



## 축력을 받는 철근콘크리트조 부재 장기거동 예측의 불확실성 분석

유재욱<sup>1)\*</sup> · 김승남<sup>1)</sup> · 유은종<sup>1)</sup> · 하태훈<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축공학과 <sup>2)</sup>대우건설 E&C

### Uncertainty Analysis of Long-Term Behavior of Reinforced Concrete Members Under Axial Load

Jae-Wook Yoo,<sup>1)</sup> Seung-Nam Kim,<sup>1)</sup> Eun-Jong Yu,<sup>1)\*</sup> and Tae-Hun Ha<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2)</sup>Daewoo Engineering Co., Ltd., Seoul 440-210, Korea

**ABSTRACT** A probabilistic construction stage analysis using the Monte Carlo Simulation was performed to address the effects of uncertainty regarding the material properties, environmental factors, and applied forces. In the previous research, creep and shrinkage were assumed to be completely independent random variables. However, because of the common influencing factors in the material models for the creep and shrinkage estimation, strong correlation between creep and shrinkage can be presumed. In this paper, an Monte Carlo Simulation using CEB-FIB creep and shrinkage equations were performed to actually evaluate the correlation coefficient between two phenomena, and then another Monte Carlo Simulation to evaluate the statistical properties of axial strain affected by partially correlated random variables including the material properties, environmental factors, and applied forces. The results of Monte Carlo Simulation were compared with measured strains of a column on a first story in a 58-story building. Comparison indicated that the variation due to the uncertainty related with the material properties were most severe. And measured strains was within the range of mean+standard deviation.

**Keywords** : creep, shrinkage, long-term analysis, Monte Carlo

#### 1. 서 론

철근콘크리트조 고층건물의 수직부재는 축력에 의한 즉시 처짐과 시간에 따른 건조수축과 크리프에 의한 축방향 변형을 일으키며, 이는 부재에 부가응력을 일으킴과 동시에 건물의 사용성에 영향을 미친다. 즉, 수직부재의 부등축소에 의해 수평부재에 부가적인 모멘트가 발생하게 되며, 슬래브의 기울어짐, 상층부의 코어월과 기둥의 수직도 이탈을 초래하여 엘리베이터 및 외장재 설치시 문제를 일으킬 수 있다.<sup>1)</sup> 탄성변형의 예측은 비교적 간단하므로 수직부재의 축방향 변형 예측에서 중요한 요소는 콘크리트의 시간에 따른 시간의존적 변형인 크리프와 건조수축에 의해 발생하는 변형의 크기를 예측하는 것이다.

콘크리트부재에서 발생하는 시간의존적인 변형의 크

기를 수치적으로 예측하기 위해서는 재료모델식과 장기 거동해석 알고리즘이 필요하다. 콘크리트의 크리프와 건조수축변형은 매우 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 이들 요인은 하중의 크기, 콘크리트를 구성하는 재료의 특성, 기온과 습도등 환경조건 등으로 이루어져 있다. 현재 여러 종류의 재료모델식이 제안되어 있으나 각 재료 모델식마다 고려하는 인자가 서로 다르며 비슷한 조건에서의 예측치도 상당한 차이를 보인다.<sup>2,3)</sup> 따라서 시공단계 해석을 위해서는 사용되는 재료시험을 통해 구한 재료 특성을 사용한 것이 일반적이다.

강경수 등은 재료모델의 변동계수 및 크리프와 건조수축사이의 상관계수를 다양하게 가정하여 시공단계 해석에 의한 변위의 불확실성을 분석하였다.<sup>4)</sup> 또한 송화철 등은 사용상의 문제와 인접 수직부재간의 부등 축소량 같은 구조적인 문제에 의해 변위의 불확실성을 분석하였다.<sup>5)</sup> 하지만 이들 연구에서는 불확실성 인자의 확률적 특성을 가정하거나 실제 계측치와의 비교가 없는 등 해석적 혹은 이론적 연구로서의 한계를 가지고 있다.

이 연구에서는 철근콘크리트조 부재의 장기거동에 미치는 요인들의 변동범위를 고려한 확률론적인 장기거동

\*Corresponding author E-mail : eunjongyu@hanyang.ac.kr

Received May 15, 2014, Revised June 2, 2014,

Accepted June 17, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

해석을 통해 축방향 변형의 변동성을 분석하고 이를 계측치와 비교하였다. 대상부재는 58층 건물의 1층의 기둥부재로 장기거동해석에 사용된 재료특성, 하중, 습도, 기온등의 평균값은 실제 건물의 재료시험 결과 및 소재지의 환경조건으로부터 산정하였으며 각 요인의 변동계수는 기존연구<sup>6,8)</sup>에 의해 제안된 값을 사용하였다. 이때 크리프와 건조수축간의 상관관계를 고려하기 위해 재료모델에서 제시하고 있는 수식을 사용하여 상관계수를 산정하였다.

