Journal of the Korea Concrete Institute
Vol.18, No.1, pp. 101 ~ 108, February, 2006

초고층 내력벽식 구조물의 기둥축소량에 대한 확률론적 예측 및 현장계측

송화철[1)*] · 윤광섭[2)]

[1)]한국해양대학교 해양공간건축학부 [2)](주)미래 ISE

(2005년 6월 20일 원고접수, 2005년 10월 31일 심사완료)

Probabilistic Prediction and Field Measurement of Column Shortening for Tall Building with Bearing Wall System

Hwa-Cheol Song[1)*] and Kwang-Sup Yoon[2)]

[1)]Division of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea
[2)]Mirae Integrated Structural Engineering, No.402, Yonji Bidg, Seoul 135-080, Korea

(Received June 20, 2005, Accepted October 31, 2005)

ABSTRACT

Accurate prediction of time-dependent column shortening is essential for tall buildings in both strength and serviceability aspects. The uncertainty associated with assumed values for concrete properties such as strength, creep, and shrinkage coefficients should be considered for the prediction of time-dependent column shortening of tall concrete buildings. In this study, the column shortenings of 41-story tall concrete building are predicted using monte carlo simulation technique based on the probabilistic analysis. The probabilistic column shortenings considering confidence intervals are compared with the actual column shortenings by field measurement. The time-dependent strains measured at tall bearing wall building were generally lower than the predicted strains and the measured values fell within a range μ-1.64, confidence level 90 %.

Keywords : column shortening, probability analysis, Monte Carlo simulation, field measurement, bearing wall building

1. 서 론

초고층건물에서 발생하는 부등축소량은 기둥과 코어를 연결하는 보와 슬래브에서의 부가응력을 유발하거나 파티션과 커튼월의 균열과 같은 문제 등을 유발하므로, 부등축소량의 영향을 최소화하기 위해 기둥축소량의 예측 및 보정이 정확히 이루어져야 하며, 구조안전성과 사용성의 관점에서 시간변화에 따른 초고층건물 기둥축소량의 정확한 예측이 필요하다. 하지만 초고층 구조물의 시공시 사용되는 재료의 성질은 같은 재료를 사용하더라도 자연적인 요인에 의해서 또는 인위적인 요건에 의해서 차이가 날 수 있다. 따라서 기둥축소량의 예측값은 실제로 발생할 기둥축소량과 다르게 나타날 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 실제 축소량을 현장계측하고 예측치와 비교하여 시공중에 반영해야 한다.

기둥축소량 해석 분야의 연구는 재료의 불확실성을 고려하지 않고 어떤 특정한 값을 가정하여 기둥축소량을 예측하는 기존의 결정론적 해석법[1)]외에 기둥축소량에 영향을 주는 콘크리트의 재료물성치 중 콘크리트강도, 크리프계수, 건조수축계수 등의 변동성을 고려하여 확률론적 해석을 이용한 기둥축소량 예측에 관한 연구[2)]가 최근에 이루어졌다. 기둥축소량의 장기현장계측에 관한 연구는 1962년 미국 시카고 3150 Lake Shore Drive 34층 철근콘크리트 건물[3)]을 효시로 하여 1979년 완공된 76층 Water Tower Place 건물[4)]에서 수행되어 중요한 계측결과자료를 제공하고 있다.

국내의 경우에는 말레이시아에 시공된 Petronas Twin Tower의 현장계측에 대한 연구결과가 1999년 발표되었으며[5)], 최근에는 69층 현대 하이페리온[6)], 59층 삼성 타워팰리스[7)]의 현장계측결과가 보고되고 있다.

기존의 연구에서는 현장계측치와 결정론적 기둥축소량 예측치와의 비교분석만 수행되었으며, 이 경우 해석치가 과대 또는 과소평가되는 문제점을 설계 및 시공과정에서 초기에 고려할 수 없다. 따라서 확률론적 기둥축소량 예측치와 현장계측치의 비교에 관한 연구가 필요하며, 신뢰구간별 기둥축소량값을 구하여 현장계측치와 비교하고 기둥축소량 보정에 반영하는 기법이 제시되어야 한다.

* Corresponding author
E-mail : song@mail.hhu.ac.kr
©2006 by Korea Concrete Institute

본 논문에서는 41층 초고층 내력벽식 구조물(Fig. 1)을 예제로 하여 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 축소량을 구하고 축소량의 분포도를 조사하여 신뢰수준별 기둥축소량을 분석하고, 현장계측치와 신뢰수준별 축소량을 비교하여 확률론적 기둥축소량 예측의 적용성을 제시하고자 한다.

2. 기둥축소량 해석의 일반 사항

기둥축소량은 탄성 축소량과 비탄성 축소량으로 나뉘며, 비탄성 축소량은 크리프 축소량과 건조수축 축소량으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 PCA(Portland Cement Association)에서 제안하는 기둥축소량 알고리즘을 채택하였다.

