

몬테카를로 기법을 이용한 CFT 기둥축소량의 예측

Column Shortening Prediction of Concrete Filled Tubes using Monte Carlo Method

장 승 우*
Jang, Sung-Woo

송 화 철**
Song, Hwa-Cheol

소 광 호***
Sho, Kwang-Ho

요 약

CFT 기둥의 장기거동에 관한 기존의 연구와 실험자료에 의하면 크리프 및 건조수축계수는 외부 강관의 구속효과에 의하여 철근콘크리트 기둥보다 작은 값을 가진다. 본 연구에서는 불확실성이 큰 콘크리트 강도와 특정크리프값과 작용하중을 매개변수로 하여 37층 건물의 CFT 기둥에 대한 확률론적 해석을 수행하였으며 매개변수의 특성을 분석하고 CFT 기둥의 축소량 해석값의 예측범위를 정량화하였다. 본 논문에서는 CFT 기둥축소량의 확률론적 해석을 위한 몬테카를로(Monte Carlo) 기법을 소개하며 다중매개변수를 동시에 적용하여 매개변수의 변동에 따른 축소량의 영향을 분석하고 신뢰지수별 변동폭을 산정하였다.

Abstract

According to the available study and experimental data about the long term behavior of CFT(Concrete Filled Tube) columns, the creep and shrinkage of concrete in CFT columns are smaller than those of RC columns because of the confinement effect of outer steel columns. In this study, the uncertainties associated with assumed values for concrete properties such as strength, creep coefficients, and service load have been considered and analyzed for the prediction of time-dependent column shortening of CFT column. The CFT column shortening analysis using Monte Carlo method is proposed and an example of a 37 story tall building with CFT columns is studied for illustration. According to the results obtained by the probability analysis with multi parameters, the effect of variation coefficient for 3 parameters is investigated considering confidence interval.

키워드 : 콘크리트충전강관 기둥, 크리프 · 건조수축계수, 기둥축소량, 확률론적 해석

Keywords : CFT column, Creep & shrinkage coefficient, Column shortening, Probability analysis

1. 서 론

기둥축소량 해석은 건물이 초고층화되면서 누적되는 수직부재의 축소로 발생하는 사용성 및 안전성의 문제점을 해결하기 위해 수행된다.¹⁾ 일반적으로 건물의 수직부재는

압축력을 받으며 탄성거동을 하지만 그 재료적 특성에 따라 콘크리트의 경우 탄성 이외의 비탄성거동도 무시할 수 없을 정도이므로 이러한 특성을 고려하여 수직부재의 축소량 해석을 수행하여야 한다.

콘크리트충전강관(Concrete Filled Tube, 이하 CFT) 기둥은 복합구조의 부재로서 강관 속에 콘크리트가 채워져 있어 콘크리트가 외기와 접촉하는 것을 차단하고 있다. 일반 철근콘크리트의 경우 콘크리트가 외기와 접하면서 건조현상에 의해 발생하는 비탄성거동이 상당히 큰 편인데

* 청림구조기술사사무소 대리, 공학석사

** 교신저자, 정회원 · 한국해양대학교 해양공간건축학부, 교수

Tel: 051-410-4582 Fax: 051-403-8841

E-mail : song@hhu.ac.kr

*** (주)대우건설 부장, 공학박사

CFT 기둥은 콘크리트와 외기와의 접촉이 단절되기 때문에 일반콘크리트에 비해 그 현상이 아주 작다. 강관 역시 비탄성거동이 작으므로 CFT 기둥은 일반콘크리트에 비해 비탄성거동이 비교적 작은 것을 예측할 수 있다.

CFT 기둥의 장기거동에 관한 연구는 P.J. Terrey²⁾, L.H. Ichinose³⁾, B. Uy⁴⁾, 권승희⁵⁾에 의해서 수행되었으며, 일반 콘크리트 시험체와 CFT 시험체를 실험하여 비교 분석하고 크리프 및 건조수축계수값을 제시하였다. 정석창⁶⁾은 CFT기둥을 사용한 초고층구조물의 기둥축소량 해석을 수행하였으며 감소된 특정크리프값과 극한건조수축값을 적용하였다. 조용수⁷⁾는 재료변동성을 고려한 확률론적 기둥축소량 해석법에 관한 연구를 수행하였다.

CFT 기둥의 경우 콘크리트재료 자체의 변동성 뿐만 아니라 외부강관의 구속효과에 의한 감소된 크리프 및 건조수축량의 변동성도 고려하여야 한다. 하지만 기존의 연구는 이와 같은 문제를 고려하지 않고 있다. 따라서 확률론적기법을 이용하여 재료특성이 CFT 기둥축소량에 미치는 영향을 분석하고 불확실성을 정량화하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 CFT 기둥의 장기거동 특성에 대한 기존 연구를 분석하여 재료특성치를 산출하고 기 시공된 37층 건물의 CFT 기둥을 대상으로 하여 기둥축소량 해석을 수행하였다. 콘크리트 강도와 특정크리프값과 작용하중을 매개변수로 하여 확률론적 해석을 수행하였으며 매개변수의 특성을 분석하고 CFT 기둥의 축소량 해석값의 예측 범위를 정량화하였다.

본 논문에서는 CFT 기둥축소량의 확률론적 해석을 위한 몬테카를로(Monte Carlo) 기법을 소개하며, 다중매개변수를 동시에 적용하여 매개변수의 변동에 따른 축소량의 영향을 분석하고 신뢰지수별 변동폭을 산정하였다.

