

콘크리트 크리프 변형 예측을 위한 비선형 4-매개변수 모델의 제안

The Suggestion of Nonlinear 4-Parameters Model for Predicting Creep Deformation of Concrete

이창수* · 김현겸**

Lee, Chang Soo · Kim, Hyeon Kyeom

Abstract

To obtain realistic stress-strain relation in concrete, it is necessary to improve the constitutive model for creep and shrinkage of concrete. This study is made up with predicting model of creep using rheological approach and mathematical development which is solution for phenomenon of concrete creep. Long-term deformation components are combined based on traditional 4-parameters model. Creep deformation is obtained adequately using 4-parameters determined by considering aging effect and microprestress among gels. And coefficient of effective viscosity is able to represent both basic creep and total creep included drying creep. This study attempt to establish mathematical model considering effects of aging, hydration, and variations of pore humidity. It can predict both basic creep and total creep. Values of result between prediction and experiment have greater than correlation factor 99%. Additionally experimental results report bad consentaneity with highway design specification adopting FIB MC 90. Rather than those are similar to FIB MC 90 rev.99.

Keywords : 4-parameters model, coefficient of effective viscosity, microprestress, total creep

요 지

콘크리트 구조물의 실제적인 응력과 변형률의 관계를 알기 위해서는 크리프와 수축에 관한 구성방정식을 정량화하는 것이 필요하다. 본 연구는 콘크리트의 시간의존적인 변형 중에서 크리프 변형에 관한 현상학적인 문제를 수학적으로 전개하고 유변학적 접근방법을 사용하여 크리프에 관한 예측모델을 구성한다. 고전적인 4-매개변수 모델에 기초하여 각각의 변형성분을 조합하고, 적절한 크리프 변형을 얻어내기 위한 4개의 매개변수들을 재령영향과 겔 입자간의 연결을 제거하려는 미세프리스트레스의 영향을 고려하여 비선형 함수로 구성된 매개변수들을 전개하며 회복이 불가능한 점성변형에 대하여 습윤평형상태와 건조상태에서 모두 예측할 수 있는 유효점성계수를 유도한다. 본 연구에서 제안한 예측모델은 실험결과와 상관계수 99% 이상의 우수한 결과를 제공하고 있다.

핵심용어 : 4-매개변수 모델, 미세프리스트레스, 유효점성계수, 전체크리프

1. 서 론

콘크리트의 시간의존적인 변형에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. 이와 같은 연구는 두 가지의 목적을 갖는다고 할 수 있다. 첫째는 콘크리트의 이러한 현상학적 특성 예측에 관한 정보를 제공하는 것이며, 둘째는 엔지니어에게 상기한 정보를 적용할 수 있도록 공학적인 설계기준을 제공하는 것이다(FIB, 1999).

콘크리트의 시간의존적인 변형 중 크리프 변형에 관한 해석 방법은 역사적으로 EM method, AEM method, RC method, RF method, ID method, TB method, Step-by-Step method 등이 있으며, 고전적인 4-매개변수 모델에 근거한 RM method가 있다. RM method를 제외한 모든 것들은 크리프 계수를

이용하여 크리프 변형률을 얻어내는 방법이므로 우선적으로 적합한 크리프 계수가 있어야 한다. 반면에 RM method는 환경 영향, 재료특성, 재하재령 등을 이용하여 크리프 변형률을 직접적으로 얻어낼 수 있는 방법이다. 즉, RM method는 현상학적 특성들을 이용하여 크리프 함수를 유도함으로써 부가적으로 크리프 변형률, 크리프 계수를 동시에 얻을 수 있는 해석방법이다(Bazant and Wittmann, 1982).

본 연구는 고체화 이론과 미세프리스트레스 이론을 도입하여 고전적인 4-매개변수 모델의 제한사항을 보완함으로써 현상학적 연구결과를 직접적으로 적용하여 콘크리트의 크리프 변형을 예측할 수 있는 해석모델을 제안하는데 초점을 맞추고 있다(Bazant, 2004; Bazant, et al., 1997; Okamoto and Endoh, 1988).

*정희원 · 서울시립대학교 토목공학과 교수(E-mail: csll@uso.ac.kr)

**정희원 · 서울시립대학교 토목공학과 박사수료(E-mail: sand0514@hanmail.net)

2. 유변학적 접근법

선형 혹은 비선형 특성을 나타내는 응력-변형률 관계를 밝히는 유변학에서는 실제 재료의 거동과 유변학적 거동의 유사성을 표현하기 위하여 스프링, 감쇠기 등을 이용하여 이들의 상관관계를 정립한다. 토목재료 분야에서 콘크리트의 크리프 거동과 같이 시간중속적인 변형 특성을 유변학적 모델에 의하여 표현하고자하는 시도가 다양하게 이루어져왔다. 이와 같은 시도의 신뢰성은 콘크리트를 구성하는 다양한 성분들의 변형 특성을 어떠한 유변학적 장치로 어떠한 결합(직렬 혹은 병렬)을 이용하여 적용하느냐에 달려있다(Neville, *et al.*, 1994).

역사적으로 1935년 Burgers가 Fig. 1과 같이 Maxwell chain과 Kelvin chain을 조합한 4-매개변수 모델을 발표하였다. 이것은 몇 가지 제한사항을 내포하고 있지만 콘크리트의 즉시탄성, 지연탄성, 점성 변형을 모두 표현할 수 있으며, 회복 크리프도 표현할 수 있는 개념적으로 매우 안정적인 유변모델이다. 그 이후로 Ross(1943), Flugge(1950), Cowan(1956), Hansen(1958), Freudenthal-Roll(1958), Vaishnav-Kesler(1961) 등이 초기 연구에 주류를 이루었고, 최근 Bazant(1997), Mabrouk(1998) 등이 매개변수의 비선형성을 고려하고자 Fig. 2(a), (b)와 같이 Multi chain을 적용한 유변모델을 구성하여 발표하였다. 하지만 Fig. 2에서 나타내는 것과 같이 최근의 연구조차도 고전적인 4-매개변수 모델을 탈피하지는 못하였다. 그렇다면 고전적인 4-매개변수 모델의 매개변수를 적절한 비선형 함수로 제공함으로써 간결하면서도 이해성 높은 크리프 해석모델을 구성할 수 있다는 결론에 도달하게 된다.

고전적인 4-매개변수 모델의 크리프 함수는 Fig. 1의 거동 특성을 다음과 같은 평형방정식, 적합방정식, 구성방정식을 이용하여 전개할 수 있다.

$$\sigma = \sigma_0^e = \sigma_0^v = \sigma_1, \sigma_1 = \sigma_1^e + \sigma_1^v \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0^e + \dot{\varepsilon}_0^v + \dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_1 = \dot{\varepsilon}_1^e = \dot{\varepsilon}_1^v \quad (2)$$

$$\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon}, \sigma = \eta\dot{\varepsilon} \quad (3)$$

상기한 기초방정식들을 전개하면 다음과 같은 선형 2계 미분방정식을 얻을 수 있으며, 이것은 고전적인 4-매개변수의 지배미분방정식이 된다.

$$\ddot{\varepsilon} + \frac{E_1}{\eta_1}\dot{\varepsilon} = \frac{1}{E_0}\ddot{\sigma} + \left[\frac{1}{\eta_0} + \frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_1 E_0} \right] \dot{\sigma} + \frac{E_1}{\eta_1 \eta_0} \sigma \quad (4)$$