## 2. 장기거동해석

일정한 하중이 지속될 경우 콘크리트는 크리프의 영향으로 시간에 따라 압축 변형량이 증가한다. 재료모델식은 콘크리트에서 발생하는 크리프 변형량을 수치적으로 모사하는 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 콘크리트와 철근의 변형이 동일해야한다는 부재내의 적합조건과 평형조건을 사용하여 실제로 발생하는 변형량을 산정하는 해석기법이다. 여러 종류의 장기거동해석알고리즘이 제안<sup>9)</sup>되어 있으나 이들 중 직접적분법(Step-by-Step Method, SSM)은 가장 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법이며 재령보정유효계수법(Age-adjusted effective Modulus Method, AEMM)은 작은 계산량 만으로 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법으로 알려져 있다. 이들 장기거동해석법의 개요는 다음과 같다.

### 2.1.1 직접적분법

시간에 따라 응력이 변화하는 콘크리트에서 발생하는 탄성변형량 및 크리프 변형량은 다음과 같은 적분식으로 나타낼 수 있다.<sup>10)</sup>

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

하지만, 식 (1)은 크리프계수가 재령과 상관없이 동일하다고 가정하지 않는 한 수학적으로 정해를 구할 수 없다. 직접적분법은 식 (1)의 적분식을 식 (2)와 같이 수치적분식으로 변환한 식이다. 즉, 이 방법은 재하시점부터 목표시점까지의 시간을 여러 구간으로 나누고 각 구간의 응력 증분에 따른 변형률을 수치적분을 통해 구한다. Fig. 1은 직접적분법의 해석방법을 도식화 한 그래프이다.<sup>9)</sup>

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t')}{E_c(t')} [1 + \phi(t, t')] + \sum_{j=1}^i \frac{\Delta \sigma(t_j)}{E_c(t_j)} [1 + \phi(t, t_j)] \quad (2)$$

여기서,

$\sigma$  : 콘크리트의 응력

$E_c(t)$  : 재령 t 에서 콘크리트의 탄성계수

### 2.1.2 재령보정유효계수법

단면내 철근이 콘크리트의 변형을 구속할 경우 콘크리트의 응력은 Fig. 1과 같이 곡선의 형태로 감소하게 된다. 재령보정유효계수법은 지속적으로 변화하는 콘크리트 응력의 효과를 재령계수를 통해 고려하는 방법이다.<sup>10)</sup> 즉, 한 구간을 여러개의 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. 재령보정유효계수법에서 변형률에 관한 식은 식 (3)과 같으며, 여기서 재령계수  $\chi(t, t')$ 는 식 (2)와 (3)으로부터 식 (4)와 같이 유도될 수 있다.<sup>10)</sup>

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t')}{E_c(t')} [1 + \phi(t, t')] + \frac{\sigma(t) - \sigma(t')}{E_c(t')} [1 + \chi(t, t') \phi(t, t')] \quad (3)$$

$$\chi(t, t') = \frac{E_c(t')}{[\sigma(t) - \sigma(t')] \phi(t, t')} \sum_{j=1}^i \frac{\Delta \sigma(t_j)}{E_c(t_j)} \times [1 + \phi(t, t_j)] - \frac{1}{\phi(t, t')} \quad (4)$$

따라서 재령계수는 재하시 재령  $t'$ , 콘크리트의 탄성계수의 발현에 영향을 받으며 크리프 계수를 구하기 위해 사용된 재료모델에 따라서도 달라진다. Bazant<sup>11)</sup>는 식 (5)와 같이 이완함수  $R(t, t')$ 를 사용하여 나타낸 후 ACI의 크리프계수를 사용할 경우 재령계수를 산정하였으며, Trost와 Schade 등도 CEB의 크리프계수식을 사용할 경우

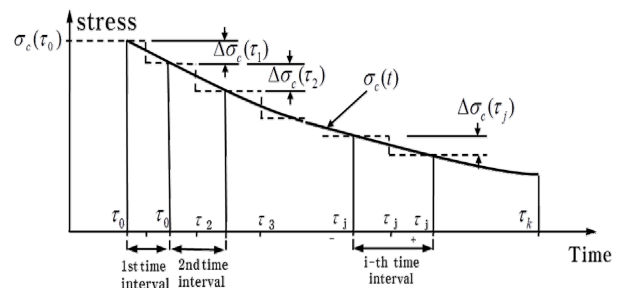


Fig. 1 Step-by-Step Method (SSM)

및 콘크리트 탄성계수가 변화하지 않을 경우에 재령계수를 산정하고 그래프의 형태로 제시하였다.

$$\chi(t, t') = \frac{E_c(t')}{E_c(t') - R(t, t')} - \frac{1}{\phi(t, t')} \quad (5)$$

하지만 위의 수식에 의하면 단면내의 철근비가 높고 낮음에 상관없이 재령계수의 값은 동일하게 된다. 유재욱 등은 단면내 철근비에 따라 달라지는 응력재분배의 효과를 고려한 재령계수를 다음의 식 (6)~(11)과 같이 제안한 바 있다.<sup>10)</sup>

$$\chi(t, t') = k + R(t - t')^{-0.2372 + 0.0104 \ln(t - t')} \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 재령계수의 초기값을 나타내는 항이며,  $R$ 는 재령계수의 변화폭을 나타내는 항이다.  $k$ 와  $R$ 은 하중재하시점이 28일, 압축강도가 40 MPa, 철근비 0.5%, 개념부 재치수가 750 mm 일 때를 기준으로 하여 회귀분석을 통해 다음과 같은 함수형태로 산정하였다.

