Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 34, No. 3: 755-761/ June, 2014
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.3.0755

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Concrete Engineering **콘크리트공학**

시간이력 하중을 받는 콘크리트의 점증적 크리프 모델

박영성* · 신동훈** · 이용학***
Park, Yeong-Seong*, Shin, Dong-Hun**, Lee, Yong-Hak***

Incremental Model Formulation of Creep under Time-varying Stress History

ABSTRACT

Internal or external restraint of concrete strain due to drying shrinkage and creep in concrete structures causes mechanical strain and becomes a source of persistent change in creep-causing stress conditions. Mathematical modeling to incorporate the persistent change of creep-inducing stress is generally achieved with consideration of the ages of concrete and concrete properties at the times of loadings, and stress history. This paper presents an incremental format of creep model based on parallel creep concept to depict the creep under time-varying stress history in developing creep strain. Laboratory experiments are carried out to validate the performance of the presented creep model. Typical creep phenomena are addressed through the comparisons between the measured and predicted creep strains.

Key words : Creep model, Time-varying stress, Drying shrinkage, Age-dependent experiment, Concrete

초 록

콘크리트의 크리프와 건조수축 변형에 대한 내적 혹은 외적 구속은 크리프 발생 응력조건을 변화시키며 이에 따라 크리프 변형의 발생은 응력변화에 종속적으로 변화한다. 시간이력 하중을 받는 크리프 거동문제로서 이해되는 이러한 크리프 거동현상의 수학적 모델링은 일반적으로 재하시의 콘크리트 재령과 물성값 및 하중이력을 기본 구성인자로 고려하여 시간적분 혹은 점증적 형태로 유도되었다. 본 논문에서는 시간이력하중을 받는 크리프 모델 가운데 단일 크리프 곡선을 사용하는 초기 크리프 모델인 평행 크리프 법의 단순성을 고려하여 이 방법이 갖는 단점과 한계성을 극복하고 성능을 개선한 평행 크리프 법을 유도하였다. 유도된 크리프 모델의 성질을 분석하고 예측 성능을 검증하기 위한 목적으로 원통형 콘크리트 공시체를 제작하고 시간이력 하중 하의 크리프 실험을 수행하였다. 끝으로, 콘크리트 공시체의 크리프 변형으로 인한 초기하중의 변화가 공시체의 재령에 따른 거동에 미치는 영향정도를 실험을 통해 분석하였으며, 크리프 시험기의 스프링계수를 측정하여 이로 인한 실험오차를 보정하였다.

검색어 : 크리프 모델, 시간이력하중, 건조수축, 재령종속실험, 콘크리트

1. 서 론

콘크리트의 크리프와 건조수축 변형에 대한 내적 혹은 외적 구속은 크리프 발생 응력조건을 변화시키며 이에 따라 크리프 변형의 발생은 응력변화에 종속적으로 변화한다. 크리프 발생 응력조건이 지속적으로 변화하는 조건 하에서 크리프 변형의 예측을 위한 수학적

* 정회원 · 건국대학교 토목공학과 박사과정 (parkys77@konkuk.ac.kr)
** 건국대학교 토목공학과 박사과정 (neweast@konkuk.ac.kr)
*** 정회원 · 교신저자 · 건국대학교 토목공학과 정교수 (**Corresponding Author** · Konkuk University · leeyo@konkuk.ac.kr)

Received September 24, 2013/ **revised** December 26, 2013/ **accepted** April 1, 2014

Copyright ⓒ 2014 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

모델의 개발은 재하시의 콘크리트 재령과 물성값 및 하중이력을 기본 구성인자로 고려하여 수행되어 왔다(Glanville, 1930), Bažant (1972), Kawano and Warner (1992), Pisani (1996), Choi and Yoon (1999), Oh and Lee (2000), Oh et al. (2005), Gilbert and Razni, 2010). 이러한 다양한 연구를 통해 제안된 모델은 일반적으로 크리프 변화율이 재하시의 재령에 독립적이라는 가정에 근거하는 크리프 함수 변화율 모델(rate of method (RCM), Glanville, 1930; Whitney, 1932), 시간 경과에 따른 하중의 변화를 미소시간증분에 대응하는 증분하중으로 고려하여 각 증분하중의 크리프 거동을 중첩하는 시간증분 중첩 해석법(step-by-step method, SSM, Gilbert and Razni, 2010), 재하 시의 콘크리트 재령과 재하형태에 따른 크리프 변화를 모사하기 위한 목적으로 재령계수(ageing coefficient)를 도입하여 하중이력 하의 재령종속적 응력-변형률 관계를 결정한 재령보정유효탄성계수 해석법(age-adjusted effective method, AAEM, Bažant, 1972)의 세 영역으로 분류할 수 있다.