2.1 탄성축소량

기둥축소량의 탄성축소량에 대한 식은 다음과 같다.

$$\Delta_{EL} = \Sigma \frac{P \times H}{A_t \times E_{ct}} \tag{1}$$

여기서, P는 작용하중, A_t는 기둥의 변환단면적, H는 층고, E_{ct}는 콘크리트의 탄성계수를 나타낸다. 기둥의 변환단면적과 콘크리트의 탄성계수에 대한 값은 다음과 같이 계산된다.

$$A_t = A_g + A_s \times (n_t - 1) \tag{2}$$

$$n_t = \frac{E_s}{E_{ct}} \tag{3}$$

$$E_{ct} = 33 \times w^{1.5} \times \sqrt{f_{ct}^{'}} \tag{4}$$

$$f_{ct}^{'} = f_{28}^{'} \times \frac{t_{la}}{4 + 0.85 \times t_{la}} \tag{5}$$

여기서, A_g는 기둥의 전단면적, A_s는 철근단면적, E_s는 철근의 탄성계수, n_t는 탄성계수비, w는 콘크리트의 밀도, $f_{ct}^{'}$는 콘크리트의 강도, $f_{28}^{'}$는 28일 재령의 콘크리트 강도, t_{la}는 콘크리트의 재령일을 나타낸다.

2.2 비탄성축소량

2.2.1 크리프 축소량

크리프 축소량을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\Delta_{CR} = \Sigma (P/A_t) \times C_u \times CR_t \times H \times CR_{la} \times CR_{vs} \times CR_{RH} \times CR_{sr} \tag{6}$$

여기서, C_u는 특정크리프계수, CR_{la}는 하중작용시점의 재령효과, CR_t는 시간에 대한 크리프 비율, CR_{vs}는 체적-표면적비 효과, CR_{RH}는 상대습도 효과, CR_{sr}는 철근비 효과를 나타낸다. 각 계수들은 다음과 같이 계산된다.

$$CR_{la} = 2.3 (t_{la})^{-0.25} \tag{7}$$

$$CR_{vs} = \frac{0.044 (v/s) + 0.934}{0.10 (v/s) + 0.85} \tag{8}$$

$$CR_{RH} = 1.0 \quad (RH<40)$$
$$= 1.40 - 0.01 \times RH \quad (RH \geqq 40) \tag{9}$$

$$CR_{sr} = \frac{1 - exp\left[\frac{-\rho \times n_t \times C_u \times CR_{la} \times CR_{vs} \times E_{ct}}{1 + \rho \times n_t}\right]}{[(C_u \times CR_{la} \times CR_{vs}) \times E_s \times \rho]} \tag{10}$$

여기서, (v/s)는 체적-표면적비, RH는 상대습도, ρ는 철근비를 나타낸다.

2.2.2 건조수축 축소량

크리프 축소량과 마찬가지로 시간의 경과에 따라 지속적으로 발생하는 축소량인 건조수축 축소량의 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta_{SH} = \Sigma \epsilon_{shu} \times SH_t \times SH_{vs} \times SH_{RH} \times SH_{sr} \times H \tag{11}$$

여기서, ϵ_{shu}는 극한건조수축 변형, SH_{vs}는 체적-표면적비 효과, SH_{RH}는 상대습도 효과, SH_{sr}는 철근비 효과, SH_t는 시간에 대한 건조수축 비율, H는 층고를 나타낸다. 각 계수들은 다음과 같이 계산된다. 건조수축식은 ACI Committee 209모델[10]을 적용하였다.

$$SH_t = \frac{t_s}{35 + t_s} \tag{12}$$

$$SH_{vs} = \frac{0.037 (v/s) + 0.944}{0.177 (v/s) + 0.734} \tag{13}$$

$$SH_{RH} = 1.0 \quad (RH < 40)$$
$$= 1.40 - 0.01 \times RH \quad (40 \leqq RH < 80) \tag{14}$$
$$= 3.00 - 0.03 \times RH \quad (80 \leqq RH)$$

$$SH_{sr} = \frac{1 - exp\left[\frac{-\rho \times n_t \times C_u \times CR_{la} \times CR_{vs} \times E_{ct}}{(1 + \rho \times n_t)}\right]}{[(C_u \times CR_{la} \times CR_{vs}) \times E_s \times \rho]} \tag{15}$$

3. Monte Carlo simulation에 의한 기둥축소량 해석

3.1 Monte Carlo simulation

몬테카를로 시뮬레이션은 난수를 발생시켜 결정론적 방

법이 가지는 불확실성을 확률·통계적인 방법으로 계산하는 방법으로 기둥축소량을 계산하기 위해서 적용되는 식들에서 제시된 재료의 물성치에 대한 일정한 값을 변수로 치환한다. 그리고 각 값에 대한 기대값과 분산을 통해서 변수의 난수를 발생시키고 기둥축소량을 예측하게 된다. 따라서 기둥축소량에 대한 기본식을 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 평가를 위한 식으로 다음과 같이 바꾸어 준다.

$$\Delta_{EL}^{S} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}(\Delta_{EL}) \tag{16}$$

$$\Delta_{CR}^{S} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}(\Delta_{CR}) \tag{17}$$

$$\Delta_{SH}^{S} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}(\Delta_{SH}) \tag{18}$$

여기서, Δ_{EL}^{S}는 확률론적 탄성축소량, Δ_{CR}^{S}는 확률론적 크리프 축소량, Δ_{SH}^{S}는 확률론적 건조수축 축소량을 나타내며, m은 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 반복수를 나타낸다. 자세한 내용은 참고문헌 2)에 소개되어 있다.

