Residual
		Residual	Non residual	Non residual
		Non residual	Non residual	Non residual
Bouncing displacement	Series	Bouncing	Bouncing	Bouncing
		Bouncing	Non bouncing	Bouncing
		Non bouncing	Non bouncing	Non bouncing
	Parallel	Bouncing	Bouncing	Bouncing
		Bouncing	Non bouncing	Bouncing
		Non bouncing	Non bouncing	Non bouncing
Vibration decrease	If a part involves viscous elements, any vibrations on the part converge to zero. On the other hand, vibration on a part consisting of elastic elements alone oscillates and does not converge to zero.			

력의 제하 이후에도 변형이 완전히 회복되지 않는 잔류 (residual) 변형이 발생하고, 외부에서 가해진 에너지는 각 구성 인자에 전달되면서 차츰 소멸되는 특징을 보인다. 잔류 변형이 전체 모델에서 나타나기 위해서는 직렬 조합의 경우 구성 인자 중 최소 한 개의 인자가 잔류변형 특성으로 보여야 하며, 병렬조합의 경우에는 전체 구성인자가 모두 잔류변형 특성을 가지고 있어야 한다. 진동(bouncing) 변형은 탄성 재료의 변형 특성으로 구성인자 중 한 개라도 진동 변형 특성을 보이면, 전체 모델은 진동변형 특성을 가지게 된다. 유변학의 대상인 점탄성 재료의 경우에는 위의 모든 변형특성을 보여야 한다.

3.2 시간 의존적 · 독립적 4변수 모델 구성

본 연구의 예측모델은 스프링과 대시포트를 기본인자로 하여 구성되었다. 그리고 각 구성인자들의 시간 경과에 따른 강성변화를 여부를 고려할 수 있도록 하여, 총 크리프 변형을 시간의존적인 부분과 시간 독립적인 부분으로 나누어 접근하였다. 기본 구성 인자 위의 화살표는 시간에 따라 강성이 변화함을 의미한다.

모델구성 전제조건인 세 번째 항목인 유변학 대상 특성만을 감안하여 시간 의존적 크리프를 모사하기 위한 4변수 유변학 모델을 수립하면 Fig. 5의 (a)~(e)까지의 총 5개의 모델을 얻을 수 있다. 그 외의 전제조건을 감안하면, (a)와 (d)를 최종적으로 선정할 수 있다. 시간 독립적 거동의 경우에는 유변학 대상의 거동 특성에 대한 기준을 만족하는 조합은 (f)이나 이는 앞서 수립한 전제 조건에 위배되므로, 기존의 연구를 통해 합리성이 증명된 고전적인 4변수 모델인 (g)의 형태를 크리프의 시간 독립적 거동을 나타내는 모델로 결정한다.

3.3 최종 모델 구성

Fig. 6의 Model 1과 Model 2는 각각 크리프의 시간 의존적 거동을 모사하는 4변수 모델인 (a)와 (d)에, 시간 독립적 크리프 거동을 모사하는 4변수 모델인 (g)를 직렬 연결

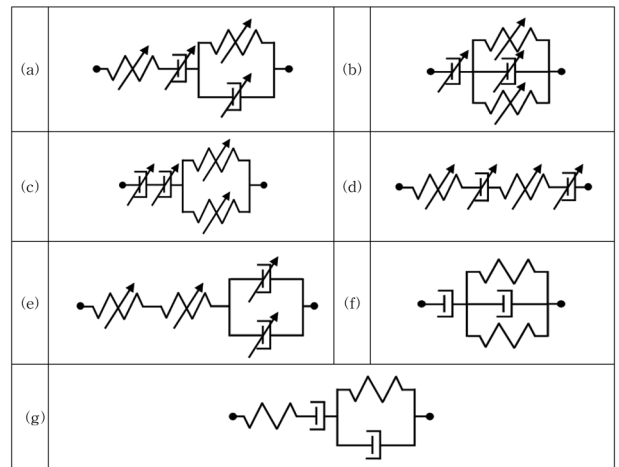


Fig. 5 4-element Model for Time Independent Deformation

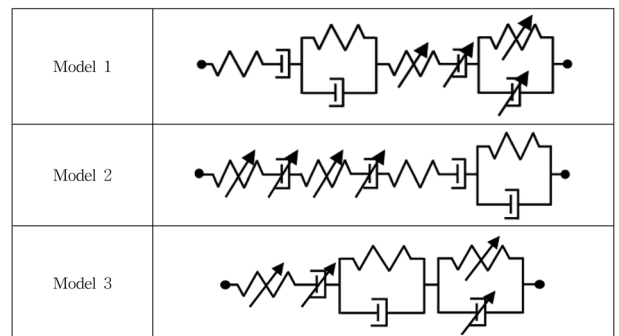


Fig. 6 8- and 6-element Rheological Models

한 것이다. Model 1은 Maxwell chain과 Kelvin chain이 조합을 이루어 시간 의존적 · 독립적 크리프 거동 각각을 모사하나, Model 2는 Maxwell chain만을 이용하여 시간 의존적 크리프를 모사한다. Maxwell chain은 응력 이완 현상은 효과적으로 모사할 수 있으나 콘크리트의 크리프 거동을 모사하기에는 적절하지 않으므로, Model 1을 최종 8변수 모델로 결정한다. 또한 Model 1은 최종적으로 Model 3의 형태로 간략화 될 수 있으므로 본 연구에서는 Model 3을 기초하여 예측식을 수립한다.