상기한 지배미분방정식에서 지속하중에 의해 발생하는 크리프 변형은 $\sigma = \sigma^*$ 인 경우에 해당되어 식(5)와 같이 단순화

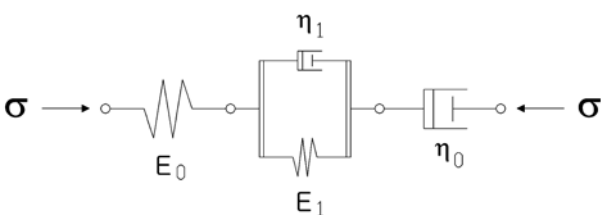
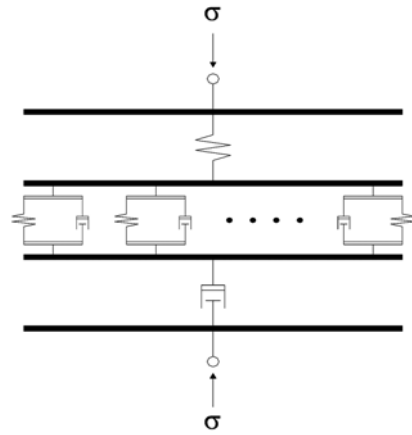
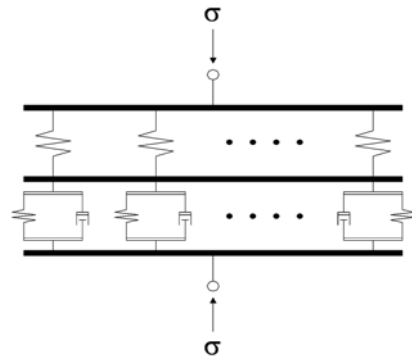


Fig. 1. Traditional 4-parameters model(1935)



(a) Model suggested by Bazant(1997)



(b) Model suggested by Mabrouk(1998)

Fig. 2 Models using Multi chain

될 수 있다.

$$\ddot{\varepsilon} + \frac{E_1}{\eta_1}\dot{\varepsilon} = \frac{E_1}{\eta_1 \eta_0} \sigma^* \quad (5)$$

σ^* : 일정한 가압응력

임의의 시간에서 매개변수들은 상수이므로 식(5)는 상계수 2계 미분방정식이 되어 제차 해와 특별 해의 선형조합으로 나타낼 수 있다. 이것을 해결하기 위하여 요구되는 초기조건 2개는 Fig. 1의 거동특성을 관찰하여 얻어낼 수 있다. 즉, 재하 순간은 Maxwell chain, Kelvin chain 모두 감쇠기는 작용하지 않고 단지 Maxwell chain의 스프링만 작용하며, 시간의 변화가 발생되면 Maxwell chain, Kelvin chain 모두 스프링의 변형률은 일정하므로 감쇠기들만 작용하게 된다. 이것을 수식으로 표현하면 다음과 같은 두 개의 초기조건을 얻을 수 있게 된다.

$$\dot{\varepsilon}(0) = \frac{1}{E_0} \sigma^* \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}(0) = \left[\frac{1}{\eta_0} + \frac{1}{\eta_1} \right] \sigma^* \quad (7)$$

위에서 얻은 초기조건 2개를 식(5)에 적용하면 식(9)와 같은 콘크리트 크리프 함수를 얻어낼 수 있게 된다.

$$\varepsilon(t) = J(t) \sigma^* = \left[\frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta_0} + \frac{1}{E_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right\} \right] \sigma^* \quad (8)$$

$$J(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta_0} + \frac{1}{E_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right\} \quad (9)$$

고전적인 4-매개변수 모델로부터 유도된 식(9)의 첫째 항은 순간탄성변형을 표현하는 것이고, 둘째 항은 비회복 점성 변형, 셋째 항은 지연탄성변형을 표현하는 것이다. 각 항의 특성을 보면, 순간탄성변형은 시간에 무관하게 일정하고, 비회복 점성변형은 시간에 따라 선형으로 증가하며, 점탄성 변형은 일정한 값에 수렴하고 그 때의 지연시간은 $t_1 = \eta_1/E_1$ 이 된다. 이렇게 구성된 콘크리트 크리프 함수는 각각의 변형 성분들을 적절하게 표현할 수 있는 매우 안정적인 모델이다. 하지만, 적절한 크리프 변형을 얻어내기 위한 4개의 매개변수들을 결정하는 것은 상당한 속도가 요구된다.

3. 고전적인 4-매개변수의 함수화

본 연구는 다음에 제시한 실험과 이론적인 근거를 이용하여 4개의 매개변수들을 결정한다. 첫째로 3일, 7일, 28일에 하중-변형을 실험으로부터 순간탄성변형에 관한 E_0 를 결정하고, 둘째로 회복크리프 실험으로부터 회복되는 전체 변형률을 통하여 지연탄성변형에 관한 E_1 을 결정하며 그 때의 곡선의 기울기를 시험오차로 구하여 η_1 을 결정한다. 마지막으로 기본크리프와 건조크리프 실험으로부터 유효점성계수 η_0 를 결정한다. 여기서, 순간탄성에 관한 매개변수는 FIB MC 90의 탄성계수 발현함수를 이용하고, 지연탄성에 관한 2개의 매개변수들은 Kelvin chain의 거동특성을 이용하며, 유효점성계수에 관한 매개변수는 겔 입자간의 미세프리스트레스의 변화과정을 이용한다.

3.1 순간탄성변형에 관한 매개변수의 함수화

본 연구는 응결된 요소의 누적체적을 FIB MC 90에서 제시하는 탄성계수 발현함수를 채용하여 재령효과를 고려한다. 이것으로부터 즉시탄성변형을 예측할 수 있게 된다. 여기서, 시멘트의 수화가 종료되는 시기를 무한대 시간으로 표현하고, 이 때를 10000일로 가정한다. 또한, $V(t)$ 는 임의의 시간에서 수화로 인해 응결된 체적을 의미한다(CEB-FIP, 1990).

$$\begin{aligned} E_0 &= v_E(t_0)E_\infty \\ E_\infty &= V(\infty)E_{28} \\ v_E(t_0) &= \frac{V(t_0)}{V(\infty)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$V(t) = \left[\exp \left\{ s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right\} \right]^2$$

s : 시멘트 종류에 관한 상수 (O.P.C.=0.25)

3.2 지연탄성변형에 관한 매개변수의 함수화

콘크리트의 크리프 변형성분 중에서 점탄성 변형은 지연탄성 변형으로써 회복이 가능한 비선형 변형이다. 이것은 고전적인 4-매개변수 모델에서 Kelvin chain에 해당되는 것으로써 회복크리프 실험결과에서 2개의 매개변수를 추출하는 것이 가능해진다. Fig. 3은 지연탄성 거동과 매개변수들의 관계를 보이고 있다. 식(11)~(14)는 지연탄성변형에 관한 크리프 계수를 나타내고 있으며, 특히 식(14)의 극한 지연탄성 크리프 계수는 회복크리프 실험결과에 따라 결정되는 실험 상수이다(Bazant and Prasannam, 1989; Okamoto and Endoh,

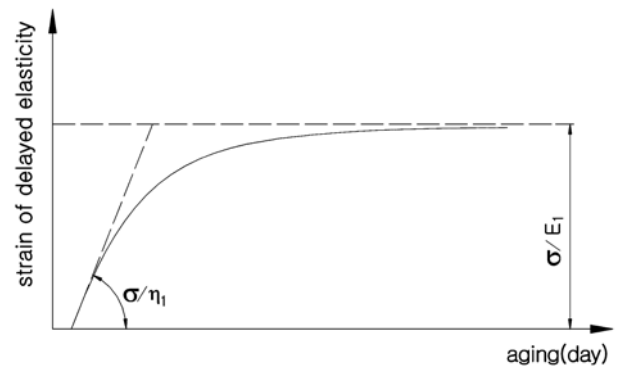


Fig. 3. Parameters connected with delayed elasticity

1988).

$$\phi_v(t) = \frac{J_v(t)}{J_e(t)} \quad (11)$$

$$J_v(t) = \frac{1}{E_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\eta_1}\right) \right\} \quad (12)$$

$$J_e(t) = \frac{1}{E_0} \quad (13)$$

$$E_1 = E_0/\phi_d \quad (14)$$

3.3 점성변형에 관한 매개변수의 함수화

콘크리트의 크리프 변형성분 중에서 점성변형은 기본크리프와 건조크리프의 합으로 회복이 불가능한 비선형 변형이다. 이것은 겔과 겔 사이의 결합을 제거하는 미세프리스트레스에 의해서 발생하는 전단 미끄러짐 현상에 기인된 점성의 변화로 설명될 수 있다. Fig. 4는 미세프리스트레스 변화과정을 정성적으로 표현하고 있다. 실제로 크리프의 주요한 원인으로 알려진 결합의 취약작용에 의하여 겔 입자간의 미끄러짐이 유도되어 크리프가 발생한다는 주장과 거의 유사한 접근이다.