$$k = 0.925 + 26.52 \left( \frac{\rho - 0.5}{f_{cu}} \right)^2 - 5.603 \left( \frac{\rho - 0.5}{f_{cu}} \right) + 0.0491 \ln \left( \frac{f_{cu}}{40} \right) + \frac{h_c - 750}{75550} \quad (7)$$

$$R = R_\rho \cdot R_{f_{cu}} \cdot R_{h_c} \quad (8)$$

$$R_\rho = 1 + 1.589 \ln \left( \frac{\rho}{0.5} \right) \quad (9)$$

$$R_{f_{cu}} = e^{-0.02 \times (f_{cu} - 40)} \quad (10)$$

$$R_{h_c} = 1 - 1.55 \times 10^{-4} \times (h_c - 750) \quad (11)$$

여기서,  $\rho$ 는 철근비,  $f_{cu}$ 는 재령일에서 콘크리트의 평균 압축강도,  $h_c$ 는 개념부재치수로서 부재의 크기를 나타내는 값이다. 이 연구에서는 직접적분법 및 식 (6)~(11)에 의한 재령계수를 사용하는 재령보정유효계수법을 통해 장기거동해석을 수행하였다.

## 2.2 재료모델

이 연구에서는 콘크리트의 시간의존적인 변형을 나타내는 재료모델식으로 CEB-FIP 1990<sup>13)</sup>을 사용하였다. CEB-FIP 1990에서는 크리프와 건조수축변형을 산정할 때 다음과 같이 다양한 요인을 반영한다.

### 2.2.1 크리프

CEB-FIP에서 크리프 변형은 단위 탄성변형량과의 비

율인 크리프계수로 표현된다. 크리프 모델식은 식 (12)와 같이 크리프계수의 극한값인 기준크리프계수  $\phi_0$ 와 시간에 따른 크리프변형을 나타내는 함수인  $\beta(t - t')$ 로 구성된다.

$$\phi(t, t') = \phi_0 \beta_c(t - t') \quad (12)$$

여기서, 기준 크리프계수는 다음의 식 (13)~(17)과 같이 재하시 콘크리트의 재령  $t'$ , 콘크리트의 압축강도  $f_{cu}$ , 상대습도  $RH(\%)$ , 온도  $T$ , 부재의 크기  $h_c$  등에 영향을 받는다. 즉,

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t') \quad (13)$$

$$\phi_{RH} = \phi_T + \frac{1 - 0.01RH}{0.10 \sqrt[3]{h_c}} \phi_T^{1.2} \quad (14)$$

$$\phi_T = \exp[0.015(T - 20)] \quad (15)$$

$$\beta(f_{cu}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cu}}} \quad (16)$$

$$\beta(t') = \frac{1}{0.1 + (t')^{0.2}} \quad (17)$$

이다. 한편, 시간에 따른 크리프의 발현을 나타내는 함수 또한 부재의 크기 및 상대습도의 영향을 고려하는 영향계수인  $\beta_H$ 와 온도에 따른 영향을 고려하는  $\beta_T$ 를 포함하고 있다.

$$\beta_c(t - t') = \left[ \frac{(t - t')}{\beta_{RH} \beta_T + (t - t')} \right]^{0.3} \quad (18)$$

### 2.2.2 건조수축

CEB-FIP의 건조수축 변형률 모델식의 구성도 크리프와 유사하다. 즉, 전체수축은 식 (19)와 같이 극한건조수축변형도를 나타내는 항  $\epsilon_{sho}$ 와 시간에 따른 변화를 나타내는 함수  $\beta(t - t_o)$ 로 구성되어 있으며,

$$\epsilon_{sh}(t, t_o) = \epsilon_{sho} \beta_s(t - t_o) \quad (19)$$

극한값은 상대습도, 콘크리트 강도에 영향을 받는다. 극한값은 식 (20)과 같이 산정된다.

$$\epsilon_{sho} = \epsilon_s(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (20)$$

여기서,

$$\epsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/10)] \times 10^{-6} \quad (21)$$

$$\beta_{RH} = -1.55 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100} \right)^3 \right] \left[ 1 + \left( \frac{8}{103 - RH} \right) \left( \frac{T - 20}{40} \right) \right] \quad (22)$$

이며,  $t_0$ 는 건조수축이 시작되는 시간(일),  $\beta_{sc}$ 는 시멘트 종류에 따른 계수로서 보통콘크리트는 4를 사용한다.

### 3. 확률변수 및 불확실성의 분석

#### 3.1 몬테카를로 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션은 불확실성을 가지는 인자를 확률분포에 맞게 무수히 많은 난수로 발생시키고 이를 사용하여 시뮬레이션을 시행한 다음 그 결과의 확률·통계적인 해석을 통해 확률변수에 의한 영향을 분석하는 방법이다.<sup>13)</sup>