Table 3. Mix Proportions and Specifications of Specimens

	f_{cu} (MPa)	w/c (%)	s/a (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Slump (mm)	Air contents (%)	Length (km)	Location
Kang-Dong brdg.	48.52	31.5	42.0	162	514	150	4.5	1.13	서울 강동
Kum-Kang brdg.	50.37	32.0	42.0	168	522	150	4.0	0.45	충북 옥천
Dan-Yang brdg.	53.43	32.0	43.0	169	528	150	4.5	0.69	충북 단양
Hoeng-Seong brdg.	53.31	32.8	42.0	160	471	150	4.5	1.31	강원 횡성
Ko-Jung brdg.	42.70	27.5	42.0	149	547	135	4.5	1.13	경북 청도

3.4 예측 계수 추정 및 모델의 완성

3.4.1 실험 재료

앞서 수립한 최종 모델의 구체화하여 실제 실험 데이터에 적용하기 위해 총 5개의 실제 국내 FCM 교량에 적용된 콘크리트의 크리프 실험 결과 값을 이용하였다. 강동대교와 금강4교, 단양대교, 횡성대교 콘크리트의 크리프 실험값을 이용하여 계수를 추정하였으며 이를 고정1교 콘크리트의 크리프 실험결과에 적용하여 모델을 검증하였다. Table 3은 연구에 이용된 실제 교량의 간략한 배합상세와 특성을 나타낸 것이다.

3.4.2 각 부분별 공학적 의의 부여

각 부분의 공학적 의의를 파악하는 것은 어떠한 이론 또는 접근법을 이용하여 계수를 추정해 나갈지 결정해 주어, 수립된 식을 보다 구체화하는 중요한 단계이다. 공학적 의의의 부여를 위해 앞서 3.3절에서 수립한 최종 모델을 총 4개의 Component로 구분하였으며 이를 Fig. 7에 나타내었다. 식(1)은 최종 모델의 수치 해를 표시한 것으로 식에서 $E_1 \sim E_2$ 그리고 $c_1 \sim c_3$ 이 추정해야할 계수이다.

$$\varepsilon(t-t_i) = \frac{f_0}{E_1} + \frac{f_0}{c_1}(t-t_i) + \frac{f_0}{E_2} [1 - e^{-(E_2/c_2)(t-t_i)}] + \frac{f_0}{E_3} [1 - e^{-(E_3/c_3)(t-t_i)}] \quad (1)$$

여기서, f_0 = 재하 하중 (MPa)

t = 재령 (days), t_i = 하중 재하시 재령 (days)

Component 1은 하중이 재하 되면 즉각적으로 변형이 발생하므로 콘크리트의 탄성거동을 모사한다고 정의한다. Component 2~4의 공학적 의의는 아래 설명한 일련의 과정을 통해 확인하였다. 우선 Component 2를 장기 크리프를, Component 3과 4는 단기 크리프를 모사한다고 가정한다. Component 2에 해당하는 변형은 장기 크리프의 발생이론인 미세 프리스트레스-고체화 이론(Microprestress-solidification theory)(Bažant *et al.*, 1997(a), (b))을 이용하여 추정한다.

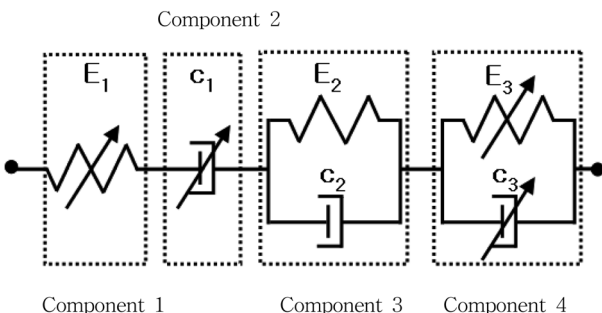


Fig. 7 Constructed Form of the Proposed Model and Classification of Component

Table 4. Ratio of 300 Days Deformation to 10,000 Days Deformation

Loading age	3 days	28 days	90 days
Kang-Dong brdg.	92.08	82.52	89.54
Kum-Kang brdg.	92.52	88.89	84.96
Dan-Yang brdg.	98.48	77.46	93.30
Hoeng-Seong brdg.	97.53	90.98	84.63
Average	95.15	84.96	88.11

Component 1과 2를 전체 크리프 변형에 제외한 것이 단기 크리프 특성을 만족하는지 확인한다.