이러한 전단 미끄러짐 현상은 전단응력에 의하여 발생되며, 주로 미끄러짐 면에 대한 횡방향 수직응력에 영향을 받는다. 미세프리스트레스는 미세공극 내부의 분리압이나 결정 성장압 등에 의하여 발생된다. 미세프리스트레스는 미세공극 내부의 상대증기압(h)에 관한 함수가 된다. 즉, 미세프리스트레스의 변화과정은 재령과 직접적으로 무관한 것으로 여겨질 수 있다. 하지만, 미세공극 내부의 상대증기압은 재료의 구성, 환경효과(외기온도, 상대습도), 재령에 따라 크기와 변화량이 변화하게 된다. 결과적으로 미세프리스트레스의 변화과정은 재령과 간접적으로 함수관계가 성립함을 알 수 있게 된다 (Bazant 2004; Bazant et al., 1997; Bazant and Wittmann,

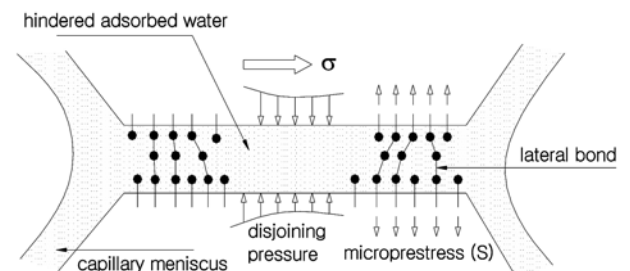


Fig. 4. Overview of microstress change among gels



Fig. 5. Rel. with microprestress and effective viscosity

1982).

미세프리스트레스에 따라 변화되는 콘크리트의 점성변형률 속도는 유효점성계수 $\eta_0(S)$ 에 관한 함수이며, 식(15)로 표현될 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_f = \frac{\sigma}{\eta_0(S)} \quad (15)$$

여기서, 유효점성계수 $\eta_0(S)$ 는 식(15)와 같이 미세프리스트레스가 증가하면 감소되는 특성을 보인다. 이것은 누승함수를 이용하여 식(16)과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\frac{1}{\eta_0(S)} = spS^{p-1} \quad (16)$$

c : 실험적 상수로써 양의 정수

p : 실험적 상수로써 1보다 큰 정수

미세프리스트레스의 변화과정에 관한 지배미분방정식은 선행연구자인 Bazant의 연구결과로부터 식(17)과 같이 표현할 수 있다(Bazant 2004; Bazant et al., 1997).

$$\frac{\dot{S}}{C_s} + \frac{S}{\eta} = \frac{\dot{\gamma}}{C_s} \quad (17)$$

C_s : 겔 입자간의 유사 강성

$\dot{\gamma}$: 미세프리스트레스의 시간적 변화율

상기한 식(17)에서 $\dot{\gamma}$ 는 모세관 장력, 표면 장력, 결정 성장압에 의해 발생하는 미세프리스트레스의 순간변화율로써 식(18)로 정의된다.

$$\dot{\gamma} = C_1 \frac{\dot{h}}{h} \quad (18)$$

C_1 : 증발에 관한 실험적 상수

h : 공극의 습도

미세프리스트레스에 관한 지배미분방정식 식(17)에 유효점성계수에 관한 식(18)을 적용하여 재정렬하면 식(19)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\dot{S}}{C_s} + cpS^{p-1}S = \frac{C_1 \dot{h}}{C_s h} \quad (19)$$

건조크리프 변형의 경우는 미세공극 내부의 상대증기압 변화가 발생하므로 간단한 미분방정식을 이용하여 변형을 예측하는데 무리가 따르게 된다. 미세프리스트레스에 관한 지배미분방정식을 전개한 식(19)를 미분의 형태로 변화시키면

식(20)과 같이 표현된다.

$$dS + cpC_s S^p dt - C_1 \frac{dh}{h} = 0 \quad (20)$$

임의의 정적인 시간에서의 미세프리스트레스는 그 때의 온도조건이 고려된 누적재령(성숙도), 공극의 습도에 의해 결정되므로 식(21)과 같이 가정할 수 있다. 그리고, 식(20)의 미세프리스트레스를 치환하면 식(22)를 얻을 수 있게 된다. 특히, 식(21)의 누적재령은 FIB MC 90의 모체가 되는 Bazant의 연구결과를 채용하도록 한다(Bazant, 20004; Bazant and Wittmann, 1982; CEB-FIP, 1990).

$$S \equiv (t_e)^{-\alpha} \quad (21)$$

α : 경험적 상수로써 양수의 값

$$t_e = \sum_{i=1}^n \exp\left(\frac{4000}{293} - \frac{4000}{T_i}\right) \Delta t_i$$

T_i : 절대온도(K)

$$d[(t_e)^{-\alpha}] + cpC_s [(t_e)^{-\alpha}]^p dt_e - C_1 \frac{dh}{h} = 0 \quad (22)$$

위의 식(22)는 부정적분하고 사실상 임의의 적분구간을 정의하게 되므로 적분상수를 0으로 적용하면, 식(23)을 얻을 수 있게 되며, 이것을 식(21)로 가정한 누적재령을 미세프리스트레스로 환원시키면 식(24)와 같이 된다.

$$(t_e)^{-\alpha} + \frac{cp}{1-\alpha p} C_s (t_e)^{1-\alpha p} - C_1 \ln|h| = 0 \quad (23)$$

$$S + \frac{cp}{1-\alpha p} C_s (t_e)^p - C_1 \ln|h| = 0 \quad (24)$$

겔 입자간의 미세프리스트레스 변화와 유효점성계수의 변화에 관한 연구에서 Bazant는 실험상수 $c=1$, $p=2$ 를 제안하고 있다. 그리고, 재령은 반드시 양수이고, 공극의 습도는 $0 \leq h \leq 1$ 의 범위에서 변화된다. 이들을 식(24)에 적용하면, 식(25)와 같은 미세프리스트레스에 관한 2차 방정식을 얻을 수 있게 된다(Bazant 2004; Bazant et al., 1997).

$$\frac{2}{1-2\alpha} C_s (t_e) C_s (t_e) S^2 + S - C_1 \ln|h| = 0 \quad (25)$$

$$A \equiv \frac{2}{1-2\alpha} C_s (t_e), B \equiv -C_1 \ln|h|$$

상기한 식(25)가 해를 갖으려면 $1-4AB \geq 0$ 을 만족해야 하며, $B \geq 0$ 이므로 $A \leq 0$ 이어야 한다. 필연적으로 $\alpha > 5$ 이 되어야 한다.