몬테카를로 시뮬레이션에 사용될 난수는 일반적으로 0과 1사이에서 균일한 분포를 가지는 난수 발생시킨 후 이를 정규분포의 난수로 변환한다. 이러한 과정에 대해서는 다양한 참고문헌이 있으므로 이 논문에서 이에 관한 소개는 생략한다.<sup>6,7)</sup> 상관계수가  $\rho$ 인 두 정규분포난수 X와 Z는 다음 식 (23)과 같이 서로 독립인 정규분포의 난수 X와 Y에 의해 구한다.<sup>14)</sup>

$$Z = \rho X + \sqrt{(1 - \rho^2)} Y \quad (23)$$

몬테카를로 시뮬레이션에 정규분포로 발생시킨 난수를 사용할 경우 매우 많은 샘플을 사용하여야 전체 확률변수의 통계적 특성을 구할 수 있다. 라틴 하이퍼큐브 샘플링(latin hypercube sampling)은 난수 발생 시 일정한 발생확률을 가지는 여러 개의 구간을 나눈 뒤 그 구간 내에서 임의로 샘플링을 하는 방식으로 일반적인 정규분포의 난수에 비해 훨씬 작은 수의 샘플링만으로도 전체의 통계적 특성에 매우 유사한 값을 구할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>16)</sup>

이 연구에서는 콘크리트의 탄성계수, 크리프계수, 건조수축, 재하하중, 환경적 요인의 변동에 의한 영향을 알아보기 위해 이들 특성을 확률변수로 선택하고 기존 연구<sup>6-8)</sup>를 통해 보고된 이 변수들의 변동계수를 라틴 하이퍼큐브 샘플링을 통해 난수로 발생시켜 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 3.2 확률변수

제안된 모델식을 통해 예측된 구조물의 거동이 실제 계측치와 차이를 보이는 이유는 여러 가지로 생각될 수 있다. 즉, 크리프 계수, 극한건조수축변형률, 탄성계수 등 재료적인 특성의 불확실성에 따른 요인, 습도 및 온도와 같은 환경적인 요인, 또한 작용하는 하중의 오차에 의한 영향, 마지막으로 계측의 오차 등이 있다.<sup>2)</sup> 이 연구에

서는 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 이들 불확실성의 요인들에 의한 해석 결과의 변동범위가 어떻게 되는지를 분석해 보고자 하였다.

Table 1은 이 연구에서 고려된 확률변수의 종류 및 확률변수들 사이의 상관계수를 나타내고 있다. 고려된 확률변수는 재령에서 평균 압축강도( $f_{cu}$ ), 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ ), 기준 크리프 계수( $\phi_0$ ), 기준 건조수축변형률( $\epsilon_{sh,0}$ )과 같은 재료적 특성에 의한 변수와 온도( $T$ ), 상대습도( $RH$ ), 개념부재 치수( $h$ )와 같은 환경적 요인, 재하하중(load)과 같은 외부에서 작용하는 요인으로 나눌 수 있다. 여기서,  $f_{cu}$ 와  $E_c$ 는 로그 정규분포로 나타내었고, 나머지는 정규분포의 형태로 가정하였다. 압축강도와 탄성계수, 극한크리프계수와 극한 건조수축 계수를 제외하고 나머지는 독립인 것으로 가정하였다.

불확실성의 분석시 그 결과는 각 확률변수들이 서로 독립인지 아니면 상관성을 가지고 있는지에 따라 달라진다. 콘크리트 압축강도  $f_{cu}$ 와 탄성계수  $E_c$ 는 높은 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있는데 이 연구에서는 기존 문헌에 따라 0.8의 상관계수를 사용하였다.<sup>11)</sup> 크리프와 건조수축의 경우도 앞서 CEB 모델식에서 볼 수 있듯이 크리프와 건조수축 변형에 미치는 요인이 매우 유사하여 어떠한 상관관계가 있을 것으로 생각되나 기존 문헌에서는 여기에 대해서는 제시된 바가 없다. 따라서 이 연구에서는 건조수축과 크리프 사이의 상관관계를 고려하기 위해 또 다른 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 여기에 사용된 확률변수는 부재의 치수  $h_c$ , 상대습도  $RH$ , 온도  $T$ , 콘크리트 강도  $f_{cu}$ 의 4종류이며, 각 확률변수의 평균과 변동계수는 Table 2와 같다. 고려된 확률변수는 모두 서로 독립인 것으로 가정하였다.

Table 1 Correlational coefficients between random variables

	$f_{cu}$	$E_c$	$\phi_0$	$\epsilon_{sh,0}$	$RH$	$T$	$h$	Load
$f_{cu}$	1	0.8	0	0	0	0	0	0
$E_c$	0.8	1	0	0	0	0	0	0
$\phi_0$	0	0	1	0.75	0	0	0	0
$\epsilon_{sh,0}$	0	0	0.75	1	0	0	0	0
$RH$	0	0	0	0	1	0	0	0
$T$	0	0	0	0	0	1	0	0
$h$	0	0	0	0	0	0	1	0
Load	0	0	0	0	0	0	0	1

Table 2 Statistical properties for preliminary MCS

Variable	Mean	CV
$h_c$	742.5 mm	0.05
$RH$	40%	0.2
$T$	30°C	0.1
$f_{cu}$	45 MPa	0.1