3.2 확률매개변수 및 부재특성치

본 논문에서 사용하게 되는 확률매개변수로는 콘크리트의 재료물성치중 변동성이 큰 콘크리트강도, 크리프계수, 건조수축계수에 대한 요소를 선정하였다.

콘크리트 강도에 대한 규정은 ACI Committee 214[8]에서 규정하고 있는 콘크리트의 변동계수에 대한 값을 10%이하의 우수한 값을 채택하는 것으로 하여 변동계수를 0.1로 적용하였다.

또한 크리프계수와 건조수축계수에 대한 확률·통계적인 특성은 Bazant와 Baweja[9]에 의해 제시되어 있다. 이는 ACI 모델에 대한 변동계수를 정의하여 사용하였는데, 이때 크리프계수는 0.528, 건조수축계수는 0.553의 변동계수를 갖는다. 크리프와 건조수축 축소량은 탄성축소량과 달리 시간의존적이다. 따라서 크리프와 건조수축 요소를 확률변수로 두고 시간에 따른 축소량의 변화를 고려해야 한다. Table 1은 적용된 확률변수의 변동계수를 나타낸다. 해석에 적용된 C 초고층 건물의 조감도는 Fig. 1에 나타나 있으며, 이 건물은 지상 41층, 지하 1층의 초고층 내력벽식 콘크리트 건물이다[11]. 지하1층의 층고는 4.75 m이다.

Table 1 Coefficient of variation for Random parameters

	Concrete strength	Ultimate shrinkage	Specific creep
Coefficient of variation	0.1	0.553	0.528

Fig. 1 Tall building

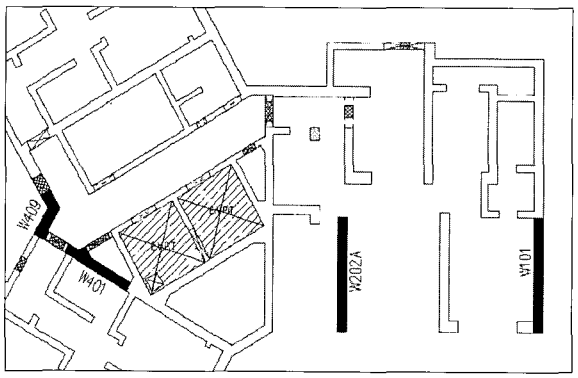

Fig. 2 Location of analysed walls

Fig. 2는 해석대상 부재를 나타내며 세대전단벽 W101, W202A인 두 부재와 내부코어 W401, W409 두개 부재를 대상으로 한다. 이 부재에 대하여 확률변수가 사용된 프로그램[2]을 이용하여 탄성, 크리프, 건조수축 축소량을 계산하였으며, 기존의 결정론적 방법의 축소량 결과와 비교·분석하였다.

사용된 재료의 특성은 Table 2에 나타나 있으며, 24층 이상의 경우에 적용된 재료의 물성치는 설계시 사용된 강도 및 PCA에서 제안하는 재료의 물성치를 사용하였으며, 23층 이하로는 재료의 실험에 의해서 나타난 값을 해석시 반영하였다. 그리고 해석시 적용된 상대습도는 66%이며, 시공공정은 지하1층에서 4층까지는 30일, 5층부터 옥상층까지는 7일의 공정으로 적용되었다.

Table 3에는 W401의 부재특성치인 단면적, 철근면적, 체적-표면적비, 작용하중 등을 나타내었다.

Table 2 Material properties

	Story	Concrete strength (MPa)	Ultimate shrinkage (10^{-6}mm/mm)	Specific creep (10^{-6}mm/mm/MPa)
Interior shear wall/ core wall	41F~32F	23.54	800	213.2
	31F~24F	26.48	800	188.5
	23F~14F	46.48	1180	168.2
	13F~B1F	46.48	876	138.5

Table 3 Member properties of W401 core wall

Story	Cross section of RC(cm^2)	Steel area (cm^2)	Volumn-to-surface(cm)	Applied loads(kN)
41F	34,307	124.9	19.1	297
33F-40F	34,307	124.9	19.1	293
27F-32F	34,307	245.3	19.1	293
22F-26F	34,307	345.8	19.1	293
PIT	34,307	345.8	19.1	318
21F	34,307	345.8	19.1	314
17F-20F	34,307	345.8	19.1	293
4F-16F	34,307	345.8	19.1	277
3F	34,307	345.8	19.1	463
B1F-2F	34,307	345.8	19.1	439