2. CFT 기둥의 장기거동특성

CFT 기둥은 앞서 언급한 바와 같이 일반적인 콘크리트와 거동이 다르다. 탄성변형은 하중에 의해 발생하며 시간의존적인 성질이 없기 때문에 일반콘크리트와 CFT 기둥의 탄성거동은 동일하게 구할 수 있지만 비탄성변형

은 시간의존적인 성질이기 때문에 많은 차이점을 보이고 있다. CFT 기둥의 비탄성거동은 강관의 구속효과와 외기와의 차단으로 비탄성변형의 발생량이 작아지지만 내부 콘크리트에 의한 시간의존적인 성질은 그대로 작용을 하므로 일반콘크리트와 CFT 기둥을 동일한 사이즈의 시험체로 같은 조건에서 변형시켜 두 시험체를 비교함으로써 CFT 기둥의 비탄성거동을 산정할 수 있다.

표 1은 국외에서 수행된 CFT 기둥의 장기거동 특성에 대한 연구를 요약한 결과로서²⁾³⁾⁴⁾ 크리프계수의 경우 실험결과 CFT 기둥은 일반콘크리트에 비해 약 50~56.6% 정도의 값을 가지는 것으로 나타났으며 극한건조수축값의 경우는 Terrey와 Ichinose의 실험값에서 CFT 기둥이 일반콘크리트에 비해 약 9~11% 정도의 값을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 Uy의 실험에서는 그 값이 조금 크게 나타났다.

〈 표 1 〉 CFT 기둥의 시험체 실험값

연구자	시험체 재료특성	크리프계수 (ϕ)	극한건조수축
P.J. Terrey	fck=45.2MPa Ec=30,800MPa	콘크리트 $\phi^{\infty}=2.15\sim 2.3$	625×10 ⁻⁶ 정도에 근접함
		CFT $\phi^{\infty}=1.15\sim 1.25$	콘크리트의 약 11%정도 발생
L.H. Ichinose	fck=27.83MPa Ec=22,736MPa	콘크리트 $\phi^{\infty}=2.72\sim 2.84$	426×10 ⁻⁶ 정도에 근접함
		CFT $\phi^{\infty}=1.44\sim 1.61$	콘크리트의 약 9%정도 발생
B. Uy	fck=56MPa Ec=35,400MPa	콘크리트 $\phi^{\infty}=2.5$	700×10 ⁻⁶ 정도에 근접함
		CFT $\phi^{\infty}=1.25$	200×10 ⁻⁶ 정도에 근접함

CFT 기둥의 가압조건과 길이에 따른 장기거동에 대한 연구가 국내에서 권승희에 의해서 이루어졌다.⁵⁾ 가압조건은 일반콘크리트 시험체와 CFT 기둥의 강관과 콘크리트 전체면적 동시 가압, 강관과 콘크리트 단면의 3/4 가압, 강관과 콘크리트 단면의 1/2가압, 콘크리트만 가압 등의 조건으로 시험체를 구성하여 동시에 가압하여 비교하였다. 그 결과 콘크리트 시험체에 비하여 콘크리트만 가압한 경우의 크리프 축소가 약간 적에 나타났으며 강관과 콘크리트 단면의 전체, 3/4, 1/2을 가압한 경우는

크리프계수의 값이 비슷하며 일반콘크리트에 비하여 외국의 연구결과와 비슷하게 일반콘크리트 크리프계수보다 약 60% 정도 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 CFT 기둥의 길이를 다르게 하여 같은 조건에서 그 장기거동 특성을 비교한 결과 길이에 대한 장기거동의 영향은 없는 것으로 나타났다.

3. 확률론적 기둥축소량 해석

3.1 확률매개변수

본 논문에서 확률론적 해석에 사용하게 되는 매개변수는 콘크리트의 재료특성 중 콘크리트 강도, 크리프계수, 작용하중을 선정하였다.

콘크리트 강도에 대한 규정은 건축구조설계기준⁸⁾에 의하면 현장재료시험의 평균 소요배합강도는 표준편차를 이용한 식(1)과 식(2)의 값 중에서 큰 값보다 커야 한다.

$$f_{cr} = f_{ck} + 1.34s \quad (1)$$

$$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s \quad (2)$$

여기서 f_{cr} , f_{ck} , s 는 각각 평균소요배합강도, 소요배합강도, 표준편차를 나타낸다.

이를 기준으로 하여 ACI Committee 214⁹⁾에서 규정하고 있는 변동계수를 알아보면 10%이하를 우수, 10~15%를 양호, 15~20%를 보통으로 규정하고 있다.

일반콘크리트의 크리프계수에 대한 확률·통계적인 특성은 Bazant와 Baweja에 의해 제시되어있다.¹⁰⁾ 일반콘크리트의 기본크리프 58.1%, 건조크리프 46.85%의 변동계수를 가지는 것으로 연구되었으나 CFT 기둥의 경우 건조수축의 발생이 적은 특성 때문에 기본크리프만이 주로 발생하고, 단면적에 대한 철골의 비가 높은 CFT 기둥의 경우 크리프의 변동계수는 일반 콘크리트와 다를 것으로 예상된다. 그리고 현재 CFT 기둥의 크리프 변동량에 대한 연구가 확률·통계적인 특성을 얻을 수 있을 만큼 데이터 축적이 되어있지 않기 때문에 크리프의 변동계수를 10%, 30%, 50%로 변화시켜 적용한다.

하중은 기둥축소량에 많은 영향을 미치는 요인 중 하나이며 기둥축소량 해석에는 항상 지속적으로 작용하는

하중이 주가 되기 때문에 일반적으로 고정하중과 활하중만을 사용한다. 고정하중의 경우 자중이 큰 비중을 차지하고 변동성도 적다. 하지만 활하중의 경우 건물의 사용 용도에 따라 설계하중이 정해지는데 이는 변동성이 고정하중에 비해 큰 편이다.

