

축하중을 받는 철근콘크리트 부재의 재령계수식 제안

Aging Coefficient Formula of Reinforced Concrete Members under Axial Compression

유재욱*
Yoo, Jae-Wook

유은종**
Yu, Eun-Jong

Abstract

The Age-adjusted effective Modulus Method(AEMM) is one of the methods adopted for the construction stage analysis of concrete structures. The AEMM uses the aging factor to consider the effects of the varying concrete stress. In the aspects of computation time and the accuracy of the results, the AEMM is considered as one of most appropriate methods for construction stage analysis of tall building structures. Previous researches proposed appropriate values of the aging factor in the forms of graphs or using very simple equations. In this paper, an equation for estimating the aging factor as a function of rebar ratio in the section, compressive strength of concrete, notional member dimension, and age of concrete at the load application. The validity of aging factor proposed in this paper were examined by the comparison with the results of step-by step method.

Keywords : AEMM, Aging factor, Construction stage analysis, SSM

1. 서론

콘크리트를 재료로 이용하는 철근 콘크리트 구조물은 탄성변형량이외에도 크리프와 건조수축 같은 시간의존적인 변형의 영향으로 단면응력과 변형이 시간경과에 따라 지속적으로 변화한다. 따라서 길이가 길며 큰 하중을 부담하는 수직부재를 가진 초고층건물 혹은 평면내 위치에 따라 부재별 하중의 변동이 큰 비정형건축물의 경우 반드시 시공 중 변형과 장기변형을 사전에 예측하고 보정하기 위한 시공단계해석이 필요하다. 이를 위해 콘크리트 구조물의 장기변형을 예측하기 위한 유효계수법(Effective Modulus Method), 크리프율법(Rate of Creep Method) 등의 다양한 해석알고리즘이 제안되고 있

다.¹⁾⁻³⁾ 이들 중 가장 정확한 방법은 목표시점까지의 시간을 다수의 구간으로 나눈 다음 각 시간구간마다 변형량을 계산하고 이를 중첩하여 목표시점의 거동을 산정하는 직접적분법(Step-by-Step Method)이다.²⁾ 하지만 직접적분법은 계산이 필요한 시점의 수가 많으며 과거 시점에서 계산된 결과를 모두 저장하여야 하므로 부재의 수와 하중단계의 수가 많은 문제의 경우 계산량이 엄청나게 증가하는 단점이 있다. 또 다른 장기변형 해석알고리즘의 하나인 재령보정유효계수법(Age-adjusted Effective Modulus Method)은 재하시의 콘크리트응력이 목표시점까지 일정할 경우 발생하는 크리프변형을 고려하여 보정된 탄성계수를 사용하는 유효계수법에 비해, 재하시점부터 목표시점까지 콘크리트 응력의 변동을 재령계수(Aging Coefficient)를 통해 근사적으로 가정하여 거동을 산정하는 방법으로 직접적분법에 비해 계산량이 작으나 정확한 재령계수를 사용할 경우 직접적분법에 의한 결과와 거의 동일한 정확한 결과를 얻을 수 있다.¹⁾