기본크리프는 습윤평형상태이므로 식(19)의 우변이 0이 되어 변수분리형 1계 미분방정식이 된다. 이것을 전개하면 식(26)을 얻을 수 있고, 식(15), (16)을 이용하면 식(27)이 유도된다.

$$cpS^{p-1} = \frac{1}{(p-1)C_s(t_e)} \quad (26)$$

$$J_f(t_e) = \frac{1}{C_s} \ln|t_e| \sigma \quad (27)$$

여기서, 겔 입자간의 유사 강성을 대표하고 있는 C_s 는 물시

멘트비, 압축강도, 탄성계수에 관한 함수로써 기본크리프의 극한값을 결정하는 인자이다. 본 연구는 기본크리프 실험과 오차의 평균이 가장 작은 값을 결정하여 Table 6에 정리하였다.

기본크리프에 관한 전개식으로부터 미세프리스트레스와 임의의 누적재령간의 관계를 맺어주는 계수는 $\alpha=1.0$ 임을 확인할 수 있게 된다. 최종적으로 미세프리스트레스에 관한 해를 얻기 위하여 모든 계수들을 도입하여 정리한 식(28)은 식(29)와 같은 형태를 갖게 된다. 회복이 불가능한 크리프 변형률은 다음의 식(30)과 같이 적분의 형태를 갖게 된다. 식(29)에서 공극의 습도에 관한 $ln|h|$ 는 재령변화에 따라 감소하는 함수로써 식(32)의 우변과 같이 나타내어진다.

$$-2C_s(t_e) + S^2 + S - C_1 ln|h| = 0 \quad (28)$$

$$S = \frac{1 + \sqrt{1 - 8C_s C_1 ln|h|(t_e)}}{4C_s(t_e)} \quad (29)$$

$$J_f(t_e) = \int_{t_{e,0}}^{t_e} \frac{dt_e}{\eta_0(S)} = 2 \int_{t_{e,0}}^{t_e} S dt_e = 2 \sum_{i=1}^n [S_i(t_{e,i}) \Delta t_{e,i}] \quad (30)$$

상기한 2차 방정식의 해 식(29)는 기본크리프와 건조크리프에 의한 변형을 모두 표현하고 있음을 알 수 있다. 즉, 기본크리프 경우에는 $ln|h|=0$ 이 되어 $2S=1/C_s t_e$ 가 된다. 건조크리프인 경우에는 근호안의 수분이동에 관한 항이 변화하면서 전체크리프가 건조크리프에 의해 기본크리프와 편차를 갖는 것을 표현할 수 있는 형태가 된다.

겔 입자간의 미세프리스트레스 변화과정에 관한 지배미분 방정식을 전개한 식(29)를 재하재령에 관한 식으로 변화시키면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(t_e - t_{e,0} + 1) = \frac{1 + \sqrt{1 - C_s C_f (t_e - t_{e,0} + 1)^{-1}}}{4C_s(t_e - t_{e,0} + 1)} \quad (31)$$

$$C_1 ln|h| = \left[\frac{\alpha_s}{f_{28}} \left[\frac{ln|RH/RH_0|}{(t_e - t_{e,0} + 1)^2} \right] \right] = C_f \left[\frac{1}{(t_e - t_{e,0} + 1)} \right]^2 \quad (32)$$

$$C_f = \left[\frac{ln|RH/RH_0|}{f_{28}} \right] \quad (33)$$

$$\alpha_s = f(h) = 0.020$$

h : 단면적-윤변장비

수분증발은 외기의 상대습도에 반비례하고, 콘크리트 압축강도에 반비례하며, 비표면적에 관한 함수이다(CEB-FIP, 1990). 식(33)은 이러한 관계를 만족하고 있으며, 비표면적에 관한 계수 α_s 는 경험적인 상수로써 실험결과를 이용하여 결정하였다.

4. 실험적 연구

건조상태에서 콘크리트에 일정한 하중을 재하하면 순간탄성, 지연탄성, 기본크리프, 건조크리프, 자기수축, 건조수축에 의한 변형이 발생된다. 따라서, 회복이 불가능한 점성변형인 기본크리프와 건조크리프 이외의 변형들에 관한 효과를 정량적으로 소거하기 위해 부가적인 실험들도 동시에 수반되어야 한다(ASTM, 1982, Bazant and Wittmann,

1982; JCI)

4.1 실험개요

콘크리트의 크리프 변형에 영향을 미치는 요소들을 살펴보면, 재료의 구성에 관계된 내적요소와 하중, 재령, 외기조건 등에 관계된 외적요소로 구분된다. 외적요소를 적절하게 고정하면 내적요소 변화에 따라 변형의 크기가 변화할 것은 자명하다. 공학적인 관점에서 내적요소의 변화에 따른 결과는 일반적으로 압축강도와 탄성계수로 표출된다. 이것들은 배합에 있어 물시멘트비에 가장 큰 영향을 받게 된다. 따라서, 실험에 관한 독립변수는 물시멘트비가 되며, 0.3, 0.4, 0.5 이상 세 종류로 실험적 연구를 수행한다(Neville 1998, Neville et al., 1983).

실험조건은 ASTM C 512를 기준으로 한다. 또한, 공시체 제작은 강제식 믹서를 이용하여 비비고, 24시간 동안 20°C를 유지하는 항온실에서 조절시킨 후 탈형한다. 탈형 후 48시간 동안 20°C를 유지하는 항온조에서 습윤양생을 수행하고, 하중재하 직전에 공시체에 파라핀을 도포한 후 랩으로 밀봉하여 이후 360일 동안 습윤평형상태, 외기온도 20±2°C를 유지하는 항온습실에서 실험을 수행한다. 뿐만 아니라 건조환경인 상대습도 50±3%인 상태의 항온습실에서 실험을 수행한다. 순간탄성변형을 확인하기 위하여 재령 3일, 7일, 28일에 압축강도실험과 탄성계수실험을 수행한다. 지연탄성변형을 확인하기 위해 회복크리프 실험을 수행한다. 마찬가지로 재령 3일에 재하한 후 재령 28일에 재하하여 회복되는 변형을 확인함으로써 간접적으로 지연탄성변형을 추출한다(ASTM 1983).

4.2 배합설계

콘크리트에서 발생하는 장기변형의 근원은 시멘트 페이스트의 점탄성 및 점성 특성이다. 즉, 동일한 압축강도를 발휘하는 경우에도 시멘트 페이스트 함유량에 따라 서로 다른 값을 나타낼 수 있다. 따라서, 실험에 사용된 단위시멘트량은 고정되어야 한다. 또한, 크리프에 직접적인 영향을 미치는 잔골재율도 고정되어야 한다. 이러한 사항들을 고려하여 배합을 Table 1과 같이 구성한다(Bazant and Wittmann, 1982).

Table 1. Digest of design of mix proportion

mix type	Gmax (mm)	slump (mm)	air. (%)	w/c (%)	s/a (%)	unit weight (N/m ³)			
						W	C	G	S
C03	19	120	5	30	45	1256	4169	9820	7887
C04	19	130	5	40	45	1668	4169	9221	7407
C05	19	140	5	50	45	2080	4169	8613	6906

Table 2. Results of slump and air content test

mix type	slump (mm)			air content (%)		
	design	experiment	error	design	experiment	error
C03	120	130	10	5	6	1
C04	130	140	10	5	6	1
C05	140	140	0	5	6	1

Table 3. Results of strength and modulus with aging

mix type	compressive strength (MPa)			modulus of elasticity (MPa)		
	3day	7day	28day	3day	7day	28day
C03	29.0	34.7	45.7	24186	27339	30602
C04	18.9	22.3	29.7	20433	23074	26498
C05	15.4	18.5	24.4	19823	22445	24972

본격적인 장기변형 분석에 앞서 기초적인 물성실험을 수행하였으며 여기에는 슬럼프 실험(KS F 2402-02), 공기량 실험(KS F 2421-02), 압축강도 실험(KS F 2405-01)이 포함된다. 그리고, 배합설계는 KS F 2405 관련지침 4-17을 참고하였다. 슬럼프 실험과 공기량 실험에 관한 결과와 압축강도 실험에 관한 결과를 각각 Table 2와 Table 3에 정리한다.