기둥축소량 해석에는 설계하중이 아니라 실하중이 사용되어야 하는데 활하중의 실하중을 측정하는 것은 상당히 어렵다. CFT 기둥의 경우 콘크리트기둥과 비교하여 건조수축변형이 작으므로 상대적으로 탄성 및 크리프 축소량이 크게 발생할 것을 예측할 수 있으며 하중의 변동계수를 변화시켜 축소량의 영향을 조사하여야 한다. 따라서 기둥축소량 해석시 하중의 변동성을 고려하기 위하여 하중의 변동계수를 5%, 10%, 20%로 변화시켜 적용한다.

3.2 몬테카를로 기법에 의한 축소량 해석법

몬테카를로 추출법은 컴퓨터 등의 전산기를 이용한 모의실험을 통해 현실세계를 가상적으로 모사하는 방법으로 1940년대에 미국에서 핵무기에 대한 연구를 위해 개발되었다.¹¹⁾ 몬테카를로 추출법은 많은 수의 실험을 바탕으로 통계 자료를 얻어 그 자료로부터 역산하여 어떤 특정한 수치나 확률분포를 구하는 방법이다. 특성상 통계자료가 많을수록, 또 입력값의 분포가 고를수록 결과의 정밀성이 높아진다.

기둥축소량은 기둥에 작용하는 하중의 재하순간 응력의 크기에 비례하여 발생하는 탄성축소량과 시간이 경과함에 따라 재료특성에 의하여 추가적으로 발생하는 비탄성축소량인 크리프와 건조수축에 의한 축소량의 합으로 구할 수 있으며, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.⁷⁾

$$\Delta_{D.T} = \Delta_{el} + \Delta_{cr} + \Delta_{sh} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta_{el} &= \text{탄성 축소량} \\ \Delta_{cr} &= \text{크리프 축소량} \\ \Delta_{sh} &= \text{건조수축 축소량} \\ \Delta_{D.T} &= \text{결정론적 방법에 의한 축소량} \end{aligned}$$

위 식은 부재의 특정한 입력값을 산출하여 기둥축소량

계산식에 의해 각 축소량을 구하기 위한 결정론적 방법의 축소량 계산식으로 이는 재료의 물성치와 하중 등 확률·통계적인 고려를 하지 않은 채 계산된 값이다. 따라서 이를 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기둥축소량 해석법으로 변환하면 다음 식(4)와 같다.⁷⁾

$$\Delta_{ST} = \Delta_{el}^S + \Delta_{cr}^S + \Delta_{sh}^S \quad (4)$$

$$\Delta_{ST} = \Delta_{el}^S + \Delta_{cr}^S + \Delta_{sh}^S \quad : \text{확률론적 탄성 축소량}$$

$$\Delta_{el}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{el}) \quad : \text{확률론적 크리프 축소량}$$

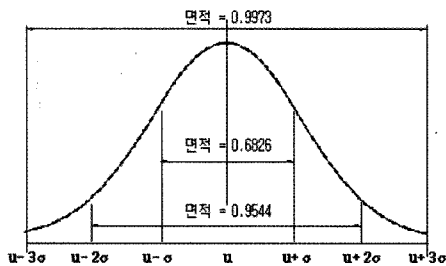
$$\Delta_{cr}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{cr}) \quad : \text{확률론적 건조수축 축소량}$$

$$\Delta_{S.T} = \text{확률론적 방법에 의한 축소량}$$

$$m = \text{몬테카를로 시뮬레이션에 의한 반복 횟수}$$

식(4)에서 각각의 탄성, 비탄성 축소량에서 지정된 변수는 시뮬레이션의 횟수에 따라 난수가 발생하게 되며, 이를 평균한 값이 확률론적으로 구한 축소량의 기대값이 된다.

이러한 기대값은 발생된 난수의 시뮬레이션을 통해서 평균과 표준편차의 값을 가지게 된다. 따라서 각각의 축소량에 대한 평균과 표준편차를 신뢰구간에 따라 상한값과 하한값으로 정리할 수 있다. 그림 1에서와 같이 각 신뢰구간별로 신뢰수준을 정리할 수 있으며, 이를 이용하여 결정론적 방법에 의한 축소량과 비교·분석한다. 그림에서 μ 는 평균값이며 σ 는 표준편차의 값이다.¹¹⁾

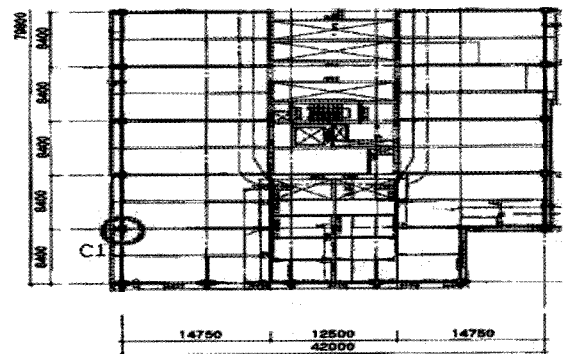


〈그림 1〉 신뢰수준에 따른 정규분포의 확률

4. CFT 기둥의 결정론적 기둥축소량 해석

4.1 예제건물 일반사항

본 논문에서는 국내에서 시공된 수원 S 연구소를 예제 건물로 선정하였다. 예제건물은 지하 5층, 지상 37층의 연구소 건물로 기준층 층고가 4.2m이며 특수실험실의 경우 층고가 14m에 달하며 전체 높이는 183.75m이다. 〈그림 2〉는 예제건물의 고층부 기준층 평면도이며 축소량 해석을 수행한 기둥의 위치가 표시되어 있다. 해석대상인 C1기둥은 지하 4층부터 최고층까지 뻗어 있으며 표 2에 나타나듯이 기둥의 단면은 850mm×850mm에서 600mm×600mm까지 변하며 각형강관의 두께는 35mm에서 15mm까지 변한다. 기둥 단면적에 대한 강관의 면적비는 21.97%에서 9.75%까지 다양하게 분포하고 있다.