Table 4는 전체 변형에서 Component 1과 2 부분을 제외한 결과의 추세를 그려 300일 재령의 변형을 변형의 일반적인 종료시점이라 여겨지는 10,000일 재령의 변형으로 나눈 것이다. Table 4를 통해 평균적으로 300일 재령에서 중국 크리프의 약 90% 정도가 발현됨을 확인할 수 있으며, 이는 하중 재하 이후, 1년 이내에 대부분의 반응이 종료되는 단기크리프의 특성과 일치한다. 그 결과 Component 2는 장기 크리프를, Component 3과 4는 단기 크리프를 모사한다는 초기 가정은 타당하다고 판단 할 수 있다.

3.4.3 각 부분별 계수 추정

3.4.2를 통해 파악된 공학적 의의를 바탕으로 각 부분의 계수를 추정하며 그 결과는 다음과 같다. Component 3과 4의 계수 추정에는 총 4개의 FCM 교량 콘크리트의 실제 크리프 실험 데이터가 이용되었으며, 이용된 교량들은 강동대교, 금강대교, 단양대교 그리고 횡성대교이다. Fig. 8~12는 각각 강동대교, 금강대교, 단양대교, 횡성대교, 고정1교 콘크리트의 비크리프 측정 결과이다.

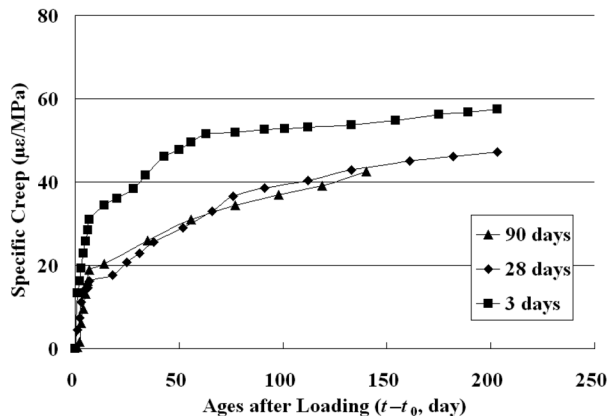


Fig. 8 Experimental Results of Specific Creep: Kang-Dong Bridge Concrete

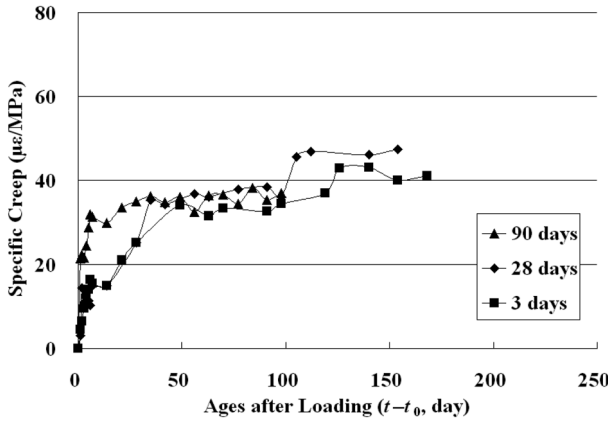


Fig. 9 Experimental Results of Specific Creep: Kum-Kang Bridge Concrete

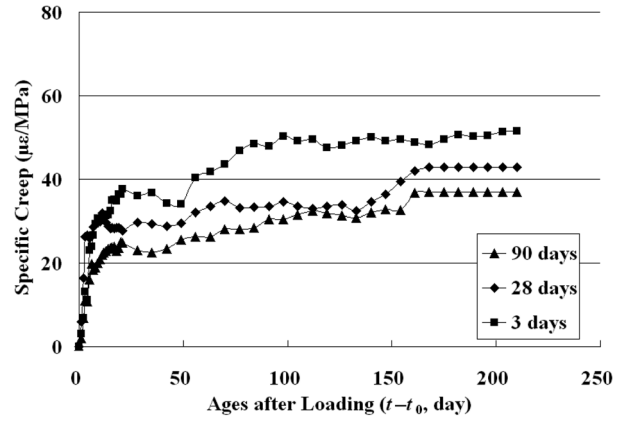


Fig. 12 Experimental Results of Specific Creep: Ko-Jung Bridge Concrete

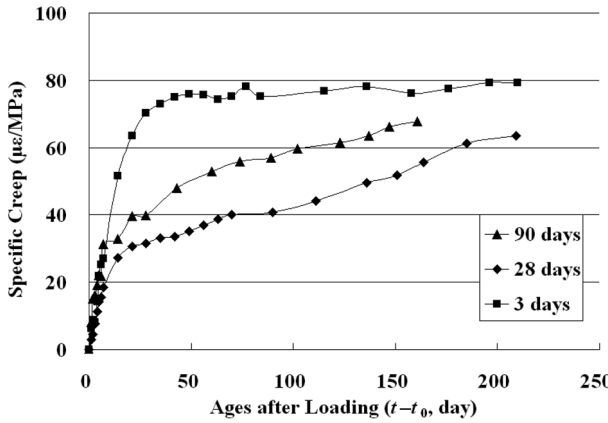


Fig. 10 Experimental Results of Specific Creep: Dan-Yang Bridge Concrete

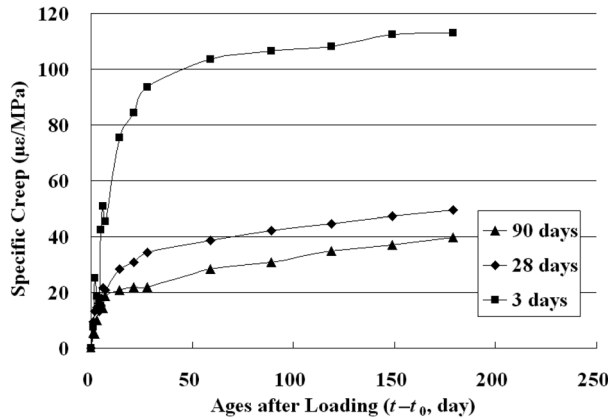


Fig. 11 Experimental Results of Specific Creep: Hoeng-Seong Bridge Concrete

1) 탄성거동 (Component 1, E_1)

콘크리트의 탄성거동을 모사하는 E_1 은 CEB-FIP MC R99(FIB, 1999)에서 제안하는 시간의 경과에 따라 변화하는 탄성계수 예측식을 이용하였고, 식(2)의 형태로 표시된다.

$$E_1 = \beta_E(t)E_{ci} \quad (2)$$

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0.5} \quad (3)$$

여기서, $\beta_{cc}(t) = \exp\left\{0.2\left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{0.5}\right]\right\}$,

$t_1=1$ days, E_{ci} = 28일 초기 접선 탄성계수

2) 장기크리프 (Component 2, c_1)

Component 2는 장기크리프의 발생이론인 미세 프리스트레스-고체화 이론을 기반으로 한 Lee and Kim(2006)의 연구의 소성변형 추정 결과 값을 이용하였고, 식(4)으로 표현된다.