* 학생회원, 한양대학교 건축공학과 석사

Hanyang University, Department of Architectural Engineering

** 교신저자, 한양대학교 건축공학과 교수, 공학박사

Hanyang University, Department of Architectural Engineering,
Professor

Tel: 02-2220-4311

E-mail : eunjongyu@hanyang.ac.kr

재령보정유효계수법에서 사용되는 재령계수는 시간에 따라 달라지는 콘크리트응력 변화의 영향을 보정하기 위한 것이다. 기존의 연구에서는 재령계수를 재하시점의 콘크리트 재령 및 콘크리트 강도 등을 변수로 미리 산정하여 그래프 혹은 테이블의 형태로 제시하고 이를 사용하도록 하거나¹⁾⁴⁾, 일부 변수를 사용한 근사식을 제시하고 있다.⁵⁾⁷⁾ 혹은 일정한 응력을 받는 경우인지 혹은 일정한 변형을 유지하는 경우인지에 따른 구속조건의 차이와 재하시점만으로 0.6에서 0.9사이의 근사값을 사용하여 해석할 것을 추천하고 있다.²⁾⁸⁾ 하지만, 실제 철근콘크리트구조물에서 콘크리트의 응력변화는 부재의 지지조건뿐 아니라 단면내 철근량에 따라서도 달라진다. 즉, 콘크리트에서 발생하는 시간의존적인 변형을 철근이 구속하게 되므로 콘크리트의 응력은 철근이 많이 배근된 경우가 그렇지 않은 경우보다 크게 감소하게 된다. 본 연구에서는 재령보정유효계수법을 사용할 때 보다 정확한 크리프변형량 산정을 위해 단면내 철근비를 포함한 다양한 인자의 영향을 고려한 재령계수 추정식을 제안하였다. 건조수축변형은 크리프변형과 독립적으로 고려할 수 있다. 즉, 건조수축에 의해 변형이 발생하는 경우 콘크리트와 철근사이의 응력전달도 동일한 재령계수식을 사용하여 해석이 가능하므로 본 연구에서는 크리프변형만을 대상으로 재령계수 추정식을 산정하였다.

2. 시공단계해석

시공단계해석은 구조물의 구성 재료별 하중 및 시간에 대한 변형을 나타내는 재료모델식 및 각 재료에서 발생하는 시간의존적변형의 영향을 고려하여 전체구조물의 응력 및 변형을 평형조건 및 적합조건을 사용하여 풀어내는 장기거동해석법으로 구성되어 있다. 프리스트레스가 가해지지 않은 일반적인 철근콘크리트부재의 경우 철근의 크리프 혹은 이완(Relaxation)의 영향은 미미하므로 보통 콘크리트에서 발생하는 크리프와 건조수축변형을 고려한다.

2.1 재료모델

본 연구에서는 콘크리트 구조설계기준(KCI, 2012)⁹⁾에서 제시된 재료모델식을 사용하였다. KCI에서 제안하고 있는 크리프 모델식은 식 (1)과 같다. 크리프변형량은 단위 탄성변형량과의 비율인 크리프계수로 표현되는데 수식에 나타난 바와 같이 크리프계수는 재하시 콘크리트의 재령, 콘크리트 압축강도, 상대습도, 온도, 부재의 크기 등에 영향을 받는다.

$$\phi(t, t') = \phi_0 \beta_c(t - t') \tag{1}$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t') \tag{2}$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - 0.01RH}{0.10 \sqrt[3]{h_c}} \tag{3}$$

$$\beta(f_{cu}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cu}}} \tag{4}$$

$$\beta_c(t - t') = \left[\frac{(t - t')}{\beta_{RH} + (t - t')} \right]^{0.3} \tag{5}$$

$$\beta_H = 1.5 [1 + (0.012RH)^{18}] h_c + 250 \leq 1,500 \tag{6}$$

여기서,

ϕ_0 : 기준 크리프 계수.

ϕ_{RH} : 상대습도와 부재 두께가 크리프에 미치는 영향계수.

RH : 상대습도.

$\beta(f_{cu})$: 콘크리트 강도가 크리프에 미치는 영향 함수.

β_c : 재하 후 시간에 따른 크리프 변화를 나타내는 계수.

β_{RH} : 외기습도에 따른 크리프와 건조수축에 미치는 영향계수.

β_H : 상대습도와 부재의 두께에 따른 계수.

t : 측정시점의 콘크리트 재령

t' : 재하시점의 콘크리트 재령

f_{cu} : 콘크리트의 28일 평균압축강도.

h_c : 개념부재 치수.

2.2 장기거동해석

일정한 하중이 지속될 경우 콘크리트는 크리프의 영향으로 시간에 따라 압축변형량이 증가한다. 재료 모델식은 콘크리트에서 발생하는 크리프변형량을 수치적으로 묘사하는 수식이다. 하지만 단면내 철근은 이러한 변형을 구속하는 역할을 하게 되므로 전체적인 변형량은 재료모델식에 의한 값보다 작아지게 되며 콘크리트의 응력은 감소하는 반면 철근의 응력은 증가하게 된다. 장기거동해석법은 부재내의 적합조건(즉 콘크리트와 철근의 변형이 동일해야 한다는)과 평형조건을 사용하여 실제로 발생하는 변형량을 산정하는 해석기법이다. 직접적분법과 재령보정유효계수법에 의한 장기거동해석의 개요는 다음과 같다.

