



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

초고층 콘크리트 건물 기둥축소량 예측을 위한 매개변수 및 적용모델의 영향

Influence of Parameters and Models on Column Shortening
Prediction for Tall Concrete Buildings

지도교수 박 수 용



2009년 2월

한국해양대학교 대학원

해양건축공학과

김 하 현

本 論文을 金夏鉉의 工學碩士 學位論文으로
認准함.

委員長 工學博士 朴 同 天 (印)

委 員 工學博士 朴 秀 鎔 (印)

委 員 工學博士 都 根 永 (印)

2009年 2月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

목 차	i
표 목 차	iii
그림목차	iv
Abstract	viii
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구범위 및 방법	4
2. 기둥축소량 해석을 위한 적용모델 및 매개변수 비교 분석	7
2.1 탄성축소량	7
2.2 크리프 축소량	8
2.2.1 ACI, PCA 모델식	9
2.2.2 CEB-FIP 모델식	10
2.2.3 B3 모델식	11
2.3 건조수축 축소량	13
2.3.1 ACI, PCA 모델식	13
2.3.2 CEB-FIP 모델식	15
2.3.3 B3 모델식	15
2.4 매개변수 비교 분석	16

3. 확률론적 기동축소량 해석법	24
3.1 몬테카를로 기법에 의한 확률론적 기동축소량 해석법	24
3.2 확률론적 기동축소량 프로그램 구성	25
4. 초고층 콘크리트 건물 적용결과	27
4.1 예제건물 일반사항	27
4.1.1 기동축소량 해석위치	27
4.1.2 콘크리트 재료특성	28
4.2 결정론적 기동축소량 해석	28
4.2.1 ACI 모델에 의한 결정론적 기동축소량 해석 결과	28
4.2.2 PCA 모델에 의한 결정론적 기동축소량 해석 결과	31
4.2.3 결정론적 기동축소량 해석 결과 비교	34
4.3 확률론적 기동축소량 해석	35
4.3.1 슬래브 타설이후 축소량 확률론적 해석 결과	35
4.3.2 전체축소량 확률론적 해석 결과	45
4.3.3 신뢰구간별 축소량	54
4.4 결정론적 방법과 확률론적 방법의 비교 분석	59
4.4.1 슬래브 타설이후 축소량 비교	59
4.4.2 전체축소량의 비교	60
4.4.3 부등축소량의 비교	61
4.5 장기계측 결과와 비교 분석	62
5. 결론	68
참고문헌	70

표 목차

표 2.1 모델별 매개변수 식 비교	17
표 2.2 ACI, PCA, CEB-FIP 모델의 시간에 대한 크리프 비율 비교	18
표 2.3 ACI 모델과 PCA 모델의 하중작용시점의 재령효과 비교	19
표 2.4 ACI, PCA, CEB-FIP, B3 모델의 시간에 대한 건조수축 비율 비교 ...	21
표 2.5 ACI 모델과 PCA 모델의 시간에 대한 건조수축 비율 비교	22
표 4.1 부재의 재료특성	28
표 4.2 ACI 모델에 의한 해석 결과	28
표 4.3 PCA 모델에 의한 해석 결과	31
표 4.4 ACI 모델과 PCA 모델에 의한 결정론적 해석 결과 비교	34
표 4.5 ACI 모델과 PCA 모델의 비탄성축소량 계산식 비교	34
표 4.6 각 축소량별 전체축소량 히스토그램 데이터 분석	55
표 4.7 각 축소량별 슬래브 타설이후 최대축소량 히스토그램 데이터 분석 ...	55
표 4.8 신뢰구간별 슬래브 타설이후 축소량	57
표 4.9 신뢰구간별 전체축소량	58
표 4.10 결정론적 방법과 확률론적 방법의 슬래브 타설이후 축소량 비교	59
표 4.11 슬래브 타설이후의 결정론적 방법과 신뢰구간별 축소량 비교	60
표 4.12 결정론적 방법과 확률론적 방법의 전체축소량 비교	60
표 4.13 전체축소량의 결정론적 방법과 신뢰구간별 축소량 비교	61
표 4.14 신뢰구간에 따른 최대 부등축소량	61
표 4.15 현장 계측치와 신뢰구간별 축소량	67

그림 목차

그림 1.1 연구방법	6
그림 2.1 기둥축소량에 영향을 미치는 요인	7
그림 2.2 시간에 대한 크리프 비율	18
그림 2.3 하중작용시점의 재령효과	19
그림 2.4 크리프 체적-표면적비 효과	20
그림 2.5 시간에 대한 건조수축 비율	21
그림 2.6 시간에 대한 건조수축 비율(PCA)	22
그림 2.7 건조수축 체적-표면적비 효과	23
그림 2.8 건조수축 상대습도 효과	23
그림 3.1 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 기둥축소량 프로그램 알고리즘	26
그림 4.1 54층 구조물의 기둥축소량 해석위치도	27
그림 4.2 WC1 기둥 탄성축소량(ACI)	29
그림 4.3 WC1 기둥 크리프축소량(ACI)	29
그림 4.4 WC1 기둥 건조수축축소량(ACI)	29
그림 4.5 WC1 기둥 전체축소량(ACI)	29
그림 4.6 WC2 기둥 탄성축소량(ACI)	30
그림 4.7 WC2 기둥 크리프축소량(ACI)	30
그림 4.8 WC2 기둥 건조수축축소량(ACI)	30
그림 4.9 WC2 기둥 전체축소량(ACI)	30
그림 4.10 WC1 기둥 탄성축소량(PCA)	32
그림 4.11 WC1 기둥 크리프축소량(PCA)	32
그림 4.12 WC1 기둥 건조수축축소량(PCA)	32
그림 4.13 WC1 기둥 전체축소량(PCA)	32

그림 4.14 WC2 기둥 탄성축소량(PCA)	33
그림 4.15 WC2 기둥 크리프축소량(PCA)	33
그림 4.16 WC2 기둥 건조수축축소량(PCA)	33
그림 4.17 WC2 기둥 전체축소량(PCA)	33
그림 4.18 결정론적 방법에 의한 슬래브 타설이후 부등축소량(ACI)	36
그림 4.19 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC1 기둥의 탄성축소량 히스토그램(ACI)	36
그림 4.20 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC1 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(ACI)	37
그림 4.21 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC1 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)	37
그림 4.22 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC2 기둥의 탄성축소량 히스토그램(ACI)	38
그림 4.23 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC2 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(ACI)	38
그림 4.24 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC2 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)	39
그림 4.25 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 슬래브 타설이후 발생하는 축소량(ACI)	39
그림 4.26 확률론적 방법에 의한 WC2 기둥의 슬래브 타설이후 발생하는 축소량(ACI)	40
그림 4.27 결정론적 방법에 의한 슬래브 타설이후 부등축소량(PCA)	41
그림 4.28 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC1 기둥의 탄성축소량 히스토그램(PCA)	41
그림 4.29 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC1 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(PCA)	42

그림 4.30 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC1 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)	42
그림 4.31 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC2 기둥의 탄성축소량 히스토그램(PCA)	43
그림 4.32 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC2 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(PCA)	43
그림 4.33 시물레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC2 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)	44
그림 4.34 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 슬래브 타설이후 발생하는 축소량(PCA)	44
그림 4.35 확률론적 방법에 의한 WC2 기둥의 슬래브 타설이후 발생하는 축소량(PCA)	45
그림 4.36 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의 전체 탄성축소량 히스토그램(ACI)	46
그림 4.37 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의 전체 크리프 축소량 히스토그램(ACI)	46
그림 4.38 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의 전체 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)	47
그림 4.39 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의 전체 탄성축소량 히스토그램(ACI)	47
그림 4.40 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의 전체 크리프 축소량 히스토그램(ACI)	48
그림 4.41 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의 전체 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)	48
그림 4.42 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 전체축소량(ACI)	49
그림 4.43 확률론적 방법에 의한 WC2 기둥의 전체축소량(ACI)	49

그림 4.44 시뮬레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의	
전체 탄성축소량 히스토그램(PCA)	50
그림 4.45 시뮬레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의	
전체 크리프 축소량 히스토그램(PCA)	51
그림 4.46 시뮬레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의	
전체 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)	51
그림 4.47 시뮬레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의	
전체 탄성축소량 히스토그램(PCA)	52
그림 4.48 시뮬레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의	
전체 크리프 축소량 히스토그램(PCA)	52
그림 4.49 시뮬레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의	
전체 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)	53
그림 4.50 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 전체축소량(PCA)	53
그림 4.51 확률론적 방법에 의한 WC2 기둥의 전체축소량(PCA)	54
그림 4.52 신뢰수준에 따른 정규분포의 확률	56
그림 4.53 W122 벽체의 확률론적 축소량(ACI)	63
그림 4.54 W122 벽체의 확률론적 축소량(PCA)	63
그림 4.55 W211 벽체의 확률론적 축소량(ACI)	64
그림 4.56 W211 벽체의 확률론적 축소량(PCA)	64
그림 4.57 W311 벽체의 확률론적 축소량(ACI)	65
그림 4.58 W311 벽체의 확률론적 축소량(PCA)	65

ABSTRACT

Influence of Parameters and Models on Column Shortening Prediction for Tall Concrete Buildings

Kim, Ha-Hyun

Dept. of Oceanic Architectural Engineering
Graduate School, Korea Maritime University

There are some proposed formulas by ACI, PCA, CEB-FIP and B3 which can be used to analyze column shortening, and each model has difference in calculating inelastic shortening that has influence on differential shortening.

This study performed a comparative analysis on parameter of each proposed formula for column shortening, and analyzed column shortening of two columns of 54-story C apartment in Haewoondae according to a proposed formula by each model. The analysis includes comparing the elasticity, creep, drying shrinkage shortening, the whole shortening, and differential shortening by each model with the column shortening analysis using the deterministic method, and the probabilistic method utilizing monte carlo simulation. And this study shows that the potential maximum shortening can be predicted using each formula by comparing shortening in each confidence interval with field measurement and probabilistic analysis. The results in this research are as follows.

1. As the result of comparing time-dependent creep rate and drying

shrinkage rate with CEB-FIP, there was great difference on the day of completion 1000 days, between ACI and PCA, thus it was not appropriate to compare the influence of variable with probabilistic analysis, and it was also not appropriate to compare B3 model with variable of other models that had different formula of calculating creep shortening. Therefore, the researcher developed the method of analyzing probabilistic column shortening that is easy to compare the influence of variable with PCA model in previous studies.

2. As the result of deterministic analysis, it indicated that drying shrinkage shortening of PCA model were 1.6~1.7 times greater than that of ACI model. Subsequent to slab installation shortening by PCA model was 114~116%, and the total shortening was 129~134%.

3. Differential shortening and the total shortening of PCA was 1.11~1.14 times and 1.15~1.27 times greater respectively as compared with ACI as the width of confidence interval was increased more subsequent to slab installation.

4. As the result of comparing field measurement with probabilistic analysis, the result by ACI model was closer to field measurement than the result by PCA. Furthermore, field measurement of ACI and PCA was between the mean value and the lowest value in 68.26% of confidence interval. Therefore this study can predict the potential maximum shortening without reference to applied formula.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 국내에는 주상복합 등의 용도로 각 건설 회사마다 초고층 건물들의 건설이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 초고층 건물들은 생활에 여러 가지 이점을 지닌 반면, 구조적 측면에서 고려해야 할 많은 문제점을 안고 있다. 초고층 건물의 경우 특히 안정성과 사용성이 중요시 되는데 그 안정성과 사용성 등 구조적으로 큰 영향을 주는 것이 기둥축소 문제이다. 철근콘크리트 구조의 기둥축소는 탄성변형 뿐만 아니라 크리프변형과 건조수축변형의 시간 의존적 비탄성 변형으로 구성된다. 초고층 건물에서 기둥과 기둥 등의 인접한 수직부재간의 부등축소량은 슬래브나 보에 전단력이나 휨모멘트와 같은 부가응력을 유발하거나 슬래브의 기울어짐, 칸막이벽의 균열 등과 같은 문제를 일으킨다. 따라서, 이러한 부등축소량에 의한 피해를 최소화하기 위해 기둥축소량의 예측과 보정이 정확히 이루어져야 하며, 시공시 예측한 사항을 반영하여 문제를 최소화 할 수 있도록 해야 한다. 하지만 초고층 건물의 시공시 사용되는 재료들은 같은 재료라고 하더라도 기후 환경 등에 의한 자연적이거나 인위적인 요인에 의해서 성질이 다르게 나타날 수 있다. 이와 같이 변동성을 가지는 변수들에 대해서는 기둥축소량 해석법인 결정론적인 방법으로는 합리적으로 해석을 할 수가 없다.

따라서 이를 보완하기 위해 기둥축소량 해석에 사용되는 변수들을 어떤 일정한 값을 가지는게 아닌 확률변수로 정의해서 확률 및 통계적인 방법으로 해석하는 것을 확률론적인 방법이라고 한다. 기둥축소량에 영향을 주는 콘크리트의 특성 중 콘크리트강도, 크리프계수, 건조수축계수 등은 변동성이 크기 때문에 이와 같은 변동성을 고려하여 확률 및 통계적 특성을 해석에 반영하여야 한다. 설계변수를 확률변수로 정의하여 해석함으로써 구조물의 안전성에 대해서 결정

론적인 방법보다 더 합리적인 안전성 평가를 할 수 있다.

기둥축소량 해석시 사용되는 재료의 물성치는 여러 가지 제안식에 따라 차이가 발생하게 되는데, 실제로 재료의 특성을 정확하게 측정하여 적용하기 힘들다. 그래서 이러한 재료적 성질을 통계적으로 조사하여 반영한 것이 기둥축소량 제안식이다.

대표적인 제안식으로 ACI모델과 CEB-FIP모델이 있고, 현재 초고층 건물 기둥축소량 해석에 널리 사용되고 있는 PCA(Portland Cement Association)에서 제안하는 제안식과 유럽에서 사용하는 B3 모델 제안식 등이 있다.

제안식에 의해 기둥축소량 중 크리프와 건조수축 축소량인 비탄성 축소량에서 모델식별 차이를 나타내며, 이러한 비탄성 축소량의 제안식은 건물의 부등축소량에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 논문에서는 기둥축소량 제안식별 매개변수와 적용모델의 비교를 통하여 각 제안식별 변수들의 특징을 알아보고, 기존에 수행되었던 PCA 모델의 확률해석을 바탕으로 예제 건물인 해운대 C 아파트 기둥의 계측치를 토대로 하여 ACI 모델을 적용한 확률론적 기둥축소량 해석법을 개발하였다. 결정론적인 방법에 의한 기둥축소량 해석과 확률론적인 방법에 의한 기둥축소량 해석을 하여 각 모델식별 탄성, 크리프, 건조수축 축소량 및 전체 축소량 값과 부등축소량 값을 비교 분석하고자 한다. 그리고 현장 계측치와 확률해석을 통한 신뢰구간별 축소량을 비교하여, 적용식별 발생 가능한 최대 축소량의 예측범위를 알아보고자 한다.

1.2 연구동향

초고층건물은 고강도 콘크리트의 발전과 사용이 활발해짐에 따라 건설이 활발하게 이루어지고 있다. 건물이 고층화 되면서 수직부재의 장기축소현상이 문제가 되기 시작하였고 이에 따라 기둥축소량에 대한 연구가 시작되었다.

기둥축소량에 대한 연구는 1960년대 미국의 Fintel과 Khan[1]에 의하여 고층 철근콘크리트 건물의 비탄성 변형을 고려한 기둥축소량 예측방법이 ACI저널에 발표되면서 제안식이 수정되어졌으며 현재 포틀랜드 시멘트 협회(Portland Cement Association)에서 제안된 계산법[2]이 이용되고 있다. PCA에서 제안한 기둥축소량 계산식은 ACI 제안식과 CEB-FIP 제안식을 기본으로 하고 연구 결과들을 참조하여 수정한 제안식이다. 국내 기둥축소량 연구로 1997년 송화철, 정석창[3] 등에 의해 PCA 기둥축소량 알고리즘을 바탕으로 한 CSA(Column Shortening Analysis) 기둥축소량 해석 프로그램이 개발되었다. 이 프로그램은 말레이시아의 Plaza Rakyat 오피스동에 대한 해석을 수행하여 기둥축소량 예측 및 보정방법에 대한 적용성을 입증하였다.

몬테카를로 기법은 난수를 발생시켜 시뮬레이션하는 방법이다. 1940년대 미국에서 핵무기에 대한 연구를 위해 개발되었고, 1949년 로스엔젤레스에서 몬테카를로 기법에 대한 학회가 개최됨으로써 많은 업적이 나오게 되었다. 1963년 Alder, Fernbach, Rotenberg가 편찬한 Methods in Computational Physics[4], 1964년 Hammersley와 Handscomb의 Monte Carlo Methods[5] 등의 저서가 편찬되면서 학문적으로 많은기여를 하였다.

난수 추출방법의 가장 일반적인 방법은 1948년 Lehmer[6]가 선형합동적 방법(Linear Congruential Method)을 사용한 이래로 거의 표준적인 방법으로 사용되고 있다. 이 방법은 겉보기에는 무작위하게 보이는 수를 생성해 내지만 이렇게 만들어진 수들은 균일하게 분포되어 있고 통계적으로도 독립성이 있음을 증명할 수 있다.

기둥축소량에 영향을 미치는 요소에 대하여 정은호, 김희철[7]이 콘크리트 탄성계수, 크리프, 건조수축, 시공기간 등을 매개변수로 하여 각 매개변수가 기둥축소량에 미치는 영향을 연구하였으며, 조용수, 송화철[8]은 기둥축소량에 영향을 많이 미치면서 변동성이 큰 재료특성인 콘크리트강도, 크리프계수, 건조수축계수 값을 확률매개변수로 하여 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기둥축소량 해석을 수행하였다. 그 결과를 신뢰구간별로 분석하여 시공시 발생할 수 있

는 자연적 또는 인위적 요인에 의한 기둥축소량 해석 값의 변동범위에 대한 연구가 수행되었다.

기둥축소량의 해석에 사용되는 제안식으로 ACI 모델, PCA 모델, CEB-FIP 모델, B3 모델 등이 있는데 각각의 모델식마다 부등축소량에 영향을 미치는 비탄성 축소량을 계산하는 제안식에 차이를 보인다.

각 모델별 기둥축소량에 영향을 미치는 매개변수의 비교와 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기둥축소량 해석 결과 비교를 통해 각각의 제안식이 기둥 축소량 해석에 어떠한 영향을 미치는지 비교해 볼 필요가 있다.

1.3 연구범위 및 방법

본 논문은 ACI 모델[9], PCA 모델[2], CEB-FIP 1990 모델[10], B3 모델[11]식의 매개변수에 대하여 비교 분석하였다. 그리고 기존에 연구되었던 PCA 모델과 매개변수의 영향을 비교하기 위하여 ACI 모델에 대해서 결정론적 및 확률론적 기둥축소량 해석을 실시하였다.

두 결과 값을 비교하여 확률론적 방법의 정확성을 검증하고 데이터의 통계적 분포를 산출하여 신뢰구간별 축소량의 데이터를 계산하였고, 기둥과 기둥에 발생하는 부등축소량의 영향과, 두 모델식간의 비탄성 축소량인 크립와 건조수축 축소량의 영향을 비교 분석하였다. 또, 신뢰구간별 축소량과 현장 계측치를 비교하여 실제 발생할 수 있는 최대 축소량의 범위를 예측하였다.

본 논문의 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다.

2장에서는 기둥축소량에 영향을 미치는 요인과 ACI, PCA, CEB-FIP, B3 모델별 사용되는 매개변수들에 대한 적용식을 소개하고 있다. 적용식별 매개변수들의 영향을 그래프와 표로 비교 분석하였다.

3장에서는 확률론적 기둥축소량 해석에 대한 일반적인 내용과 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기둥축소량 해석방법 및 기둥축소량 프로그램의 알고리

증에 대해서 설명하였다.

4장에서는 ACI모델식과 PCA모델식에 의한 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 54층 예제건물의 기둥축소량을 해석하였다. 결정론적 방법과 확률론적 방법의 결과값을 비교 분석하여 정확성을 검증하였고, 두 모델식간의 기둥축소량 해석결과를 비교분석하였다. 그리고 현장 계측치와 확률해석을 통한 신뢰구간별 축소량을 비교하여 발생가능한 최대 기둥축소량을 예측하였다.

마지막으로 5장에서는 본 연구를 통해서 얻은 결론을 서술하였다.

이상의 내용을 그림 1.1과 같이 도식화하여 나타내었다.