$$c_1 = 0.5 \times \frac{1}{S} \quad (4)$$

$$S(t-t_i+1) = \frac{1 + \sqrt{1 - C_s C_f (t-t_i+1)^{-1}}}{4C_s (t-t_i+1)} \quad (5)$$

여기서, $\frac{1}{C_s} = \beta(t_0)\beta(w/c)\frac{n}{E_{28}}$, $C_f = 0.020 \frac{\ln|RH/RH_0|}{f_{28}}$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}}, \quad t_1 = 1 \text{ day}$$

$$\beta(w/c) = 120\sqrt{w/c}[(f_{28})^{-0.85}]$$

3) 시간 독립적 단기크리프 (Component 3, E_2 , c_2)

Component 3은 시간 독립적 단기크리프를 모사하며, 실제 실험 결과의 회귀분석을 통한 수치적 접근을 통해 계수를 추정한다. 주요변수로는 28일 재령의 탄성계수를 이용하였으며, 식(6)과 (7)을 통해 그 결과를 나타내었다.

$$E_2 = (-1.0 \times 10^{-6}) \times E_{28} + 0.6 \quad (6)$$

$$c_2 = \left| (4.0 \times 10^{-2})E_{28} - 1, 470 \right| \quad (7)$$

여기서, E_{28} =28일 재령의 탄성계수

4) 시간 의존적 단기크리프 (Component 4, E_3 , c_3)

Component 4 역시 수치적 접근을 이용하여 계수를 추정하며, 탄성계수 그리고 시간 경과를 주요 변수로 한다. 계수 추정 결과는 식(8)과 (9)에 나타내었다.

$$E_3 = \frac{-2.0 \times 10^{-4} \times (t-t_i) + 0.08}{\alpha \times (t-t_i)^\beta} \quad (8)$$

$$c_3 = (4.0 \times 10^{-5}) \times e^{(3.0 \times 10^{-4} \times E_i)} \quad (9)$$

여기서, α, β = 해석 상수(Table 5)

Table 5는 식 (8)과 (9)의 해석 상수 값을 정리한 것으로,

Table 5. Experimental Constants (α, β)

Loading age	3 days	7 days	28 days	90 days
α	5.0	6.0	15.0	25.0
β	-0.2	-0.3	-0.5	-0.6

Table 6. Engineering Meaning and Method of Deduction

Component	Engineering meaning	Method of deduction
1	Elastic deformation	CEB-FIP MC R99
2	Long-term creep	Microprestress-solidification theory
3	Short-term creep	Numerical approach
4	Short-term creep	Numerical approach

각 재령은 크리프 시험이 실시된 시점의 콘크리트 재령을 의미한다. Table 6은 본 3.4.3 절을 통해 서술한 Component 별 공학적 의미와 이에 따른 계수 추정 방법을 정리한 것이다.