〈그림 2〉 고층부 기준층 평면도

〈표 2〉 기둥단면 정보

이름	C1	
특징		
형태		
Steel	B4~B3 CFTB □-850×850×35×35(15.79%) B2~B1 CFTB □-750×750×35×35(17.80%) 1F~2F CFTB □-700×700×35×35(19.00%) 3F~6F CFTB □-650×650×35×35(20.37%) 7F~9F CFTB □-600×600×35×35(21.97%) 10F~12F CFTB □-600×600×30×30(19.00%) 13F~15F CFTB □-600×600×25×25(15.97%) 16F~18F CFTB □-600×600×20×20(12.89%) 19F~ROOF CFTB □-600×600×15×15(9.75%)	
Concrete	전 층에 49.04MPa 강도를 사용	

결정론적 기둥축소량 해석을 위해서는 PCA(Portland Cement Association)에서 제안하는 기둥축소량 알고리즘¹²⁾을 적용한 참고문헌¹⁾의 CSA(Column Shortening

Analysis) 프로그램을 사용하였다.

〈표 3〉은 예제건물의 CFT 기둥의 축소량 계산에 사용하게 될 입력값인 재료특성을 나타낸다.

〈 표 3 〉 대상 부재의 재료특성

종류 항목	콘크리트 강도	특정 크리프값	극한건조 수축값
입력값	49.04 MPa	3.377×10 ⁷	65.0×10 ⁶

콘크리트 압축강도는 설계기준강도인 49.04MPa를 사용하였다. CFT기둥의 특정크리프값은 강관 내부에 채워지는 콘크리트의 특정크리프값을 근거로 추정할 수 있다. 먼저 콘크리트의 특정크리프값은 PCA에서 제시하는 일반콘크리트의 특정크리프값인 $0.003/f_c \sim 0.005/f_c$ 를 사용하였으며¹²⁾, 여기서 f_c 는 콘크리트 압축강도이며 단위는 psi이다. 그리고 PCA에서 제시하는 값의 평균값 $0.004/f_c$ 를 사용하여 예제건물의 콘크리트 강도를 기준으로 계산된 콘크리트의 특정크리프값은 5.628×10^7 이다. CFT 기둥의 특정크리프값은 내부충전 콘크리트의 특정크리프값의 60%를 적용하여 해석모델의 최종 CFT 기둥의 특정크리프값은 3.337×10^7 으로 계산된다.

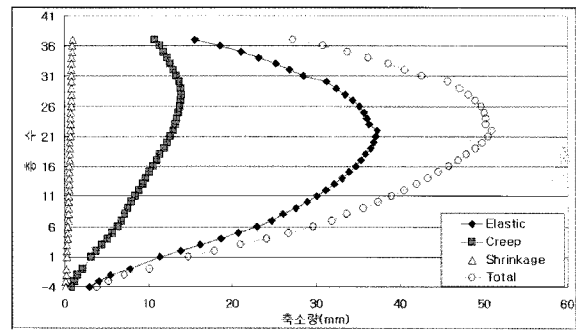
극한건조수축값도 PCA에서 제시하는 일반콘크리트의 극한건조수축값인 $500 \times 10^6 \sim 800 \times 10^6$ 사이의 값을 사용하며, 본 논문에서는 PCA에서 제시하는 값의 평균값인 650×10^6 을 사용하였다. CFT 기둥의 극한건조수축값 역시 특정크리프값처럼 일반콘크리트의 극한건조수축값을 기준으로 CFT 기둥의 극한건조수축값을 계산하였다. 선행연구에서 CFT 기둥의 건조수축은 거의 없거나 무시해도 될 정도라고 실험결과를 제시하였지만, 건조수축이 완전히 발생하지 않는다고는 볼 수 없으므로 일반콘크리트에서 발생하는 값의 10%를 적용하여 CFT 기둥의 극한건조수축값을 65×10^6 로 하여 해석을 수행하고자 한다.

4.2 슬래브타설 이후 축소량

슬래브타설 이후(Subsequent to slab installation)의 축소량은 해당층의 슬래브가 타설된 이후에 해당층의 수직부재에 발생하는 축소량으로써 보와 슬래브에 부가용

력을 발생하거나 파티션이나 조적벽 등 비구조체에 균열을 발생시키는 주요원인이 될 수 있기 때문에 슬래브타설 이후의 축소량을 정확히 추정하여 보정하여야 한다.¹²⁾

〈그림 3〉은 CFT 기둥 축소량을 해석한 후의 결과값 중 슬래브타설 이후의 각 축소량을 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타나 있듯이 탄성 축소량의 경우는 22층에서 37.31mm, 크리프의 경우는 28층에서 13.92mm, 건조수축의 경우는 37층에서 1.01mm의 최대값을 나타내고 있다. 각 축소량의 합인 슬래브타설 이후 전체 축소량은 22층에서 50.98mm의 최대값이 나타난다.



〈그림 3〉 슬래브타설 이후 축소량

〈표 4〉는 슬래브타설 이후 축소량이 가장 크게 나타나는 22층의 각 축소량의 값과 비율을 나타낸 결과이다. 예제 건물 CFT 기둥의 축소량 해석결과 탄성 축소량이 전체 축소량의 73%를 차지하고 크리프가 25%, 건조수축의 경우는 2%로 나타났다. 이 결과 CFT 기둥의 슬래브타설 이후 축소량은 탄성변형에 많은 영향을 받고 그 다음으로 크리프의 영향을 받고 건조수축의 경우는 영향이 아주 작은 것을 알 수 있다.