이러한 크리프 모델 가운데 RCM 모델은 여러 개의 하중이 시간이력을 가지고 작용하는 경우에 동일한 재령위치에서 각 하중에 대한 크리프 함수의 변화율은 동일하다는 가정에 근거하고 있다. 크리프 함수의 변화율이 같다는 가정은 서로 다른 시간에 재하된 각 하중의 크리프 함수 형상이 동일한 재령에서 수직으로 평행하여 동일하다는 것을 의미하므로 평행 크리프 법(parallel creep method)으로도 표현된다. 시간이력 하중 조건 하에서 발생하는 크리프 변형을 단일 크리프 함수로서 표현이 가능하게 하는 이 개념은 크리프 관계식의 표현을 매우 단순화하는 장점을 갖는 반면에, 재하시의 재령에 민감한 크리프 거동 성격이 관계식에 고려되지 못함으로 인해 실제 크리프 거동을 과소평가하는 단점을 갖고 있다. 본 논문에서는 단일 크리프 형상함수를 사용하여 시간이력 하중 하의 크리프 거동을 표현하는 RCM 모델의 제한성과 기본가정 상의 단점을 수정 및 확장하여 개선된 형태의 RCM 모델을 유도하였다.

RCM의 기본 가정에서 제한성을 극복하기 위해 본 논문에서는 수직방향 평행 크리프 개념 이외에 수평방향 평행 크리프 개념을 크리프 가중계수를 도입하여 연결함으로써 크리프 형상함수를 유도하였다. 유도된 크리프 모델의 성격과 적용성을 평가하기 위해 원통형 공시체를 제작하여 모델에 요구되는 일정 하중하의 크리프, 건조수축 및 탄성계수발현을 계측하였으며, 시간이력 단계하중을 재하하는 별도의 크리프 실험을 통해 크리프 모델에 적용된 가중계수 값을 결정하였다. 압축 크리프 실험에서 크리프 실험장치에 도입된 압축력은 시간의 경과에 따라 실험체에 발생하는 압축 크리프 변형으로 인해 도입된 압축력이 점진적으로 감소한다. 크리프 실험 동안에 이러한 하중조건 변화가 크리프 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 감소된 압축력을 보충함 없이 압축력의 감소를 허용하는 크리프 실험을 별도로 수행하였으며, 크리프 시험기의 스프링계수를 측정하여 예상되는 실험오차의 보정방법을 검토하였다.

2. 크리프 함수의 유도

Glanville (1930)에 의해 제안된 RCM 모델은 시간이력 하중을 받는 콘크리트의 임의 재령에서 각 하중이력에 대한 크리프 함수의 변화율은 서로 같다는 가정에 근거하여 개발되었다. 임의 재령에서 크리프 함수의 변화율이 같다는 것은 각 하중에 대한 크리프 함수 형상이 동일한 재령에서 수직으로 평행하여 동일하다는 것을 의미하므로 평행 크리프 법으로서 표현하기도 한다. RCM 모델을 설명하는 Fig. 1에서 시간 t_o, t_1, t_2, …, t_{n-1}에 재하된 각 시간이력 하중에 대응하는 크리프 함수의 시간 t_n에서 크리프 함수 기울기 $dJ'(t=t_n,t_{i-1})/dt$는 서로 동일한 것을 보여주고 있다. 이러한 RCM 모델의 기본가정은 실제 크리프 변형을 과소평가하는 원인이 되고 있다. 본 논문에서는 RCM 모델이 갖는 단점을 개선하기 위해 Fig. 2와 같이 수평방향으로 평행한 크리프 함수를 도입하고 수직방향 평행 크리프 함수와 결합하여 개선된 평행 크리프 함수를 개발하였다.

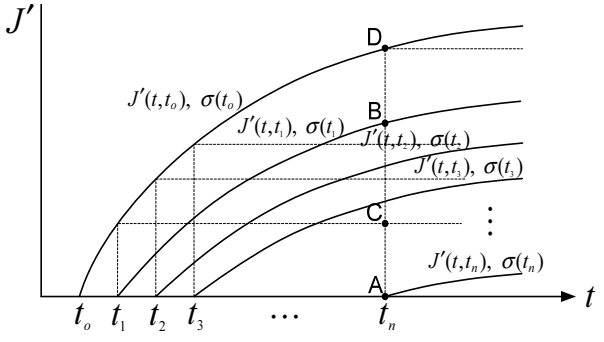


Fig. 1. Vertical Parallel Creep Curve

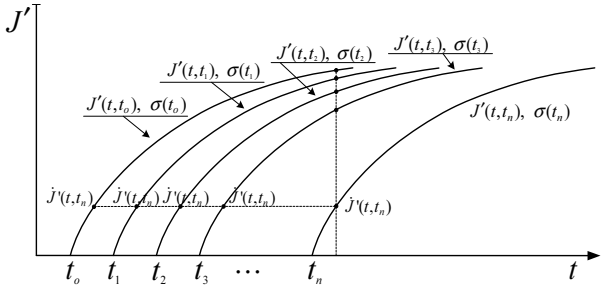


Fig. 2. Horizontal Parallel Creep Curve

2.1 수직방향 평행 크리프 함수 (Glanville (1930))