3.4.4 예측 모델의 완성

각 부분별 계수 추정 결과를 종합하고 이를 식(1)에 대입하면, 콘크리트 크리프의 예측이 가능하며, 이를 바탕으로 한 비크리프 예측식은 아래 식(10)과 같다.

$$C = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{c_1}(t-t_i) + \frac{1}{E_2} [1 - e^{-(E_2/c_2)(t-t_i)}] + \frac{1}{E_3} [1 - e^{-(E_3/c_3)(t-t_i)}] \quad (10)$$

4. 결과 분석

4.1 수립된 예측 모델의 검증

본 연구를 통해 수립된 예측식을 고정 1교 콘크리트에 적용한 결과를 Fig. 13에 나타내었으며, 그래프의 가로축은 예측된 비크리프 값을, 세로축은 실제 측정된 비크리프 값을 의미한다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 제안된 모델을 통한 예측값은 실제 실험 결과와 잘 부합하며, 좁은 분포를 보여

일정한 FCM 교량의 장기 거동과 이에 따른 사용성의 예측 평가가 가능하다.

4.2 기존 모델과의 비교

4.1절에서 수립 모델의 검증을 위해 사용된 실험결과와 동일한 자료를 바탕으로, 기존 예측식들과 제안된 예측식을 비교하였으며, 이를 통해 제안식의 정확도 및 우수성을 평가하였다. 총 4개의 기존 이론식과 4개의 설계 기준식이 사용되었으며, 이는 Table 7에 정리하였다. Kim *et al.*(2003)과 Lee and Kim(2006)의 식은 유변학에 근거한 크리프 예측식으로 대부분의 계수를 실험결과를 바탕으로 한 회귀분석을 이용하여 추정하였다. B3 모델(Bazant and Baweja, 2000; Jirásek and Bazant, 2002)은 이전의 BP 모델과 BP-KX 모델을, GL 2000(Gardener and Lockman, 2001)은 1993년 발표된 GZ모델을 수정·보완한 것으로 각각 1995년과 2001년에 발표되었다. 설계 기준식으로는 AASHTO LRFD 07, CEB-FIP MC R99, ACI 209 R92 그리고 JSCE

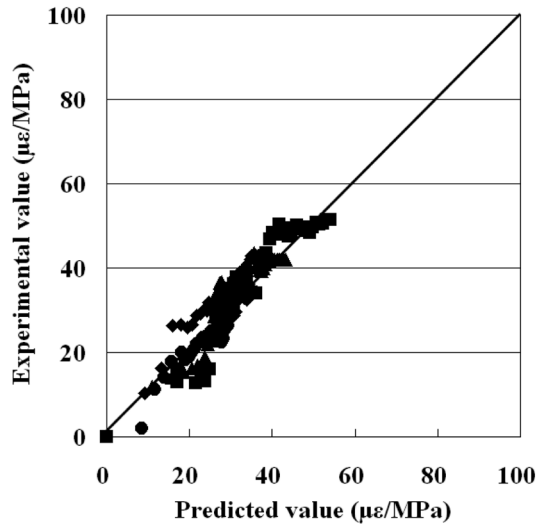


Fig. 13 Specific Creep using Proposed Model

Table 7. Established Equations for Concrete Creep

(a) Kim <i>et al.</i> (2003)	$\epsilon(t, t_i) = \frac{f_0}{E_t} + \frac{f_0}{E_0} [\alpha(1 - e^{-E_0 t/c_i}) + \beta(1 - e^{-E_t t'/c_i})]$
(b) Lee & Kim (2006)	$J(t, t_i) = \frac{1}{E_0} + \int_{t_i}^t \frac{dt_i}{\eta_i} + \frac{1}{E_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} - (t - t_i)\right) \right\}$
(c) B3 model	$J(t, t') = q_1 + C_v(t, t') + D_d(t, t', t_0)$
(d) GL 2000	$J(t, t_0) = \frac{1}{E_{cm t_0}} + \frac{\phi_{28}}{E_{cm 28}}$
(e) AASHTO LRFD 07	$\psi(t, t_i) = 1.9 k_c k_{hc} k_j k_{td} k_i^{-0.118}$
(f) CEB-FIP MC R99	$C = \frac{1}{E_{ci}} \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_i) \beta(t - t_i)$
(g) ACI 209 R92	$v_t(t, t_i) = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} v_u$
(h) JSCE 1996	$\epsilon_{cc}'(t, t', t_0) = \{1 - \exp[-0.09(t - t')^{0.60}]\} \epsilon_{cc}'$

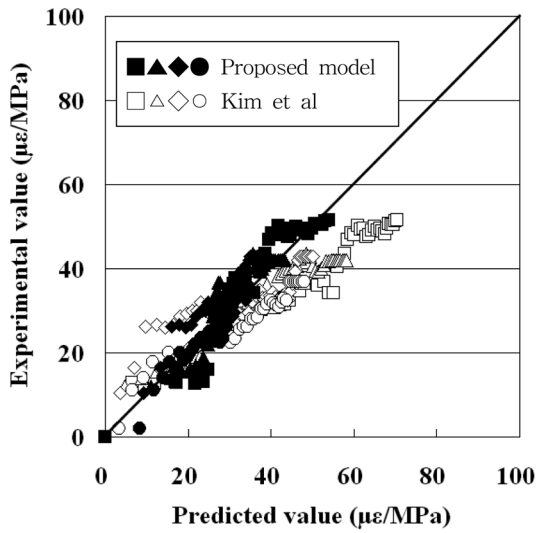


Fig. 14 Comparison of Specific Creep between Kim *et al.* (2003) and Proposed Model