2.2.1 직접적분법

시간에 따라 응력이 변화하는 콘크리트에서 발생하는 탄성변형량 및 크리프 변형량은 다음과 같은 적분식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t')}{E_c(t')} [1 + \phi(t, t')] + \int_{t'}^t \frac{1 + \phi(t, t')}{E_c(t')} \frac{\partial \sigma(t')}{\partial t'} dt' \quad (7)$$

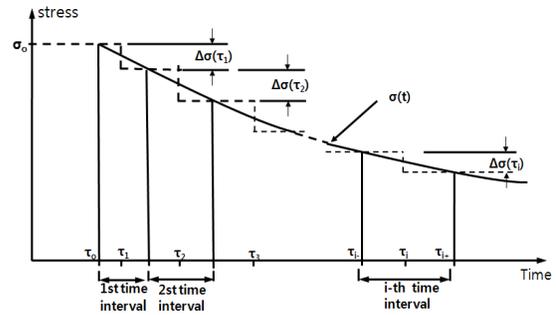
하지만, 식 (7)은 크리프계수가 재령과 상관없이 동일하다고 가정하지 않는 한 수학적으로 정해를 구할 수 없다. 직접적분법은 식 (7)의 적분식을 식 (8)과 같이 수치적분식으로 변환한 식이다. 즉, 이 방법은 재하시점부터 목표시점까지의 시간을 여러 구간으로 나누고 각 구간의 응력 증분에 따른 변형률을 수치적분을 통해 구한다. <Fig. 1>⁵⁾은 직접적분법의 해석방법을 도식화 한 그래프이다.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t')}{E_c(t')} [1 + \phi(t, t')] + \sum_{j=1}^i \frac{\Delta \sigma(t_j)}{E_c(t_j)} [1 + \phi(t_i, t_j)] \quad (8)$$

여기서,

σ : 콘크리트의 응력.

$E_c(t)$: 재령 t 에서 콘크리트의 탄성계수.



<Fig. 1> Step-by-Step Method

2.2.2 재령보정유효계수법

단면내 철근이 콘크리트의 변형을 구속할 경우 콘크리트의 응력은 <Fig. 1>과 같이 곡선의 형태로 감소하게 된다. 재령보정유효계수법은 지속적으로 변화하는 콘크리트 응력의 효과를 재령계수라는 계수를 통해 고려하는 방법이다. 즉, 한 구간을 여러 개의 구간으로 분할하지 않고 재하시점의 콘크리트 응력을 기초로 재령계수로 보정된 크리프계수를 사용하여 변형을 산정하므로 계산량이 적으며 정확한 재령계수를 사용할 경우 직접적분법과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 변형률에 관한 식은 식 (9)와 같으며 보정계수는 $\chi(t, t')$ 이다.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t')}{E_c(t')} [1 + \phi(t, t')] + \frac{\sigma(t) - \sigma(t')}{E_c(t')} [1 + \chi(t, t') \phi(t, t')] \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)로부터 재령계수 $\chi(t, t')$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$\chi(t, t') = \frac{E_c(t')}{[\sigma(t) - \sigma(t')] \phi(t, t')} \sum_{j=1}^i \frac{\Delta \sigma(t_j)}{E_c(t_j)} \times [1 + \phi(t_i, t_j)] - \frac{1}{\phi(t, t')} \quad (10)$$

따라서 재령계수는 사용된 재료모델에 의한 크리프계수식, 재하시 재령 t' , 콘크리트의 탄성계수 발현에 영향을 받는다. 식 (10)에서부터 많은 연구자들이 서로 다른 크리프계수식이 사용된 경우 재령계수를 산정하여 주로 그래프 형태로 제시하였다.⁵⁾

Bazant¹⁰⁾는 식 (11)과 같이 이완함수 $R(t, t')$ 를 사용하여 나타낸 후 ACI의 크리프계수를 사용할 경우 재령계수를 산정하였으며, Trost와 Schade 등도 CEB의 크리프계수식을 사용할 경우 및 콘크리트 탄성계수가 변화하지 않을 경우에 재령계수를 산정하고 그래프의 형태로 제시하였다.¹⁾

$$\chi(t, t') = \frac{E_c(t')}{E_c(t') - R(t, t')} - \frac{1}{\phi(t, t')} \quad (11)$$