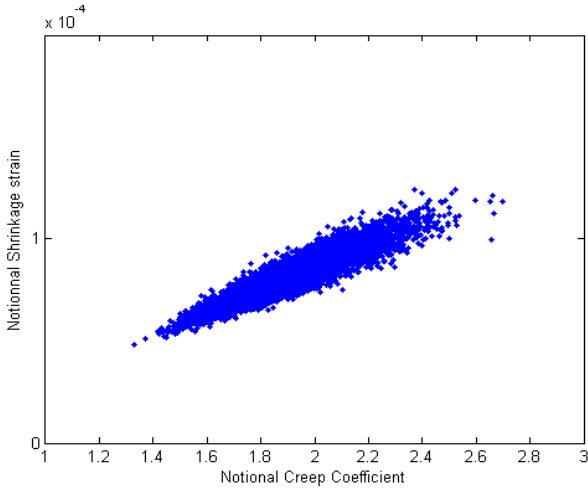


Fig. 2 Statistical dispersion of shrinkage and creep

Fig. 2는 그 결과를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 크리프계수와 건조수축변형률의 상관계수는 0.75로 상당히 높은 값을 나타내었다. Table 1의 크리프와 건조수축 사이의 상관계수는 이를 통해 구해진 값이다.

#### 4. 고층건물 기둥의 축방향 변형량 예측

##### 4.1 대상 건물과 계층부재의 소개

이 연구에서는 말레이시아에서 현재 시공중인 지하 4층 지상 58층의 건물을 대상으로 2절과 3절에서 언급한 장기거동해석법과 몬테카를로 시뮬레이션기법을 사용하여 부재 장기거동의 변동성을 분석하고 이를 계측치와 비교하였다. 대상건물의 평면은 Fig. 3과 같이 전체적으로 마름모꼴을 가지고 있으며 각 모서리부에 메가 칼럼을 가지고 있으며 중앙부에 코어가 위치하고 있으며 이 중 SC1A기둥의 지상1층에서 계측된 변형률과 예측치를 비교하였다.

##### 4.2 재료시험

콘크리트 재료특성은 골재나 혼화재 등에 따라 크게 달라지므로 시공단계해석 및 시공중 변위 모니터링을 위해서는 재료시험을 수행하는 것이 일반적이다. 대상부재 역시 타설시 사용된 콘크리트로 제작된 공시체를 통해 탄성계수, 크리프, 건조수축 등의 특성을 파악하기 위한 재료시험을 수행하였다. 재료시험은 동일한 온도와 습도를 유지하는 항온항습실에서 시행되었으며, 공시체에 가해진 하중 및 환경조건은 Table 3과 같다.

앞서 언급한 바와 같이 시공단계해석을 위해서는 시간에 따른 건조수축 및 크리프 변형의 크기를 나타내는 재료모델식이 필요하다. 하지만 이들 수식에 의한 값과 재료시험에 의한 결과는 반드시 일치하지는 않는다. 따라서 이 연구에서는 재료시험 결과와 유사한 결과를 나타

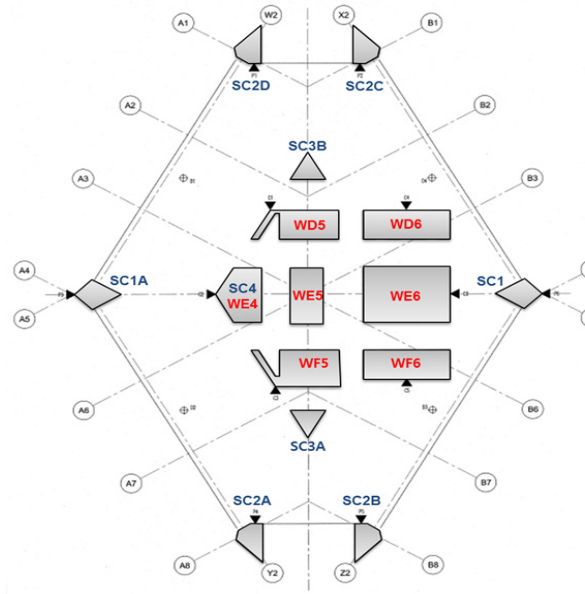


Fig. 3 Floor plan of considered building

Table 3 Conditions for material test

RH	Time of loading	Load
40%	27 days	16.89 MPa

Table 4 Compensation Coefficients for material property

Type	Elastic	Shrinkage	Creep
Factor	0.922	0.867	0.547

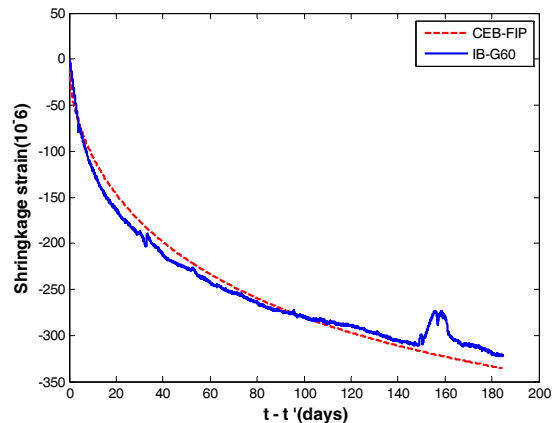


Fig. 4 Compensation of shrinkage strain estimate

내기 위해 CEB-FIP의 수식에 의한 값에 적절한 보정계수를 사용하였다. Table 4는 탄성계수, 건조수축, 크리프수식의 보정계수이다. 탄성계수는 모델식에 의한 예측치와 거의 유사하게 나타났으나 건조수축변형 및 크리프 변형의 경우 예측치의 86.7% 및 55%에 해당하는 변형률이 계측되었다. Fig. 4는 재료시험 결과 중 시간에 따른 건조수축 변형량 및 CEB-FIP에 의한 예측치에 보정계수를 곱한 값을 비교한 그래프이다.