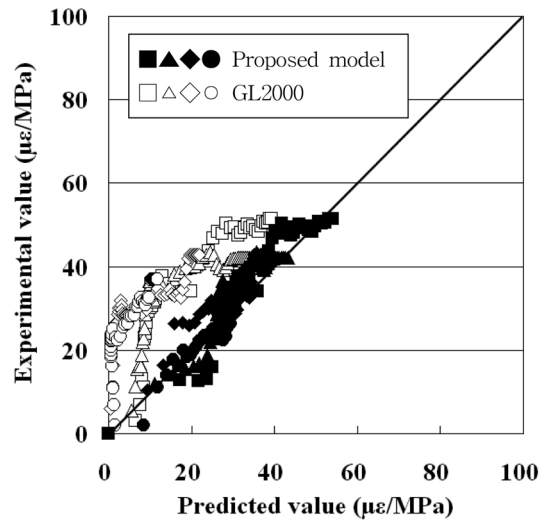


Fig. 17 Comparison of Specific Creep between GL2000 and Proposed Model

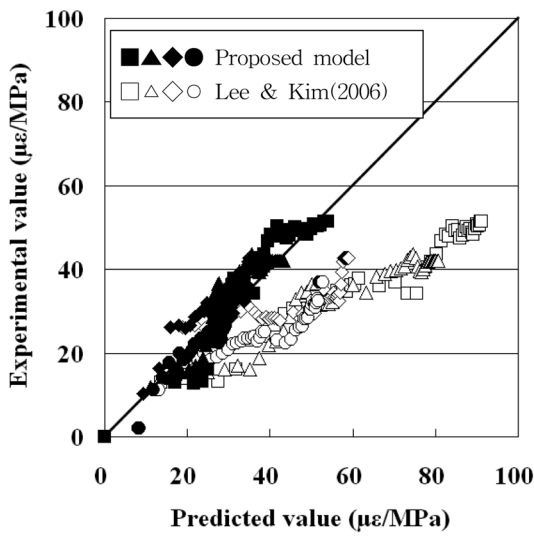


Fig. 15 Comparison of Specific Creep between Lee & Kim (2006) and Proposed Model

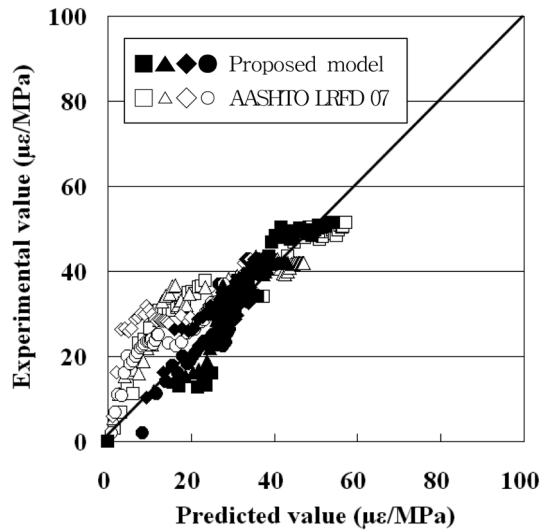


Fig. 18 Comparison of Specific Creep between AASHTO LRFD 07 and Proposed Model

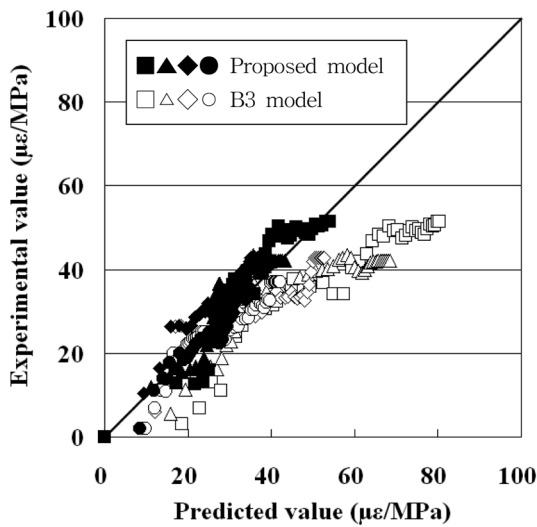


Fig. 16 Comparison of Specific Creep between B3 Model and Proposed Model

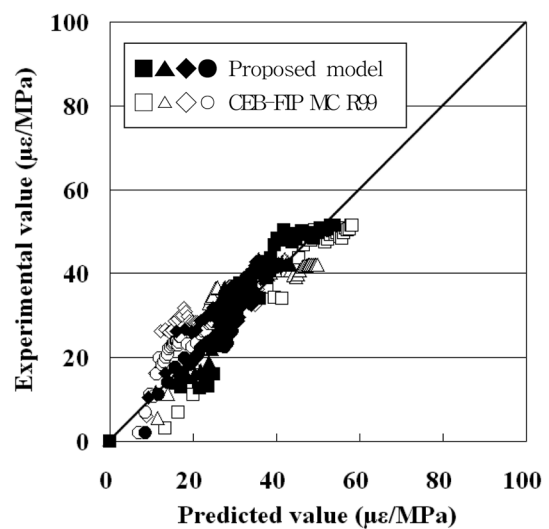


Fig. 19 Comparison of Specific Creep between CEB-FIP MC R99 and Proposed Model

1996이 사용되었으며, 콘크리트구조설계기준(2007)은 CEB-FIP MC R99의 식과 상당 부분이 유사하므로 제외하였다.

Fig. 14~21은 각각의 기존 예측식들을 적용한 결과로, 그래프의 세로축은 실험값을, 가로축은 예측값을 의미하며 본

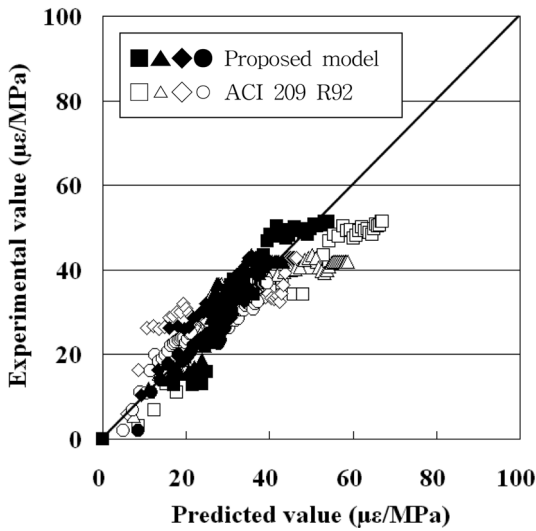


Fig. 20 Comparison of Specific Creep between ACI 209 R92 and Proposed Model

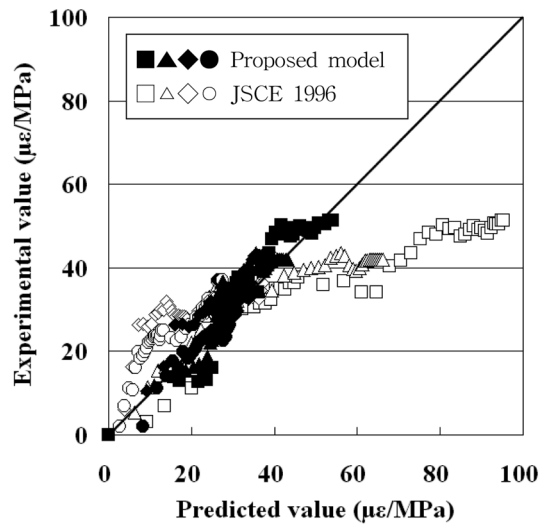