Fig. 1의 수직방향 평행 크리프 개념에서 재령 t_o, t_1, t_2, ..., t_{n-1}에 재하된 하중으로 인해 재령 t_n에 발생하는 크리프 변형률 $\epsilon_{cr}(t_n)$은 그림의 두 직선 CD와 AB의 기하학적 관계로부터 Eq. (1)로서 계산된다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cr}(t_n) &= J'(t_n,t_o)\Delta\sigma(t_o)+J'(t_n,t_1)\Delta\sigma(t_1)\\ &\quad +J'(t_n,t_2)\Delta\sigma(t_2)+...J'(t_n,t_{n-1})\Delta\sigma(t_{n-1})\\ &= \sum_{i=1}^{n-1}J'(t_n,t_{i-1})\Delta\sigma(t_{i-1})\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 $\Delta\sigma(t_{i-1})$는 t_{i-1}로부터 t_i로 시간변화 동안에 발생한 응력의 변화를 나타내며, $J'(t_n,t_{i-1})=J'(t_n,t_o)-J'(t_{i-1},t_o)$는 $\Delta\sigma(t_{i-1})$에 대응하는 크리프 함수를 의미한다. 시간 t_o에 작용한 단일 응력 $\Delta\sigma(t_o)$로 인한 크리프 함수 $J'(t,t_o)$와 크리프 계수 $\phi(t,t_o)$ 및 크리프 컴플라이언스 함수 $J(t,t_o)$ 간의 관계는 Eq. (2) 로서 표현된다.

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \frac{1+\phi(t,t_0)}{E_c(t_0)}\sigma_c(t_0)=\left\{\frac{1}{E_c(t_0)}+J'(t,t_0)\right\}\sigma_c(t_0)\\ &= J(t,t_0)\sigma_c(t_0)\end{aligned} \tag{2}$$

Eq. (1)의 총 변형률 표현은 시간 t_n 에서의 크리프 변형률 증분량 $\Delta\epsilon_{cr}(t_n)$의 관계로서 Eqs. (3) and (4)로서 표현된다.

$$\Delta\varepsilon_{cr}(t_n)=\{J'(t_n,t_0)-J'(t_{n-1},t_0)\}\sum_{i=1}^{n}\Delta\sigma(t_{i-l}) \tag{3}$$

혹은

$$\Delta\varepsilon_{cr}(t_n)=\Delta J(t_{n-1})\,\sigma(t_{n-1}) \tag{4}$$

Eq. (4)는 재령 t_o, t_1, t_2, ..., t_{n-1}에 재하된 지속하중으로 인해 시간 t_n에서 크리프 변형률의 변화량을 수직방향 평행 크리프 개념에 근거하여 계산하는 관계를 나타낸다.

2.2 수평방향 평행 크리프 함수

Fig. 1의 수직방향 평행 크리프 개념과 달리, Fig. 2의 수평방향 평행 크리프 개념을 도입할 때, 시간 t_n에서 총 크리프 변형률 $\epsilon_{cr}(t_n)$은 Eq. (5)를 통해 계산된다.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cr}(t_n) &= \sum_{i=1}^{n}\{J'(t_n,t_o)-J'(t_n,t_n-t_{i-1}+t_o)\}\Delta\sigma(t_{i-1})\\ &= \sum_{i=1}^{n}J'(t_n-t_{i-1}+t_o,t_o)\Delta\sigma(t_{i-1})\end{aligned} \tag{5}$$

Eq. (5)의 총 크리프 변형률 표현을 시간 t_n에서 크리프 증분변형률 $\Delta\epsilon_{cr}(t_n)$로서 나타내면 Eq. (6)과 같다.

$$\begin{aligned}&\Delta\varepsilon_{cr}(t_n)\\ &=\sum_{i=1}^{n}\{J'(t_n-t_{i-1}+t_o,t_o)-J'(t_{n-1}-t_{i-1}+t_o,t_o)\}\sigma(t_{i-1})\\ &=\sum_{i=1}^{n}\Delta J'(t_{i-1})\Delta\sigma(t_{i-1})\end{aligned} \tag{6}$$

실제의 크리프 변형률은 Eqs. (4) and (6)이 만드는 경계 내에 위치하게 되므로 두 식을 가중계수 α를 도입하여 Eq. (7)로서 표현하였다.

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon_{cr}(t_n) &= (1-\alpha)\{\Delta J(t_{n-1})\,\sigma(t_{n-1})\}\\ &\quad +\alpha\left\{\sum_{i=1}^{n}\Delta J_{i-1}(t_n)\Delta\sigma(t_{i-1})\right\}\end{aligned} \tag{7}$$

Eq. (7)에서 가중계수 $\alpha=0$인 경우는 수직방향 평행 크리프 개념을 나타내고, $\alpha=1$의 경우는 수평방향 평행 크리프 개념을 나타내며, $0\le\alpha\le1$의 범위에 위치하는 α는 크리프 실험을 통해서 결정되는 크리프 가중계수이다. Eq. (7)의 개선된 평행 크리프 개념은 시간 t_o에 재하된 일정 지속하중에 의한 단일 크리프 함수를 사용하여 시간이력 하중 하의 크리프 변형을 예측하고 있음을 알 수 있다.