## 5. 불확실성 분석 및 예측치와의 비교

### 5.1 불확실성 분석

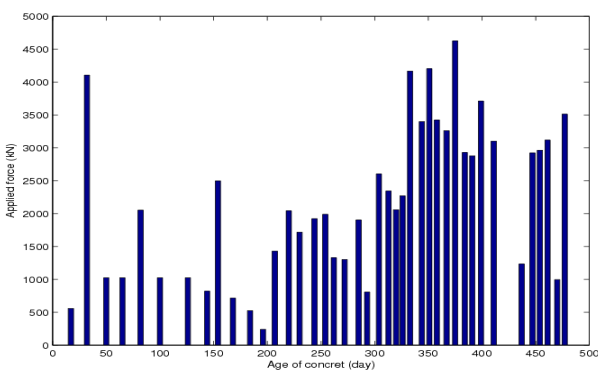
이 연구에서는 불확실성의 요인을 다음과 같이 3개의 그룹으로 나누고 각각의 인자들의 변동에 따른 해석 결과의 변동의 크기를 분석하였다. 불확실성 인자의 3개 그룹은 다음과 같다.

- 1) 재료특성(압축강도, 탄성계수, 기온크리프, 건조수축)의 불확실성
- 2) 환경적 요인(개념부재치수, 습도, 온도)의 불확실성
- 3) 가해지는 하중의 불확실성

해석에 사용된 각 인자들의 평균값 및 변동계수는 Table 5와 같다. 이 중 콘크리트 강도의 평균치는 재료시험을 통해 구해진 값이며, 탄성계수, 크리프계수, 건조수축 변형률의 평균치는 재료시험 결과와 일치시키기 위해 CEB-FIP 모델식에 사용된 보정계수를 의미한다. 또한, 습도 및 기온의 평균 및 변동계수는 대상건물이 위치한 지역의 통계자료로부터 산정된 값이다. 습도 및 기온을 제외한 나머지 인자들의 변동계수는 여러 참고문헌 및 기존문헌자료를 근거로 설정하였다.<sup>4,8)</sup> 여기서 크리프계

**Table 5** Statistical properties of random variables

		Mean	CV
Material Properties	Concrete strength	46.3 MPa	0.060
	Elasticity	0.922	0.150
	Creep coefficient	0.547	0.270
	Shrinkage strain	0.867	0.451
Environmental factor	Notional member size	1446 mm	0.050
	Humidity	40%	0.200
	Temperature	30°C	0.100
Applied load		see Fig. 5	0.05



**Fig. 5** Applied loads and ages of concrete

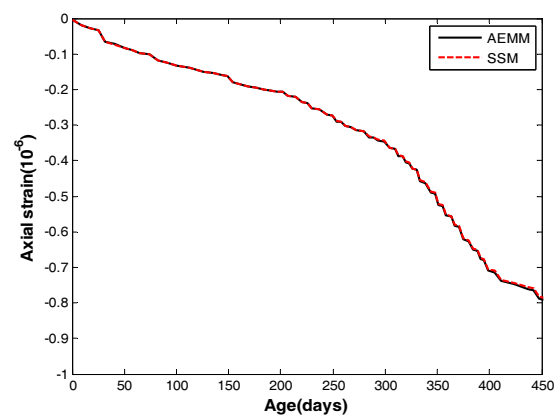
수와 건조수축변형률의 변동계수는 예측자료로부터 구한 전체 변동계수를 예측오차를 0.05로 가정하여 보정한 값이다.<sup>2,7)</sup> 부재크기에 따른 수분증발의 차이를 고려하기 위한 인자인 개념부재치수는 대상부재인 SC1A 기둥의 경우 1446 mm이며 가장 최근의 예측시점인 42층 시공까지의 시공스케줄에 따른 하중작용시 재령 및 하중의 크기는 Fig. 5와 같다.

### 5.2 해석 결과 및 예측치와의 비교

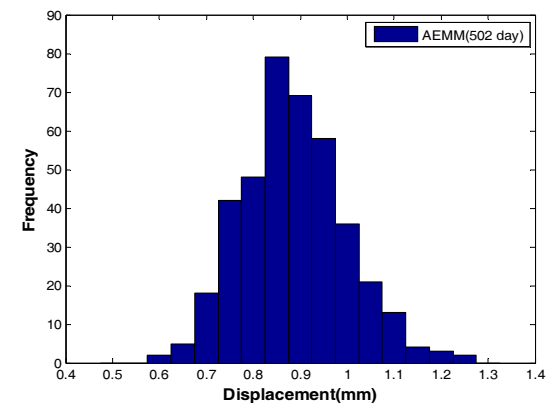
불확실성의 분석을 위해 이상과 같은 통계적 특성을 가진 확률변수를 라틴 하이퍼큐브 샘플링을 통해 발생시키고 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 장기거동해석알고리즘으로는 직접적분법 및 유재옥등의 재령계수를 이용한 재령보정유효계수법<sup>10)</sup>을 사용하였다. Fig. 6은 직접적분법과 재령보정유효계수법을 사용한 해석 결과의 비교로 두 해석법은 거의 동일한 결과를 나타내었다.