3.3 확률론적 기둥축소량 해석

재료의 물성치에 대한 확률·통계적 특성을 이용하여 기둥축소량을 계산하면 결정론적 방법에서 얻을 수 있는 특정값을 기대값(또는 평균값)으로 얻을 수 있는 동시에 통계적 특성을 같이 얻을 수 있으므로 이를 이용하여 각 신뢰수준에 따른 축소량의 변화값도 분석할 수 있다

이러한 확률론적 방법은 결정론적 방법의 불확실성을 고려함과 동시에 실제 구조물의 적용에 있어서도 예상치 못한 축소량의 변화를 고려할 수 있게 된다.

Figs. 3 ~ 6은 각각의 내부전단벽과 코어벽체의 시간에 따른 신뢰수준별 축소되는 값을 나타낸다. 각각의 내부전단벽과 코어벽체는 골조공사가 끝나기 이전인 505일 이전에는 축소량이 지속적으로 증가하고 있지만 505일 이후에는 그 값이 미소하게 증가하고 있다. 이는 골조공사가 끝나는 505일 이전까지는 점차적으로 하중이 증가하기 때문이며 골조공사가 끝나는 505일 이후에는 하중의 증가없이 비탄성변형인 장기변형과 시공하중으로 인하여 경사가 완만해짐을 알 수 있다.

Table 4는 B1층 신뢰구간별 축소량을 나타낸 것이다. 각각의 신뢰구간별 축소량과 비교해보면 신뢰구간(σ, 1.645σ,2σ)에 따라 W101의 경우 상한치가 3.057 mm, 3.560 mm, 3.835 mm, 하한치의 경우 1.501 mm, 1.000 mm, 0.723 mm로 결정론적 해석치인 2.296 mm와 차이가 점점 벌어진다. 이는 실제적으로 결정론적 해석치가 2.296 mm만 고려하지만 현장계측의 경우 재료의 불확성 및 여러 변수에 의해 다른값이 나올 수 있음을 알 수 있다.

W202A의 경우 가장 큰 축소량 값을 나타내며, 상한치가 4.076 mm, 4.743 mm, 5.110 mm, 하한치가 2.006 mm, 1.338 mm, 0.971 mm로 결정론적 해석치인 3.056 mm와 점점 차이가 나며, W409의 경우 상한치가 2.955 mm, 3.445 mm, 3.715 mm, 하한치의 경우 1.436 mm, 0.946 mm, 0.677 mm로 결정론적 해석치인 2.212 mm와 차이가 점점 벌어진다. 그리고 W401의 경우도 상한치가 3.383 mm, 3.935 mm, 4.239 mm, 하한치가 1.670 mm, 1.118 mm, 0.814 mm로 결정론적

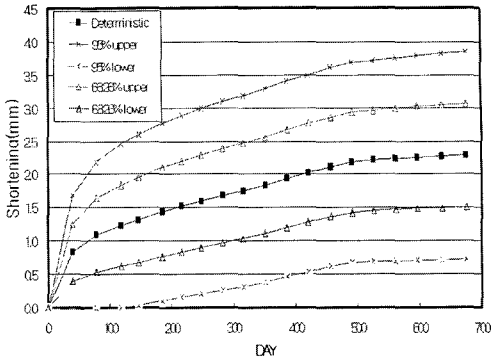

Fig. 3 Shortening of W101 at level B1 for two different confidence levels

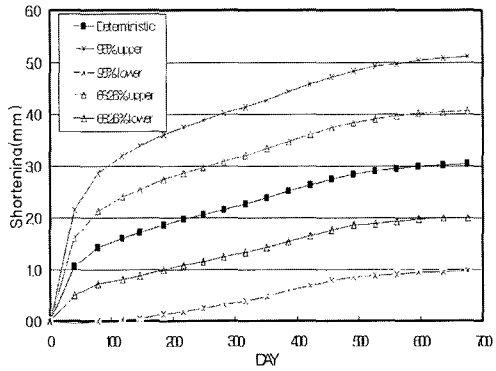

Fig. 4 Shortening of W202A at level B1 for two different confidence levels

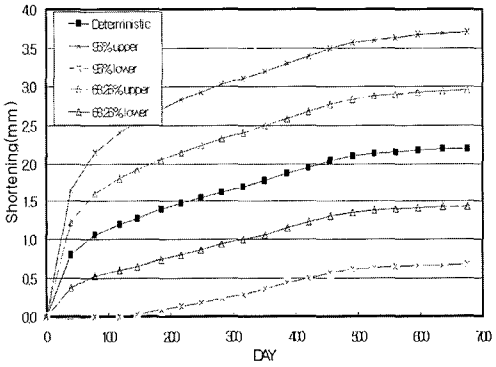

Fig. 5 Shortening of W409 at level B1 for two different confidence levels

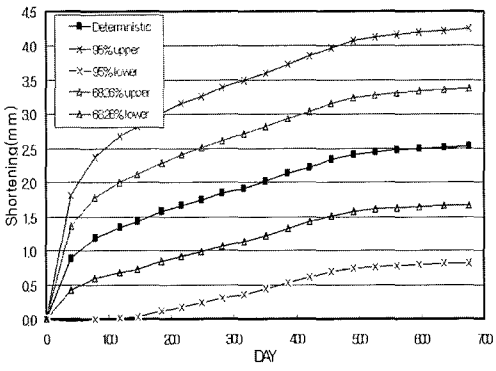

Fig. 6 Shortening of W401 at level B1 for two different confidence levels

Table 4 Shortening for confidence intervals of level B1(unit : mm)