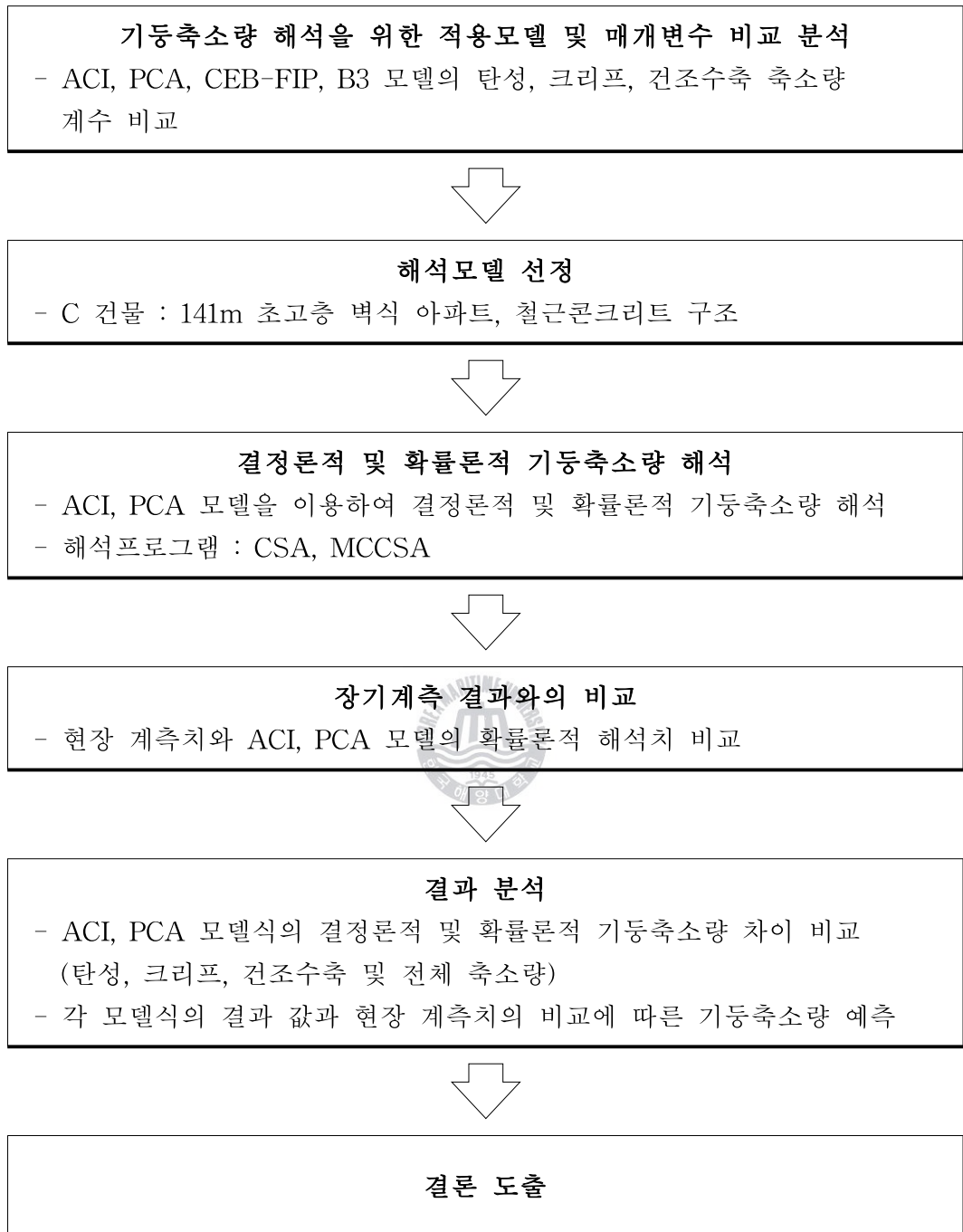


그림 1.1 연구방법

2. 기동축소량 해석을 의한 적용모델 및 매개변수 비교 분석

기동축소량의 해석에 사용되는 제안식으로 ACI 모델, PCA 모델, CEB-FIP 모델, B3 모델 등이 있는데 각각의 모델식 마다 부등축소량에 영향을 미치는 비탄성 축소량을 계산하는 제안식에 차이를 보인다. 이 장에서는 탄성축소량을 제외한 비탄성 축소량인 크리프 축소량, 건조수축 축소량을 계산하는 매개변수에 대해서 각 모델별로 비교하고자 한다. 그림 2.1은 기동축소량에 영향을 미치는 요인인 탄성축소량, 크리프 축소량, 건조수축 축소량의 영향요소를 나타낸 것이다.

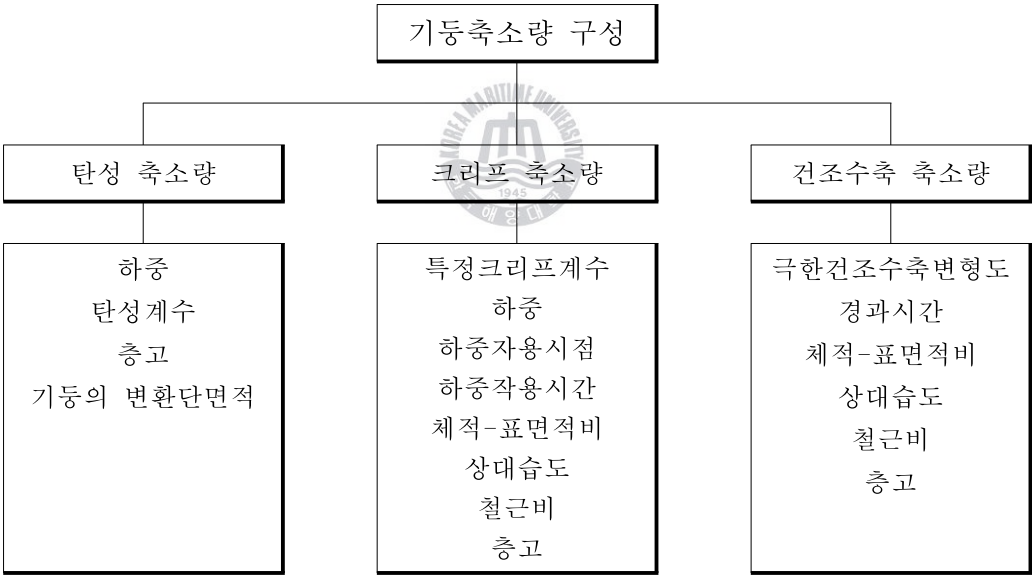


그림 2.1 기동축소량에 영향을 미치는 요인

2.1 탄성 축소량

기동축소량의 탄성 축소량은 식 2.1과 같다. 탄성 축소량은 건물이 건설되면

서 누적되는 하중과 시간의 변화에 따른 기둥의 변환단면적, 층고, 시간에 따른 콘크리트 탄성계수의 변화에 의해 구해진다.

$$\Delta_{EL} = \sum \frac{P \times h}{A_t \times E_{ct}} \quad (2.1)$$

여기서 P 는 작용하중, A_t 는 시간 종속적 기둥의 변환단면적, h 는 층고, E_{ct} 는 콘크리트 탄성계수를 나타낸다.

시간 종속적 기둥의 변환단면적과 콘크리트 탄성계수에 대한 값은 다음과 같이 계산된다.

$$A_t = A_g + A_s \times (n_t - 1) \quad (2.2)$$

$$n_t = \frac{E_s}{E_{ct}} \quad (2.3)$$

$$E_{ct} = 33w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad (2.4)$$

$$f_{ct} = f_{28} \times \frac{t_{la}}{4 + 0.85t_{la}} \quad (2.5)$$

여기서 A_g 는 기둥의 전체단면적, A_s 는 철근의 단면적, E_s 는 철근의 탄성계수, n_t 는 시간 종속적 탄성계수비, w 는 콘크리트의 밀도(kg/m^3), f'_{ct} 는 콘크리트의 강도(psi), f'_{28} 는 콘크리트의 28일 재령강도(psi), t_{la} 는 콘크리트 재령일을 나타낸다.

2.2 크리프 축소량

크리프는 콘크리트가 지속적인 하중을 받을 때 시간의 경과에 따라 변형도가

증가하는 현상을 말한다. 크리프는 2가지 종류로 나눌 수 있으며 기본크리프(Basic Creep)와 건조크리프(Drying Creep)로 나누어진다. 기본크리프는 주변환경과 수분의 이동이 없는 상태에서 일어나는 크리프이며 건조크리프는 건조에 의해 일어나는 추가적인 크리프이다.

2.2.1 ACI, PCA 모델식

크리프 축소량은 슬래브 타설이전과 슬래브 타설이후의 크리프 축소량으로 나타난다. ACI 모델, PCA 모델의 식을 각각 사용하여 크리프 축소량 계산시 특정 계수를 각 모델식에 맞는 계수법을 이용하여 계산한다. 식 2.6은 슬래브타설 이전, 식 2.7은 슬래브타설 이후의 크리프 축소량을 나타내며 ACI 모델과 PCA 모델에서 동일하게 사용된다. ACI 모델과 PCA 모델의 계수 중에서 하중작용시점의 재령효과(식 2.9와 2.10)와 체적-표면적비 효과(식 2.11과 2.12)에 대해서만 다른 식을 사용하고 나머지는 동일한 식을 사용한다.

$$\Delta_{CR}^{UPTO} = \sum (P/A_t) \times C_u \times CR_t \times h \times CR_{la} \times CR_{v/s} \times CR_{RH} \times CR_{sr} \quad (2.6)$$

$$\Delta_{CR}^{SUBTO} = \sum (P/A_t) \times C_u \times (1 - CR_t) \times h \times CR_{la} \times CR_{v/s} \times CR_{RH} \times CR_{sr} \quad (2.7)$$

여기서 P 는 작용하중, A_t 는 시간 종속적 기둥의 변환단면적, C_u 는 특정크리프계수, CR_t 는 시간에 대한 크리프 비율, CR_{la} 는 하중작용시점의 재령효과, CR_{vs} 는 체적-표면적비 효과, CR_{RH} 는 상대습도 효과, CR_{sr} 는 철근비 효과를 나타낸다.

각 계수들은 다음과 같이 계산된다.

$$CR_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \quad (2.8)$$

$$\text{ACI Model : } CR_{la} = 1.25(t_{la})^{-0.118} \quad (2.9)$$

$$\text{PCA Model : } CR_{la} = 2.3(t_{la})^{-0.25} \quad (2.10)$$

$$\text{ACI Model : } CR_{vs} = \frac{2}{3}(1 + 1.13e^{-0.54v/s}) \quad (2.11)$$

$$\text{PCA Model : } CR_{vs} = \frac{0.044(v/s) + 0.934}{0.10(v/s) + 0.85} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} CR_{RH} &= 1.0 & (RH < 40) \\ &= 1.40 - 0.01 \times RH & (RH \geq 40) \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} CR_{sr} &= 1 - \exp[-\rho \times n_t \times C_u \times CR_{la} \times CR_{vs} \times E_{ct} / (1 + \rho \times n)] \\ &\quad / [(C_u \times CR_{la} \times CR_{vs}) \times E_s \times \rho] \end{aligned} \quad (2.14)$$

여기서 E_s 는 철근의 탄성계수, E_{ct} 는 콘크리트의 탄성계수, t_{la} 는 콘크리트의 재령일, (v/s) 는 체적-표면적비, RH 는 상대습도, ρ 는 철근비를 나타낸다.

크리프에 대한 전체 축소량은 슬래브타설 이전과 타설 이후에 대한 합으로 ACI Model식과 PCA Model식에서 동일하게 사용되며 다음 식 2.15와 같다.

$$\Delta_{CR} = \Delta_{CR}^{UPTO} + \Delta_{CR}^{SUBTO} \quad (2.15)$$

2.2.2 CEB-FIP 모델식

CEB-FIP 모델의 크리프 계수 중 CR_t 에 해당하는 크리프 계수식은 식 2.16과 같다.

$$CR_t = \beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (2.16)$$

여기서 β_c 는 재하 후 재령에 따른 크리프 발달계수, t 는 고려하는 순간의 콘크리트 재령(일), t_0 는 재하 때의 콘크리트 재령(일), t_1 은 1일을 나타낸다. 그리고 β_H 는 식 2.17로 계산된다.

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (2.17)$$

여기서 RH 는 상대습도, RH_0 는 100%, h 는 부재의 기본치수, h_0 는 100mm를 나타낸다. 부재의 기본치수 h 는 다음과 같이 계산한다.

$$h = \frac{2A_c}{u} \quad (2.18)$$



여기서 A_c 는 부재의 단면적, u 는 부재의 대기에 접한 둘레를 나타낸다.

2.2.3 B3 모델식

B3 모델의 경우는 ACI 모델식이나 PCA 모델식처럼 CR_b , CR_{la} , CR_{vs} 와 같이 크리프 축소량을 계산하는 식의 각각의 매개변수들로 나타나 있지 않고, 순간탄성변형 q_1 과 기본 크리프 $C_0(t, t')$ 및 건조 크리프량 $C_d(t, t', t_0)$ 의 합으로 계산되어 매개변수의 비교가 되지 않는다. 식 2.19는 B3 모델의 크리프 변형을 나타낸다.

$$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0) \quad (2.19)$$

각 계수들은 다음과 같이 계산된다.

$$q_1 = 0.6 \times 10^6 / E_{28} \quad (2.20)$$

$$C_0(t, t') = q_2 Q(t, t') + q_3 \ln[1 + (t - t')^n] + q_4 \ln(t/t') \quad (2.21)$$

$$C_d(t, t', t_0) = q_5 \sqrt{\exp\{-8H(t)\} - \exp\{-8H(t')\}} \quad (2.22)$$

여기서

$$q_2 = 451.1 c^{0.5} / f'_c{}^{0.9} \quad (2.23)$$

$$q_3 = 0.29 (w/c)^4 \times q_2 \quad (2.24)$$

$$q_4 = 0.14 / (a/c)^{0.7} \quad (2.25)$$

$$q_5 = 7.57 \times 10^5 (f'_c)^{-1} ABS(\epsilon_{s\infty})^{-0.6} \quad (2.26)$$

$$H(t) = 1 - (1 - h) \times S(t) \quad (2.27)$$

$$Q(t, t') = \frac{Q_f(t')}{\left[1 + \left(\frac{Q_f(t')}{Z(t, t')}\right)^{r(t')}\right]^{\frac{1}{r(t')}}} \quad (2.28)$$

$$Q_f(t') = \frac{1}{[0.086(t')^{2/9} + 1.21(t')^{4/9}]} \quad (2.29)$$

$$Z(t, t') = \frac{\ln[1 + (t - t')^{0.1}]}{\sqrt{t'}} \quad (2.30)$$

$$t(t') = 1.7(t')^{0.12} + 8 \quad (2.31)$$

h 는 상대습도, $S(t)$ 는 건조수축 변형률을 나타낸다.

2.3 건조수축 축소량

건조수축은 콘크리트의 경화이후 시간에 따른 콘크리트의 체적감소를 말한다. 체적감소는 콘크리트의 수분함량의 변화에 의해 외부로부터 작용하는 응력과는 관계없이 일어나는 물리-화학적인 변화에 기인한다. 건조수축은 안정된 상대습도와 온도조건하에서의 무차원화된 변형도 (in./in.)로 간편하게 나타낸다. 건조수축은 다음과 같은 3요소로 이루어진다.

1. Drying Shrinkage : 콘크리트 내부의 수분의 감소에 의해 발생
2. Autogenous Shrinkage : 시멘트의 수화작용에 의해 발생
3. Carbonation Shrinkage : 여러 가지 시멘트의 수화물이 이산화탄소에 의해 탄화됨으로써 발생

2.3.1 ACI, PCA 모델식

건조수축 축소량은 크리프 축소량과 마찬가지로 슬래브 타설이전과 슬래브 타설이후의 크리프 축소량으로 나타난다. ACI 모델, PCA 모델의 식을 각각 사용하여 건조수축 축소량 계산시 특정 계수를 각 모델식에 맞는 계수법을 이용하여 계산한다. 식 2.32는 슬래브타설 이전, 식 2.33은 슬래브타설 이후의 건조수축 축소량을 나타내며 ACI 모델과 PCA 모델에서 동일하게 사용된다. ACI 모델과 PCA 모델의 계수중 체적-표면적비 효과(식 2.35와 2.36)에 대해서만 다른 식을 사용하고 나머지는 동일한 식을 사용한다.

$$\Delta_{SH}^{UPTO} = \sum \epsilon_{shu} \times SH_t \times SH_{vs} \times SH_{RH} \times SH_{sr} \times h \quad (2.32)$$

$$\Delta_{SH}^{SUBTO} = \sum \epsilon_{shu} \times (1 - SH_t) \times SH_{vs} \times SH_{RH} \times SH_{sr} \times h \quad (2.33)$$

여기서 ϵ_{shu} 는 극한건조수축 변형, SH_t 는 시간에 대한 건조수축 비율, SH_{vs} 는 체적-표면적비 효과, SH_{RH} 는 상대습도 효과, SH_{sr} 는 철근비 효과,

h 는 층고를 나타낸다.

각 계수들은 다음과 같이 계산된다.

$$SH_t = \frac{t_s}{35 + t_s} \quad (2.34)$$

$$\text{ACI Model : } SH_{vs} = 1.2^{-0.12 \sqrt{v/s}} \quad (2.35)$$

$$\text{PCA Model : } SH_{vs} = \frac{0.037(\sqrt{v/s}) + 0.944}{0.177(\sqrt{v/s}) + 0.734} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} SH_{RH} &= 1.0 & (RH < 40) \\ &= 1.40 - 0.01 \times RH & (40 \leq RH < 80) \\ &= 3.00 - 0.03 \times RH & (80 \leq RH) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} SH_{sr} &= 1 - \exp[-\rho \times n_t \times C_u \times CR_{la} \times CR_{v/s} \times E_{ct} / (1 + \rho \times n_t)] \\ &\quad / [(C_u \times CR_{la} \times CR_{vs}) \times E_s \times \rho] \end{aligned} \quad (2.38)$$

여기서 RH 는 상대습도, $(\sqrt{v/s})$ 는 체적-표면적비, t_s 는 타설 후 경과시간 (일), ρ 는 철근비, C_u 는 특정크리프계수, CR_{la} 는 하중작용시점의 재령효과, CR_{vs} 는 체적-표면적비 효과, E_{ct} 는 콘크리트의 탄성계수, E_s 는 철근의 탄성계수를 나타낸다.

식 2.34의 시간에 대한 건조수축 비율을 나타내는 계수 SH_t 는 ACI 209[9]에서 제시하는 식으로, 식 2.39와 같이 PCA에서 제시하는 식과는 차이가 있다. PCA에서는 식 2.39와 같이 체적-표면적비가 커짐에 따라 시간에 대한 건조수축의 진행이 느려지는 것을 고려한 Hansen-Mattock의 식을 사용하고 있다.

$$SH_t = \frac{t}{26e^{0.36v/s} + t} \quad (2.39)$$

Hansen-Mattock의 식은 체적-표면적비가 1in.~6in. 사이의 실험체를 대상으로 해 얻은 식으로써, 체적-표면적비가 초고층건물에서처럼 상당히 증가할 경우 건조수축량은 비현실적인 값이 계산되어 상당히 큰 차이가 난다. 따라서 본 논문에서는 PCA 모델에 의한 건조수축 축소량 계산시에도 시간에 대한 건조수축 비율에 대한 계수는 동일하게 ACI 209에서 제안된 식을 사용한다.

건조수축 축소량의 전체 축소량은 슬래브타설 이전과 타설 이후에 대한 합으로 ACI Model식과 PCA Model식에서 같이 사용되며 다음 식 2.40과 같다.

$$\Delta_{SH} = \Delta_{SH}^{UPTO} + \Delta_{SH}^{SUBTO} \quad (2.40)$$

2.3.2 CEB-FIP 모델식

CEB-FIP 모델의 건조수축 크리프 계수 중 SH_t 에 해당하는 건조수축 계수 식은 다음과 같다.

$$\beta_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0.5} \quad (2.41)$$

여기서 h 는 부재의 기본치수, h_0 는 100mm, t_1 은 1일을 나타낸다.

2.3.3 B3 모델식

B3 모델의 건조수축 크리프 계수 중 SH_t 에 해당하는 건조수축 계수식은 다음과 같다.

$$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t - t_0}{\tau_{sh}}} \quad (2.42)$$

각 계수들은 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_{sh} = k_t (k_s D)^2 \quad (2.43)$$

여기서

$$k_t = 190.8 / (t_0^{0.08} \times f'_c{}^{0.25}) \quad (2.44)$$

$$k_s = \begin{cases} 1.0 & \text{(무한한 크기의 슬래브판)} \\ 1.15 & \text{(무한한 원주 기둥)} \\ 1.25 & \text{(무한한 정사각형 단면 기둥)} \\ 1.30 & \text{(구)} \\ 1.55 & \text{(정 육면체)} \end{cases} \quad (2.45)$$

$$D = 2v/s \quad (2.46)$$



v/s 는 체적-표면적비로 체적-표면적비 효과(SH_{vs})를 이 식에서 포함하고 있다.

2.4 매개변수 비교 분석

표 2.1은 각 모델별 크리프 및 건조수축 관련 매개변수들을 나타낸 것이다. 표 2.2와 표 2.2에서 알 수 있듯이 CEB-FIP 모델은 준공시점인 1,000일에 대한 값이 ACI, PCA 모델과 차이가 크게 나타나 확률해석을 통한 매개변수의 영향을 비교하기가 적합하지 않고, 표 2.1에서 알 수 있듯이 B3 모델은 크리프 축소량 계산식이 다른 모델들의 매개변수와 비교하기에 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 기존에 연구되었던 PCA 모델과 매개변수의 영향을 비교하기 용이한 ACI 모델에 대해서만 기둥축소량 해석을 실시하였다.