Fig. 7은 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 구한 재령 502일 시점의 축방향 변위의 크기를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 400개의 샘플을 사용할 경우 그 분포는 거의 정규분포와 가까워짐을 알 수 있다.

Fig. 8-10은 각각 재료특성의 불확실성, 환경조건의 불확실성, 하중의 불확실성을 고려할 경우 해석 결과의 평



**Fig. 6** Comparison of results using SSM and AEMM



**Fig. 7** Histogram of results by Monte Carlo Simulation (AEMM)

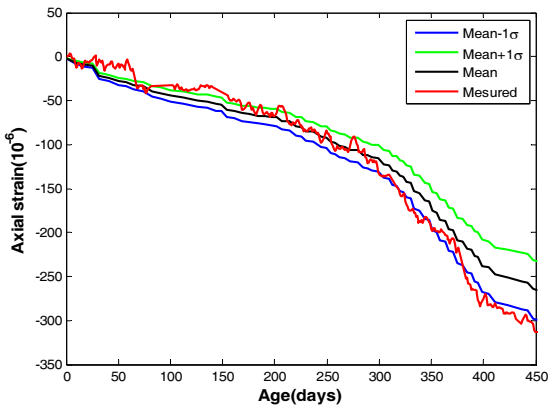


Fig. 8 Variation of estimation by uncertainty of material properties

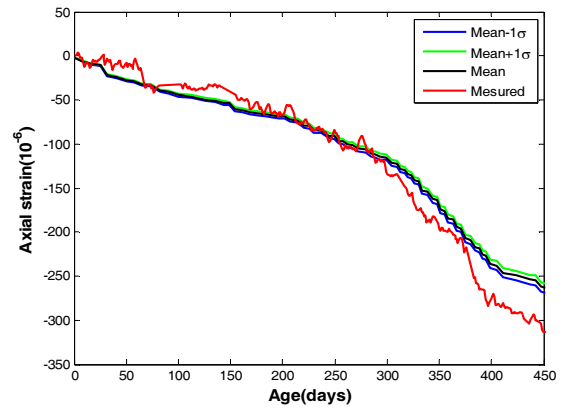


Fig. 9 Variation of estimation by uncertainty of environmental conditions

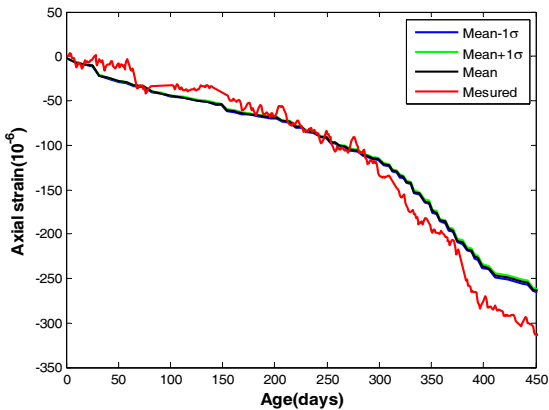


Fig. 10 Variation of estimation by uncertainty of applied forces

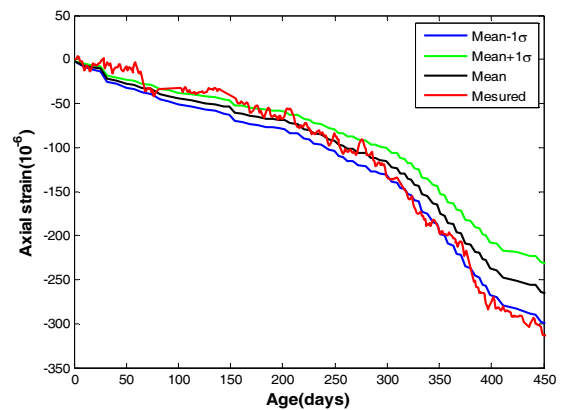


Fig. 11 Variation of estimation when all uncertainties are considered

Table 6 Coefficient of variation due to types of uncertainties

Uncertainty type	CV
Material Properties	0.051
Environmental factor	0.010
Applied load	0.004
All uncertainties	0.052

균, 평균+표준편차, 평균-표준편차 그래프로 나타내고 이를 계측치와 비교한 것이다. 또한 Fig. 11은 모든 불확실성을 모두 고려할 경우의 결과이다. 각각의 요인에 의한 해석 결과의 변동계수는 Table 6에 나타나 있다. Table 6에서 볼 수 있듯이 모든 요인의 변동성을 고려한 데이터의 변동계수는 0.052고 재료적인 특성만 고려한 데이터의 변동계수는 0.051로 환경적인 요인이나 하중의 불확실성에 비해 재료특성의 불확실성이 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 정확한 장기거동의 예측을 위해서는 많은 수의 시편을 사용하는 등 보다 정밀한 재료시험을 통한 재료특성의 산정이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 철근콘크리트조 부재의 장기거동에 미치는 요인들의 변동범위를 고려한 확률론적인 장기거동 해석을 통해 축방향 변형의 변동성을 분석하고 이를 계측치와 비교하였다.