Gilbert⁵⁾는 산정된 재령계수의 회귀분석을 통해 식 (12)와 같은 근사식을 제안하였으며, Chiorino와 Lacidogna⁶⁾는 재령이 1년 이상일 경우 재령계수는 식 (13)과 같은 간단한 식으로 나타낼 수 있음을 밝혔다.

$$\chi(t, t') = 1 - \frac{(1 - \chi^*)(t - t')}{20 + (t - t')} \quad (12)$$

여기서,

$$\chi^* = \frac{k_1 t'}{k_2 + t'}$$

$$k_1 = 0.78 + 0.4e^{-1.33\phi^*(t')}$$

$$k_2 = 0.16 + 0.8e^{-1.33\phi^*(t')}$$

ϕ^* : 극한 크리프계수

$$\chi(t, t') = \frac{\sqrt{t'}}{1 + \sqrt{t'}} \quad (13)$$

3. 재령계수 분석

앞서 언급한 바와 같이 콘크리트응력의 감소현상의 주된 원인이 철근에 의한 구속, 즉 콘크리트의 변형을 철근이 막고 있기 때문임을 고려하면 철근 콘크리트 단면에서 크리프와 건조수축변형의 크기

는 철근량에 따라서 달라질 수밖에 없다.

본 연구에서는 재령계수에 영향을 끼치는 변수를 분석하고 이들의 영향을 고려한 재령계수 예측식을 제안하였다. 우선 재하시점, 철근비, 압축강도, 부재의 크기등 다양한 변수를 고려하여 축력을 받는 단일 철근콘크리트 기둥의 크리프 변형을 직접적분법을 이용하여 산정하고 그 결과로부터 각 시점별로 재령계수를 산출하였다. 산출된 재령계수를 다변수 회귀분석을 통해 추정식을 제안하였다. 직접적분법에 의한 장기거동해석시 사용된 변수는 <Table 1>과 같다. 건조수축변형의 경우 장기거동해석시 별도로 고려되므로 직접적분법 해석시 건조수축변형은 제외하였다.

<Table 1> The variables used in the calculation

Variables	Factors
Loading time	28, 42, 56, 70, 84, 98 day
Reinforcement ratio	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 %
Compressive strength	40, 50, 60, 70, 80 MPa
The notational size of member	300, 500, 750 mm

재령계수는 콘크리트의 응력의 변동을 반영하여 실제 발생하는 크리프변형과 하중이 일정할 경우 재료모델식을 통해 산정되는 크리프 변형의 비율로 정의된다. 따라서 직접적분법에 의해 구해진 크리프 변형을 실제 발생하는 크리프변형으로 볼 경우 재령계수는 식 (14)와 같이 산정할 수 있다.

$$\chi(t, t') = \frac{\epsilon_{cr}(t)}{\phi(t, t') \epsilon_c(t')} \quad (14)$$

여기서,

$\epsilon_{cr}(t)$: 측정 시점의 크리프에 의한 변형량

$\epsilon_c(t')$: 재하시점의 탄성 변형량

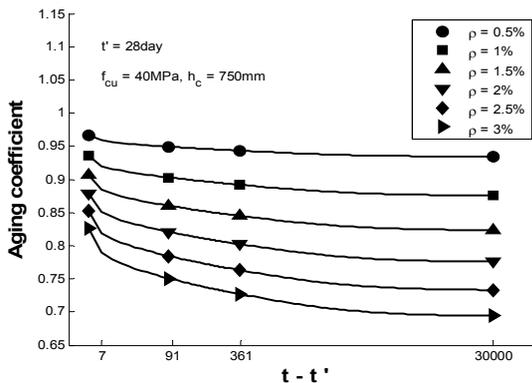
연구에 사용된 변수, 즉, 철근비, 재하시점, 콘크리트 압축강도, 개념부재치수별로 재령계수에 미치는 영향을 분석하면 다음과 같다.