Shortenings(B1) \ Confidence levels		$\mu-\sigma \leq X \leq \mu+\sigma$ (68.26 %)	$\mu-1.645\sigma \leq X \leq \mu+1.645\sigma$ (90 %)	$\mu-2\sigma \leq X \leq \mu+2\sigma$ (95.44 %)
W101	upper	3.057	3.560	3.835
	lower	1.501	1.000	0.723
	mean		2.279	
W202A	upper	4.076	4.743	5.110
	lower	2.006	1.338	0.971
	mean		3.041	
W409	upper	2.955	3.445	3.715
	lower	1.436	0.946	0.677
	mean		2.196	
W401	upper	3.383	3.935	4.239
	lower	1.670	1.118	0.814
	mean		2.527	
Shortening by deterministic analysis	W101		2.296	
	W202A		3.056	
	W409		2.212	
	W401		2.542	

해석치인 2.542 mm와 차이가 벌어진다.

이와 같이 재료의 불확실성을 고려하여 신뢰구간별 해석을 수행하면 실제 구조물의 적용에 있어서도 예상치 못한 축소량을 고려할 수가 있으며 기둥축소량의 변동성을 예측하여 설계 및 보정시에 고려할 수 있다.

4. 현장계측 결과와 비교검토

4.1 현장계측방법

C 초고층 철근콘크리트 건물의 현장계측에서는 진동현식 스트레인 게이지(vibrating wire strain gauge)가 설치되었다. 진동현식 스트레인게이지가 전기저항식에 비하여 수명이 길고 정밀도 면에서 현장에서 계측하여야 할 데이터의 정밀도 기대치에 대해 완벽히 소화할 수 있고 습기는 물론 온도변화에 영향이 적어 일반적으로 기둥축소량 현장계측에 적용된다. Fig. 7은 설치된 진동현식게이지를 나타낸다. 변형게이지에 사용되는 철선은 열팽창계수가 12.2 με/℃이며, 한편 콘크리트의 열팽창계수는 10.4 με/℃로 본다. 그러므로 온도변화를 고려한 최종변형율은 다음 식(19)에 의해 계산한다[11].

$$\mu\epsilon_{load} = (R_1 - R_o) + (T_1 - T_o) \times (CF_1 - CF_2) \quad (19)$$

여기서, T^0, T^1 = 초기 및 임의시간에서의 온도, CF^1, CF^2 = 철선 및 콘크리트의 열팽창계수, R^0, R^1 = 초기변형, 임의시간에서의 변형을 나타낸다.

현장계측에 사용된 계측기는 G사의 GK-403 VW read out이며, 이 계측기는 모든 날씨 환경에 대하여 계측할 수 있는 계측기로써 400 Hz 부터 6000 Hz, 5 volt square wave를 지원하며 진동형 와이어 센서를 계측할 수 있다.

Fig. 7 Vibratin wire strain gauge installed between rebars

이 건물 B1층의 내부전단벽과 코어벽체의 수직변형량 현장 실측은 2003년 3월 3일부터 시작하여 1주의 계측주기를 기준으로하여 수행되었으며[11], 본 연구에서는 2005년 1월 5일까지 673일에 대한 계측치를 적용하였다.

4.2 계측값과 비교 분석

Figs. 8 ~ 11에는 현장계측치와 결정론적 해석치를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 현장계측한 초기값이 급격한 증가를 보이는데 이와 같은 초기증가현상의 원인으로는 강도가 충분히 확보되지 않은 상태에서 하중이 가해졌기 때문이며, 또한 타설후 초기에 크리프 및 건조수축과 같은 비탄성축소가 많이 발생한 것으로 추정된다. 해석 결과에 의하면 특히 건조수축이 초기에 많이 발생하고 있다. 계측이 실시된 내부전단벽과 코어벽체의 경우 초기 급격한 증가를 보이다가 120일 이후에 축소량이 완만하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8의 W101 벽체의 경우 결정론적인 해석값과 현장계측치간에 51 %정도의 차이가 발생하고 있다. 673일까지의 축소량을 보면 결정론적 해석치가 2.296 mm이고 현장계측치가 1.118 mm로 비교적 큰 차이가 발생된다. 이는 콘크리트의 재료에 대한 변동성과 시공공기의 지연등에 의해서 발생된 여러 가지 문제로 인해서 현장계측치가 결정론적 해석치와 일치하지 못하고 있음을 나타낸다.