4.3 실험상수 결정

지연탄성 크리프계수는 실험적으로 의 범위를 나타냄을 확인할 수 있으며, 본 연구는 극한 지연탄성 크리프계수로 결정한다. 또한, 탄성변형의 지연현상을 발생시키는 유효점성계수는 Bazant의 연구로부터 의 범위를 갖는다. 본 연구는 이들의 평균값인 $\eta_1=1.2 \times 10^6 (MPa \cdot day)$ 를 적용하는 것으로 결정한다(Bazant *et al.*, 1997; Bazant and Prasannam, 1989; Okamoto and Endoh, 1988).

Figs. 6~7에 나타난 회복크리프 실험에서 얻은 지연탄성 크리프계수를 식 (11)에 적용한 결과는 Fig. 8과 같은 분포를 가지며, 회복 가능한 변형성분에 관한 특성 변형률($\times 10^{-6}/MPa$)을 Table 4에 요약한다.

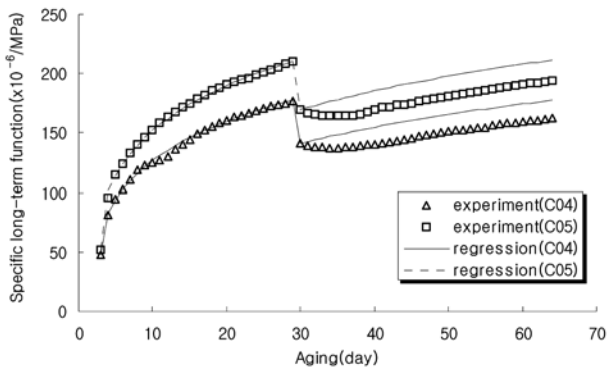


Fig. 6. Results of recovery creep test

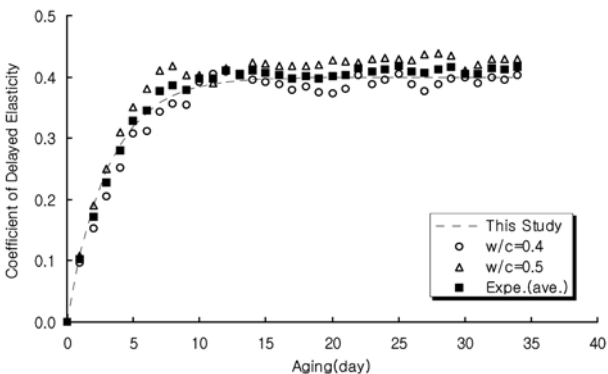


Fig. 7. Abstracting coefficient of delayed elasticity

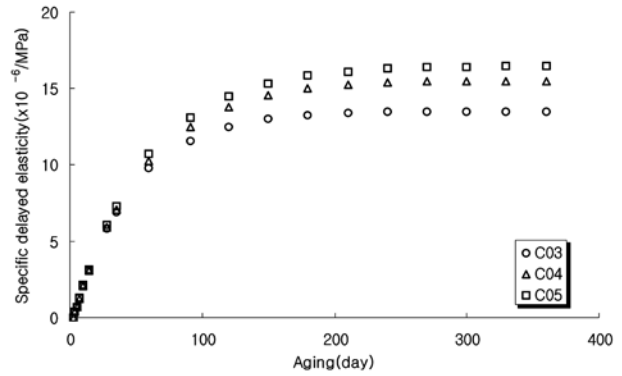


Fig. 8. Prediction of specific delayed elasticity based on recovery creep test

Table 4. Digest of specific recoverable strain

component	aging(day)	C03	C04	C05
instant elasticity	3	41	49	50
	28	33	38	40
delayed elasticity	28	6	6	6
	360	13	15	16

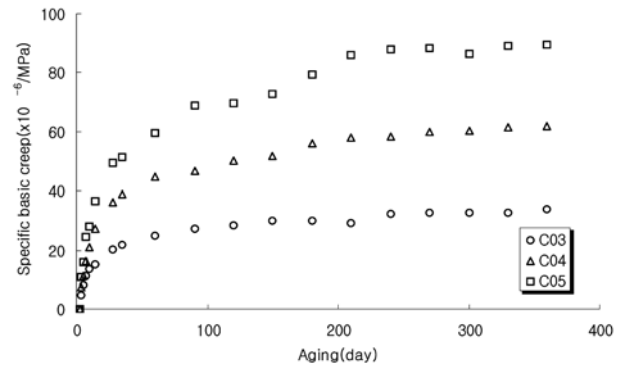


Fig. 9. Result of basic creep test

Table 5. Digest of specific basic creep strain

component	aging(day)	C03	C04	C05
basic creep	28	20	36	49
	360	34	62	90

Table 6. Empirical parameters for pseudo stiffness

mix type	C03	C04	C05
	209176	109685	74677
	4.781	9.117	13.391

기본크리프 실험에 부수적으로 중첩되어 발생하는 변형성분들을 제거한 회복 불가능한 점성변형의 실험결과는 Fig. 9와 같은 분포를 가지며, 결과적으로 나타나는 특성 변형률($\times 10^{-6}/MPa$)을 Table 5에 요약한다. 또한, 식(27)에서 습윤 평형상태의 점성변형을 지배하는 겔 입자간의 유사강성에 관한 실험적 상수를 Table 6에 제시한다.

전체크리프 실험에 부수적으로 중첩되어 발생하는 변형성분들을 제거한 회복 불가능한 점성변형의 실험결과는 Fig. 10과 같은 분포를 가지며, 결과적으로 나타나는 특성 변형률($\times 10^{-6}/MPa$)을 Table 7에 요약한다.

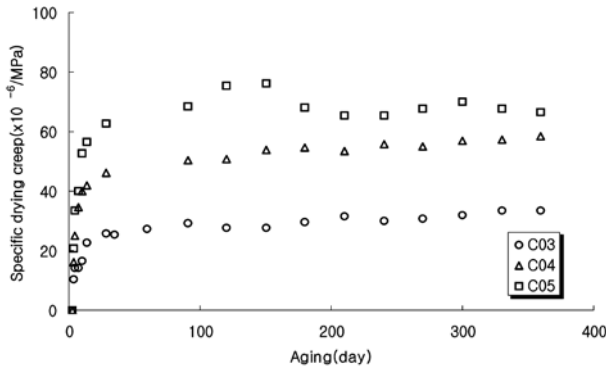


Fig. 10. Result of drying creep test

Table 7. Digest of specific drying creep strain

component	aging(day)	C03	C04	C05
drying creep	28	26	46	63
	360	34	59	67

5. 비선형 4-매개변수 유변모델

앞서 전개한 식(12), 식(13), 식(30)은 Pickett's effect에 의한 독립적인 변형성분으로써 다음과 같이 선형조합하여 특성 크리프를 얻을 수 있다.

$$J(t_e, t_{e,0}) = \frac{1}{E_0} + \int_{t_{e,0}}^{t_e} \frac{dt_e}{\eta_0} + \frac{1}{E_1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1}(t_e - t_{e,0})\right) \right\} \quad (34)$$

본 연구에서 제안한 식(34)는 외관상으로는 식(9)와 다른 것이 없어 보인다. 여기서, 주의해야 할 사항은 변형성분의 조합이 아니라 사용되는 4개의 매개변수들이 어떠한 값을 갖는가에 관한 것이다. 앞서 제시된 각각의 매개변수들은 콘 크리트의 크리프 변형을 적절하게 예측하는데 사용되는 중요한 결과물이다. Table 8은 본 연구결과와 실험에 관한 레이블을 정리하였다.