3.1 철근비

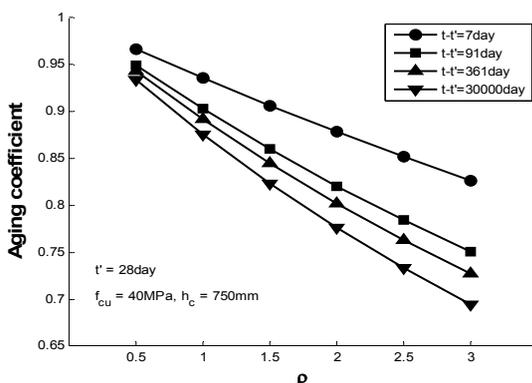
<Table 2>는 압축강도 40 MPa, 개념부재치수 750 mm, 재하시점이 28, 철근비가 0.5에서 3%까지 변할 때 재령 7, 91, 361, 30000일의 재령계수를 나타낸 값이다. <Fig. 2>는 이때의 값을 나타낸 그래프이다. <Fig. 3>은 압축강도가 40 MPa, 개념부재치수, 750 mm, 재하시점 28일 일 때의 그래프로 철근비가 0.5에서 3%까지 변할 때 재하시점으로부터 7, 91, 361, 30000일의 경우를 각각 그린 그래프이

<Table 2> Reinforcement ratio and the aging coefficient

t-t'(day)	0.5%	1%	1.5%	2%	2.5%	3%
7	0.9671	0.9359	0.9064	0.8784	0.8518	0.8265
91	0.9493	0.9029	0.8602	0.8208	0.7844	0.7506
361	0.9433	0.8919	0.8451	0.8024	0.7631	0.7271
30000	0.9344	0.8759	0.8233	0.7760	0.7331	0.6941
Diff	0.0327	0.0600	0.0831	0.1024	0.1187	0.1324



<Fig. 2> The relationship between time and the aging coefficient about reinforcement ratio



<Fig. 3> The relationship between reinforcement ratio and the aging coefficient

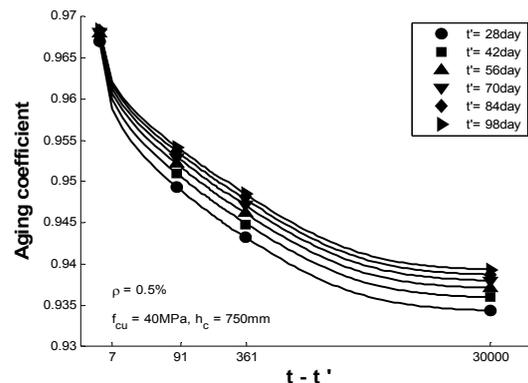
다. 이 그래프를 살펴보면 철근비가 증가할수록 재령계수가 감소함을 알 수 있다. <Table 2>를 보면 철근비가 증가할수록 값의 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다.

3.2 재하시점

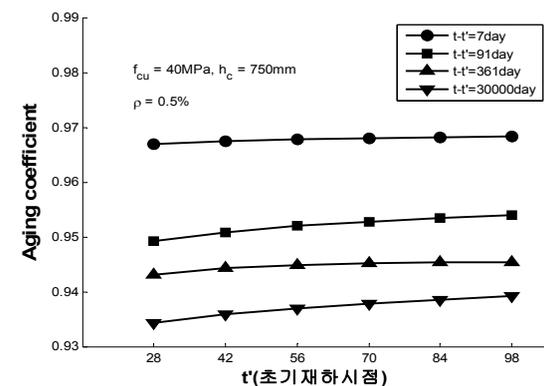
<Table 3>은 압축강도 40 MPa, 개념부재치수 750 mm, 철근비 0.5%, 재하시점이 28에서 98일까지 변할 때 재령 7, 91, 361, 30000일의 재령계수를

<Table 3> Loading time and the aging coefficient

t-t'(day)	28	42	56	70	84	98
7	0.9671	0.9676	0.9679	0.9682	0.9683	0.9685
91	0.9493	0.9510	0.9521	0.9530	0.9537	0.9542
361	0.9433	0.9444	0.9451	0.9454	0.9455	0.9455
30000	0.9344	0.9360	0.9371	0.9380	0.9387	0.9394
Diff	0.0327	0.0316	0.0308	0.0301	0.0296	0.0291



<Fig. 4> The relationship between time and the aging coefficient about loading time



<Fig. 5> The relationship between loading time and the aging coefficient

나타낸 값이다. <Fig. 4>는 이때의 값을 나타낸 그래프이다. <Fig. 5>는 압축강도가 40 MPa, 개념부재치수, 750 mm, 철근비 0.5% 일 때의 그래프로 재하시점이 28에서 98일까지 변할 때 재하시점으로부터 7, 91, 361, 30000일의 경우를 각각 그린 그래프이다. 이 그래프를 살펴보면 재하시점이 증가할수록 재령계수가 증가함을 알 수 있다. <Table 3>을 보면 재하시점이 증가할수록 값의 차이가 점점 줄어드는 것을 알 수 있다.