Fig. 9의 W202A 벽체의 경우에도 W101 벽체의 경우와 비슷하게 44 %정도의 현장계측치와 결정론적 해석치간의 차이를 보이고 있다. 676일까지의 현장계측에 대한 결정론적 해석치는 3.056 mm이고 현장계측치는 1.717 mm로 차이가 나타났다.

Fig. 10의 W409 벽체의 경우 결정론적 해석치는 2.212 mm이며 현장계측치는 1.675 mm로 오차가 24% 정도 나타났다. 다른 센서들과 비교하여 볼 때 해석치와 현장계측

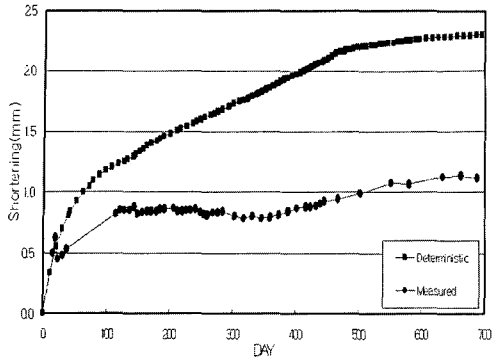

Fig. 8 Comparison of the mesaured and deterministic predicted shortening of W101 at level B1

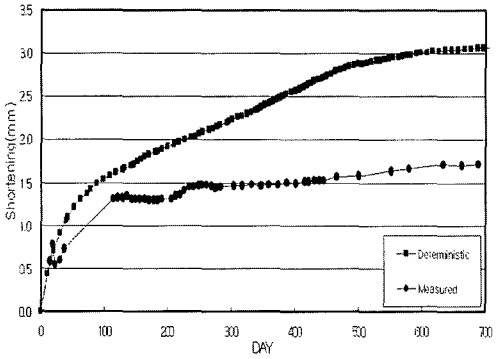

Fig. 9 Comparison of the mesaured and deterministic predicted shortening of W202A at level B1

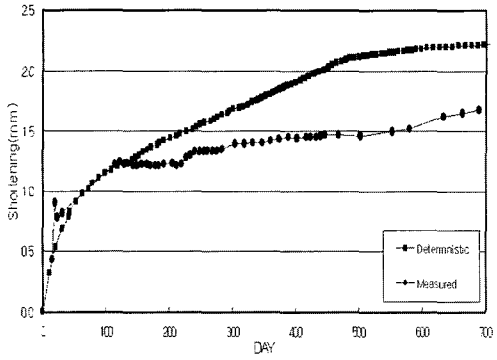

Fig. 10 Comparison of the mesaured and deterministic predicted shortening of W409 at level B1

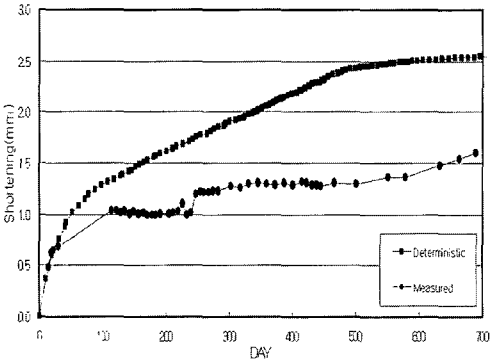

Fig. 11 Comparison of the mesaured and deterministic predicted shortening of W401 at level B1

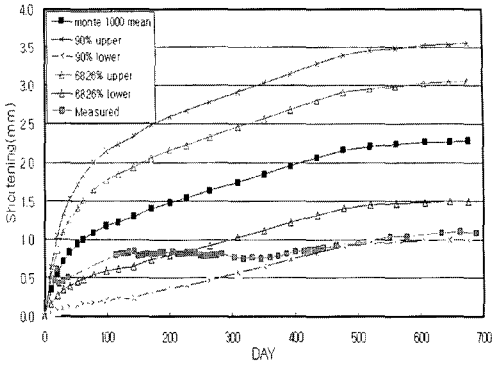

Fig. 12 Comparison of the mesaured and probabilistic predicted shortening of W101 at level B1

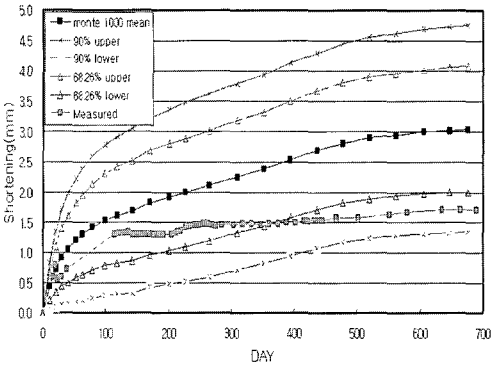

Fig. 13 Comparison of the mesaured and probabilistic predicted shortening of W202A at level B1