표 2.1 모델별 매개변수 식 비교

	ACI	PCA
CR_t	$CR_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}}$	
CR_{la}	$CR_{la} = 1.25(t_{la})^{-0.118}$	$CR_{la} = 2.3(t_{la})^{-0.25}$
CR_{vs}	$CR_{vs} = \frac{2}{3}(1 + 1.13e^{-0.54v/s})$	$CR_{vs} = \frac{0.044(v/s) + 0.934}{0.10(v/s) + 0.85}$
CR_{RH}	$CR_{RH} = 1.27 - 0.0067RH$	$CR_{RH} = 1.0 \quad (RH < 40)$ $= 1.40 - 0.01 \times RH \quad (RH \geq 40)$
SH_t	$SH_t = \frac{t}{35 + t}$	$SH_t = \frac{t}{26e^{0.36v/s} + t}$
SH_{vs}	$SH_{vs} = 1.2e^{-0.12v/s}$	$SH_{vs} = \frac{0.037(v/s) + 0.944}{0.177(v/s) + 0.734}$
SH_{RH}	$SH_{RH} = 1.40 - 0.01 \times RH \quad (40 \leq RH < 80)$ $= 3.00 - 0.03 \times RH \quad (80 \leq RH)$	
	CEB-FIP	B3
CR_t	$\beta_c(t-t_0) = \left[\frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right]^{0.3}$	$J(t, t') = q_1 + C_0(t, t') + C_d(t, t', t_0)$
CR_{la}	X	X
CR_{vs}	X	X
CR_{RH}	$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{0.46 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{3}}}$	X
SH_t	$\beta_s(t-t_s) = \left[\frac{(t-t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1} \right]^{0.5}$	$S(t) = \tanh \sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}}$
SH_{vs}	X	SH_t 에 포함

그림 2.2는 ACI, PCA, CEB-FIP 모델의 시간에 대한 크리프 비율을 30년까지 변화를 나타낸 그래프이고, 표 2.2는 시간변화에 따른 식별 변화량을 준공시

점인 1,000일의 변화량을 포함하여 나타낸 표이다. 표를 보면 초기 값부터 준공 시점인 1,000일의 값 등 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. CEB-FIP 모델의 계산에 사용된 부재단면적(A_c)과 부재의 대기에 접한 둘레(u)와 상대습도(RH)는 본 논문에서 해석한 건물의 물성치를 이용하여 계산하였다. CEB-FIP 모델의 경우 하중작용시점의 재령효과와 체적-표면적비 효과가 ACI 모델이나 PCA 모델처럼 나타나 있지 않아 시간에 대한 크리프 비율만 그래프로 비교 하였다.

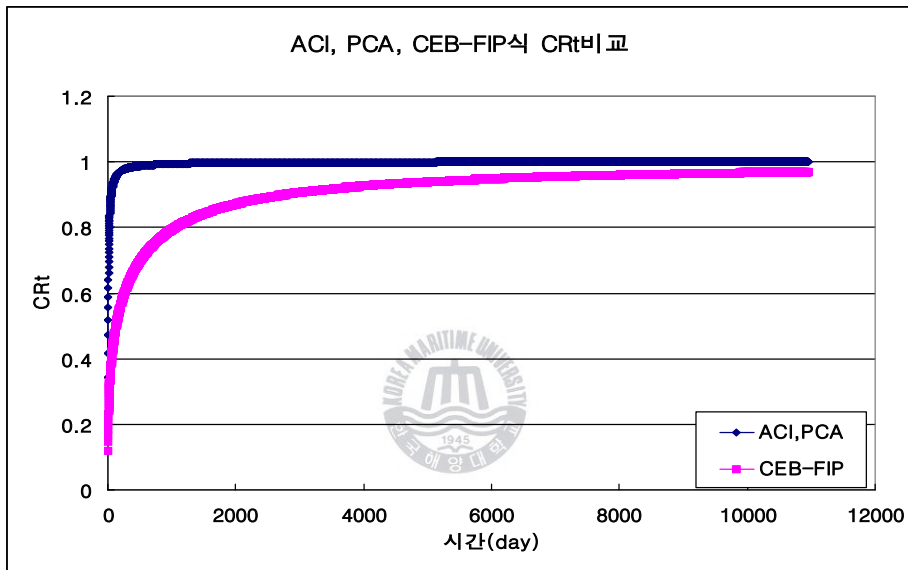


그림 2.2 시간에 대한 크리프 비율

표 2.2 ACI, PCA, CEB-FIP 모델의 시간에 대한 크리프 비율 비교

	ACI, PCA	CEB-FIP
초기	0.237	0.12
1년	0.984	0.651
1000일	0.994	0.794
5년	0.997	0.863
10년	0.998	0.921
20년	0.999	0.957
30년	0.999	0.97

그림 2.3은 ACI 모델과 PCA 모델의 하중작용시점의 재령효과를 나타낸 그래프이고, 표 2.3은 시간변화에 따른 식별 변화량을 준공시점인 1,000일의 변화량을 포함하여 나타낸 표이다. 표에서 알 수 있듯이 초기 변형부터 PCA 모델의 값이 크고 시간이 지날수록 변형 차이의 폭도 크게 나타남을 알 수 있다. 마찬가지로 30년까지의 변화를 나타내고 있다.

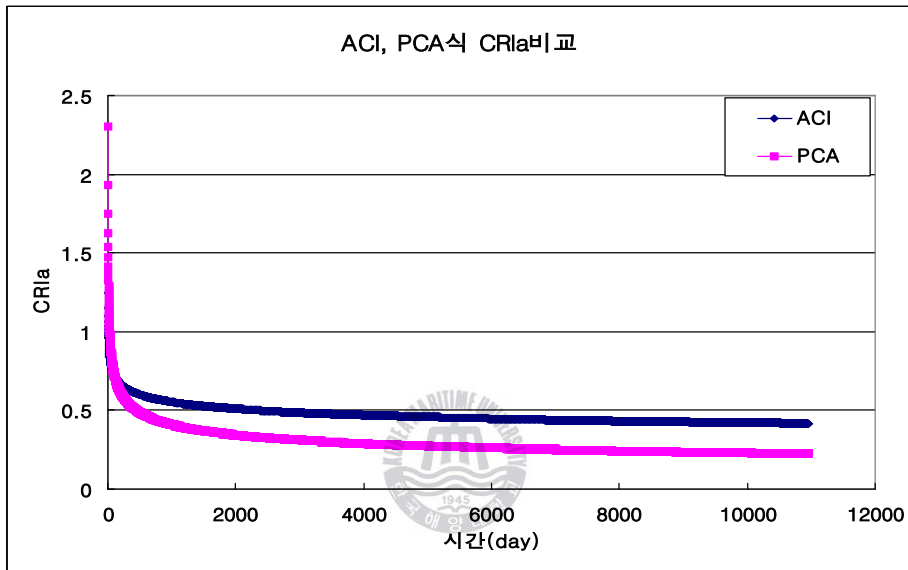


그림 2.3 하중작용시점의 재령효과

표 2.3 ACI 모델과 PCA 모델의 하중작용시점의 재령효과 비교

	ACI	PCA
초기	1.25	2.3
1년	0.623	0.526
1000일	0.553	0.409
5년	0.515	0.352
10년	0.475	0.296
20년	0.438	0.249
30년	0.417	0.225

그림 2.4는 ACI 모델과 PCA 모델의 체적-표면적비 효과를 나타낸 그래프이다. ACI 모델의 경우 초기 변형이 크게 나타나다가 어느 순간부터 거의 일정한 값을 갖는 이유는 ACI 모델식의 exp 수식 때문에 v/s 값이 커질수록 계산된 값은 작아져서 변화에 큰 영향을 주지 못하기 때문에 어느정도 변형을 보이다가 일정한 값이 나타나게 된다.

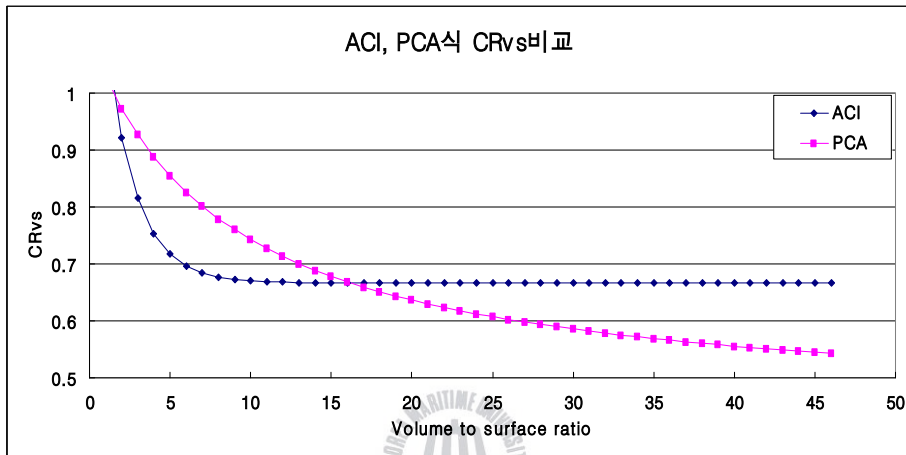


그림 2.4 크리프 체적-표면적비 효과

그림 2.5는 ACI, PCA, CEB-FIP, B3 모델의 시간에 대한 건조수축 비율을 30년까지 변화를 나타낸 그래프이고, 표 2.4는 시간변화에 따른 식별 변화량을 준공시점인 1,000일의 변화량을 포함하여 나타낸 표이다. 식 2.40에서 알 수 있듯이 CEB-FIP 모델식은 건물이 고층화에 따른 부재의 기본치수 증가로 아래와 같은 결과가 나타나게 된다.

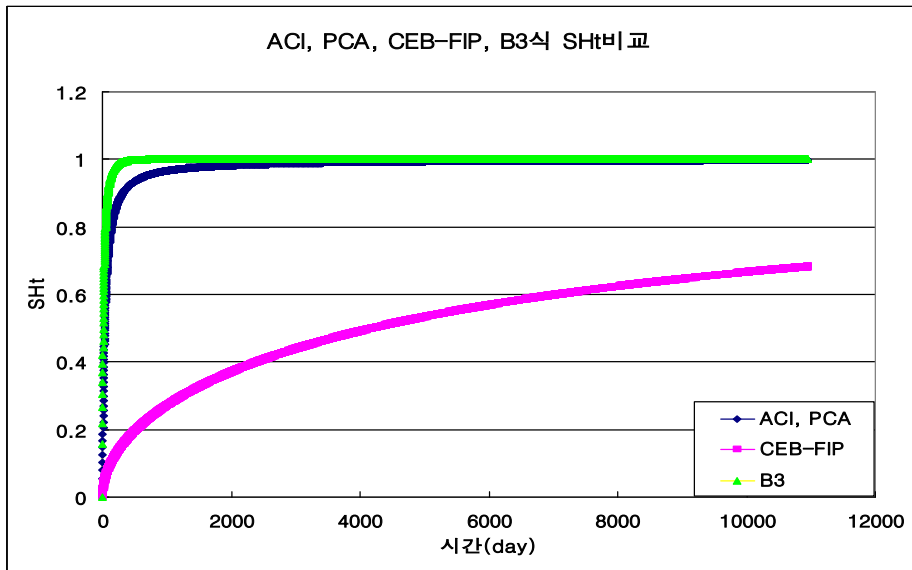


그림 2.5 시간에 대한 건조수축 비율

표 2.4 ACI, PCA, CEB-FIP, B3 모델의 시간에 대한 건조수축 비율 비교

	ACI, PCA	CEB-FIP	B3
초기	0.027	0.009	0.157
1년	0.913	0.168	0.995
1000일	0.966	0.271	0.999
5년	0.981	0.357	0.999
10년	0.991	0.474	0.999
20년	0.995	0.606	0.999
30년	0.997	0.682	0.999

그림 2.6은 PCA에서 제시하는 시간에 대한 건조수축 비율(SH_t) 식 2.39에 대한 그래프이고, 표 2.5는 ACI 모델과 식 2.39를 이용한 PCA 모델의 시간에 대한 건조수축 비율을 준공시점인 1,000일에 대한 값을 포함하여 시간에 대해 나타낸 것이다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 체적-표면적비가 초고층건물에서처럼 상당히 증가할 경우 건조수축량은 비현실적인 값이 계산되어 상당히 큰 차

이가 나는 것을 보여주고 있다. 따라서 시간에 대한 건조수축 비율에 대한 계수는 동일하게 ACI 209에서 제안된 식을 사용한다.

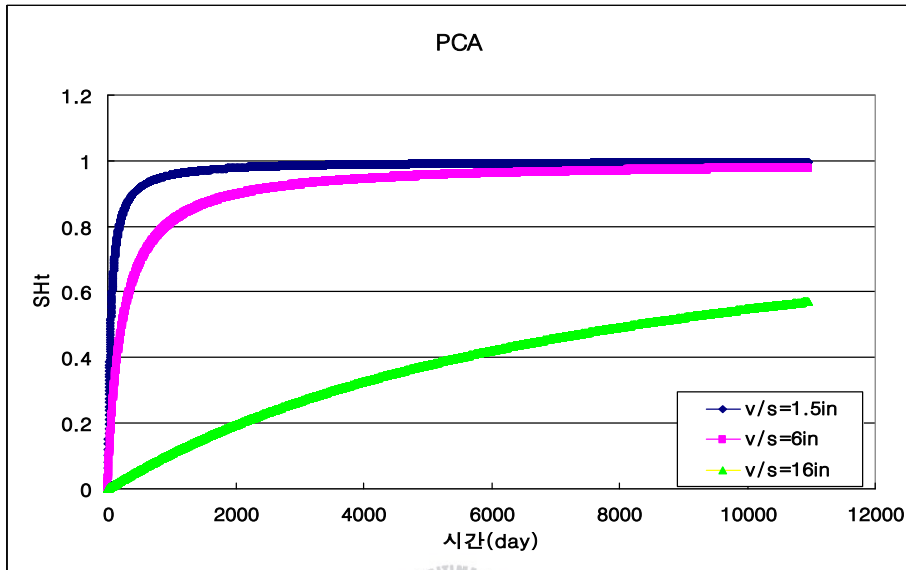


그림 2.6 시간에 대한 건조수축 비율(PCA)

표 2.5 ACI 모델과 PCA 모델의 시간에 대한 건조수축 비율 비교

	ACI	PCA(v/s:1.5인치)	PCA(v/s:6인치)	PCA(v/s:16인치)
1년	0.912	0.891	0.618	0.042
1000일	0.966	0.957	0.816	0.108
5년	0.981	0.976	0.890	0.181
10년	0.990	0.988	0.942	0.307
20년	0.995	0.994	0.970	0.469
30년	0.997	0.996	0.980	0.570

그림 2.7은 ACI 모델과 PCA 모델의 체적-표면적비 효과를 나타낸 그래프이다. 그래프를 비교해 보았을때 초기변형은 비슷하게 나타났으나, v/s값이 커질수록 PCA 모델의 값이 ACI 모델에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

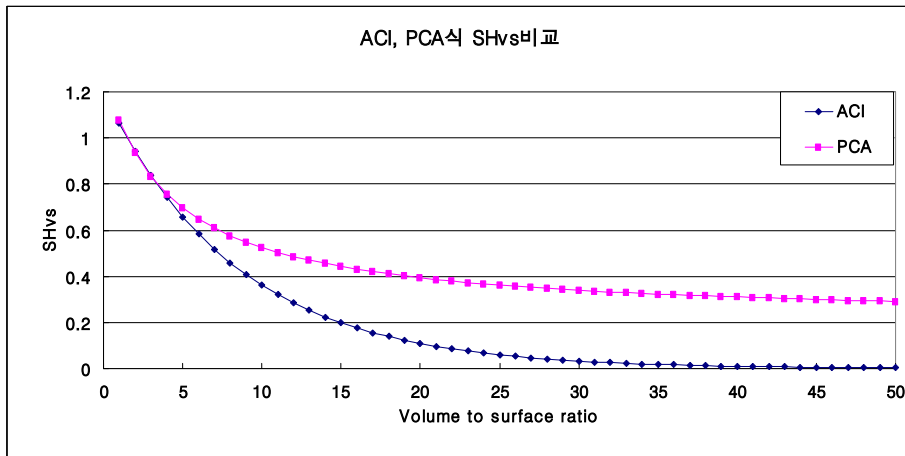


그림 2.7 건조수축 체적-표면적비 효과

그림 2.8은 ACI 모델과 PCA 모델의 상대습도 효과를 나타낸 그래프로 습도 변화에 따른 계수의 차이를 나타내고 있다. 상대습도 40% 미만일 때는 일정한 값 1을 가지다가 40% 이상 80% 미만인 상태에는 약 1.392~1.396의 값을 가지고, 80% 이상이 되면 약 2.97~2.976의 값을 가지게 된다.

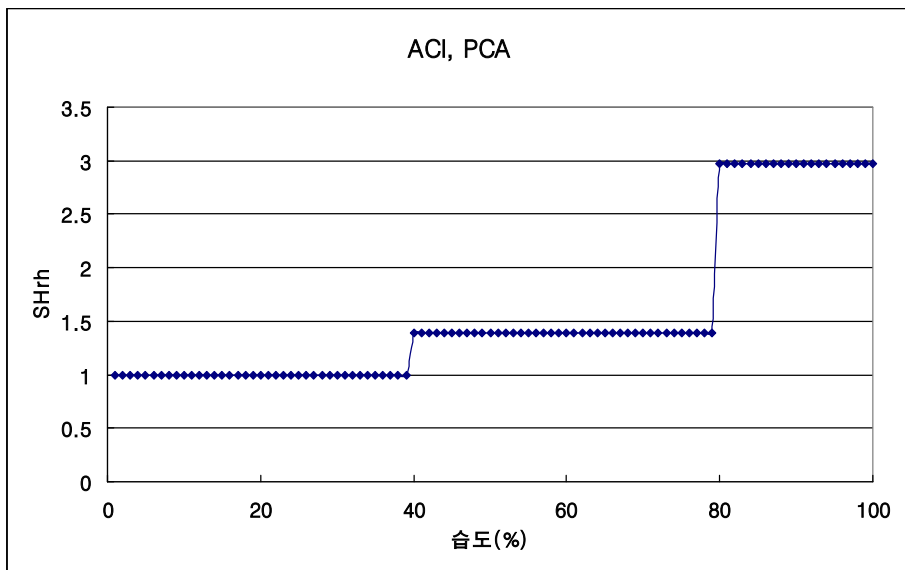


그림 2.8 건조수축 상대습도 효과

3. 확률론적 기동축소량 해석법

기동축소량은 일반적으로 탄성 축소량보다 크리프변형과 건조수축변형을 합한 비탄성 축소량이 더 크므로, 철근콘크리트 초고층 구조물에서는 비탄성 축소량이 중요한 문제가 된다. 탄성 축소량은 구조설계시에 예측이 가능하여 보정이 상대적으로 간단하나, 크리프 축소와 건조수축은 기후 환경과 재료 성질의 불규칙성으로 인해 실제 구조물에서의 습도 및 온도 변화에 따른 축소량을 정확하게 예측할 수가 없어 콘크리트 구조물에서의 이러한 현상에 대한 해석은 만족스럽지 못한 상태이다.

크리프와 건조수축 축소량에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 또한 이런 불규칙성에 대한 어려운 점을 해결하기 위해 최근에 이르러 확률론적 해석법이 도입되고 있다. 확률론적 해석이란 실제 구조물의 설계에서 구조물에 영향을 미치는 변수들이 가지는 변동성을 합리적으로 해석하기 위해 확률 및 통계적인 방법을 바탕으로 한 해석방법이다. 설계변수를 확률변수로 정의하여 해석함으로써 실제 변수들이 가지는 통계적 특성을 고려하게 됨으로써 구조물의 안전성에 대해서 기존의 결정론적 해석방법보다 더 합리적인 안전성 평가를 할 수 있게 된다.

3.1 몬테카를로 기법에 의한 확률론적 기동축소량 해석법

기동축소량에 대한 계산식을 바탕으로 유추한 확률론적 기동축소량 해석법은 다음과 같다.

$$\Delta_{D.T} = \Delta_{el} + \Delta_{cr} + \Delta_{sh} \quad (3.1)$$

위 식은 각 축소량에 대한 결정론적 방법의 축소량 계산식으로 Δ_{el} , Δ_{cr} , Δ_{sh} 는 이미 앞에서 구한 해석법이며, $\Delta_{D.T}$ 는 결정론적 방법의 전체 축소량이다.

이를 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기동축소량 해석법으로 변환하면 다음 식과 같다.

$$\Delta_{S.T} = \Delta_{el}^S + \Delta_{cr}^S + \Delta_{sh}^S \quad (3.2)$$

$$\Delta_{el}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{el}) \quad (3.3)$$

$$\Delta_{cr}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{cr}) \quad (3.4)$$

$$\Delta_{sh}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{sh}) \quad (3.5)$$

여기서, Δ_{el}^S , Δ_{cr}^S , Δ_{sh}^S 는 각각 확률론적 탄성 축소량, 확률론적 크리프 축소량, 확률론적 건조수축 축소량을 나타내는 것이고, $\Delta_{S.T}$ 는 확률론적 방법에 의한 전체 축소량, m은 몬테카를로 시뮬레이션의 반복횟수이다.

식 3.2에서 각각의 탄성, 비탄성 축소량에서 지정된 확률변수는 시뮬레이션의 횟수에 따라서 난수를 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 표준편차의 값을 신뢰구간에 따라 하한값과 상한값으로 정리할 수 있다.

3.2 확률론적 기동축소량 프로그램 구성

그림 3.1은 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 기동축소량 해석을 알고리즘[12]으로 나타내고 있다. 알고리즘을 구현하는데 사용된 프로그램은 Visual Fortran 6.0을 사용하였다. Fortran에서 ACI, PCA Model을 식별로 각각의 Code를 정리하였다.