3. 크리프 실험과 예측

3.1 실험의 계획

제안된 크리프 함수가 포함하고 있는 크리프 가중계수 α 값을 결정하고 모델의 성격을 분석하기 위한 목적으로 원통형 콘크리트 공시체를 제작하여 재령종속적 거동 실험을 수행하였다. 제한된 숫자의 크리프 시험기로 인해 두 종류의 콘크리트를 제작하여 각각 120일 동안 실험을 수행하였다. 먼저 수행한 CS-type (CS: Cylindrical specimen with Stepwise load) 실험에서는 일정 하중 조건과 시간이력 단계하중 조건 하의 두 종류 크리프 실험을 통해 가중계수 α 값을 결정하였으며, 실험결과를 통해 제안된 크리프 함수의 특성을 분석하였다. 120일 동안 CS-type에 대한 실험을 수행한 후에 새로운 콘크리트를 배합하여 원통형 공시체를 제작하고 CP-type (CP: Cylindrical specimen with Pressure-dependency) 실험을 수행하였다. CP-type 실험에서는 압축 크리프 실험에서 크리프 실험장치에 도입된 압축력이 시간의 경과에 따라 진행되는 실험체의 압축 크리프 변형으로 인해 도입된 압축력이 점진적으로 감소하는 크리프 실험의 하중조건 변화가 크리프 거동에 미치는 영향을 평가하기 위해 계획하였다.

Table 1. Mix Proportions of Two Types of Concrete

Test type	Max. size of aggr. (mm)	W/C ratio (%)	Slump (mm)	Unit weight (N/m^3)			
				Water	Cement	Fine aggr.	Corase aggr.
A	20	57	110	1,880	3,310	7,520	10,200
B	20	57	120	1,640	3,300	9,030	8,570

3.2 원통형 콘크리트 공시체의 제작

CS-type과 CP-type 각각에 대해 크리프 실험 4개, 건조수축 3개, 탄성계수 측정 20개를 포함한 총 27개의 공시체를 지름 150 mm, 높이 300mm의 원통형으로 제작하였으며, 각 실험에 대한 배합비는 Table 1과 같다. 콘크리트 타설 24시간 후에 몰드를 제거하여 수중양생 하였으며, 재령 7일째에 일축압축 실험을 통해 초기 탄성계수를 계측하였다. 공시체의 1/2 높이 위치에서 공시체 둘레를 따라 120° 위치 간격으로 변형률게이지를 부착하고 크리프 변형률, 건조수축 변형률, 일축압축 하의 축방향 변형률을 각각 계측하였다.

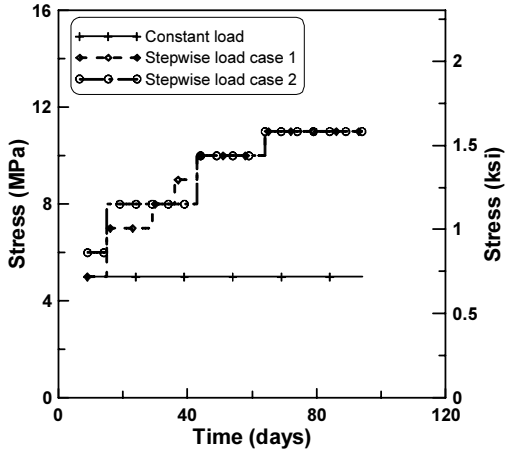


Fig. 3. Stepwise Loads in CS-type Test

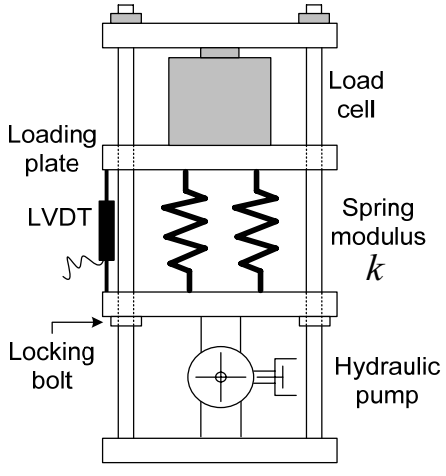


Fig. 4. Schematic Draw of Creep Testing Apparatus

모델에서 요구되는 단일 크리프 함수는 CS-type과 CP-type 공통으로 2대의 크리프 시험기를 사용하여 일정 압축하중 조건을 유지하는 크리프 실험으로부터 결정하였다. 나머지 2 대의 시험기에 대해 CS-type 실험에서는 Fig. 3에 보이는 두 종류의 시간이력 단계하중을 각각 재하 하여 크리프 가중계수 크기를 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 크리프 시험기를 작동시키는 유압은 유압펌프의 펌핑장치를 통해 공급하였으며, 유압장치에 부착된 압력계와 Fig. 4에 보이는 콘크리트 공시체 상부에 거치된 하중계를 사용하여 공급되는 유압의 크기를 계측하였다. 실험기간 동안 유압의 누출을 방지하기 위해 Fig. 4에 보이는 잠금볼트를 잠금으로써 시험기의 공시체부와 유압부를 분리하였다. 이러한 실험방법을 통해 유압의 누출로 인한 압축력의 감소는 방지 할 수 있으나, 공시체의 압축 크리프 변형으로 인해 발생하는 스프링의 탄성이 초래하는 압축력의 감소는 방지하지 못하기 때문에 일정하중 하의 크리프 실험의 경우에는 매 2일마다 유압을 추가로 보충하였다.