다음의 Figs. 11(a)~11(c)는 기본크리프와 전체크리프에 관한 실험과 제안모델을 비교하고 있다. 이 때의 상관계수들은 각 99.5%, 99.7%, 99.8%를 나타낸다.

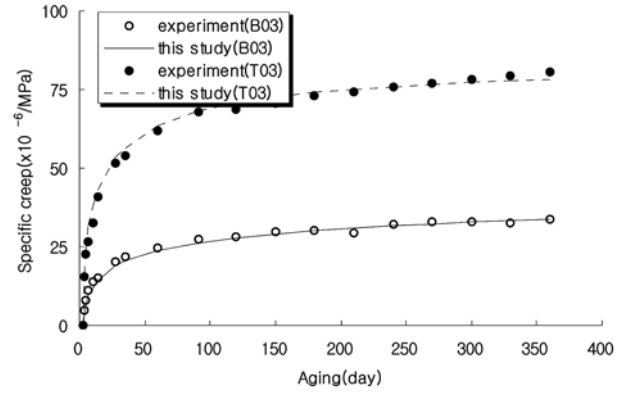
다음의 Figs. 12(a)~12(c)는 FIB MC 90과 전체크리프에 관한 실험과 제안모델을 비교하고 있다. 이 때의 FIB MC 90과 실험결과의 상관계수들은 각 97.3%, 97.3%, 97.3%를 나타낸다.

다음의 Figs. 13(a)~13(c)는 FIB MC R99와 전체크리프에 관한 실험과 제안모델을 비교하고 있다. 이 때의 FIB MC R99와 실험결과의 상관계수들은 각 97.5%, 97.2%, 97.0%를 나타낸다.

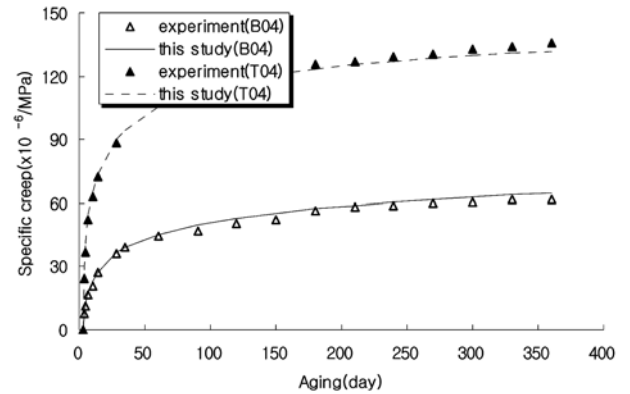
다음의 Figs. 14(a)~14(c)는 ACI committee 209와 전체크리프에 관한 실험과 제안모델을 비교하고 있다. 이 때의 ACI committee 209와 실험결과의 상관계수들은 각 96.7%, 96.3%, 96.2%를 나타낸다.

Table 8. Presentation of label each mix type

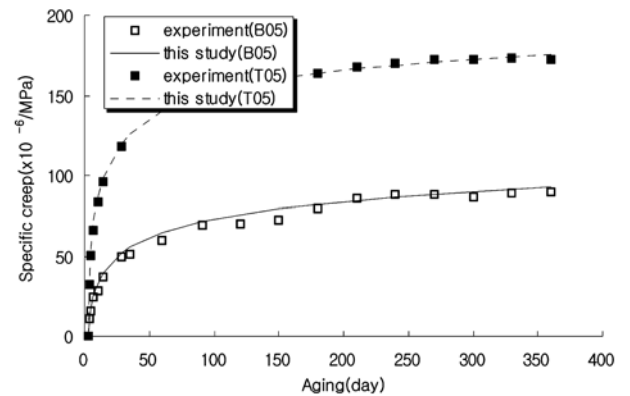
mix type	C03	C04	C05
basic creep	B03	B04	B05
total creep	T03	T04	T05



(a) Results of basic and total creep of C03



(b) Results of basic and total creep of C04



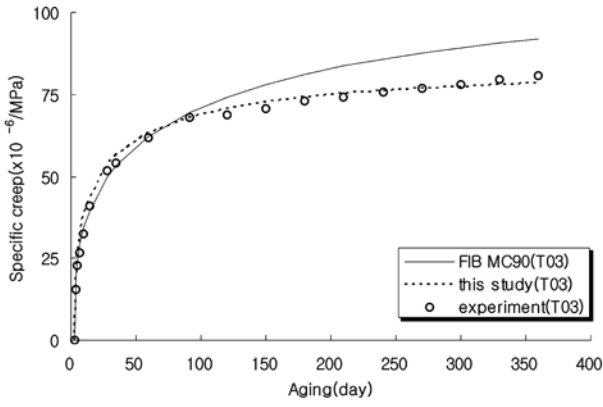
(c) Results of basic and total creep of C05

Fig. 11 Results of basic and total creep of

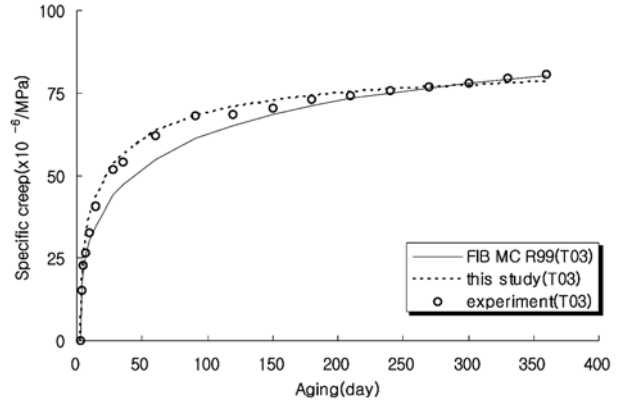
다음의 Figs. 15(a)~15(c)는 AASHTO DS 1994와 전체크리프에 관한 실험과 제안모델을 비교하고 있다. 이 때의 AASHTO DS 1994와 실험결과의 상관계수들은 각 96.8%, 96.5%, 96.4%를 나타낸다.

6. 결 론

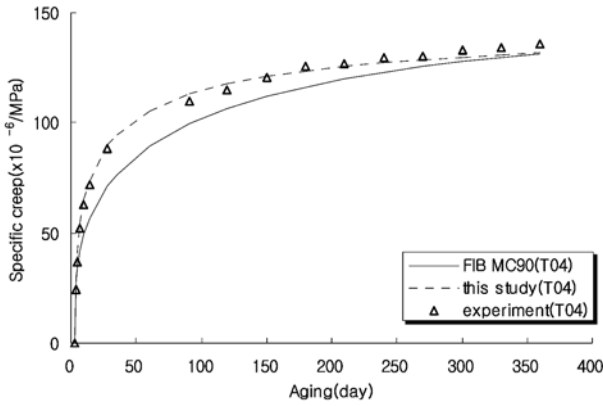
본 연구는 콘크리트의 시간의존적인 변형 중에서 크리프 변형에 관한 현상학적인 문제를 수학적으로 전개하고 유변학적 접근방법을 사용하여 크리프에 관한 예측모델을 구성하였다. 예측모델을 전개하는 과정에서 재령의 영향과 젤 입자간의 연결을 제거하려는 미세프리스트레스의 영향으로 인한 유효점성의 변화를 주요한 관심사로 두고 있으며, 그 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.