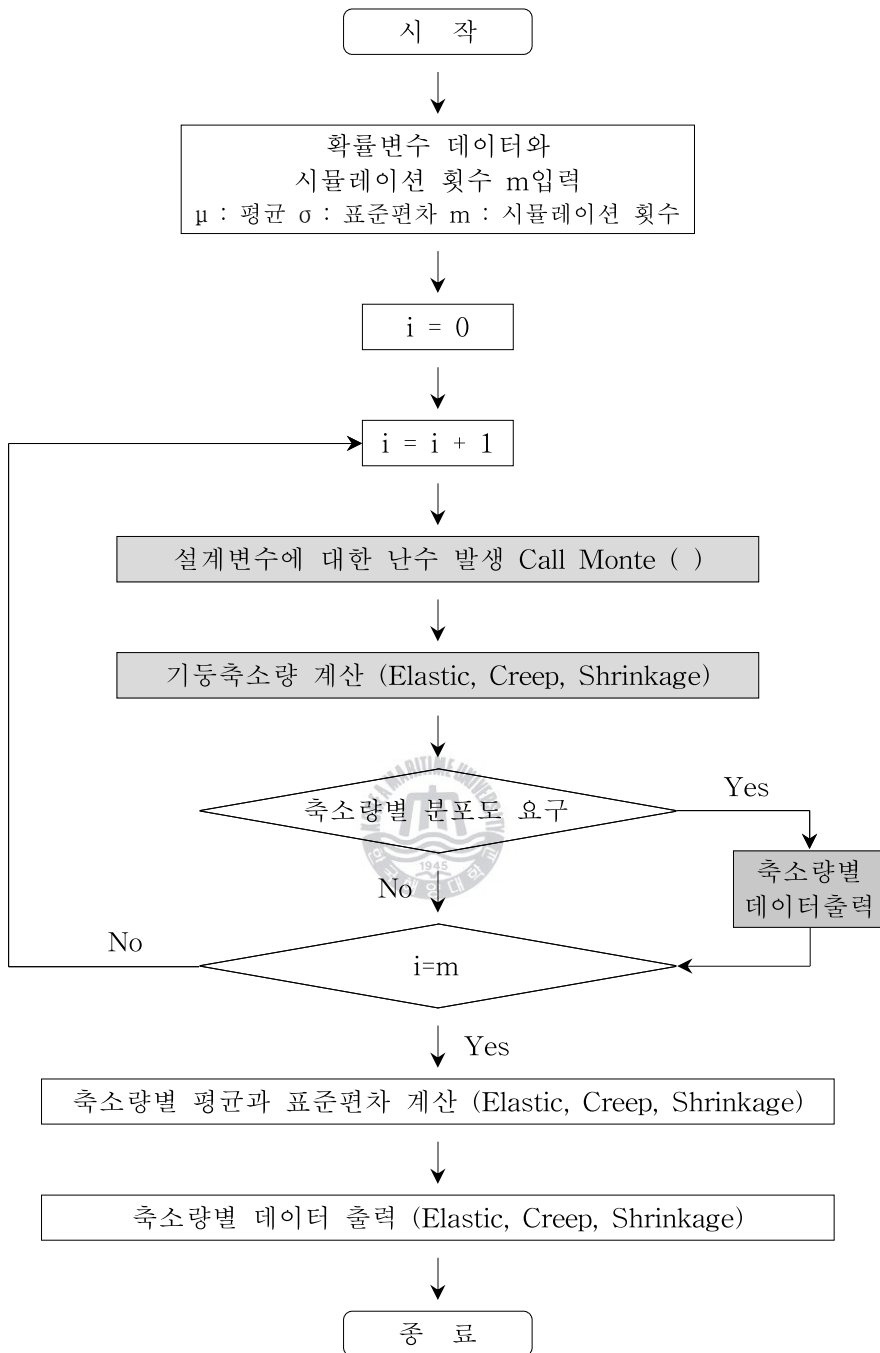


그림 3.1 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적
기동축소량 프로그램 알고리즘

4. 초고층 콘크리트 건물 적용결과

4.1 예제건물 일반사항

4.1.1 기둥축소량 해석위치

본 연구에 적용된 예제 건물인 해운대 C 아파트는 50층이 넘는 벽식의 철근 콘크리트 초고층 주거 건물로 횡력에 대한 구조적 안정성과 사용성을 확보하기 위해 벽식 구조물과 아웃리거 시스템을 같이 사용한다.

그림 4.1은 기둥축소량 해석 대상인 해운대 C 아파트의 113동의 평면도이다. 전체 층수가 54층의 건물로 WC1 기둥과 WC2 기둥을 기둥축소량 해석을 하여 모델식별 결정론적 해석결과와 확률론적 해석결과 및 부등축소를 비교 하였고, W122, W211, W311 벽체는 실제 현장계측치와 확률론적 축소량 해석결과를 비교 하였다.

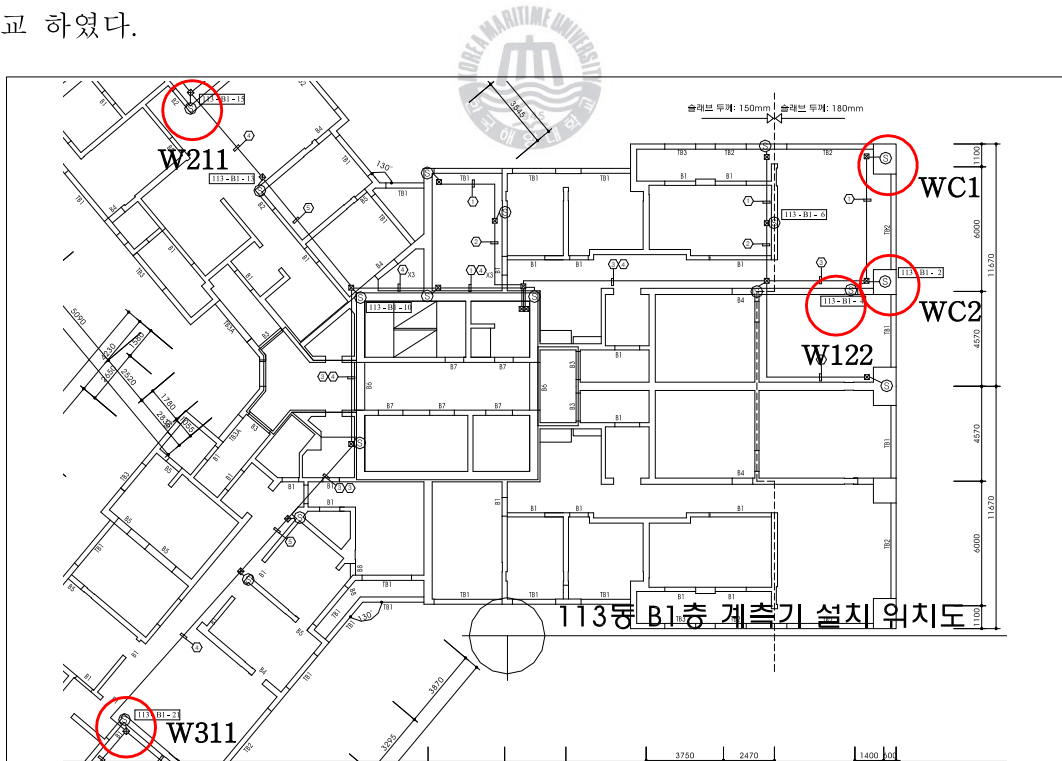


그림 4.1 54층 구조물의 기둥축소량 해석위치도

4.1.2 콘크리트 재료특성

표 4.1은 해석 부재의 콘크리트 재료특성으로 같은 값을 나타낸다. 아래의 재료성질을 이용하여 기둥축소량을 해석한다.

표 4.1 부재의 재료특성

층 수	콘크리트강도(kg/cm²)	특정크리프(cm/cm/kg/cm²)	극한건조수축(in/in)
1F~25F	473	13.58×10 ⁻⁶	8.76×10 ⁻⁴
26F~35F	300	16.46×10 ⁻⁶	1.18×10 ⁻³
36F~45F	270	18.55×10 ⁻⁶	8.00×10 ⁻⁴
46F~54F	240	20.87×10 ⁻⁶	8.00×10 ⁻⁴

4.2 결정론적 기둥 축소량 해석

4.2.1 ACI 모델에 의한 결정론적 기둥 축소량 해석 결과

WC1 기둥과 WC2 기둥의 CSA프로그램을 이용한 ACI 모델식 해석 결과는 표 4.2와 같이 나타난다. 그림 4.2에서 그림 4.5는 WC1 기둥, 그림 4.6에서 그림 4.9는 WC2 기둥의 해석 결과 그래프로 탄성축소량, 크리프 축소량, 건조수축 축소량, 전체축소량으로 각각 나타내었다. 해석결과 그래프에서 알 수 있듯이 전체 축소량과 슬래브 타설 이전 축소량의 경우 최대 발생층은 건물의 최상층에서 발생하지만 슬래브 타설 이후의 축소량은 중간층에서 나타난다.

표 4.2 ACI 모델에 의한 해석 결과 (단위 : mm)

		탄성축소량		크리프 축소량		건조수축축소량		전체축소량	
		Subto	Total	Subto	Total	Subto	Total	Subto	Total
WC1	축소량	6.927	13.836	12.167	19.129	5.262	24.154	24.245	57.119
	발생층	32F	54F	38F	54F	35F	54F	35F	54F
	비율	24%		34%		42%		100%	
WC2	축소량	7.214	14.348	12.997	20.431	6.013	27.907	25.943	62.686
	발생층	31F	54F	38F	54F	35F	54F	35F	54F
	비율	23%		33%		44%		100%	

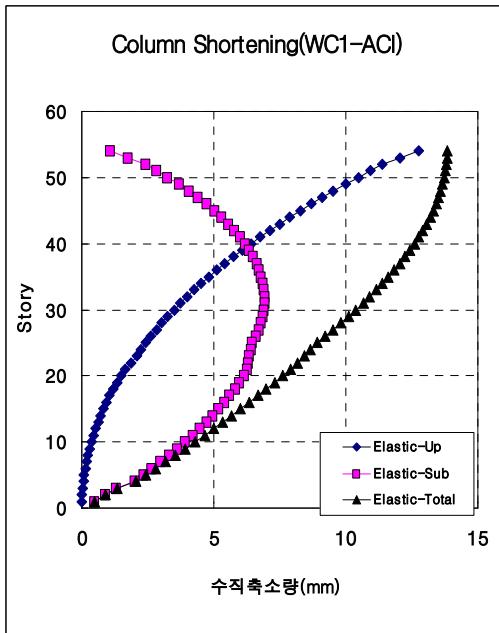


그림 4.2 WC1 기둥 탄성축소량(ACI)

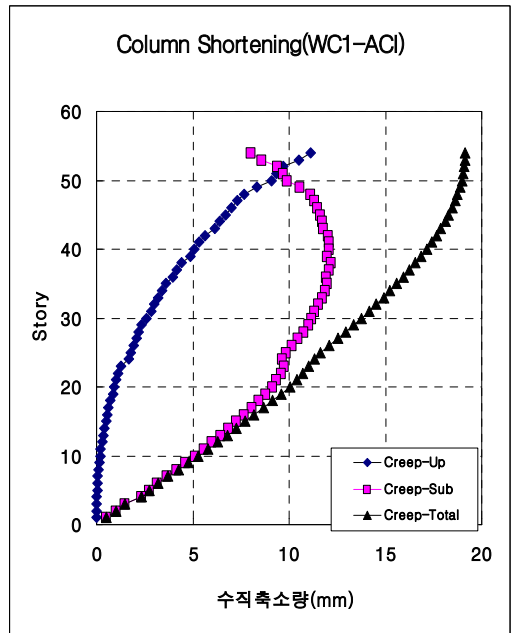


그림 4.3 WC1 기둥 크리프축소량(ACI)

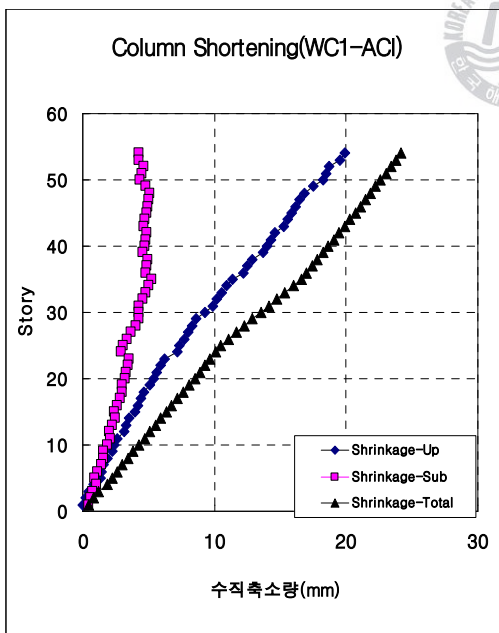


그림 4.4 WC1 기둥 건조수축축소량(ACI)

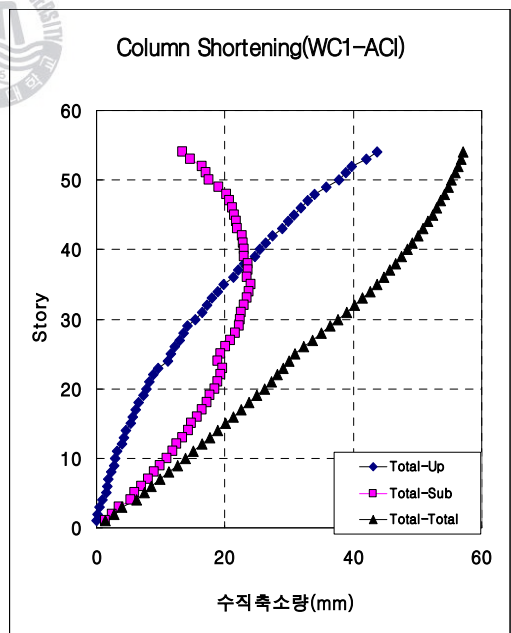


그림 4.5 WC1 기둥 전체축소량(ACI)

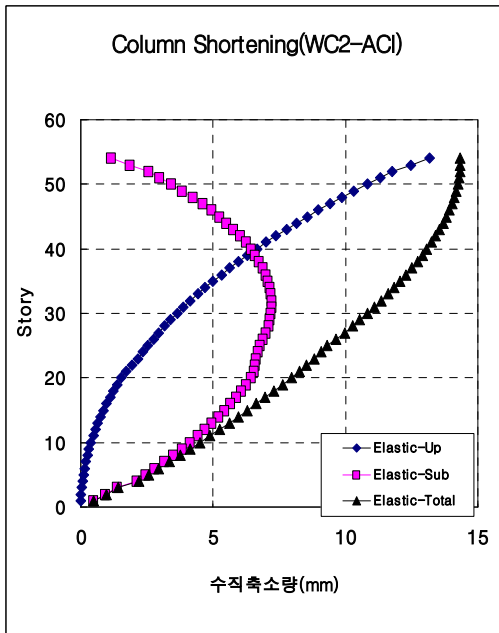


그림 4.6 WC2 기둥 탄성축소량(ACI)

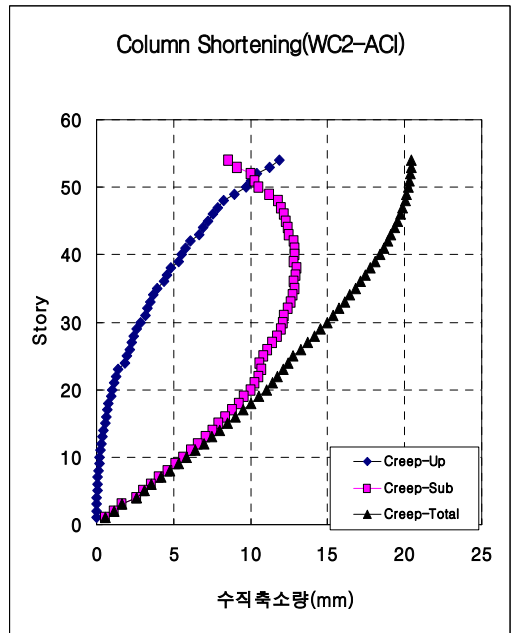


그림 4.7 WC2 기둥 크리프축소량(ACI)

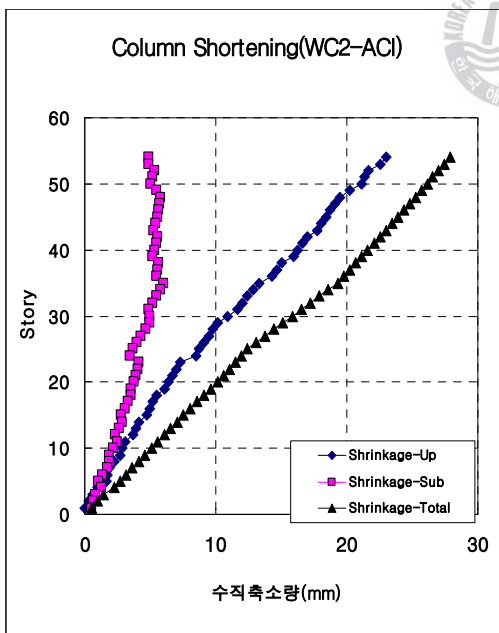


그림 4.8 WC2 기둥 건조수축축소량(ACI)

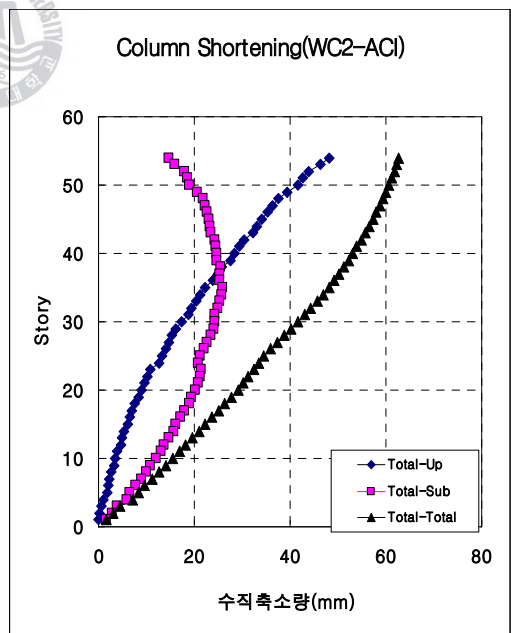


그림 4.9 WC2 기둥 전체축소량(ACI)

4.2.2 PCA 모델에 의한 결정론적 기둥축소량 해석 결과

ACI 모델식과 마찬가지로 CSA프로그램을 이용한 WC1 기둥과 WC2 기둥의 PCA 모델식 해석 결과는 표 4.3과 같이 나타난다. 표 4.2와 마찬가지로 각 축소량별 슬래브 타설 이후의 최대축소량과 발생층, 전체축소량과 발생층을 표로 나타내었다. 그림 4.10에서 그림 4.13은 WC1 기둥, 그림 4.14에서 그림 4.17은 WC2 기둥의 해석 결과 그래프로 탄성축소량, 크리프 축소량, 건조수축 축소량, 전체축소량으로 각각 나타내었다. 해석결과 그래프에서 알 수 있듯이 전체 축소량과 슬래브 타설 이전 축소량의 경우 최대 발생층은 건물의 최상층에서 발생하지만 슬래브 타설 이후의 축소량은 중간층에서 나타난다.