3.3 압축강도

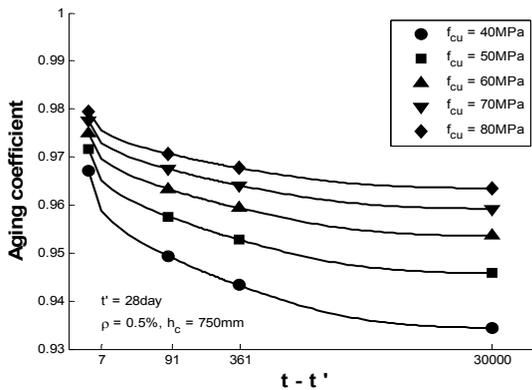
<Table 4>는 재하시점이 28일, 개념부재치수 750 mm, 철근비가 0.5, 압축강도가 40에서 80 MPa까지 변할 때 재령 7, 91, 361, 30000일의 재령계수를 나타낸 값이다. <Fig. 6>은 이때의 값을 나타낸 그래프이다. <Fig. 7>은 재하시점이 28일, 개념부재치수, 750 mm, 철근비 0.5% 일 때의 그래프로 압축강도가 40에서 80 MPa까지 변할 때 재하시점으로부터 7, 91, 361, 30000일의 경우를 각각 그린 그래프이

<Table 4> Compressive strength and the aging coefficient

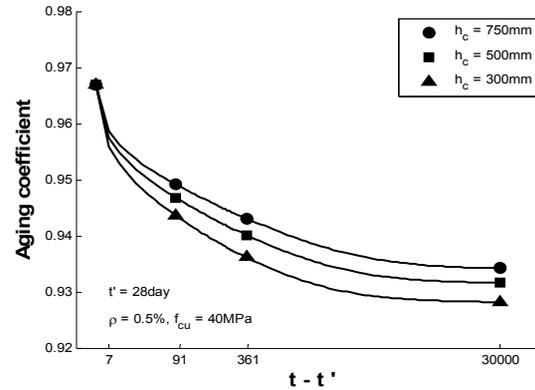
t-t'(day)	40MPa	50MPa	60MPa	70MPa	80MPa
7	0.9671	0.9717	0.9750	0.9775	0.9794
91	0.9493	0.9576	0.9633	0.9675	0.9707
361	0.9433	0.9528	0.9594	0.9641	0.9677
30000	0.9344	0.9458	0.9536	0.9592	0.9635
Diff	0.0327	0.0259	0.0215	0.0183	0.0159

<Table 5> The notational size of member and the aging coefficient

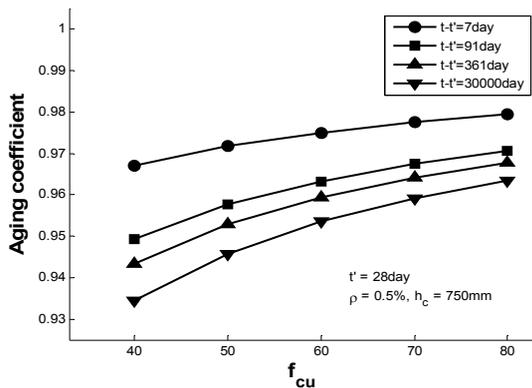
t-t'(day)	300mm	500mm	750mm
7	0.9671	0.9671	0.9671
91	0.9493	0.9470	0.9437
361	0.9433	0.9403	0.9363
30000	0.9344	0.9318	0.9284
Diff	0.0327	0.0353	0.0387