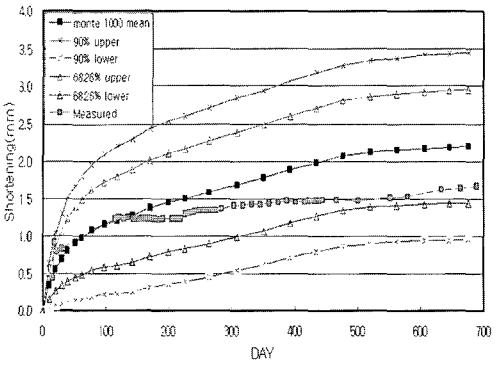

Fig. 14 Comparison of the mesaured and probabilistic predicted shortening of W409 at level B1

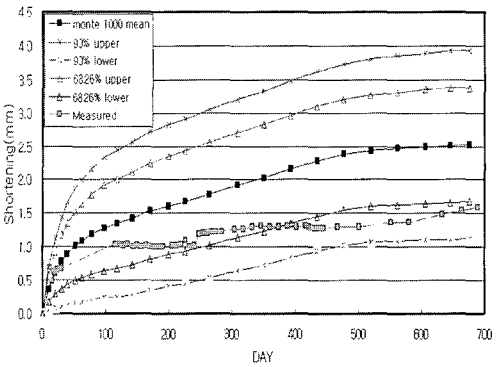

Fig. 15 Comparison of the mesaured and probabilistic predicted shortening of W401 at level B1

치가 가장 근사한 값을 보이고 있다.

Fig. 11의 W401 벽체의 경우 결정론적 해석치는 2.542 mm이며 현장계측치는 1.600 mm로 오차가 37% 정도 발생된다.

결정론적 해석치와 현장계측치를 분석한 결과, 내부전단벽에 해당하는 W101과 W202A의 차이가 비슷하게 나타났으며, 코어벽체에 해당하는 W409과 W401의 차이도 비슷한 축소량을 보이는 것으로 나타났다. 그래프에서 나타나듯이 결정론적인 값보다 현장계측치가 작게 나타나는데 이는 현장의 시공시점이 실제 기준으로 잡은 계획공정보다 늦어짐으로써 결정론적 축소량의 값보다 작게 발생된 것으로 평가된다. 그리고 본 논문의 내력벽식 구조물의 계측치와 해석치의 차이는 [참고문헌 12]의 결과인 최대 25%와 비교하여 큰 차이를 나타낸다. 내력벽식구조의 경우 강성골조시스템의 수직재인 기둥보다 벽체의 단면이 크며, 또한 인접벽체간의 스팬간격이 작기 때문에 인접벽체와의 강성의 영향이 기둥보다 벽식에서 크게 작용하므로 단위 벽체의 분담하중이 해석시 적용한 값과 차이가 나는 것으로 사료된다. 그래프에서 보이듯이 계측일자가 경과할수록 해석치와 계측치간의 차이가 크게 나고 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 2~3회 재해석을 통한 재보정을 실시하고 있다.

Figs. 12 ~ 15는 확률론적 해석치와 현장계측치를 비교하여 나타낸 그래프이다. W101 벽체의 경우 초기계측이후 250일까지는 신뢰수준 68.26% 하한치, 즉 신뢰구간 ($\mu-\sigma$) 사이의 값을 나타내고 있으며, 250일 이후에는 신뢰수준 90% 하한치 이내의 값으로 나타난다. W202A 벽체의 경우, 400일까지는 신뢰수준 68.26% 하한치의 값 이내에서 측정되었다가 400일 이후에는 신뢰수준 68.26% 하한치와 신뢰수준 90% 하한치 사이의 값으로 나타난다. 그리고 W409 벽체의 경우 150일까지는 평균값과 거의 일치하지만, 150일 이후에는 신뢰구간($\mu-\sigma$) 사이의 값을 나타내고 있다. W401 벽체의 경우 400일 이전에는 신뢰수준 68.26% 하한치의 값 이내에서 측정되다가 400일 이후에는 신뢰수준 90% 하한치의 이내의 값으로 나타난다.