표 4.3 PCA 모델에 의한 해석 결과

(단위 : mm)

		탄성축소량		크리프 축소량		건조수축축소량		전체축소량	
		Subto	Total	Subto	Total	Subto	Total	Subto	Total
WC1	축소량	6.927	13.836	12.177	19.994	9.258	42.503	28.001	76.333
	발생층	32F	54F	38F	54F	35F	54F	35F	54F
	비율	18%		26%		56%		100%	
WC2	축소량	7.214	14.348	13.189	21.671	9.7	45.01	29.77	81.028
	발생층	31F	54F	38F	54F	35F	54F	35F	54F
	비율	18%		27%		55%		100%	

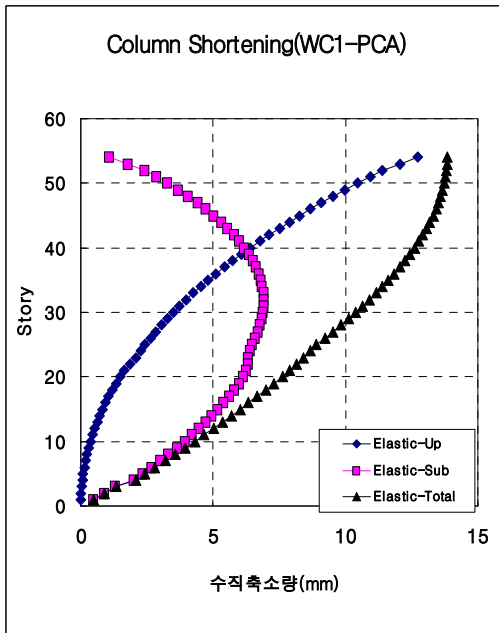


그림 4.10 WC1 기둥 탄성축소량(PCA)

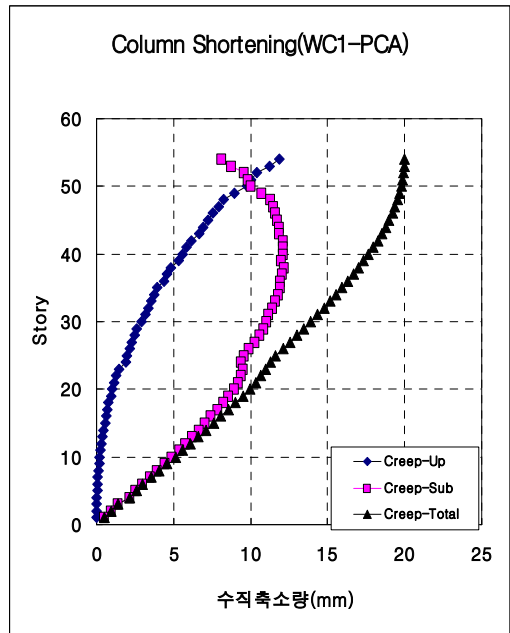


그림 4.11 WC1 기둥 크리프축소량(PCA)

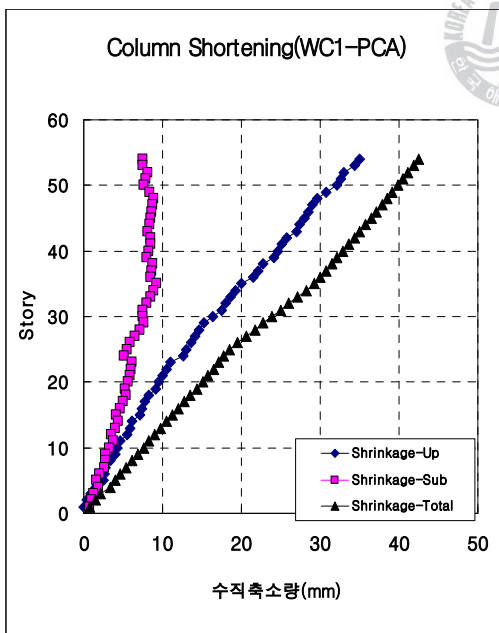


그림 4.12 WC1 기둥 건조수축축소량(PCA)

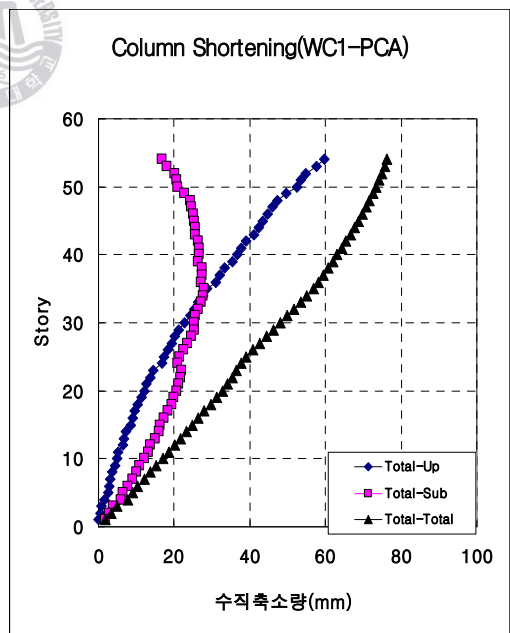


그림 4.13 WC1 기둥 전체축소량(PCA)

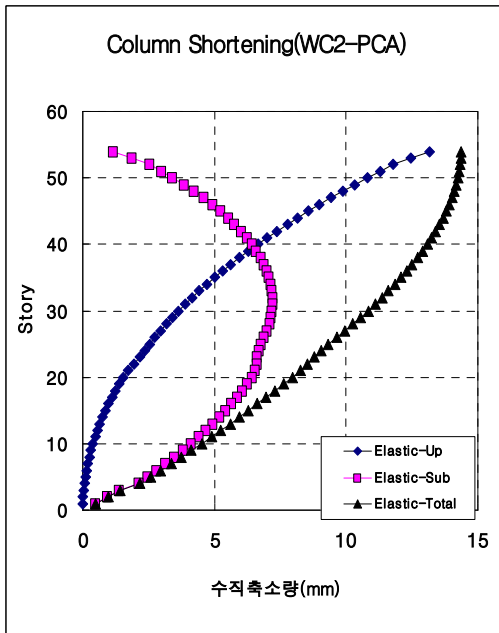


그림 4.14 WC2 기둥 탄성축소량(PCA)

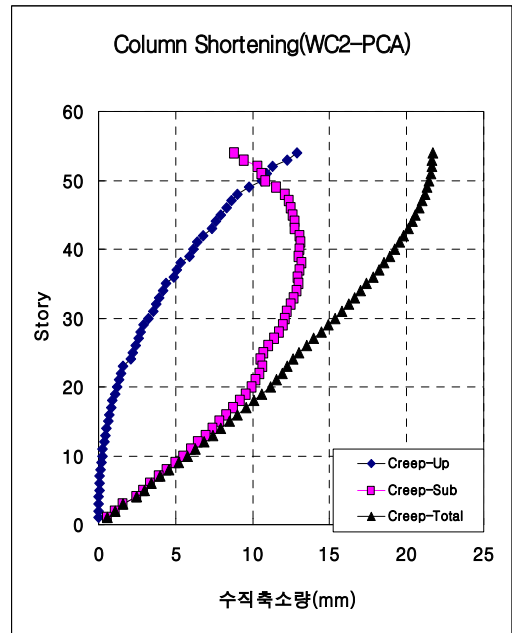


그림 4.15 WC2 기둥 크리프축소량(PCA)

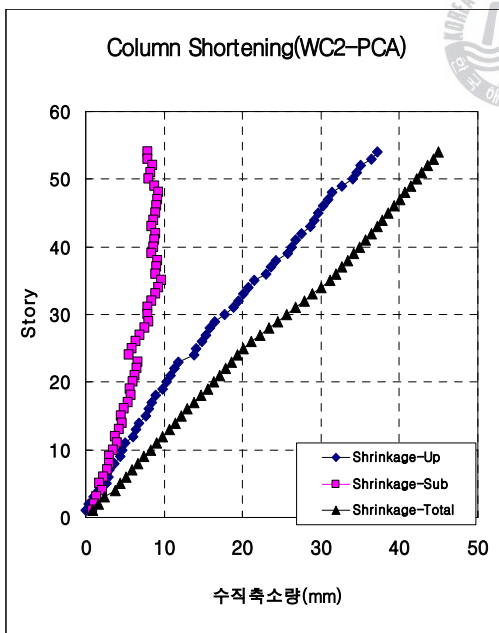


그림 4.16 WC2 기둥 건조수축축소량(PCA)

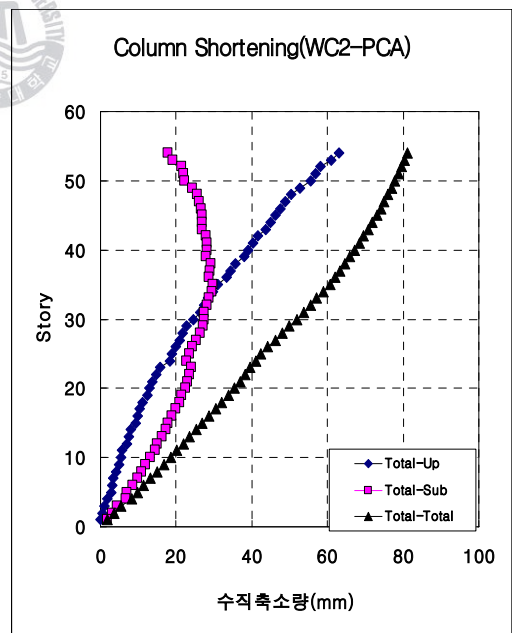


그림 4.17 WC2 기둥 전체축소량(PCA)

4.2.3 결정론적 기둥축소량 해석 결과 비교

표 4.4 ACI 모델과 PCA 모델에 의한 결정론적
해석 결과 비교

(단위 : mm)

	대상 부재	크리프 축소량		건조수축 축소량		전체축소량	
		Subto	Total	Subto	Total	Subto	Total
ACI	WC1	12.167	19.129	5.262	24.154	24.245	57.119
PCA		12.177	19.994	9.258	42.503	28.001	76.333
비율		100%	105%	176%	176%	115.5%	133.6%
ACI	WC2	12.997	20.431	6.013	27.907	25.943	62.686
PCA		13.189	21.671	9.7	45.01	29.77	81.028
비율		101.5%	106.1%	161.3%	161.3%	114.8%	129.3%

표 4.4는 ACI 모델과 PCA 모델에 의한 결정론적 해석 결과 비교표이다. Subto 축소량이 약 114~116%, 전체축소량이 약 129~134%로 PCA 모델이 크게 나타나는 것은 2장에서 언급한바와 같이 두 모델에서 비탄성 축소량을 계산하는 식이 서로 다르기 때문이다. 크리프 축소량의 하중작용시점 재령효과 (CR_{la})와 체적-표면적비 효과(CR_{vs}), 그리고 건조수축 축소량의 체적-표면적비 효과(SH_{vs}) 값이 다르게 계산되기 때문에 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 건조수축 축소량의 경우는 1.6배 이상의 큰 차이를 보이고 있다. 표 4.5는 비탄성 축소량 계산식을 비교한 표이다.

표 4.5 ACI 모델과 PCA 모델의 비탄성축소량 계산식 비교

비탄성축소량		ACI	PCA
크리프	CR_{la}	$1.25(t_{la})^{-0.118}$	$2.3(t_{la})^{-0.25}$
	CR_{vs}	$\frac{2}{3}(1 + 1.13e^{-0.54v/s})$	$\frac{0.044(v/s) + 0.934}{0.10(v/s) + 0.85}$
건조수축	SH_{vs}	$1.2e^{-0.12v/s}$	$\frac{0.037(v/s) + 0.944}{0.177(v/s) + 0.734}$

4.3 확률론적 기둥축소량 해석

콘크리트 강도, 크리프계수, 건조수축계수의 3가지 확률변수를 가정하여 개발된 확률론적 기둥축소량 해석프로그램을 사용하여 예제 건물의 축소량을 해석하고 그 결과값을 분석한다. 예제 건물에서 산출된 각 축소량별 평균과 표준편차를 이용하여 신뢰구간별 축소량의 변화량을 비교한다.

4.3.1 슬래브 타설이후 축소량 확률론적 해석 결과

확률론적 방법에 의한 슬래브 타설이후 최대 부등축소량의 계산은 결정론적 방법에 의한 슬래브 타설이후 부등축소량 계산 값에서 부등축소량이 최대가 되는 층을 먼저 파악한다. 그리고 최대가 되는 층에 대해서 확률론적 방법에 의한 슬래브 타설이후의 축소량을 구해준다. 확률론적 방법에 의한 최대 부등축소량이 발생하는 층의 결과 값은 이렇게 얻을 수 있다.

그림 4.18은 ACI 모델을 사용한 결정론적 방법에 의한 슬래브 타설이후의 부등축소량 그래프이다. 이 그래프에서 최대 부등축소량은 23층에서 생기는 것을 알 수 있다.

그림 4.19~그림 4.24는 ACI 모델을 사용한 WC1 기둥과 WC2 기둥의 23층의 슬래브 타설이후 탄성, 크리프, 건조수축 각각의 축소량에 대한 10,000개의 데이터를 히스토그램으로 나타낸 그래프이다. 이를 근거로 각 축소량에 대한 평균을 계산하였으며, 계산된 평균을 나타낸 그림이 그림 4.25와 그림 4.26이다. 그림 4.25는 ACI 모델의 WC1 기둥, 그림 4.26은 WC2 기둥의 슬래브 타설이후 시점에 대한 축소량 그래프이다.

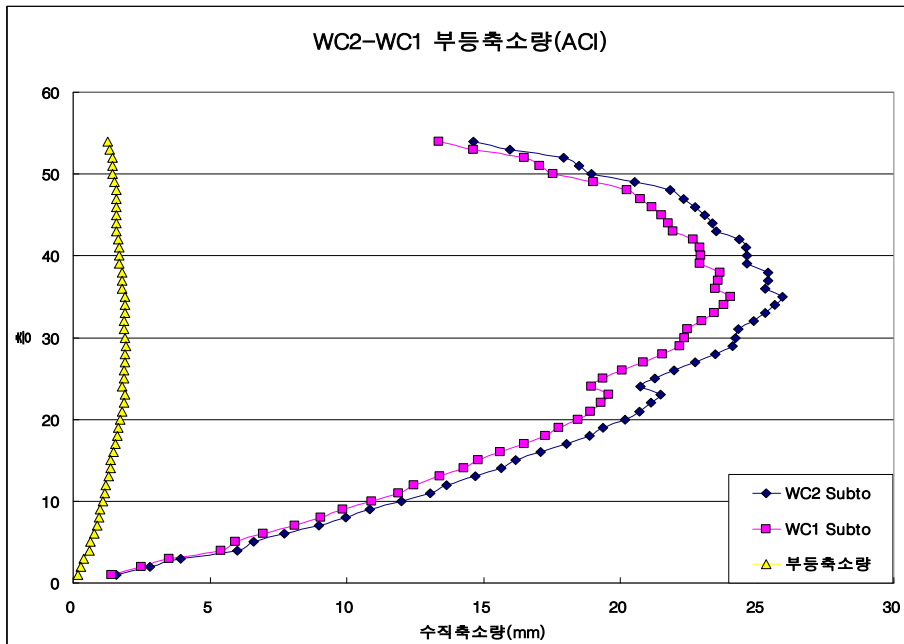


그림 4.18 결정론적 방법에 의한 슬래브 타설이후 부등축소량(ACI)

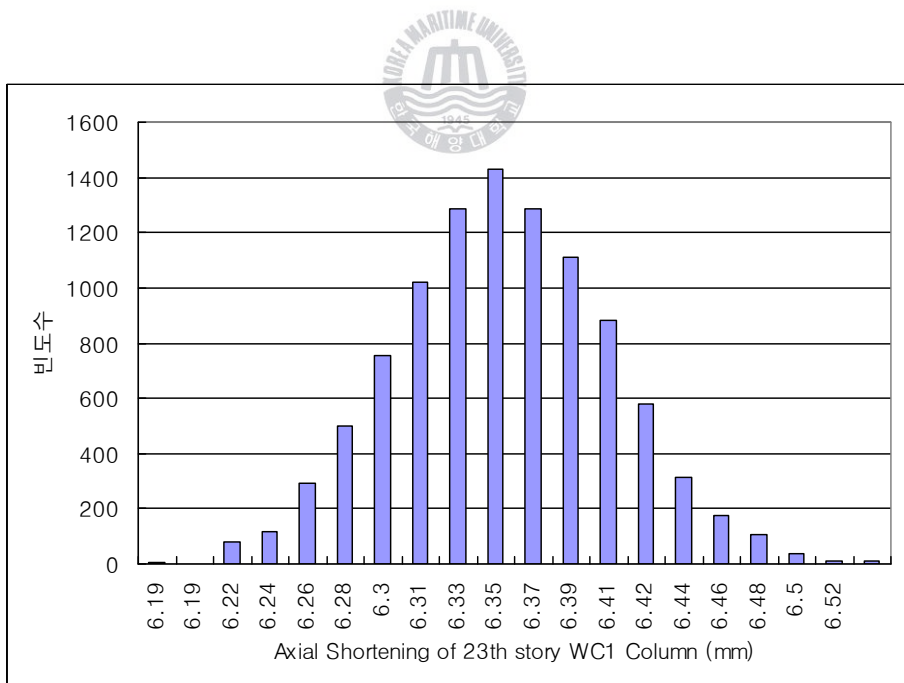


그림 4.19 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC1 기둥의 탄성 축소량 히스토그램(ACI)

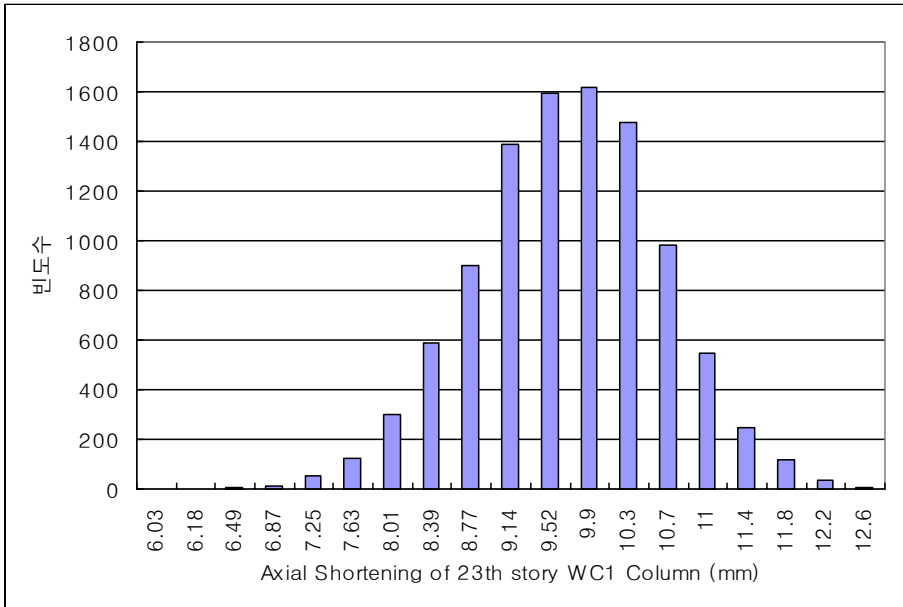


그림 4.20 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC1 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(ACI)

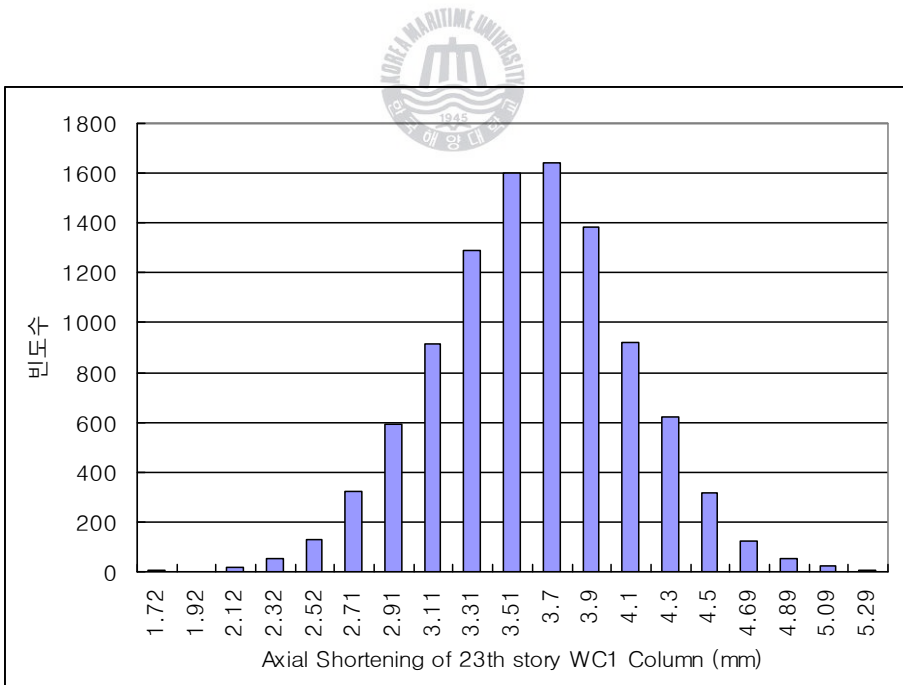


그림 4.21 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC1 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)

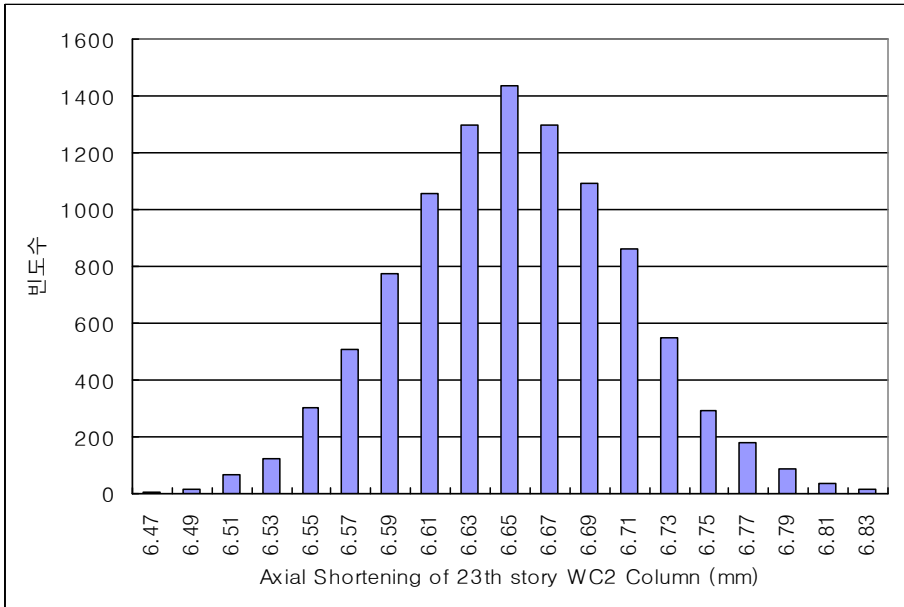


그림 4.22 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC2 기둥의 탄성 축소량 히스토그램(ACI)