일반적인 크리프 실험의 경우에는 스프링의 탄성복원으로 인한 압축력의 감소를 보충하기 위한 추가 유압의 공급 없이 크리프 실험이 수행된다. CP-type 실험에서는 2 대의 크리프 시험기를 사용하여 유압을 보충하는 경우와 보충하지 않는 경우의 크리프 시험을 수행하였으며, 이를 통해 공시체에 도입된 초기 압축력의 감소가 재령종속적 거동에 미치는 영향을 검토하였으며, 시험기의 스프링계수를 측정하여 오차를 보정하였다.

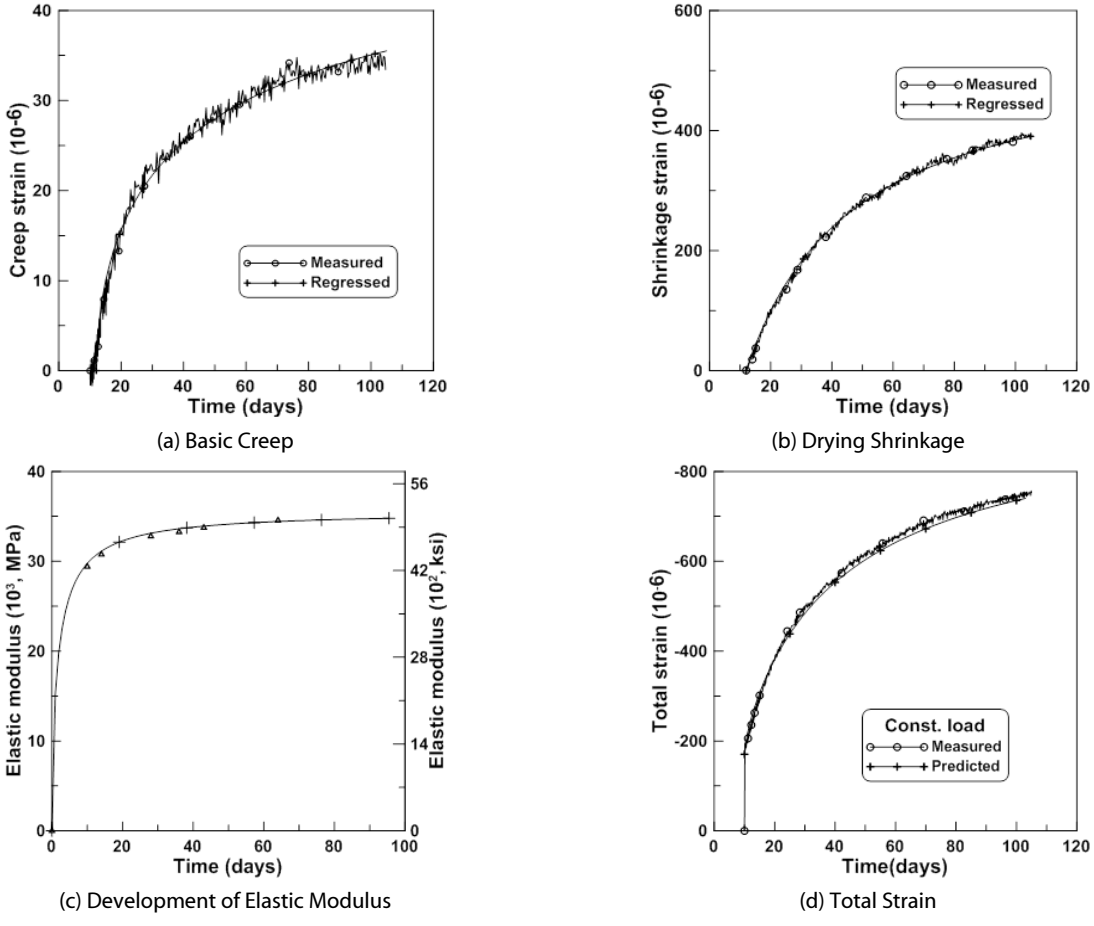
3.3 재령종속적 기본 성질

모든 실험체의 실험은 22±1°C 온도와 60±2% 상대습도를 유지하는 항온항습실에서 수행하였다. 공시체로부터의 계측 값은 81개의 채널로 구성된 데이터 로거를 사용하여 1분 간격으로 저장하였으며, 예기치 못한 계측데이터의 손실을 방지하기 위해 매 5일마다 저장 데이터를 백업하였다.