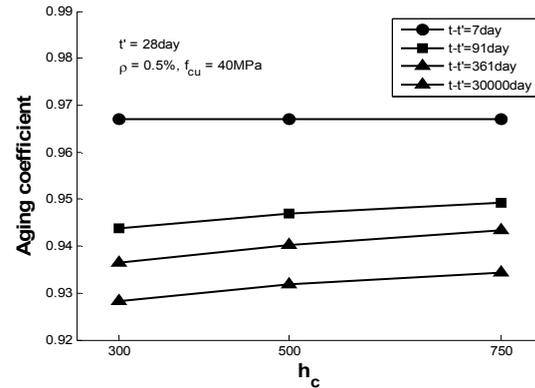
<Fig. 6> The relationship between time and the aging coefficient about compressive strength



<Fig. 8> The relationship between time and the aging coefficient about the notational size of member



<Fig. 7> The relationship between compressive strength and the aging coefficient



<Fig. 9> The relationship between the notational size of member and the aging coefficient

다. 이 그래프를 살펴보면 압축강도가 증가할수록 재령계수가 증가함을 알 수 있다. <Table 4>를 보면 재하시점이 뒤로 갈수록 값의 차이가 점점 줄어드는 것을 알 수 있다.

3.4 개념부재치수

<Table 5>는 압축강도 40 MPa, 철근비 0.5%, 재하시점이 28일, 개념부재치수가 300에서 750mm까지 변할 때 재령 7, 91, 361, 30000일의 재령계수를 나타낸 값이다. <Fig. 8>은 이때의 값을 나타낸 그래프이다. <Fig. 9>는 압축강도가 40 MPa, 재하시점 28일, 철근비 0.5% 일 때의 그래프로 개념부재치수가 300에서 750mm까지 변할 때 재하시점으로부터 7, 91, 361, 30000일의 경우를 각각 그린 그래프이다. <Table 5>를 살펴보면 7일인 시점은 모두 재령계수의 값이 동일하나, 개념부재치수가 커질수록 재령계수의 값의 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다.

4. 재령계수식 제안

3장의 결과를 토대로 다변수회귀분석을 통해 재령계수 예측식을 산정하였다. 재령계수의 곡선은 모두 유사한 형태를 가진다는 점에 착안하여 다음의 식 (15)와 같은 지수함수를 기본식으로 사용하였다.

$$\chi(t, t') = k + R(t - t')^{-0.2372 + 0.0104 \ln(t - t')} \quad (15)$$

회귀식의 k 는 재령계수의 초기값을 나타내는 항이며, R 는 재령계수의 변화폭을 나타내는 항이다. k 와 R 은 하중재하시점이 28일, 압축강도가 40 MPa, 철근비 0.5%, 개념부재치수가 750 mm 일 때를 기준으로 하여 회귀분석을 통해 다음과 같이 적절한 함수형태로 산정하였다.

$$k = 0.925 + 26.52 \left(\frac{\rho - 0.5}{f_{cu}} \right)^2 - 5.603 \left(\frac{\rho - 0.5}{f_{cu}} \right) + 0.0491 \ln \left(\frac{f_{cu}}{40} \right) + \frac{h_c - 750}{75550} \quad (16)$$

$$R = R_\rho \cdot R_{f_{cu}} \cdot R_{h_c} \quad (17)$$

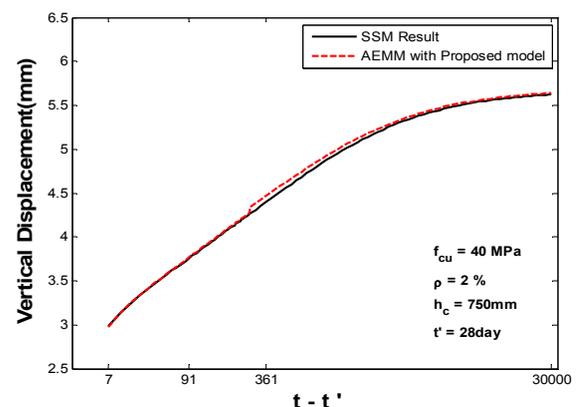
$$R_\rho = 1 + 1.589 \ln \left(\frac{\rho}{0.5} \right) \quad (18)$$

$$R_{f_{cu}} = e^{-0.02 \times (f_{cu} - 40)} \quad (19)$$

$$R_{h_c} = 1 - 1.55 \times 10^{-4} \times (h_c - 750) \quad (20)$$

여기서, k 는 재령계수의 초기값을 철근비, 압축강도, 개념부재치수를 고려하여 보정한 값이다. R 은 재령계수의 최대, 최소값의 폭을 정하기 위한 보정값을 철근비, 압축강도, 개념부재치수로 보정한 값이다. R_ρ 는 철근, $R_{f_{cu}}$ 는 압축강도, R_{h_c} 는 개념부재치수에 대한 영향을 나타낸 계수로 식 (15)를 결정할 때 기준으로 설정한 값에 대해 1의 값을 가지도록 정했다. 위에서 제안된 회귀식의 R^2 값은 0.988로 상당히 정확한 추정결과를 보여준다.