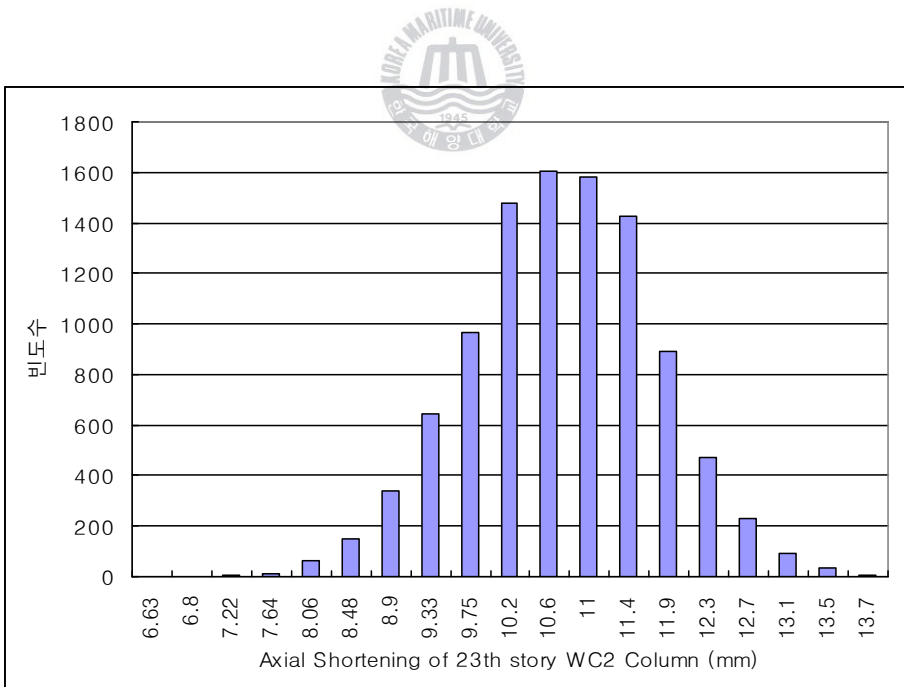


그림 4.23 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC2 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(ACI)

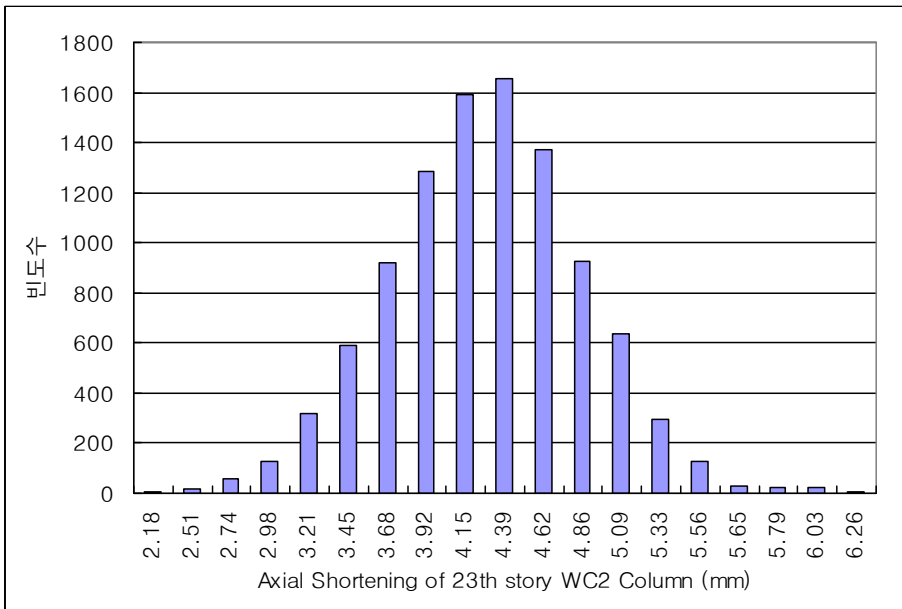


그림 4.24 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC2 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)

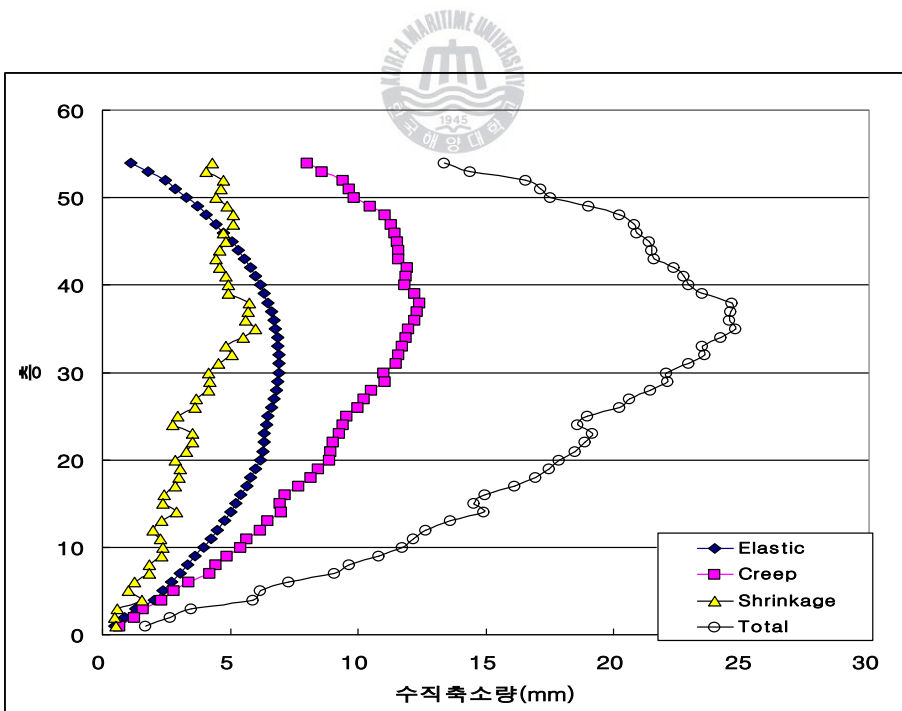


그림 4.25 확률론적 방법에 의한 WC1기둥의 슬래브 타설이후
발생하는 축소량(ACI)

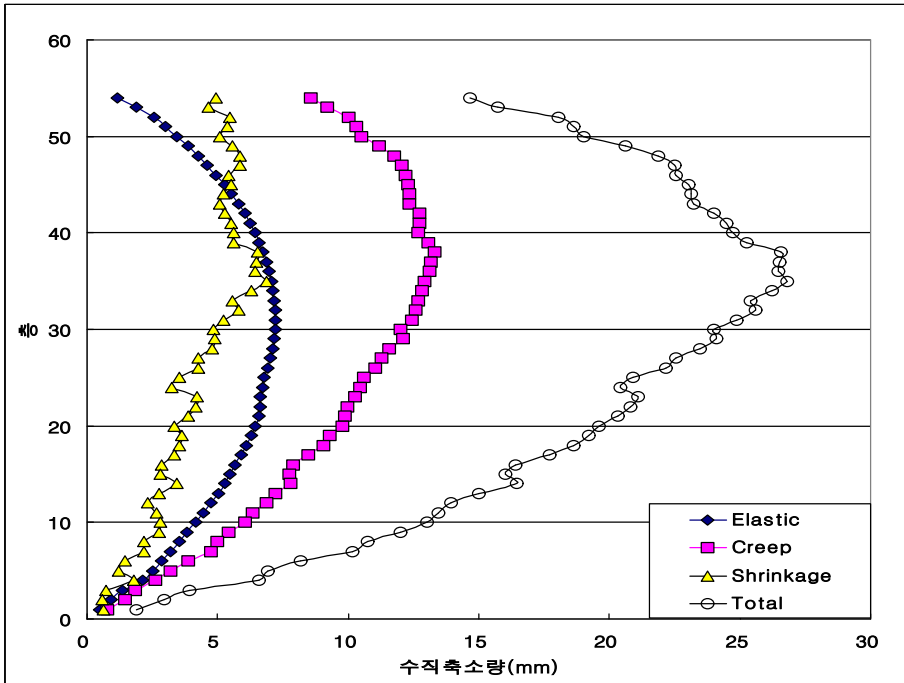


그림 4.26 확률론적 방법에 의한 WC2기둥의 슬래브 타설이후 발생하는 축소량(ACI)

그림 4.27은 PCA 모델을 사용한 결정론적 방법에 의한 슬래브 타설이후의 부등축소량 그래프이다. 앞의 ACI 모델 결과와 마찬가지로 PCA 모델을 이용한 결정론적 해석 결과 값에서 슬래브 타설이후 부등축소량의 최대가 되는 층을 파악한 후 확률론적 방법에 의한 슬래브 타설이후의 축소량을 구해준다. 이 그래프에서 최대 부등축소량은 23층에서 생기는 것을 알 수 있다.

그림 4.28~그림 4.33은 PCA 모델을 사용한 WC1 기둥과 WC2 기둥의 23층의 슬래브 타설이후 탄성, 크리프, 건조수축 각각의 축소량에 대한 10,000개의 데이터를 히스토그램으로 나타낸 그래프이다. 그림 4.34는 PCA 모델의 WC1 기둥, 그림 4.35는 WC2 기둥의 슬래브 타설이후 시점에 대한 축소량 그래프이다.

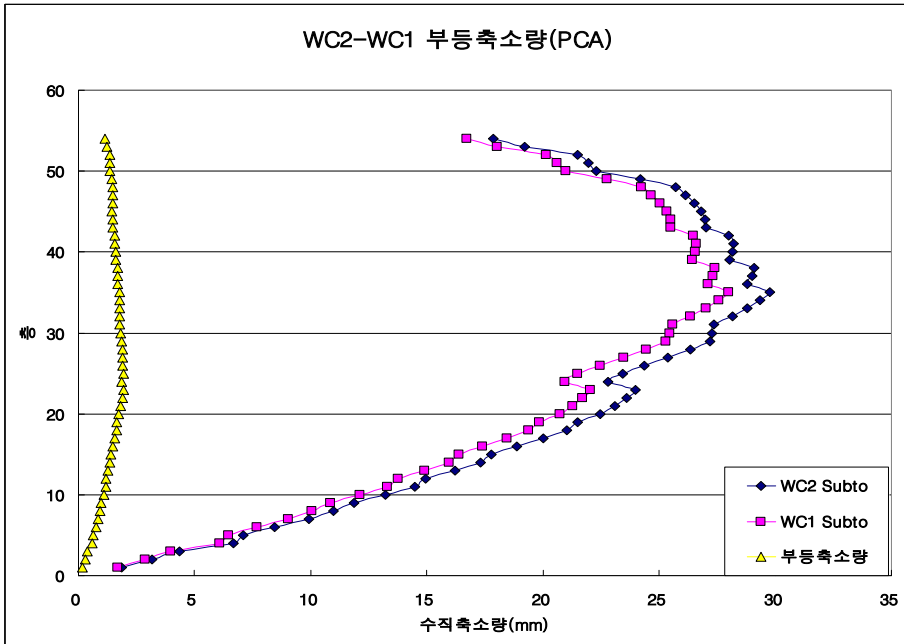


그림 4.27 결정론적 방법에 의한 슬래브 타설이후 부등축소량(PCA)

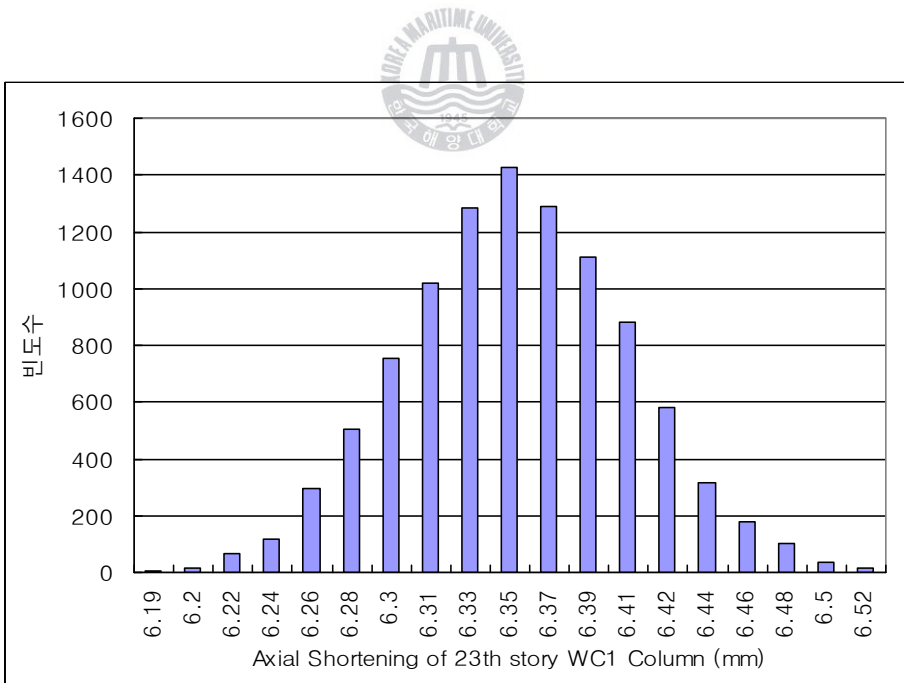


그림 4.28 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의 WC1 기둥의 탄성 축소량 히스토그램(PCA)

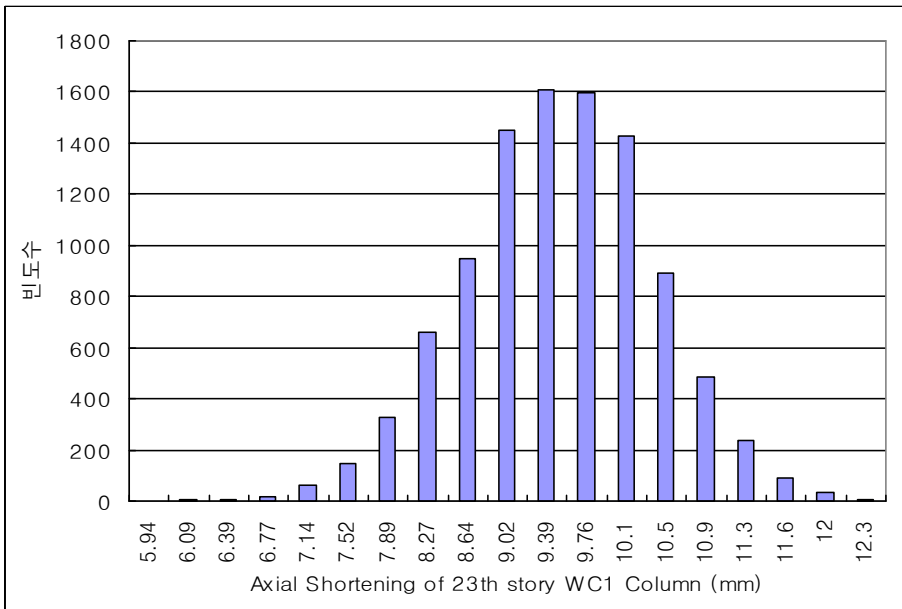


그림 4.29 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC1 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(PCA)

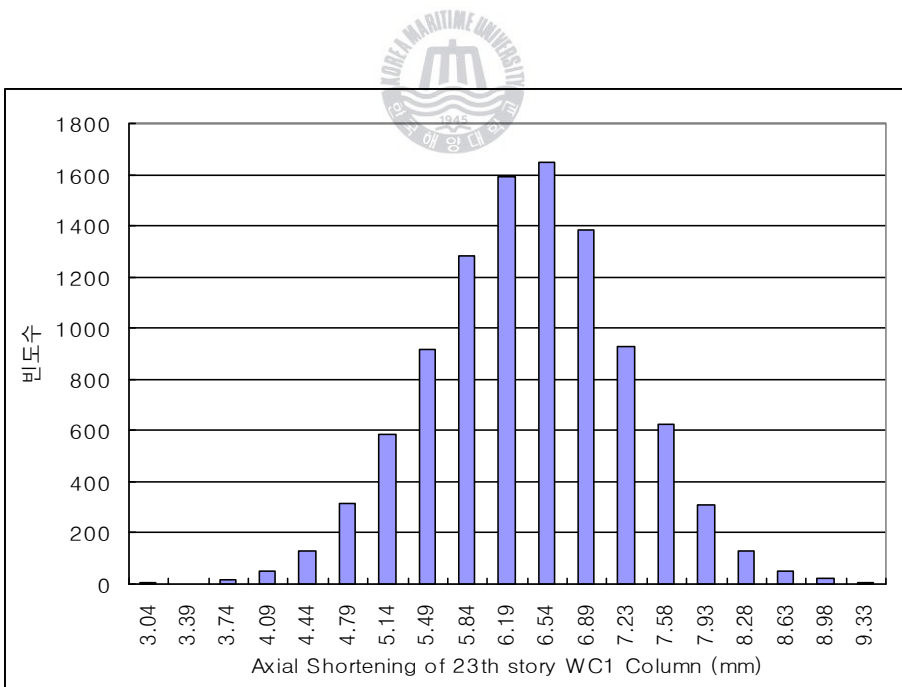


그림 4.30 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC1 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)

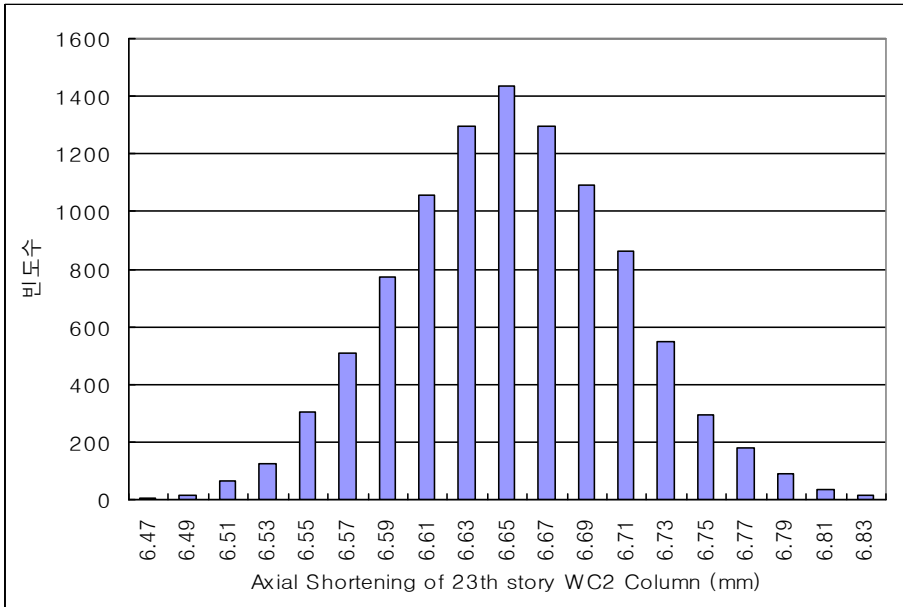


그림 4.31 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC2 기둥의 탄성 축소량 히스토그램(PCA)

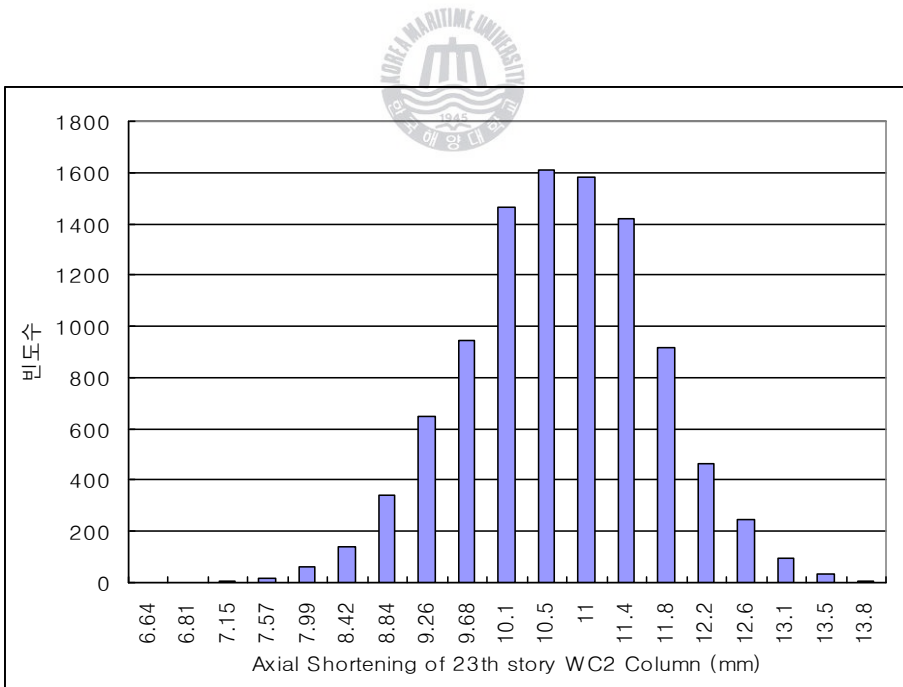


그림 4.32 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC2 기둥의 크리프 축소량 히스토그램(PCA)