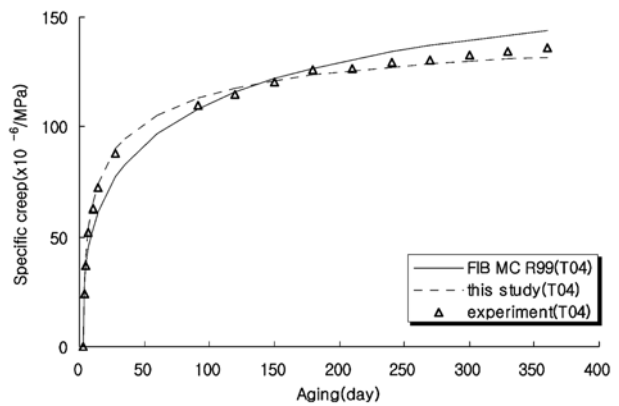
(a) Comparison with FIB MC 90 and C03



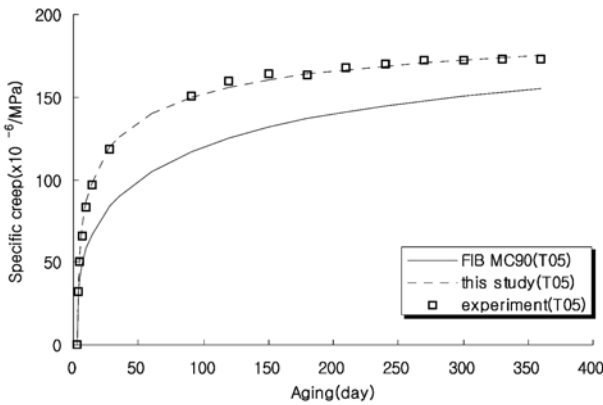
(a) Comparison with FIB MC R99 and C03



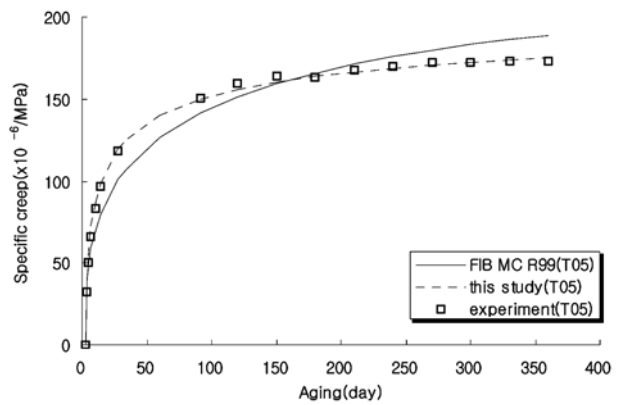
(b) Comparison with FIB MC 90 and C04



(b) Comparison with FIB MC R99 and C04



(c) Comparison with FIB MC 90 and C05



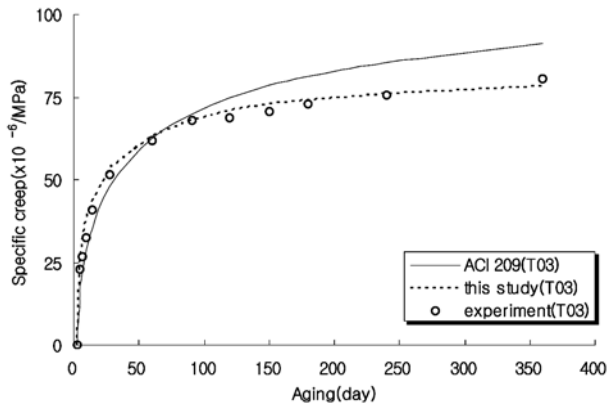
(c) Comparison with FIB MC R99 and C05

Fig. 12 Comparison with FIB MC 90 and

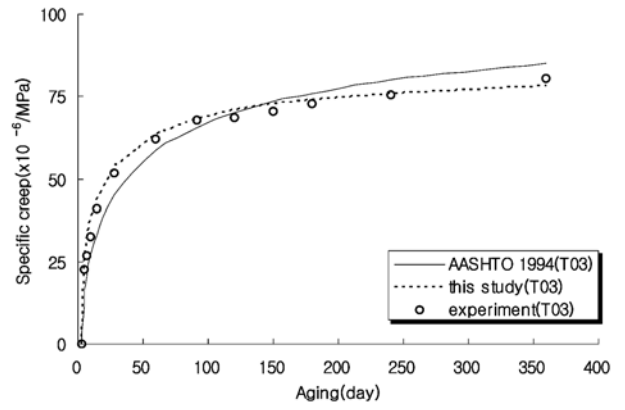
Fig. 13 Comparison with FIB MC R99 and C05

1. 콘크리트에 발생하는 크리프, 건조수축, 자기수축 등의 시간종속적인 변형은 시멘트 페이스트와 자유수의 양에 민감한 특성을 합리적으로 표현하고자 물시멘트비를 주요한 독립변수로 정한 후 수행한 실험결과와 제안한 예측모델은 기존의 예측모델에 비해 시간이력 추이와 값들의 편차가 훨씬 작음을 확인할 수 있었다. 콘크리트의 크리프 변형을 예측하는데 있어 본 연구결과와 실험결과는 물시멘트비별 각각 $R^2 \geq 99\%$ 이상의 결과를 제공하고 있다.
2. 습윤평형상태에서 기본크리프 총량을 결정짓는 것으로 겔 입자간을 연결하는 유사 강성에 관한 실험상수는 물시멘트비 0.3, 0.4, 0.5에 따라 각각 209176, 109685, 74677 로써 겔 입자간의 유사강성은 물시멘트비에 반비례함을 알 수 있었다.
3. 회복되는 변형성분 중에서 지연된 변형의 총량을 확인하

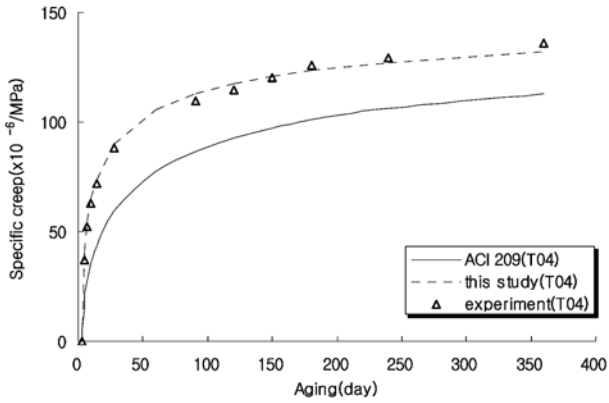
- 기 위한 회복크리프 실험으로부터 지연탄성변형은 즉시탄성변형의 40% 전후임을 확인할 수 있었다. 즉, 극한지연탄성계수 $\phi_l=0.4$ 가 적합함을 확인하였다.
4. 본 연구의 예측모델은 겔 입자간에 작용하는 미세프리스트레스의 변화를 조절하여 외기 상대습도에 관한 조건이 습윤평형상태, 건조상태에 무관하게 기본크리프와 전체크리프를 동시에 확인하는 것이 가능하도록 구성되어 있어 외기의 온도 및 상대습도가 변화하더라도 함수의 변경없이 하나의 함수로 표현하는 것이 가능한 결과를 제공한다.
5. 콘크리트의 크리프 변형에 관한 곡선의 개형이 유사한 이유로 대부분의 예측모델들이 $R^2 \geq 95\%$ 의 결과를 나타내고 있다. 실험결과와의 관계를 고찰해보면, European 계열의 예측모델은 $R^2 \geq 97\%$, American 계열의 예측모델은 $R^2 \geq 96\%$ 를 보이고 있지만, 값들의 편차는 American 계