Fig. 21 Comparison of Specific Creep between JSCE 1996 and Proposed Model

Table 8. Summary of Results

days	Proposed model		Kim <i>et al.</i>		Lee & Kim		B3 Model		GL 2000		AASHTO LRFD 07		CEB-FIP MC R99		ACI 209 R92		JSCE 1996	
	ratio	SD	ratio	SD	ratio	SD	ratio	SD	ratio	SD	ratio	SD	ratio	SD	ratio	SD	ratio	SD
3	1.04	0.03	0.79	0.09	0.58	0.20	0.69	0.12	2.03	0.12	1.46	0.06	0.72	0.10	0.89	0.05	0.68	0.15
7	1.08	0.03	0.93	0.05	0.58	0.18	0.74	0.09	2.18	0.11	1.67	0.06	0.77	0.07	0.94	0.05	0.92	0.07
28	1.13	0.02	1.14	0.04	0.76	0.10	0.95	0.05	6.16	0.16	2.39	0.08	1.01	0.04	1.19	0.04	1.56	0.05
90	1.00	0.01	0.91	0.04	0.65	0.10	0.91	0.03	13.46	0.16	1.98	0.07	1.00	0.02	1.05	0.02	1.66	0.06
Average	1.06	0.02	0.94	0.06	0.64	0.15	0.82	0.07	5.96	0.14	1.88	0.07	0.88	0.06	1.02	0.04	1.21	0.08

연구를 통해 제안된 예측식 적용 결과를 검은 점으로, 기존 이론식 및 설계식의 적용 결과는 흰색 점으로 나타냈다. 그 그래프를 통해 나타낸 결과는 Table 8에 정리하였다. ratio는 실측값-예측값의 비율, SD는 표준 편차를 의미한다. ratio가 1.00에 가깝고 SD는 작을수록 정확함과 동시에 정밀한 예측이 이루어진다고 판단 할 수 있다.