〈 표 4 〉 대상 부재의 재료특성

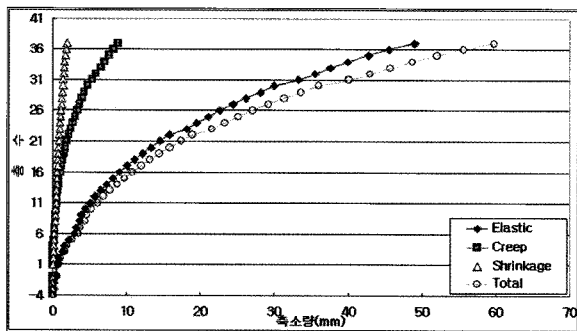
종류 결과	탄성 축소량	크리프 축소량	건조수축 축소량	Total
축소량 (mm)	37.31	12.98	0.69	50.98
비율(%)	73%	25%	2%	100%

4.3 전체 축소량

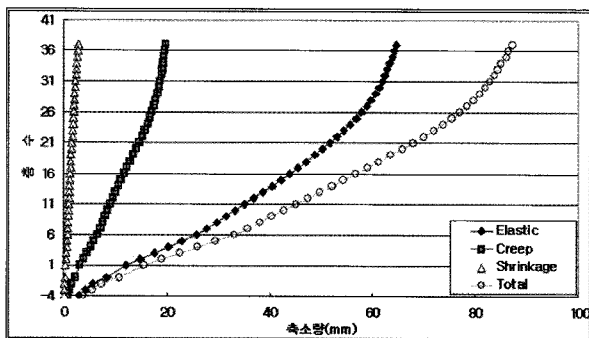
전체 축소량은 기둥축소량의 비교·분석시 중요한 기준이 되며 〈그림 4〉의 슬래브타설 이전 축소량과 타설이

후 축소량을 합하면 <그림 5>의 전체 축소량 그래프를 구할 수 있다.

표 5는 최고층의 전체 축소량에서 각 축소량의 값과 비율을 나타낸 결과이다. 예제 건물 CFT 기둥의 축소량 해석결과 탄성 축소량이 전체 축소량의 74%를 차지하고 크리프가 23%, 건조수축의 경우는 3%로 나타났다. CFT 기둥의 전체 축소량 역시 슬래브타설 이후 축소량처럼 탄성변형에 많은 영향을 받고 그 다음으로 크리프의 영향을 받고 건조수축의 경우는 영향이 아주 작은 것으로 나타났다.



<그림 4> 슬래브타설 이전 축소량



<그림 5> 전체 축소량

< 표 5 > 최고층 전체 축소량

종류	탄성 축소량	크리프 축소량	건조수축 축소량	Total
축소량 (mm)	64.55	19.67	2.90	87.12
비율(%)	74%	23%	3%	100%

일반적으로 철근콘크리트 기둥의 축소량은 건조수축 변형이 전체 축소량의 30~40% 정도 발생하는 것에 비

하여 CFT 기둥의 축소량은 위의 결과에서 나타나듯이 건조수축량이 현저하게 작게 발생한다. 따라서 다음 장의 확률론적 해석시 건조수축계수는 매개변수로 적용하지 않아도 전체 축소량에 미치는 영향은 작을 것으로 사료된다.

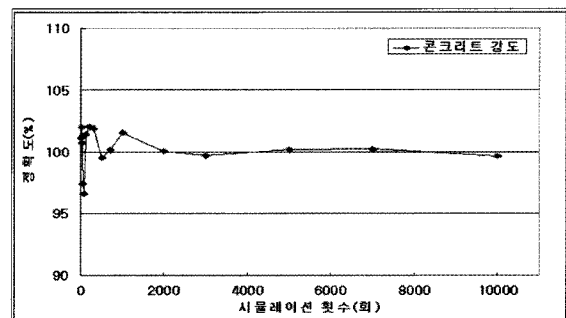
5. CFT 기둥의 확률론적 축소량 해석

CFT 기둥의 경우 영향이 작은 건조수축계수를 제외한 콘크리트 강도, 특정크리프값, 하중의 3가지 매개변수를 정하여 각 매개변수의 변동계수를 변화시키면서 몬테카를로 기법을 사용하여 예제 건물의 CFT 기둥 축소량을 해석하였다. 확률론적 해석을 위해서는 참고문헌⁷⁾의 MCCSA(Monte Carlo Column Shortening Analysis) 프로그램을 사용하였으며, 본 연구에서는 하중매개변수를 추가하였다.

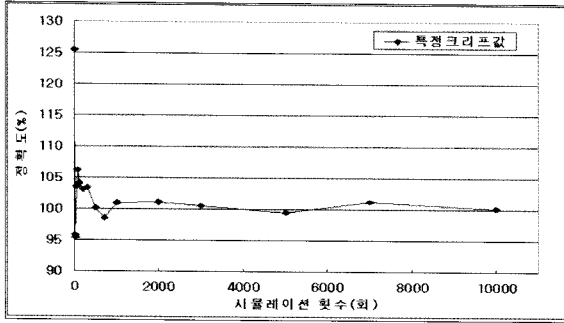
5.1 몬테카를로 시뮬레이션의 정확성

몬테카를로 시뮬레이션에 의한 해석의 정확성을 검증하기 위해서 변동성을 고려한 입력값과 결정론적 방법에 사용된 입력값을 비교한다. <그림 6~8>은 콘크리트 강도의 변동계수 20%, 특정크리프값의 변동계수 50%, 하중의 변동계수 20%를 적용한 입력값을 시뮬레이션 반복 횟수에 따라 각 매개변수 입력값의 평균과 결정론적 입력값의 일치율을 나타낸 것이다.