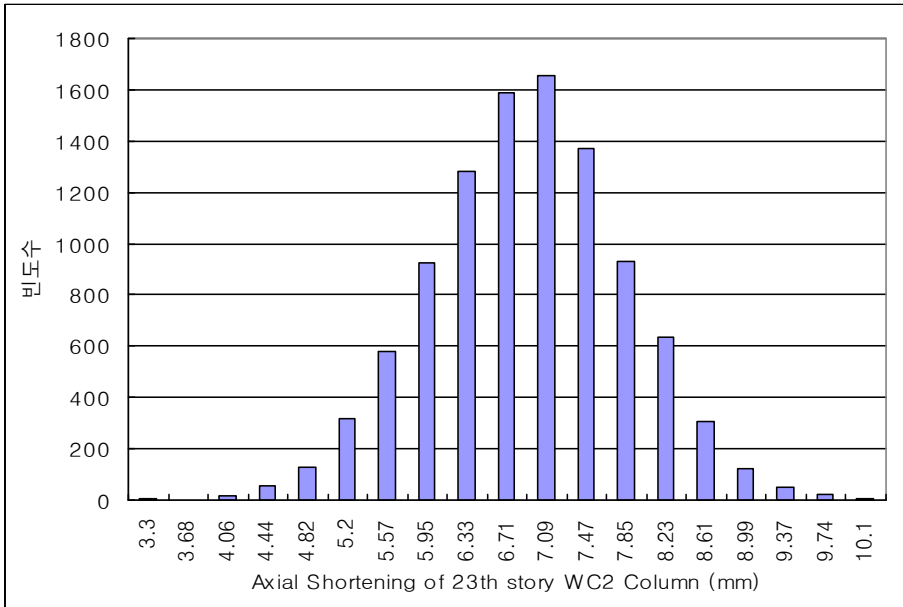


그림 4.33 시뮬레이션 10000회에 대한 슬래브 타설이후의
WC2 기둥의 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)

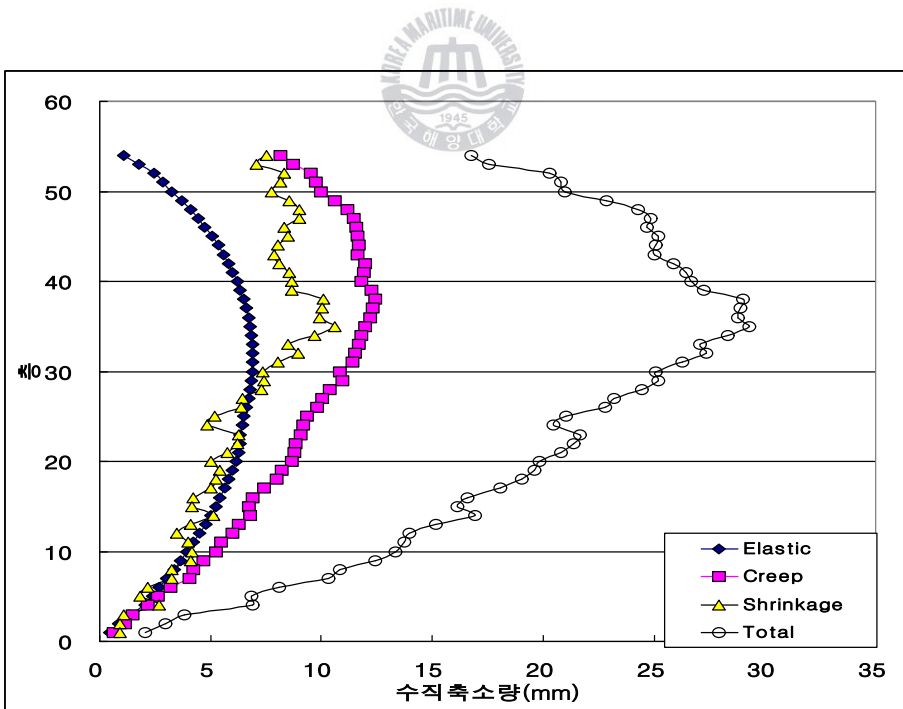


그림 4.34 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 슬래브 타설이후
발생하는 축소량(PCA)

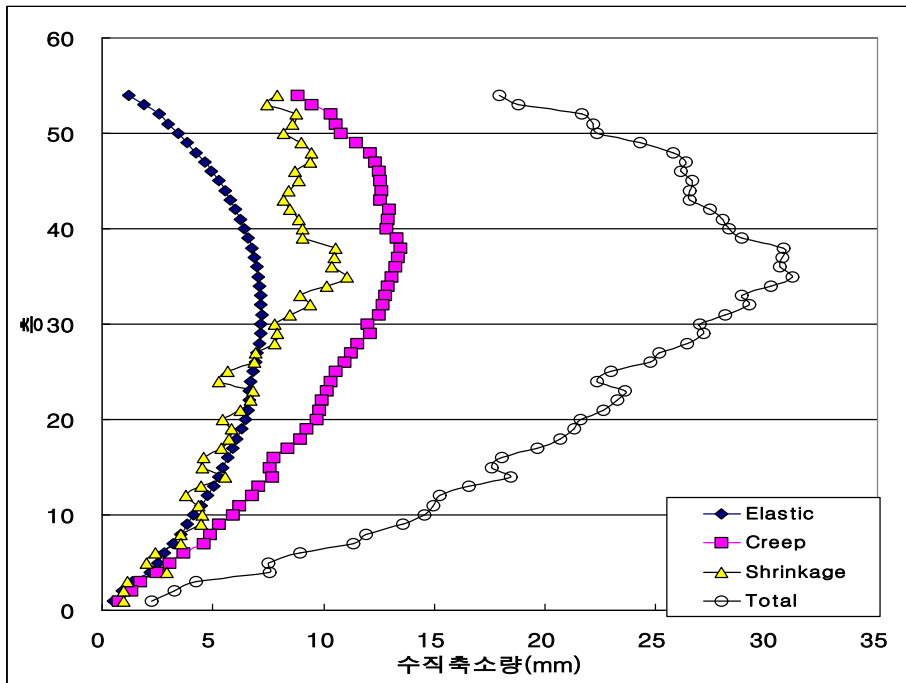


그림 4.35 확률론적 방법에 의한 WC2 기둥의 슬래브 타설이후 발생하는 축소량(PCA)

4.3.2 전체 축소량 확률론적 해석 결과

확률론적 방법에 의한 전체축소량 해석은 결정론적 방법의 전체축소량과 마찬가지로 슬래브 타설이전의 축소량과 슬래브 타설이후의 축소량의 합과 같다.

전체축소량의 해석도 슬래브 타설이후의 축소량과 마찬가지로 데이터의 정확성을 기하기 위해 시뮬레이션 반복횟수를 10,000회로 하였다.

그림 4.36~그림 4.41은 ACI 모델을 사용한 WC1 기둥과 WC2 기둥에 대한 탄성, 크리프, 건조수축 축소량을 각각의 히스토그램으로 나타낸 것이고, 그림 4.42와 그림 4.43은 ACI 모델의 WC1 기둥과 WC2 기둥 각각의 전체축소량을 나타내는 그래프이다.

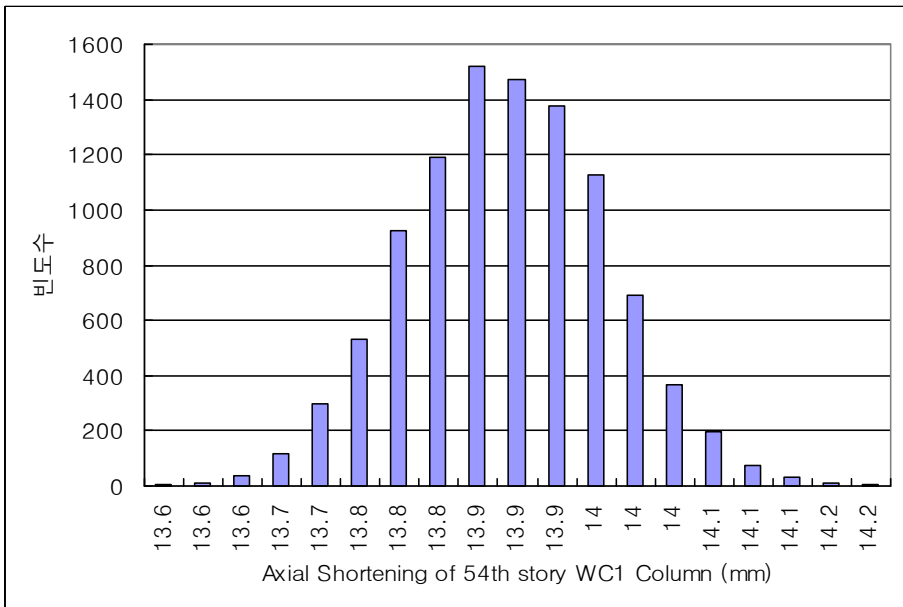


그림 4.36 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의
전체 탄성 축소량 히스토그램(ACI)

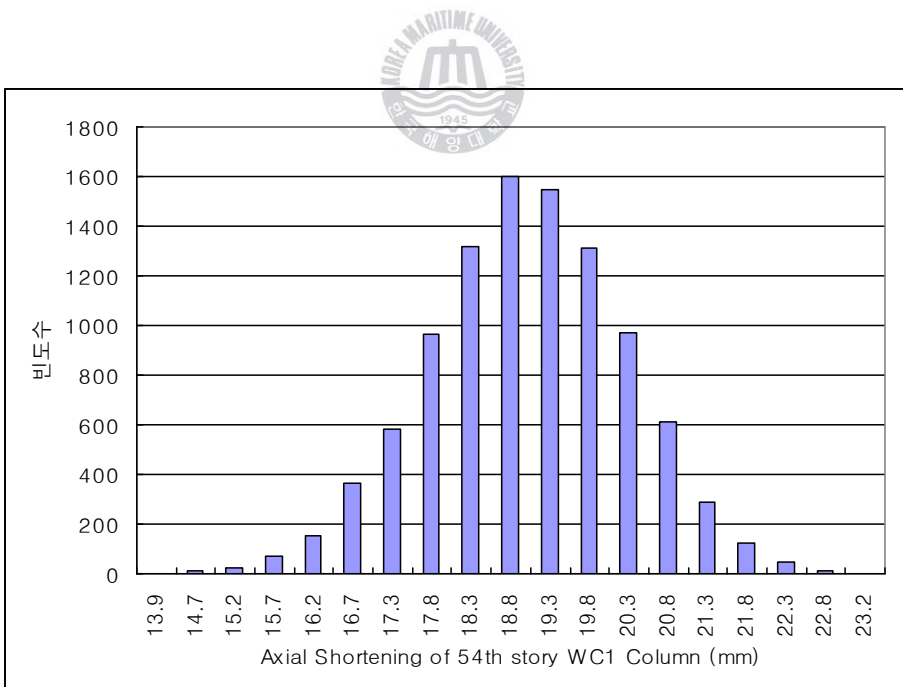


그림 4.37 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의
전체 크리프 축소량 히스토그램(ACI)

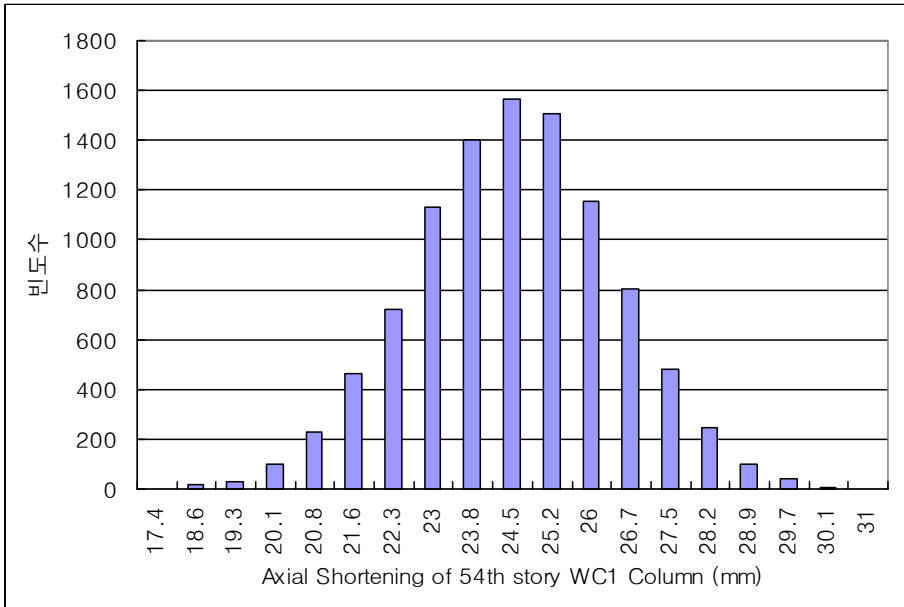


그림 4.38 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의
전체 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)

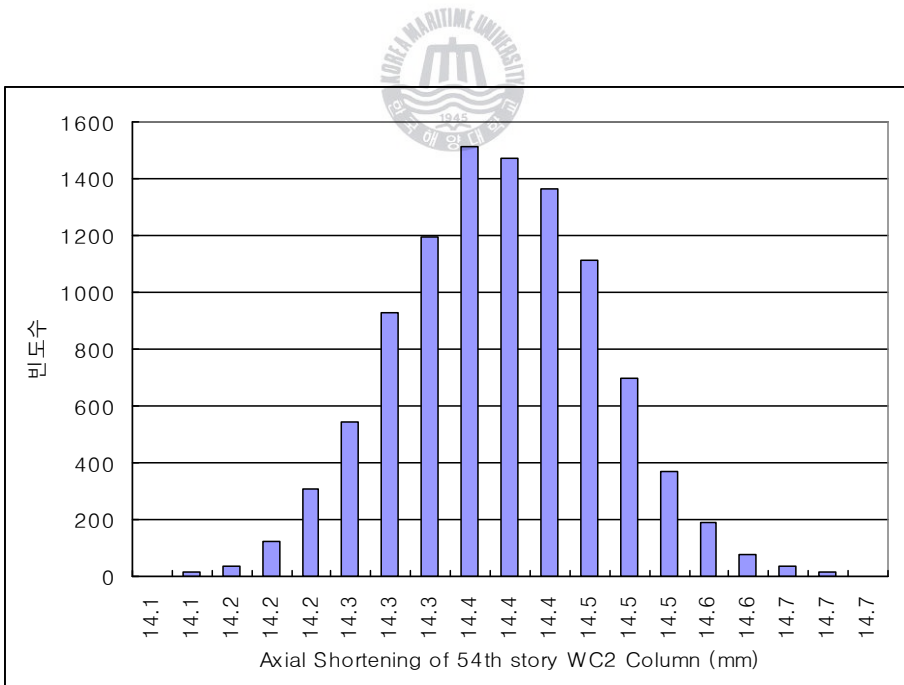


그림 4.39 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의
전체 탄성 축소량 히스토그램(ACI)

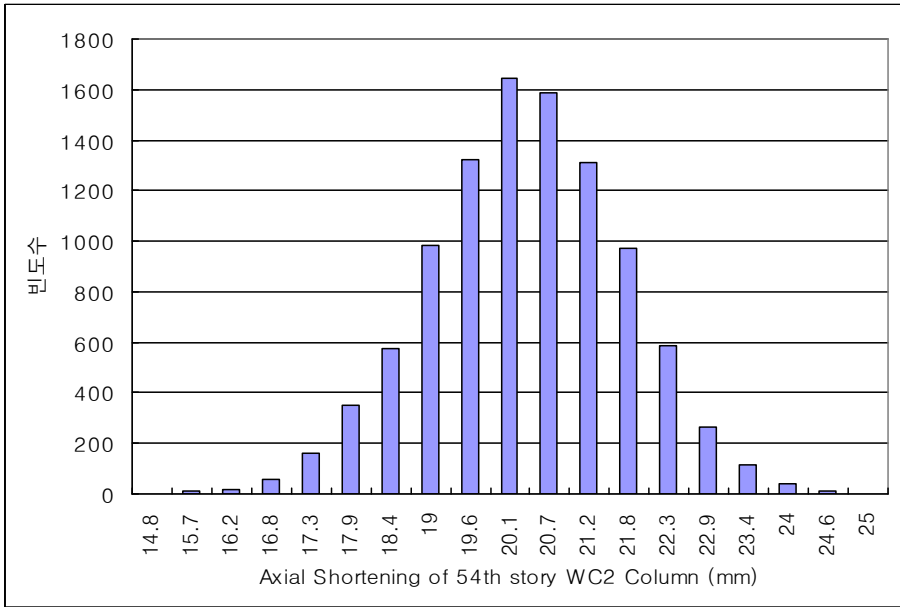


그림 4.40 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의
전체 크리프 축소량 히스토그램(ACI)

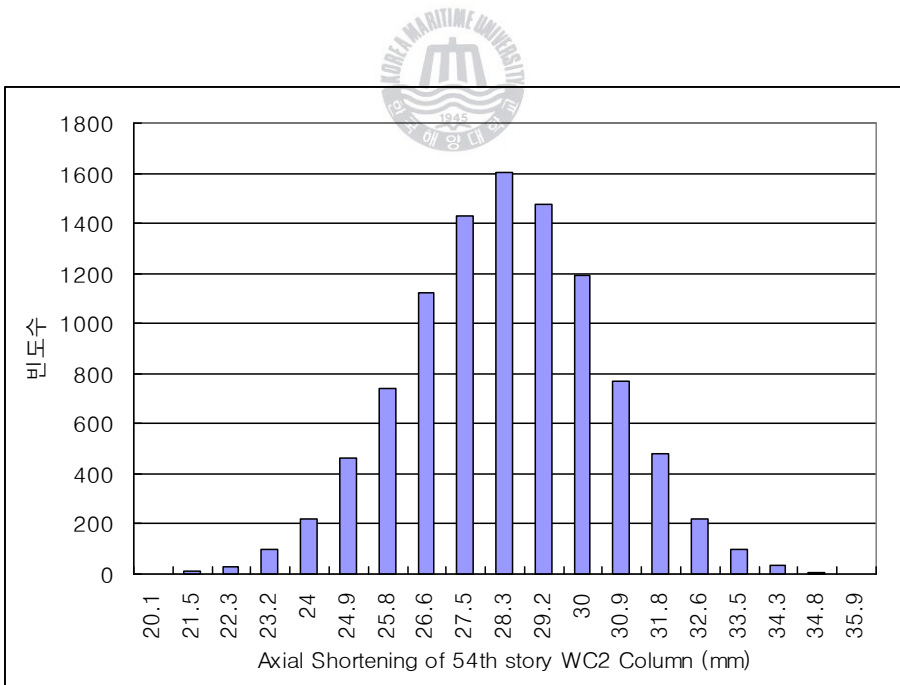


그림 4.41 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의
전체 건조수축 축소량 히스토그램(ACI)

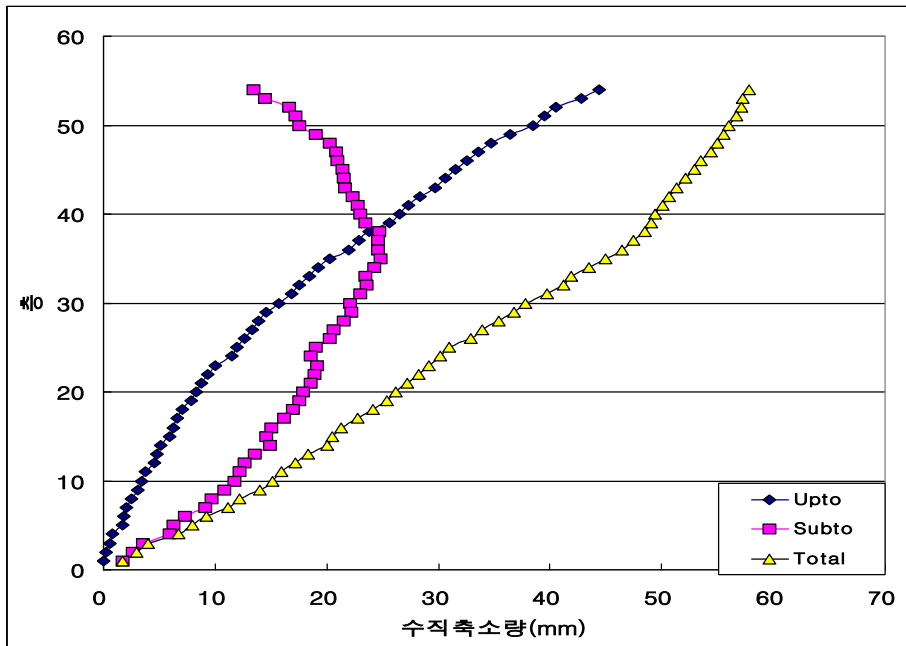


그림 4.42 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 전체축소량(ACI)

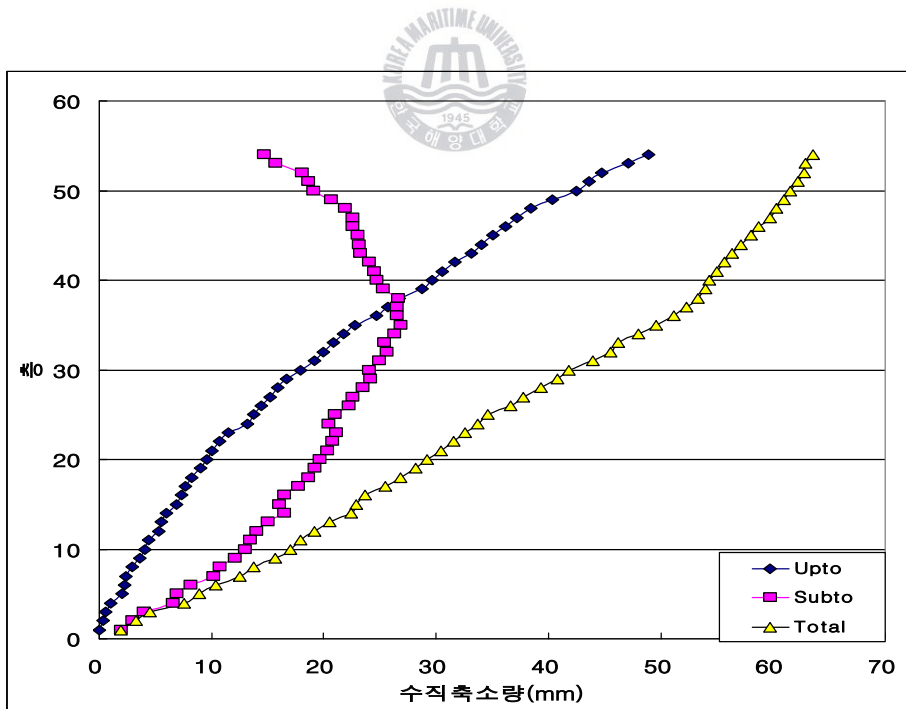


그림 4.43 확률론적 방법에 의한 WC2 기둥의 전체축소량(ACI)

그림 4.44~그림 4.49는 PCA 모델을 사용한 WC1 기둥과 WC2 기둥에 대한 탄성, 크리프, 건조수축 축소량을 각각의 히스토그램으로 나타낸 것이고, 그림 4.50과 그림 4.51은 PCA 모델의 WC1 기둥과 WC2 기둥 각각의 전체축소량을 나타내는 그래프이다.