Table 8을 통해 본 연구를 통해 제안된 예측식은 기존의 제안식 및 설계식들 중, 실제 값에 거의 정확한 예측을 보여준 Kim *et al.*(2003)과 ACI 209 R92의 식에 거의 동등한, 실측값-예측값 비(ratio)가 1.00에 가까운 높은 정확도를 보였으며, 표준편차(SD)는 이들 중 가장 작은 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 예측식은 기존 예측식들에 비해 상당히 정확하고, 신뢰할 만한 예측값을 제공해준다고 평가된다. 또한 일정한 안전율의 확보로 실제 시공 현장에 확대 적용이 가능할 것으로 판단되며, 이와 동시에 예측 모델 개발을 위한 하나의 방법론적 제안이 역시 가능한 것으로 파악된다.

5. 결 론

본 연구를 통해, 콘크리트 크리프 변형에 관한 현상학적인 문제를 유변학을 이용하여 접근하고, 구성된 모델의 매개변수 추정 과정에 있어서 이론과 설계기준을 최대한 활용하여, 명확한 이론에 근간한 합리적인 크리프 예측 모델 예측 모델을 개발하였다.

1. 본 연구를 통해 개발된 모델은 장기 크리프와 단기 크리프의 분리리는 최신의 크리프 이론을 수용하였으며, 실제 FCM 교량 콘크리트의 크리프 실험 결과에 적용·확인하였다.
2. 최소한의 변수와 간단한 계산을 통해 예측에 필요한 모든 계수의 추정이 가능하며, 실측값-예측값의 비가 1.06 그리고 표준편차 값은 0.02이었다. 본 연구의 제안 모델을 통해 근사한 예측이 가능하며, 정밀한 예측으로 일정한 안전율을 유지가 가능하여 실제 시공 현장의 적용 시 상당한 신뢰도를 보일 것이라 판단된다.
3. 추가적 실험 자료의 수집을 통한 다양한 실험변수에 대한 연구와 단기 크리프 부분의 이론적 접근에 대한 연구가 병행되어, 일반 강도 콘크리트 영역까지 모델의 적용이 확대된다면, 보다 발전적인 형태를 가질 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-20031-0).

참고문헌

- 강창구(1995) 콘크리트변형과 파괴. 원기술, pp. 173-184.
 김성욱, 고경택, 송영철, 박효선(2005) 콘크리트 구조물의 건조수

- 축과 크리프 예측기술. **한국콘크리트학회지**, 한국콘크리트학회, 제17권, 4호, pp. 25-33.
- 김제기, 이만섭, 이주하, 윤영수(2003) 국내 FCM교량에 사용되는 고성능 콘크리트의 크리프에 관한 유동학적 모델. 2003년도 가을 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, Vol. 15, No. 2, pp. 433-436.
- 윤영수(2008) **철근콘크리트 역학 및 설계**. 도서출판 새론, pp. 39-45.
- 이창수, 김현겸(2006) 콘크리트 크리프 변형 예측을 위한 비선형 4-매개변수 모델의 제안. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제1A호, pp. 45-54.
- 日本土木學會 (1996) **コンクリト 標準示方書** (平成 8年版), 設計編, pp. 26-32.
- AASHTO (2007) **AASHTO LRFD Bridge Design Specification** 2007.
- ACI Committee 209 (2008) **Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures**, ACI 209R-92, ACI Manual of Concrete Practice.
- Bazant, Z.P. and Baweja, S. (2000) Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: model B3, **ACI Special Publication**, Vol. 194, pp. 1-84.
- Bazant, Z.P., Hauggaard, A.B., Baweja, S., and Ulm, F.-J. (1997) Microprestress-solidification theory for concrete creep. I: aging and drying effects, **Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 123, No. 11, pp. 1188-1194.
- Bazant, Z.P., Hauggaard, A.B., and Baweja, S. (1997) Microprestress-Solidification theory for concrete creep. II: algorithm and verification, **Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 123, No. 11, pp. 1195-1201.
- FIB (1999) **CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures**, Structural Concrete, Vol. I, Federation Internationale du Beton, Switzerland.
- Gardener, N.J. and Lockman, M.J. (2001) Design provision for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete, **ACI Material Journal**, Vol.98, No.2, pp.159-167.
- Jirásek, M. and Bazant, Z.P. (2002) **Inelastic Analysis of Structures** John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, pp. 555-570, 665-670.
- Shames, I.H. and Cozzarelli, F.A. (1992) **Elastic and Inelastic Stress Analysis**. Prentice-Hall, Inc., Simon & Schuster Company, Englewood Cliffs, NJ, pp. 162-172, 212-220.
- Ulm, F.J., Maou, F.L., and Boulay, C. (2000) Creep and shrinkage of concrete-kinetics approach, **ACI Special Publication**, Vol. 194, pp. 135-154.

(접수일: 2008.7.1/심사일: 2008.9.22/심사완료일: 2009.1.13)