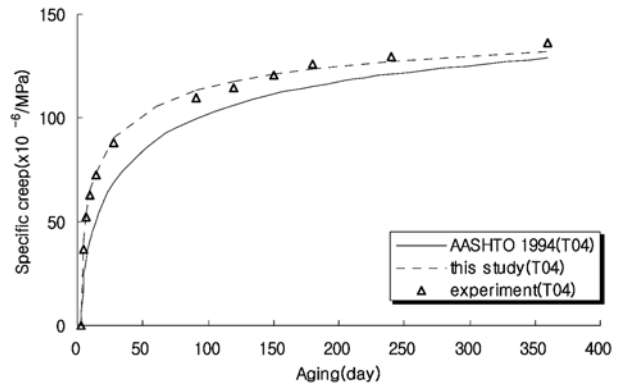
(a) Comparison with ACI committee 209 and C03



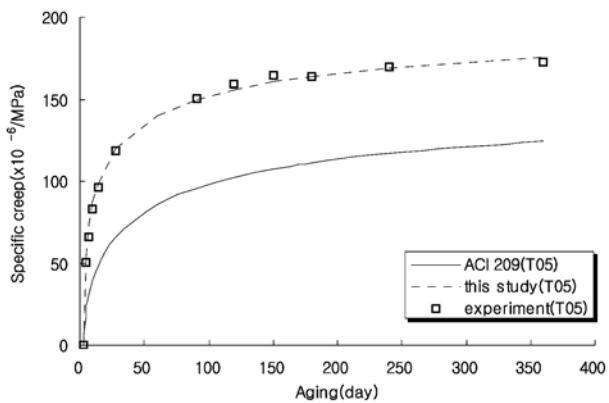
(a) Comparison with AASHTO DS 1994 and C03



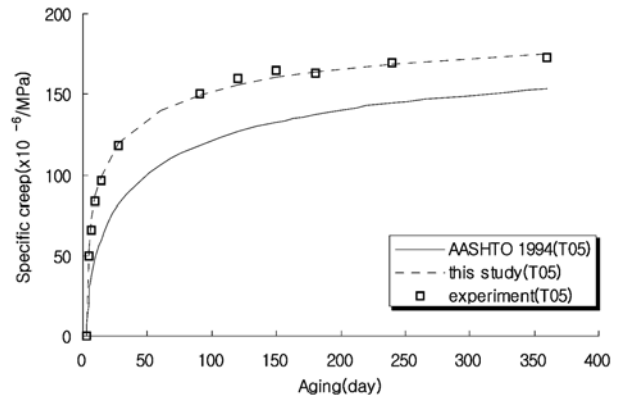
(b) Comparison with ACI committee 209 and C04



(b) Comparison with AASHTO DS 1994 and C04



(c) Comparison with ACI committee 209 and C05



(c) Comparison with AASHTO DS 1994 and C05

Fig. 14(c) Comparison with ACI committee 209 and

Fig. 15 Comparison with AASHTO DS 1994 and

열의 예측모델이 상당한 값을 나타내어 적합하지 못한 결과를 제공함을 확인할 수 있었다.

6. 부가적으로 본 연구결과에서 확인된 바와 같이 현행 국내 설계기준의 모체인 FIB MC 90은 $w/c=0.3$ 에서는 과대평가, $w/c=0.4$ 에서는 적절, $w/c=0.5$ 에서는 과소평가를 나타내어 일정하지 않은 결과를 보이고 있어서 일률적이지 못한 결과를 제공하고 있다. 따라서, 일반적인 경우의 예측 모델로 받아들이기에는 부적절한 것으로 사료된다.
7. 고전적인 유변모델이 포함하고 있는 4개의 매개변수를 비선형적으로 결정하여 콘크리트 크리프 변형률을 예측함으로써 보다 과학적인 전개과정을 얻을 수 있었다. 추후 실험적인 보완을 통해 매개변수들의 경험적 상수를 증보할 수 있도록 구성하였다.
8. 본 연구에서 제안한 예측모델은 습윤평형, 습윤불평형 환

경 모두에서 외기의 상대습도를 고려하여 크리프 변형을 예측하는 것은 가능하지만, 재령에 따라 시시각각 임의로 변하는 외기의 상대습도를 고려하는 것은 실험적 검증이 부족한 상태이므로 추후 추가적인 연구를 통해 보완되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 건설교통부(1999) 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 대한건축학회.
- 송영철, 송하원, 변근주(2000) 단기크리프 시험결과를 이용한 콘크리트의 크리프 예측식의 수정, 한국콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제12권, 제4호, pp.69-78.
- AASHTO (1994) AASHTO Design Specification 1994.

- ACI Committee 209R-92 (1994) Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures, ACI Manual of Concrete Practice, Part I.
- ASTM Committee C-9 (1983) Standard test method for creep of concrete in compression, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 02., C-512-82.
- Bazant, Z.P. (2004) Durability modeling based on fracture, diffusion, chemomechanics and creep : recent advances, proc. of 4th international conference on concrete under severe Conditions, CONSEC '04, Seoul, pp.3-16.
- Bazant, Z.P., and Carol, I. (1997) Viscoelasticity with aging caused by solidification of non-aging constituent, *J. of Engrg. Mech. ASCE*, Vol. 119, pp.2252-2269.
- Bazant, Z.P., and Prasannam, S. (1989) Solidification theory for concrete Creep. I : Formulation, *J. of Engrg. Mech. ASCE*, Vol. 115, pp.1691-1703.
- Bazant, Z.P., and Prasannam, S. (1989) Solidification theory for concrete Creep. II : verification and application, *J. of Engrg. Mech. ASCE*, Vol. 115, pp.1704-1725.
- Bazant, Z.P., and Wittmann, F.H. (1982) Creep and shrinkage in concrete structures, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Bazant, Z.P., Hauggaard, A.B., Baweja, S., and Ulm, F.J. (1997) Microprestress-solidification theory for concrete Creep. I : aging and drying effects, *J. of Engrg. Mech. ASCE*, Vol. 123, pp.1188-1194.
- Bazant, Z.P., Hauggaard, A.B., Baweja, S., and Ulm, F.J. (1997) Microprestress-solidification theory for concrete Creep. II : algorithm and verification, *J. of Engrg. Mech. ASCE*, Vol. 123, pp.1195-1201.
- CEB-FIP (1990) CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures, Comite Euro-International du Beton, Lausanne.
- Eierle. B. and Schikora. K. (1999) Computational viscoelasticity of aging materials, ECCM. '99.
- FIB (1999)CEB-FIP Model Code 90 for Concrete Structures, Structural Concrete, Vol. I, pp.37-61, Federation Internationale du Beton.
- Gilbert, R.I. (1988) Time Effects in Concrete Structures, Elsevier, Amsterdam-Oxford-NewYork-Tokyo.
- JCI Technical Committee Report on Autogenous Shrinkage (1998) Autogenous shrinkage of concrete, preceeding of the international workshop, Tazawa, E&FN Spon, London, pp.3-63.
- JSCE (1996) Japanese Standard Specification for Design of Concrete Structures.
- Neville, A.M. (1994) Properties of Concrete, Longman Scientific & Technical, London.
- Neville, A.M., Dilger, W.H., and Brooks, J.J. (1983) Creep of Plane and Structural Concrete, Con-struction Press, London-New York.
- Niyogi, A.K., Hau, P., and Meyers, B.L. (1973) The influence of age at time of loading on basic and drying creep, Cement and Concrete Research, Vol. 3, pp.633-644.
- Okamoto, K. and Endoh, T. (1988) A study on acknowledge of deformation in very early aging concrete subjected to sustained load, proc. of JSCE, Vol. 9, No. 396, pp. 69-77.
- RILEM Committee TC 69 (1988) State of the Art in Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., U.K.

(접수일:2005.3.2/심사일:2005.9.27/심사완료일:2005.10.14)