<Fig. 10>은 부재길이가 5000mm이고 단면크기가 1500mm x 1500mm 인 기둥에 36000KN의 축하중을 작용시켰을 때 추정식에 의해 산정된 재령계수를 사용하는 재령보정유효계수법과 직접적분법에 의해 구한 탄성변형과 크리프변형에 의한 변위를 나타낸 그래프로 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 그래프는 초기재하시점 28일, 철근비 2%, 압축강도 40MPa, 개념부재치수 750 mm일 때의 결과를 비교한 것으로 조건을 변화시켰을 경우도 유사한 정확도를 나타내었다.



<Fig. 10> Comparison of displacements

5. 결 론

재령보정유효계수법은 결과의 정확성 및 계산량의 측면에서 볼 때 시공이력이 복잡하고 부재의 수가 많은 고층건축물의 시공단계해석에 적합한 장기 거동해석법으로 판단된다. 본 연구에서는 한국콘크리트학회의 크리프계수식을 사용할 경우 적용할 수 있는 재령계수 추정식을 제안하였다.

이를 위해 축력을 받는 단일 기둥에서 철근비 및 재하시점, 압축강도, 부재치수 등을 변화시키면서 직접적분법을 사용하여 크리프변형을 산정하고 그 결과로부터 재령계수를 산정하였다. 이후 다변수 회귀분석을 통해 계령계수의 추정식을 산정하였다. 산정된 추정식은 기본적으로 지수함수의 형태를 가지며 하중재하시점, 압축강도, 철근비, 개념부재치수의 변화를 초기값 및 보정계수의 형태로 반영한다. 추정식은 결정계수 R^2 가 0.988로 아주 정확한 값을 산정할 수 있으며 추정식에 의한 재령계수를 사용한 크리프변형은 직접적분법에 의한 결과와 거의 동일한 값을 가짐을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#09첨단도시A01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Neville, Adam M., Walter H. Dilger, and Jeffery J. Brooks. Creep of plain and structural concrete. London and New York: Construction Press, 1983.
2. Gilbert, Raymond Ian, and Gianluca Ranzi. Time-dependent behaviour of concrete structures. Taylor & Francis, 2010.
3. Jang Sung-Woo, Song Hwa-Cheol, Sho Kwang-Ho. "Column Shortening Prediction of Concrete Filled Tubes using Monte Carlo Method." Journal of the Korean Association for Spatial Structures. vol.10 No.1: 75-84, 2010.
4. Sassone, Mario, and Mario Alberto Chiorino. "Design aids for the evaluation of creep induced structural effects." Shrinkage and Creep of Concrete (2005): 239-259.
5. Gilbert, Raymond Ian. Time effects in concrete structures. Developments in civil engineering 23, 1988.
6. Chiorino, M.A. and G. Lacidogna (1991), Approximate values of the aging coefficient for the age-adjusted effective modulus method in linear analysis of creep structures, Report No. 31, Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino, Turin, Italy.
7. Choi Na-Rae, Kim Jin-Keun. Development of Model Equations of Aging Coefficient for the Slab under Flexural Moment and Axial Force. Journal of the architectural institute of korea(structure & construction), vol.28 No.9: 25-32, 2012.
8. Ghali, Amin, Renaud Favre, and Mamdouh Elbadry. Concrete Structures: Stresses and Deformations: Analysis and Design for Serviceability. Taylor & Francis, 2002.
9. KCI Structural Concrete Design Code 2012, the Korea Concrete Institute.
10. BAZANT, Zdenek P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective modulus method. ACI Journal, 1972, 69.4: 212-217.

(접 수 일 자 : 2013년 10월 21일)
(심사완료일자 : 2013년 11월 15일)
(게재확정일자 : 2013년 11월 22일)