CS-type 및 CP-type 공시체 콘크리트에 대한 크리프 변형률, 건조수축 변형률 및 탄성계수의 발현 성질을 나타내는 세 기본 방정식을 각 실험으로부터 계측된 데이터의 회귀분석을 통해 결정하여 Table 2에 나타냈다. 회귀분석함수는 KCI (2007) and ACI (1996) 및 *fib* (1999)에서 적용하는 식 형태를 취하여 각 계수

Table 2. Three Empirical Equations for CS-type and CP-type Tests

Equations	Test A	Test B
$J'(t,t_o)$	$\frac{(t-10)^{0.6}}{11+1.6(t-10)^{0.6}}\frac{c_1}{E_c(t=t_o)}$	$\frac{(t-t_o)^{0.6}}{12.5+0.4(t-t_o)^{0.6}}\frac{c_1}{E_c(t=t_o)}$
$\epsilon_{sh}(t,t_o)$	$\frac{(t-10)^{0.6}}{51+1.45(t-10)^{0.6}}\epsilon_{shu}$	$\frac{(t-7)^{0.6}}{26.3+1.0(t-7)^{0.6}}\epsilon_{shu}$
$E_c(t)$	$\sqrt{\frac{t}{4+0.85t}}\ E_c(t=28\ days)$	$\sqrt{\frac{t}{6+0.76t}}\ E_c(t=28\ days)$



(a) Basic Creep (b) Drying Shrinkage

(c) Development of Elastic Modulus (d) Total Strain

Fig. 5. Basic Age-dependent Properties of CS-type Test

값을 회귀분석을 통해 결정하였다. 각 실험경우에 대한 탄성계수는 재령 7 (CS-type 경우 10), 14, 28, 56일에 각각 측정하였으며, $c_1 = 2.35$와 $\epsilon_{shu} = 7.8\times10^{-4}$은 시간 $t=\infty$에서 크리프 함수와 건조수축 변형률의 크기를 정의한다. 재령 28일 압축강도는 CS-type와 CP-type 각 경우에 28MPa과 22MPa이었으며, 탄성계수는 32,800MPa과 18,600MPa이었다.

Figs. 5(a)~(d)는 CS-type에서 얻어진 단위 크리프 변형률, 건조수축 변형률, 탄성계수 및 총 변형률을 각각 나타내며, 단위 크리프 변형률은 총 변형률로부터 건조수축변형률을 제외한 후에 작용된 압축하중으로 나누어 계산하였다.

3.4 가중계수 α 값의 결정

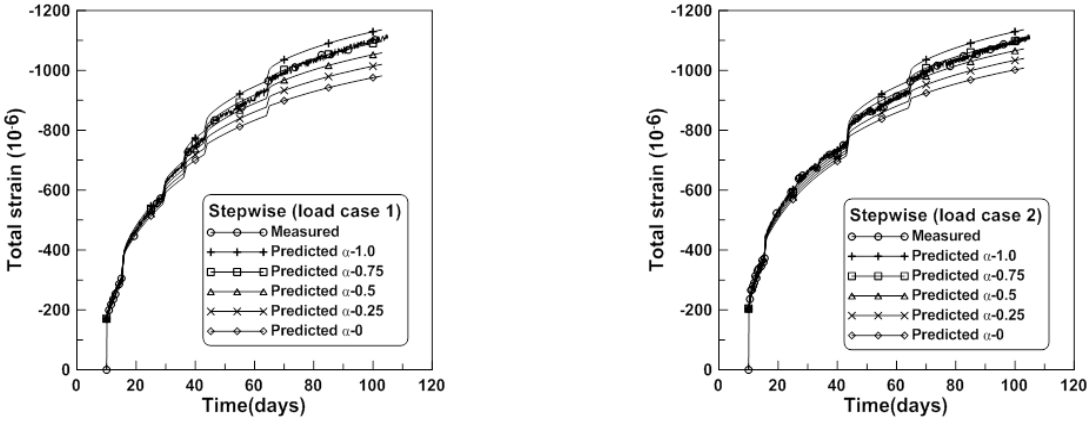
Fig. 3의 시간이력 단계하중을 작용시킨 크리프 거동실험으로부터 Eq. (7)을 구성하는 크리프 가중계수 α 값을 결정하였다. Figs. 6(a) and (b)은 두 종류의 시간이력 단계하중 하에서 계측된 변형률과 본 논문에서 제안된 크리프 모델에 의해 예측된 결과를 비교하고

있다. 수치해석은 가중계수 α 값을 0으로부터 1까지 0.25 만큼씩 증가시켜 수행하였다. 그림의 결과는 수정계수 α 값이 수직방향 평행 크리프 방법의 경우인 $\alpha=0$에 가까울수록 크리프 변형률은 작게 평가되며, 수평방향 크리프 방법의 경우인 $\alpha=1$에 가까울수록 크게 평가되는 경향을 나타낸다. 두 단계별 하중 재하 실험결과를 통해 $\alpha=0.75$의 경우에 예측결과가 실험결과에 잘 일치하며, 예측된 결과가 가중계수 $\alpha=0$의 경우보다 1의 경우에 실험값에 보다 근접하는 결과를 통해 크리프 거동은 수직방향 평행 크리프 개념보다는 수평방향 평행 크리프 개념이 지배적임을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 보다 보수적 접근이 요구되는 콘크리트 구조물에 대한 재령종속적 거동해석은 $\alpha=1$의 수평방향 평행 크리프 개념이 적합하다는 것을 알 수 있다.