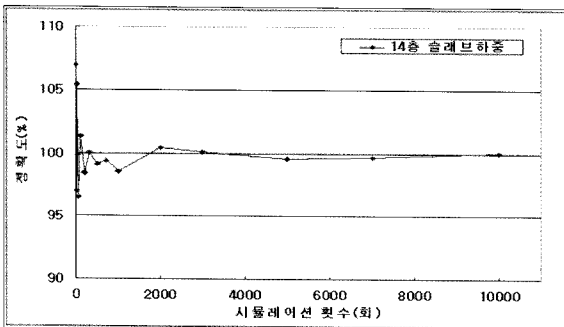
그래프를 보면 시뮬레이션 반복 횟수가 2000회를 넘어서면 오차율이 0.5%미만으로 결정론적 입력값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션 반복



<그림 6> 시뮬레이션 횟수에 따른 콘크리트 강도의 정확도



〈그림 7〉 시뮬레이션 횟수에 따른 특정크리프값의 정확도



〈그림 8〉 시뮬레이션 횟수에 따른 하중의 정확도

횟수의 오차를 배제하기 위해서 반복 횟수를 10000회로 실시하여 확률론적 해석을 수행하였다.

5.2 각 매개변수에 대한 확률론적 해석결과

각 매개변수에 대한 CFT 기둥의 축소량의 영향을 알아보기 위하여 몬테카를로 기법을 이용하여 입력값을 고정시킨 상태에서 각 매개변수를 독립적으로 변동계수를 일정하게 변화시키면서 도출된 결과값의 데이터를 분석한 결과는 〈표 6~8〉과 같다.

〈표 6〉은 콘크리트 강도의 변동에 따른 축소량의 변동계수를 보여준다. 축소량의 변동계수는 확률론적 해석 결과가 이루는 정규분포 형태의 축소량 분산표의 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 축소량의 변동성을 의미하는 것이다. 품질관리에 따른 콘크리트 강도의 변동계수는 10%, 15%, 20%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수는 0.13%에서 0.31%로 나타났으며, 최고층 전체 축소량의 변동계수는 0.13%에서 0.27%로 나타났다.

〈 표 6 〉 콘크리트 강도의 변동에 따른 축소량 변동계수

콘크리트 강도의 변동계수		평균값	10%	15%	20%
축소량 변동계수	22층 슬래브타설 이후 축소량	51.03mm	0.13%	0.23%	0.31%
	최고층 전체 축소량	87.22mm	0.13%	0.20%	0.27%

〈표 7〉은 크리프의 변동계수가 10%, 30%, 50%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 평균값은 50.75mm이며 변동계수는 0.28%에서 1.44%로 나타났다. 최고층 전체 축소량의 평균값은 86.77mm이며 변동계수는 0.21%에서 1.07%로 나타났다.

〈 표 7 〉 특정크리프값의 변동에 따른 축소량 변동계수

특정크리프값의 변동계수		평균값	10%	30%	50%
축소량 변동계수	22층 슬래브타설 이후 축소량	50.75mm	0.28%	0.84%	1.44%
	최고층 전체 축소량	86.77mm	0.21%	0.62%	1.07%

〈표 8〉은 하중의 변동계수가 5%, 10%, 20%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 평균값은 50.98mm이며 변동계수는 0.67%에서 2.68%까지 변하는 것으로 나타났다.

최고층 전체 축소량의 평균값은 87.13mm이며 변동계수는 0.57%에서 2.30%까지 변하는 것으로 나타났다. 이 값들은 앞서 해석한 콘크리트 강도나 특정크리프값에 비해서는 큰 값으로 CFT 기둥의 축소량은 매개변수 중 하중의 변동에 대한 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

〈 표 8 〉 하중의 변동에 따른 축소량 변동계수

하중의 변동계수		평균값	5%	10%	20%
축소량 변동계수	22층 슬래브타설 이후 축소량	50.98mm	0.67%	1.34%	2.68%
	최고층 전체 축소량	87.13mm	0.57%	1.15%	2.30%

5.3 다중매개변수 변동에 따른 축소량의 변동성

확률해석을 위해 매개변수로 선정한 입력값들이 개별적으로 일정한 변동성을 보이는 것이 아니라 복합적으로 변화한다. 따라서 축소량의 변동성을 정량적으로 예측하기 위해서는 그러한 변동성을 최대한 고려하여 확률론적 해석을 수행하여야 하며 다중매개변수를 적용하여 축소량의 변동에 대한 영향을 비교해 볼 필요가 있다.

〈표 9〉는 다중매개변수를 적용하여 CFT 기둥 축소량 해석을 수행한 결과이며, 표에 보이는 매개변수의 변동계수에서 fck는 콘크리트 강도, C는 특정크리프값, L은 하중을 표시하는 것이다. 모든 매개변수의 변동계수 조건에서 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수가 전체 축소량의 변동계수에 비해 약 15%~30%정도 크게 나타났다. 이는 매개변수의 변동성이 전체 축소량에 미치는 영향 보다는 부등축소량을 유발하는 슬래브타설 이후 축소량에 더 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

매개변수에 적용된 변동계수에 따른 전체 축소량의 변동계수를 비교해 보면 콘크리트 강도의 경우 변동계수가 10%에서 20%로 증가하여도 축소량의 변동계수는 아주 작은 증가를 보이고 콘크리트 강도 외의 매개변수인 특정크리프값이나 하중의 변동계수가 큰 경우 오히려 축소량의 변동계수가 감소하는 모습을 보이는데 이는 콘크리