불확실성 분석은 라틴 하이퍼큐브 샘플링을 통해 난수를 발생시켜 불확실성의 요인을 3개의 그룹으로 나누고 각각의 인자들의 변동에 따른 해석 결과의 변동의 크기를 분석하였다. 그 결과 재료에 의한 요인이 환경적 요인과 하중에 의한 요인보다 월등히 큰 비율을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이를 미루어 볼 때 재료적 특성을 실제 시공시 사용한 재료적 특성과 동일하게 할수록 오차가 줄어들 수 있어 건물의 실제 거동에 가깝게 예측할 수 있다는 결론을 낼 수 있었다.

이 연구에서는 축방향의 변형률만을 대상으로 결론을 도출하였다. 이후 연구에서는 횡방향의 변형률도 함께 고려하여 계측치에 가까운 해석 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.



## 감사의 글

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

## References

1. Elnimeiri, M. M. and Joglekar, M. R., "Influence of Column Shortening in Reinforced Concrete and Composite High-Rise Structures," *ACI Special Publication*, ACI, 1989, 117 pp. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/3318>)
2. Henrik, M. and Bazant, Z. P., "Uncertainty Analysis of Creep and Shrinkage Effects in Concrete Structures," *ACI Journal*, Vol. 80, No. 2, 1983, pp. 116-127. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/10467>)
3. Gardner, N. J., "Comparison of Prediction Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concretes," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 5, 2004, pp. 767-775. (doi: <http://dx.doi.org/10.1139/104-046>)
4. Kang, K. S., Gu, M. S., and Yu, E. J., "Probabilistic Construction Stage Analysis of Building Structures Considering the Variations of Material Properties," *Journal of the Architectural Institute of Korea : Structure & Construction*, Vol. 27, No. 11, 2011, pp. 37-44.
5. Song, H. C., Yu, E. J., Jeong, S. C., Ju, Y. K., and Park, C. L., "Influence of Column Shortening in Tall Concrete Buildings," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 13, No. 12, 1997, pp. 289-297.
6. Keitel, H., "Quantifying Sources of Uncertainty for Creep Models under Varying Stresses," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 139, No. 6, 2013, pp. 949-956. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000716](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000716))
7. Yang, I. H., "Uncertainty and Sensitivity Analysis of Time-Dependent Effects in Concrete Structures," *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 7, 2007, pp. 1366-1374. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.07.015>)
8. Keitel, H. and Andrea, D. O., "Uncertainty and Sensitivity Analysis of Creep Models for Uncorrelated and Correlated Input Parameters," *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 11, 2010, pp. 3758-3767. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.020>)
9. Gilbert, R. I., *Time Effects in Concrete Structures*, Developments in Civil Engineering, 1988.
10. Yoo, J. W. and Yu, E. J., "Aging Coefficient Formula of Reinforced Concrete Members under Axial Compression," *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 13, No. 4, 2013, pp. 67-74. (doi: <http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2013.13.4.067>)
11. Bazant, Z. P., "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method," *ACI Journal*, Vol. 69, No. 4, 1972, pp. 212-217. (doi: <http://dx.doi.org/10.14359/11265>)
12. Neville, A. M., Walter H. D., and Jeffery J. B., *Creep of Plain and Structural Concrete*, London and New York: Construction Press, 1983.
13. CEB-FIP, M. C., *90 Design of Concrete Structures. CEB-FIP-Model-Code 1990*, British Standard Institution, London, UK, 1993.
14. Jang, S. W., Song H. C., and Sho K. H., "Column Shortening Prediction of Concrete Filled Tubes using Monte Carlo Method," *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 10, No. 1, 2010, pp. 75-84.
15. Ghali, A. R. F. and Mamdough, E., *Concrete Structures: Stresses and Deformations: Analysis and Design for Serviceability*, Taylor & Francis, 2002.
16. Park, J. S. and Hwang, H. S., "Comparison and Distance Calculation Between Two Latin-hypercube Designs," *The Korean Journal of Applied Statistics*, Vol. 13, No. 2, 2000, pp. 477-488.

**요약** 이 연구에서 몬테카를로 시뮬레이션을 이용해 확률론적 시공단계해석을 수행한 이유는 재료 특성, 환경 요인 및 하중에 대한 불확실성의 영향을 고려하기 위해서이다. 지금까지의 연구에서는 크리프 및 건조수축이 완전히 독립적인 확률 변수라고 가정되었다. 그러나 크리프 및 건조수축 추정을 위한 재료모델의 공통적인 영향요인 때문에 크리프 및 건조수축 사이에 강한 상관관계를 추정 할 수 있다. 이 논문에서는 CEB-FIB모델의 크리프 및 건조수축식을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 실제 두 현상 사이의 상관 계수를 평가 한 후 재료 특성, 환경 요인 및 하중의 확률 변수의 영향을 받는 축방향 변형의 통계적 특성을 평가하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 한번 더 사용하였다. 몬테카를로 시뮬레이션의 결과는 58층 건물의 첫 번째 층의 기둥의 변형률과 비교 했다. 비교 결과는 재료특성에 불확실성에 의한 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 측정된 변형률은 평균+ 표준 편차 범위 안에 있었다.

**핵심용어** : 크리프, 건조수축, 장기거동해석, 몬테카를로 시뮬레이션