3.5 크리프 하중의 변화를 고려한 크리프 실험

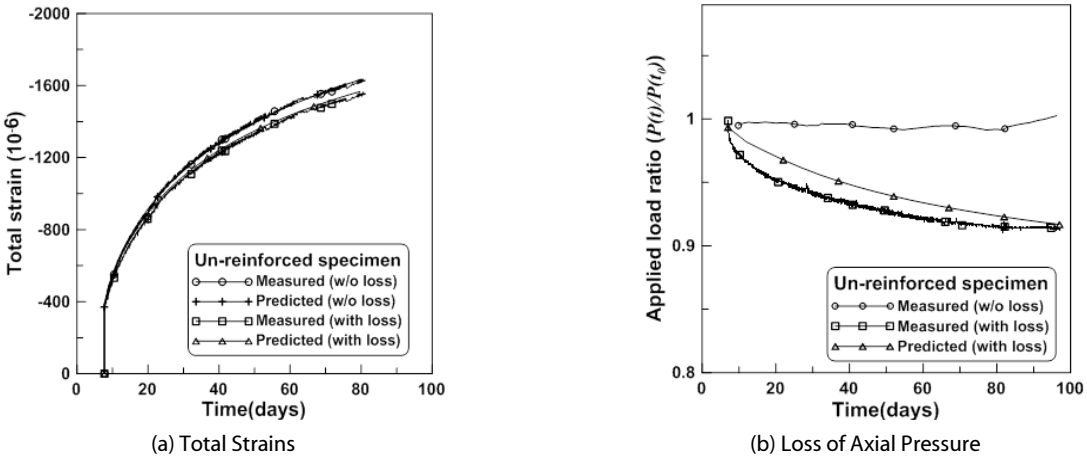
공시체에 작용하는 크리프 하중은 유압장치에 의해 공급된 유압의 손실과 공시체의 재령종속적 변형으로 인해 발생하는 스프링의 탄성복원을 원인으로 시간의 경과에 따라 감소한다. 이러한 경우에 실험기간 동안 하중조건의 변화로 인해 발생하는 재령종속적 변형에 대한 보정을 필요로 한다.

CP-type 실험에서 고려된 두 종류의 하중 조건은 첫째로, 손실인정 (with loss)의 경우로서 이 조건에서는 Fig. 4에 보이는 잠금볼트를 잠근 후에 스프링의 복원에 따른 압축하중의 손실을 보충함 없이 실험을 진행하였다. 두 번째 경우의 하중조건에서는 손실을 보정하는 손실보정(without loss) 경우로서 매 2일 간격으로 손실된 크기만큼의 하중을 압력펌프를 사용하여 보충하였다. CP-type 실험에 대한 단일 크리프 함수, 건조수축 함수 및 탄성계수 발현 관계식은 CS-type 실험의 경우와 함께 Table 2에 나타냈으며, 이에 관련한 실험은 손실보정 경우의 하중조건에 근거하여 수행하였다. 두 하중조건 하에서 얻어진 총 변형률을 비교하는 Fig. 7(a)에서 두 변형률 간의 차이는 손실인정 경우의 압축하중이 시간의



(a) Stepwise Load Case 1 (b) Stepwise Load Case 2

Fig. 6. Comparisons of Predicted Measured Strains Under Stepwise Loads of CS-type Test



(a) Total Strains (b) Loss of Axial Pressure

Fig. 7. Comparison of Creep Behaviors Under Different Axial Pressure Conditions of CP-type Test

경과에 따라 지속적으로 감소하기 때문이며, Fig. 7(b)는 손실보정과 손실인정의 두 하중조건 경우 간의 압축하중 차이를 보여준다. Fig. 7(b)에서 시간 t에 감소된 하중 $P(t)$는 초기하중 $P(t_o)$로 나눈 백분율로 표시하였으며, 본 논문의 실험에서는 하중손실이 4% 발생하였으며, 이로 인해 8%의 변형률 감소가 발생하였다.