〈 표 9 〉 다중매개변수의 변동에 대한 축소량의 변동계수

매개변수의 변동계수	22층 슬래브타설 이후 축소량	최고층 전체 축소량
fck 10%, C 10%, L 5%	0.734%	0.623%
fck 10%, C 50%, L 5%	1.597%	1.227%
fck 20%, C 10%, L 5%	0.773%	0.664%
fck 20%, C 50%, L 5%	1.595%	1.236%
fck 10%, C 10%, L 20%	2.710%	2.317%
fck 10%, C 50%, L 20%	3.046%	2.534%
fck 20%, C 10%, L 20%	2.698%	2.311%
fck 20%, C 50%, L 20%	3.020%	2.522%

트 강도의 변동에 대한 축소량의 영향이 아주 작기 때문인 것으로 판단된다.

특정크리프값의 경우 변동계수가 10%에서 50%로 증가하는 동안 전체 축소량의 변동계수는 최대 0.604%에서 최소 0.217%까지 변하는 것으로 나타났다.

하중의 경우 변동계수가 5%에서 20%로 증가하면 전체 축소량의 변동계수는 최대 1.694%에서 최소 1.286%까지 변하는 것으로 다른 매개변수에 비해 그 변화폭이 크며, 이는 CFT 기둥 축소량의 경우 하중의 변동에 가장 민감하게 반응을 보인다는 것을 나타내는 것이다.

〈표 10〉과 〈표 11〉은 매개변수의 변동성을 최소로 적용하였을 경우와 최대로 적용한 경우의 확률론적 방법에 의해서 구한 자료를 신뢰구간별로 예상되는 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량의 상한치와 하한치로 나타낸 것으로 결정론적 방법에 의한 결과값과 비교할 수 있다.

〈표 10〉은 다중매개변수의 변동계수가 본 논문에서 가정한 경우 중 가장 작은 값을 가질 때의 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량의 신뢰수준별 상·하한값을 나타낸 것이다. 각 축소량의 평균값은 결정론적 방법의 결과와 거의 일치하며 슬래브타설 이후 축소량은 신뢰지수 95.44%에서 평균값을 기준으로 최대 ±0.75mm의 변동을 보인다. 전체 축소량의 경우 신뢰지수 95.44%에서 평균값을 기준으로 ±1.09mm의 변동성을 예상할 수 있다.

〈 표 10 〉 신뢰구간별 축소량 (fck 10%, C10%, L5% 일 경우)

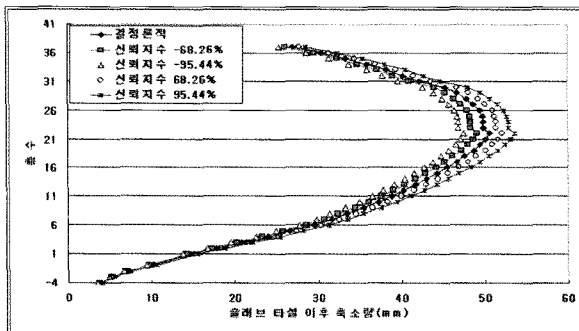
		$\mu - \sigma$ $\leq X \leq$ $\mu + \sigma$ (68.26%)	$\mu - 1.645\sigma$ $\leq X \leq$ $\mu + 1.645\sigma$ (90%)	$\mu - 2\sigma$ $\leq X \leq$ $\mu + 2\sigma$ (95.44%)
22층 슬래브타 설 이후 축소량	upper	51.35mm	51.59mm	51.73mm
	lower	50.60mm	50.36mm	50.23mm
	mean	50.98mm		
최고층 전체 축소량	upper	87.66mm	88.01mm	88.21mm
	lower	86.58mm	86.23mm	86.04mm
	mean	87.12mm		
결정론적	Sub to	50.98mm		
	Total	87.12mm		

〈표 11〉은 다중매개변수의 변동계수가 가장 큰 값을 가질 때의 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량의 신뢰수준별 상·하한값을 나타낸 것이다. 슬래브타설 이후 축소량은 신뢰지수 95.44%에서 평균값을 기준으로 최대 ±3.05mm의 변동을 보이며, 전체 축소량의 경우 신뢰지수 95.44%에서 평균값을 기준으로 ±4.37mm의 변동성을 예상할 수 있다.

상·하한값의 차이는 전체 축소량의 약 10% 정도이며 부등축소량의 원인이 되는 슬래브타설 이후 축소량의 경우는 전체의 약 12% 정도로 실제 CFT 기둥 축소량 해석 시 하중의 변동에 대하여 가장 많은 고려를 해야 하고 특정크리프값, 콘크리트 강도의 순으로 고려해야 할 것으로 사료된다.

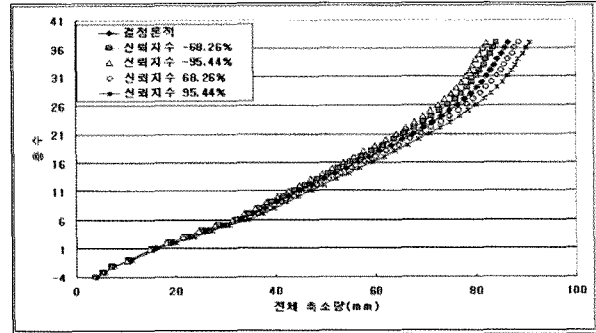
〈 표 11 〉 신뢰구간별 축소량 (fck 20%, C50%, L20% 일 경우)