초고층 내력벽식 구조물 예제에서 현장계측된 변형값은 해석에 의한 결과값보다 전체적으로 작으며, 확률론적으로 신뢰수준 90%이내의 값을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 41층 초고층 내력벽식 콘크리트 건물의 기둥축소량을 확률론적 해석에 기반을 둔 몬테카를로 시뮬레이션 기법에 의해 예측하였고, 실제 현장계측치와 확률론적 해석치를 비교 분석하였다. 각각의 신뢰구간별 기둥축소량과 현장계측치를 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 실제 시공된 초고층 콘크리트 건물에 대한 기둥축소량을 몬테카를로 기법을 이용하여 확률론적으로 예측할 수 있으며, 기둥축소량 예상값을 시간경과에 따른 신뢰구간별로 비교하여 나타낼 수 있다.
2) 현장계측치와 결정론적 해석치를 비교분석한 결과 전체적으로 오차가 나고 있으며, 오차의 비율은 24% ~ 51% 정도로 나타나고 있다. 이러한 현상은 저층부 보정시 과대 또는 과소의 부정확한 보정이 이루어질 수 있으며, 과소평가될 경우에는 안전성 측면에서 부가응력을 유발하여 구조물에 영향을 주는 것을 예상할 수 있다.
3) 신뢰구간별 축소량값과 현장계측치를 비교한 결과 본 연구에 적용한 건물의 경우 90% 신뢰수준 이내에서 발생하고 있다. 즉 신뢰구간 $\mu \pm 1.645\sigma$를 적용하여 발생가능한 최대 축소량을 예측할 수 있으며 이 경우 과대 또는 과소보정의 오류를 최대한 줄일 수 있을 것으로 사료된다.
4) 내력벽식 구조에서 발생되는 축소량은 강성골조구조에서 발생하는 축소량과는 달리 계측치가 해석치보다 작게 나오고 있다. 내력벽식구조의 경우 강성골조시스템의 수직재인 기둥보다 벽체의 단면이 크며, 또한 인접벽체간의 스팬간격이 작기 때문에 인접벽체와의 강성의 영향이 기둥보다 벽식에서 크게 작용하므로 단위 벽체의 분담하중이 해석시 적용한 값과 차이가 나는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 변형발생이 가장 큰 지하 1개 층에 대한 계측결과와 비교하였으며 향후 상부층의 계측자료와 비교하여 상부층과 하부층의 결과를 고찰하여야 한다.

참고문헌

1. 송화철, 유은종, 정석창, 주영규, 박칠림, "초고층 콘크리트 건물의 기둥축소량 효과", 대한건축학회 논문집, 13권 12호, 1997. 12, pp.289~297.
2. 조용수, 송화철,"초고층건물 기둥축소량의 확률론적 해석법", 대한건축학회 논문집, 19권 1호, 2002. 1, pp.53~60.
3. Fintel, M. and Khan, F. R., "Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structure - Prediction of Inelastic Column Shortening", *ACI Journal, Proceedings*, Vol.66, No.12, American Concrete Institute, Detroit, Mich., December 1969, pp.957~967.
4. Henry G. Russell and Steven C.larson., "Thirteen Year of Deformation in Water Tower Place", *ACI Structural Journal*, Vol.86, No.2, March-April 1989, pp.182~191.
5. 김원상, 조한욱, 오정근, 염경수, "고층 콘크리트 건물의 기둥축소량 계측연구", 콘크리트학회 논문집, 11권 3호, 1999. 6, pp.161~169.
6. 조석희, 김한수, 김도균, "초고층건물의 기둥축소량 예측 및 현장계측", 대한건축학회 학술발표논문집, 22권 2호 2002, pp.225~228.

7. 삼성중공업, TOWER PALACE II 수직부재 축소량 계측 및 분석 보고서, 2001. 7, pp.74~75.
8. ACI Committee 214, *Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete*, ACI 214-77, American Concrete Institute, Dettoit, 1977.
9. Bazant, Z. P. and Baweja, S., "Justification and Re-finement of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage 1. Statistics and Sensitivity", *Materials and Structures*, Vol.28, 1995, pp.415~430.
10. ACI Committee 209, *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*, ACI 209-R92, American Concrete Institute, Detroit, 1992.
11. 장윤성, "초고층 건물의 기둥축소량에 대한 현장계측 및 확률론적 예측", 한국해양대학교, 석사학위논문, 2004. 2, pp.22~36.
12. 대우건설기술연구소, TRUMP WORLD I 기둥축소량 최종보고서, 2002. 1, 27pp.

요 약

초고층건물에서 발생하는 부등축소량은 기둥과 코어를 연결하는 보와 슬래브에서의 부가응력을 유발하거나 파티션과 커튼월의 균열과 같은 문제 등을 유발하므로, 부등축소량의 영향을 최소화하기 위해 기둥축소량의 예측 및 보정이 정확히 이루어져야 하며, 구조안전성과 사용성의 관점에서 시간변화에 따른 초고층건물 기둥축소량의 정확한 예측이 필요하다. 기둥축소량에 영향을 주는 콘크리트의 재료물성치 중 콘크리트강도, 크리프계수, 건조수축계수 등의 변동성을 고려하여 확률론적 해석을 이용한 기둥축소량 예측을 하여야 한다. 본 논문에서는 41층 초고층 내력벽식 구조물을 예제로 하여 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 축소량을 구하고 축소량의 분포도를 조사하여 신뢰수준별 기둥축소량을 분석하였다. 초고층 내력벽식 구조물예제에서 현장계측된 변형값은 해석에 의한 결과값보다 전체적으로 작으며, 확률론적으로 신뢰구간 $\mu - 1.645\sigma$(신뢰수준 90.0% 하한치)이내의 값을 나타내었다.

핵심용어 : 기둥축소량, 확률론적 해석, 몬테카를로 기법, 현장계측, 내력벽식 구조물