Fig. 7(a)에서 손실인정 경우의 수치해석은 $P(t) = P(t_o) - \Delta P(t)$의 선형적 관계를 적용하여 수행하였다. 이 관계에서 하중감소량 $\Delta P(t)$는 $\Delta P(t) = kl\,\Delta\epsilon_{ns}(t)$의 관계로부터 계산하였고, l은 공시체의 높이이며, k는 크리프 시험기(Fig. 4)에 설치된 스프링의 스프링계수로서 크리프 시험기에 대한 하중재하 실험을 통해 $k = 27\ \mathrm{kN/mm}$의 값을 얻었다. 해석에서 요구되는 크리프 가중계수 α 값은 CS-type 실험으로부터 결정된 0.75를 사용하였다. 이러한 결과는 일반적인 실험방법인 손실인정의 경우에 발생하는 실험오차를 $P(t) = P(t_o) - \Delta P(t)$와 $\Delta P(t) = kl\,\Delta\epsilon_{ns}(t)$의 관계를 사용하여 보정할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

시간이력 하중을 받는 콘크리트의 크리프 변형 예측모델을 점진적 관계로서 유도하였다. 수직방향 평행 크리프 모델 개념에 수평방향 평행 크리프 개념을 크리프 가중계수를 도입하여 연결함으로써 개선된 평행 크리프 방법을 유도하였으며, 이 개념을 통해 기존의 평행 크리프 개념이 갖는 크리프 변형의 과소평가 문제를 개선할 수 있었다. 이러한 개선 효과를 검증하기 위한 목적으로 일정하중을 받는 크리프 실험과 단계하중을 받는 크리프 실험을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 단일 크리프 함수를 사용하여 시간이력 하중 하의 콘크리트 크리프 거동을 예측하는 본 논문의 크리프 모델을 단계하중을 받는 콘크리트의 크리프 실험결과에 대한 예측에 적용하여 모델의 예측능력과 적용성을 검증하였다.

(2) 수직 및 수평방향 평행 크리프 개념을 결합하기 위해 도입된 가중계수는 시간이력 하중조건 하에서 단일 크리프 함수를 사용한 크리프 모델의 유도를 가능하게 하였으며, 보통강도 콘크리트를 사용한 본 논문의 원통형 콘크리트 공시체의 경우에서는 0.75의 가중계수 값을 얻었다.

(3) 크리프 실험에서 압축하중의 하중조건이 크리프 거동에 미치는 정도를 파악하기 위해 손실인정과 손실보정의 두 하중조건을 고려하는 크리프 실험을 수행하였으며, 일반적인 크리프 실험의 하중조건인 손실인정의 하중조건 경우에 측정된 크리프 함수는 크리프 시험기의 스프링계수를 사용하여 보정이 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설교통기술촉진사업의 연구비지원(12기술혁신B04)에 의해 수행되었습니다.

References

ACI Committee 209 (1996). *Prediction of creep, shrinkage and temperature effect in concrete structures*, ACI Manual of Concrete Practice, Part I.

Bažant, Z. P. (1972). "Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method." *ACI J.*, Vol. 69, No. 4, pp. 212-217.

Bažant, Z. P. and Chern, J. C. (1985). "Concrete creep at variable humidity: Constitutive law and mechanism." *Materials and Structures, RILEM*, Vol. 18 No. 103, pp. 1-20.

Choi, H. T. and Yoon, Y. S. (1999). "Comparative study on the creep models and analytical methods in concrete considering incremental stress history." *J. of KSCE*, KSCE, Vol. 19, No. I-5, pp. 675-685 (in Korean).

fib (1999). *Structural concrete-textbook on behavior; Design and Performance*, CEB-FIP Model Code 1990, Vol. 1, pp. 21-52.

Ghali, A. and Favre, R. (1986). *Concrete structures: Stresses and Deformations*, Chapmal and Hall, London-New York.

Gilbert, R. I. (1988). *Time effects in concrete structures*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

Gilbert, R. I. and Ranzi, G. (2010). *Time-dependent behavior of concrete structures*, Spon Press, London and New York.

Glanville, W. H. (1930). *Studies in reinforced concrete – III, the creep or flow of concrete under load*, Building Research Technical Paper No. 12, Dept. of Scientific and Industrial Research, London.

Kawano, A. and Warner, R. F. (1992). "Model formulations for numerical creep calculations for concrete." *J. of Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 284-290.

KCI Committee (2007). Design standard for concrete structures, KCI (in Korean).

Oh, B. H. and Lee, H. J. (2000). "Time-dependent analysis of reinforced and prestressed concrete structures considering tensile creep of concrete." *J. of KSCE*, KSCE, Vol. 20, No. 1-A, pp. 1-11 (in Korean).

Oh, B. H., Choi, S. C. and Cha, S. W. (2005). "Identification of relaxation in early-age concrete using differential-type viscoelastic constitutive law." *J. of KSCE*, KSCE, Vol. 25, No. 1A, pp. 1-9 (in Korean).

Pisani, M. A. (1996). "Numerical analysis of creep problems." *Computers and Structures*, Vol. 51, No. 1, pp. 57-63.

Rusch, H., Jungwirth, D. and Hilsdorf, H. K. (1983). *Creep and shrinkage their effect on the behavior of concrete structures*, Springer-verlag, New York, Heidelberg, Berlin.

Whitney, C. S. (1932). "Plain and reinforced concrete arches." *ACI J.*, Vol. 28, pp. 479-519.