		$\mu - \sigma$ $\leq X \leq$ $\mu + \sigma$ (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%)
22층 슬래브타 설 이후 축소량	upper	52.09mm	53.07mm	53.61mm
	lower	49.03mm	48.50mm	47.51mm
	mean	50.56mm		
최고층 전체 축소량	upper	88.71mm	90.11mm	90.89mm
	lower	84.34mm	82.93mm	82.16mm
	mean	86.52mm		
결정론적	Sub to	50.98mm		
	Total	87.12mm		



〈그림 9〉 콘크리트 강도 20%, 특정크리프값 50%, 하중 20%의 변동성에 따른 신뢰지수별 슬래브타설 이후 축소량

〈그림 9〉와 〈그림 10〉은 확률론적 해석에 사용된 매개변수의 변동계수가 콘크리트 강도의 변동계수 20%, 특정크리프값의 변동계수 50%, 하중의 변동계수 20%로 가장 크게 적용하여 해석한 결과로 각 층의 신뢰지수별 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량의 상·하한값을 그래프로 나타낸 것이다.



〈그림 10〉 크리트 강도 20%, 특정크리프값 50%, 하중 20%의 변동성에 따른 신뢰지수별 전체 축소량

6. 결 론

본 논문에서는 CFT 기둥의 장기거동특성을 고려하여 기 시공된 37층 예제건물의 CFT 기둥 축소량 해석을 수행하여 그 특성을 분석하였다. 해석값과 실제 기둥에 발생하는 축소량과의 차이를 야기할 수 있는 콘크리트 강도, 특정크리프값, 하중에 대한 변동성을 고려하여 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 해석을 수행하였으며 신뢰지수별 기둥축소량을 비교한 결과는 다음과 같다.

(1) CFT 장기특성 중 특정크리프값은 일반콘크리트의 60%, 극한건조수축값은 10%로 적용하여 37층 예제건물의 CFT 기둥축소량을 해석한 결과값을 분석하면 최고층의 전체 축소량에서 탄성 축소량은 약 74%, 크리프 축소량은 23%, 건조수축 축소량은 3%로 탄성거동은 CFT 기둥의 축소량에 많은 영향을 미치지만 건조수축에 대한 영향은 아주 작은 것을 알 수 있다.

(2) 다중매개변수의 변동성을 고려하여 확률론적 해석을 수행한 결과 기둥 축소량에 미치는 영향은 하중의 변

동성에 따라 많은 영향을 받으며 하중의 변동성이 클 경우 다른 매개변수에 대한 축소량의 영향은 줄어든다.

(3) 축소량에 영향이 가장 큰 하중의 변동계수가 20% 일 경우 신뢰지수 95.44%에서 22층 슬래브타설 이후 축소량은 최소 48.24mm에서 최대53.75mm까지 변동을 보이며 최고층의 전체 축소량은 최소 83.13mm에서 최대 91.15mm까지 변동을 하는 것으로 나타났다. 따라서 구조해석이나 축소량 보정시 하중의 변동에 대한 해석값의 변동폭을 고려하여 한다.

향후 더 많은 CFT 기둥의 축소량에 대한 해석과 실제 CFT 기둥의 축소량 계측값을 비교하는 연구가 필요하다. 그리고 CFT 기둥의 비탄성 특성에 대한 실험이 수행되어 통계적인 데이터를 축적하여 매개변수의 통계적인 변동값을 통한 확률론적 해석을 수행하여야 한다.

-참고문헌-

1. 송화철, 유은중, 정석창, 주영규, 박칠림, 초고층 콘크리트 건물의 기둥축소량 효과, 대한건축학회 논문집, 제 13권, 12호, pp.289~297, 1997.
2. Terrey, P.J., Bradford, M.A. & Gilbert, R.I., Creep and shrinkage in concrete-filled steel tubes, Tubular Structures VI, Proc. 6th Int. Symp. on Tubular Structures, pp.293~298, 1994.
3. Ichinose, L.H., Watanabe, E. & Nakai, H., An experimental study on creep of concrete filled steel pipes, Journal of constructional Steel Research, Vol. 57, pp.453~466, 2001.
4. Uy, B., Static Long-Term Effects in Short Concrete-Filled Steel Box Columns under Sustained Loading, ACI Structural Journal, Vol. 98, pp.96~104, 2001.
5. 권승희, 김진근, CFT 기둥의 장기거동 특성에 관한 연구, 초대형 고층건물 : 건축세계, 구조, 설비

및 시공 기술개발, pp. 77~88, 2001.

6. 정석창, 유은중, 주영규, 최항, 박칠림, 콘크리트 충전 강관기둥을 사용한 초고층 구조물의 기둥축소량 해석, 대한건축학회논문집, 제 14권, 11호, pp.47~54, 1998.
7. 조용수, 송화철, 초고층 건물 기둥축소량의 확률론적 해석법, 대한건축학회논문집, 제 18권, 1호, pp.53~60, 2002.
8. 대한건축학회. 건축구조설계기준 2005, 기문당, 서울, 2005.
9. ACI Committee 214, Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete, ACI 214-77, American Concrete Institute, Detroit, 1977.
10. Bazant, Z.P. and Baweja, S., Justification and Refinement of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage - 1. Statistics and Sensitivity, Materials and Structures, Vol. 28, pp.415~430, 1995.
11. 양영순, 서용석, 이재욱, 구조신뢰성공학, 서울대학교출판부, 서울, 1999.
12. Fintel, M., Ghosh, S. K. and Iyengar, H., Column Shortening in Tall Structures - Prediction and Compensation, Portland Cement Association, 1987.

▶ 접수일자 : 2009년 10월 29일

▶ 심사 완료일자 : 2009년 11월 11일

▶ 게재 확정일자 : 2009년 12월 11일