PCA 모델을 이용한 확률론적 방법에 의한 전체축소량 해석도 앞의 ACI 모델과 마찬가지로 슬래브 타설이전의 축소량과 슬래브 타설이후의 축소량의 합과 같다. 또한 데이터의 정확성을 기하기 위한 시뮬레이션 반복횟수도 10,000회로 같이 하였다.

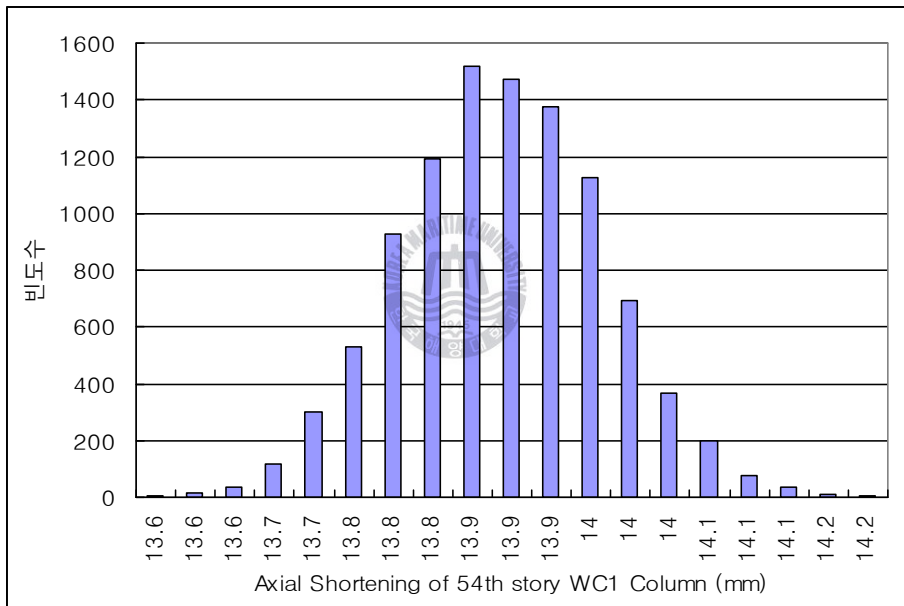


그림 4.44 시뮬레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의
전체 탄성 축소량 히스토그램(PCA)

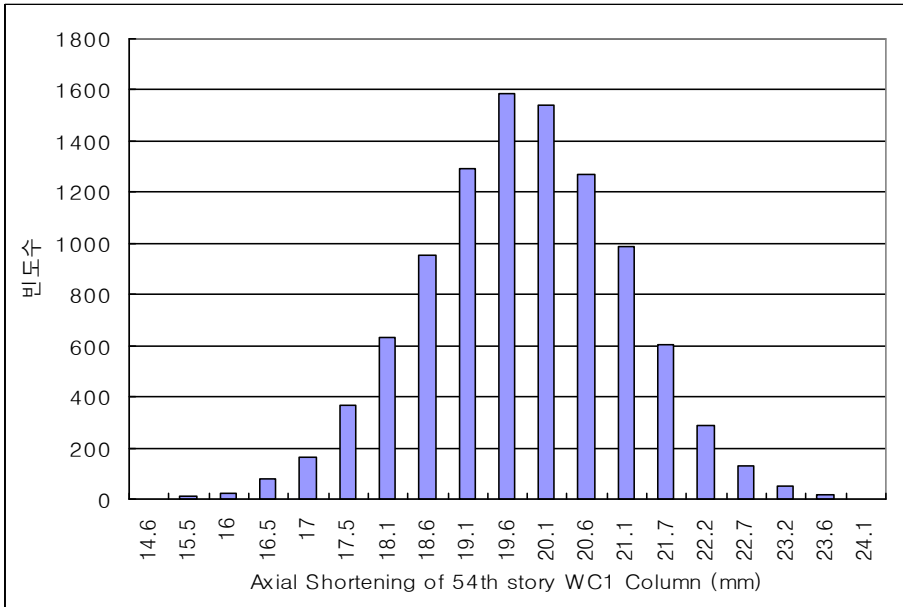


그림 4.45 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의
전체 크리프 축소량 히스토그램(PCA)

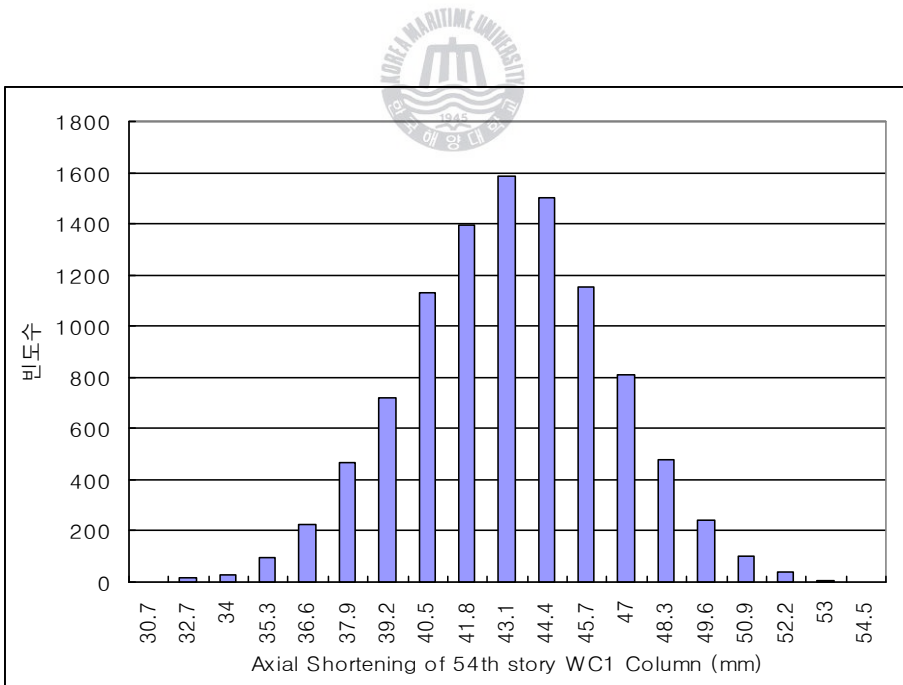


그림 4.46 시물레이션 10000회에 대한 WC1 기둥의
전체 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)

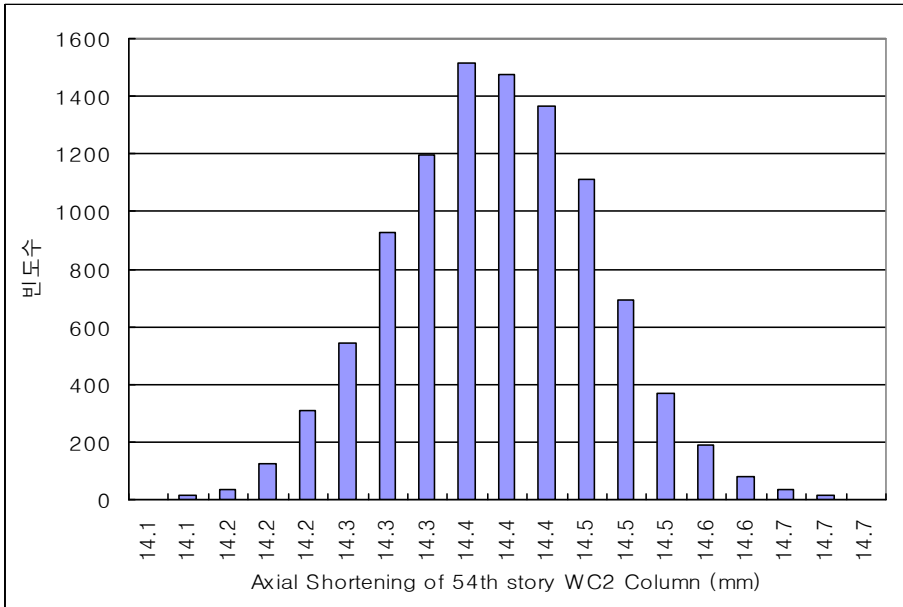


그림 4.47 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의
전체 탄성 축소량 히스토그램(PCA)

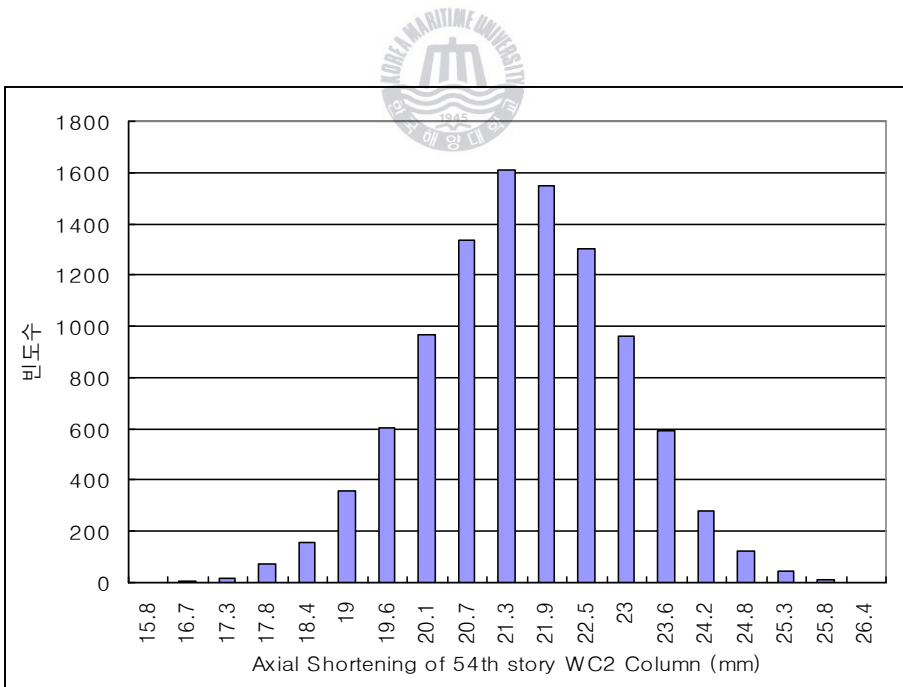


그림 4.48 시물레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의
전체 크리프 축소량 히스토그램(PCA)

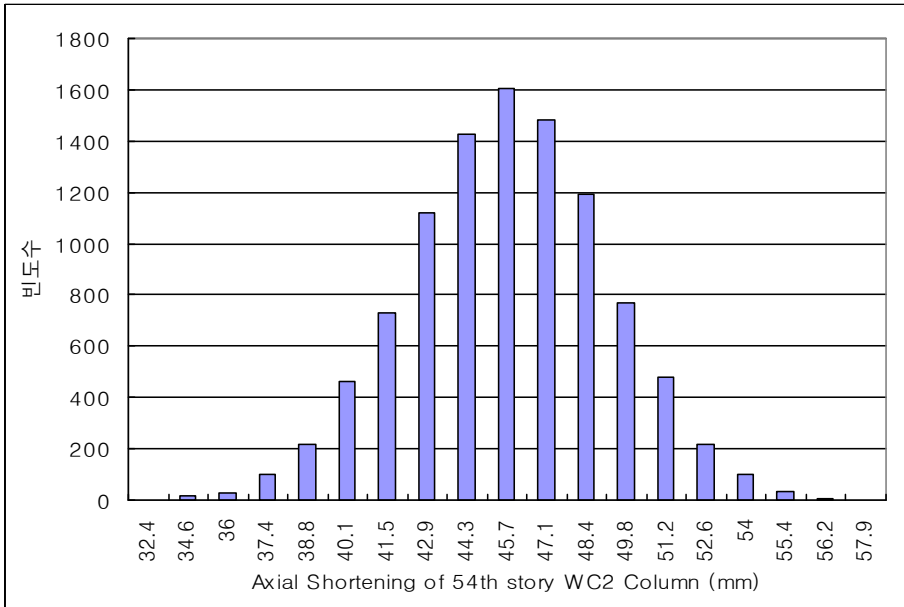


그림 4.49 시뮬레이션 10000회에 대한 WC2 기둥의
전체 건조수축 축소량 히스토그램(PCA)

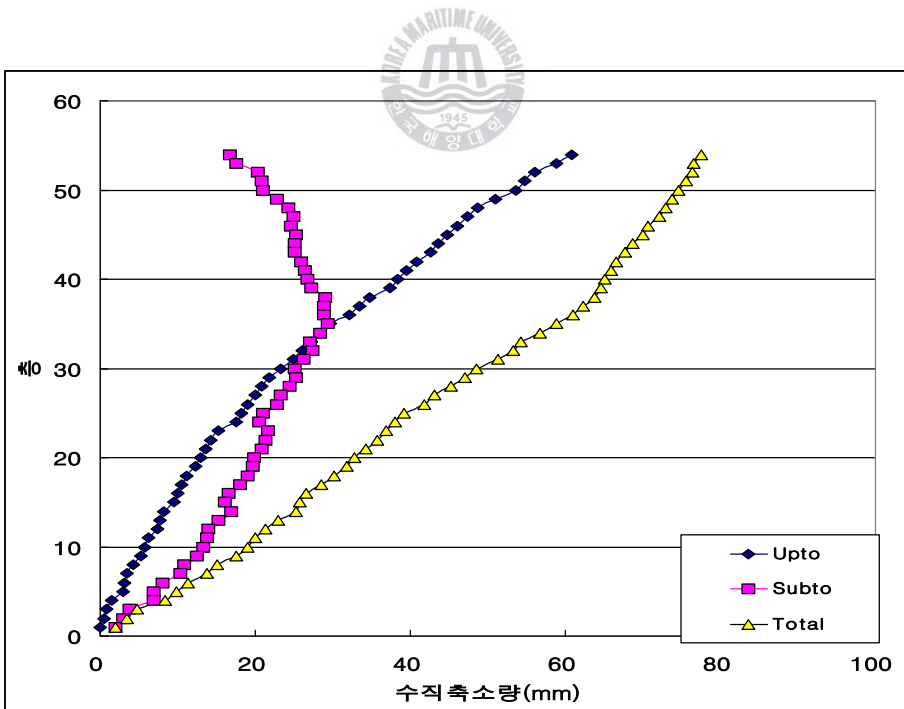


그림 4.50 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 전체축소량(PCA)

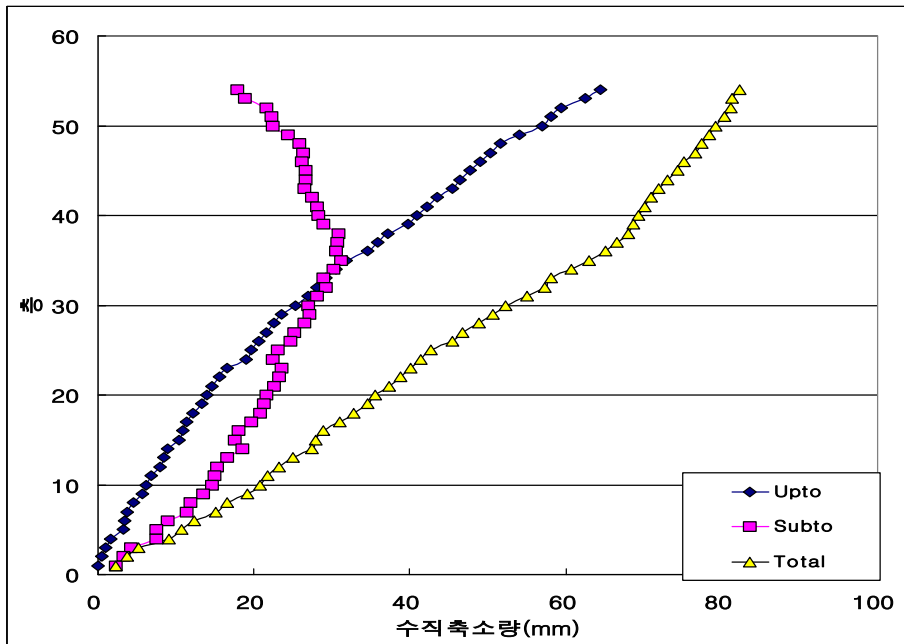


그림 4.51 확률론적 방법에 의한 WC2 기둥의 전체축소량(PCA)

4.3.3 신뢰구간별 축소량



시뮬레이션 10,000회의 확률론적 방법에 의해서 산출된 각 축소량별 평균값과 분산값은 신뢰구간별 축소량의 범위를 조사하는데 기초가 된다.

기후 환경이나 재료 성질의 불규칙성으로 인해 구조물의 정확한 축소량을 예측할 수가 없는 결정론적 방법은, 특히나 초고층 구조물에서는 예상되는 범위를 벗어나는 일이 발생할 확률이 높다. 따라서 확률론적 방법에 의해서 구한 각 축소량별 데이터를 기초로 하여 신뢰구간의 폭에 따라 축소량의 변화도를 나타내고, 결정론적 방법에 의해서 계산된 축소량과 비교하기 위해 신뢰구간별 최대축소량과 최소축소량의 범위를 분석한다.

표 4.6은 54층 건물에서 발생하는 전체축소량에 대한 히스토그램 분석 결과이고, 표 4.7은 슬래브 타설이후에 발생하는 축소량에 대한 데이터를 분석한 것으로, 23층에 대한 데이터 분석 값이다.

표 4.6 각 축소량별 전체축소량 히스토그램 데이터 분석

(단위 : mm)

		WC1			WC2		
		탄 성	크리프	건조수축	탄 성	크리프	건조수축
ACI	평 균	13.863	18.731	24.175	14.377	20.058	27.922
	표준편차	0.087	1.255	1.868	0.092	1.36	2.151
PCA	평 균	13.863	19.55	42.537	14.377	21.237	45.034
	표준편차	0.087	1.304	3.287	0.092	1.429	3.47
비 율	평 균	100%	104.4%	176%	100%	105.9%	161.3%
	표준편차	100%	103.9%	176%	100%	105.1%	161.3%

표 4.7 각 축소량별 슬래브 타설이후 최대축소량

히스토그램 데이터 분석

(단위 : mm)

		WC1			WC2		
		탄 성	크리프	건조수축	탄 성	크리프	건조수축
ACI	평 균	6.345	9.514	3.512	6.642	10.501	4.159
	표준편차	0.052	0.899	0.486	0.056	0.999	0.576
PCA	평 균	6.345	9.319	6.2	6.642	10.452	6.724
	표준편차	0.052	0.89	0.858	0.056	1.004	0.931
비 율	평 균	100%	98%	176.5%	100%	99.5%	161.7%
	표준편차	100%	99%	176.5%	100%	100.5%	161.6%

표 4.6과 표 4.7의 ACI 모델 분석 값과 PCA 모델 분석 값을 비교해보면 앞의 4.2.3절에서 마찬가지로 전체적으로 PCA 모델에 의한 결과 값이 크게 나타나는데, 특히 건조수축 축소량은 1.6배 이상으로 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다. 탄성축소량은 ACI 모델과 PCA 모델이 같은 식을 사용하기 때문에 차이가 없다.

표 4.6과 표 4.7의 데이터를 기준으로 각 신뢰구간별 축소량의 범위를 산출할 수 있다. 각 축소량의 데이터를 조합하고 정규분포의 평균(μ)과 표준편차(σ)를 이용하여 축소량별 신뢰구간의 폭에 따라 그림 4.52와 같은 신뢰수준을 얻을 수 있다. 정규분포 그래프에서 신뢰구간이 $\mu \pm \sigma$ 일 때의 신뢰수준은 68.26%이고, $\mu \pm 1.645\sigma$ 일 때의 신뢰수준은 90.00%, 그리고 $\mu \pm 2\sigma$ 일 때의 신뢰수준은 95.44%의 확률적 분포를 보여주게 된다.

이러한 신뢰구간의 개념을 각 축소량별 평균값과 표준편차의 데이터 값과 부합시켜 실제 구조물에 발생할 수 있는 축소량의 범위를 추정할 수 있다.

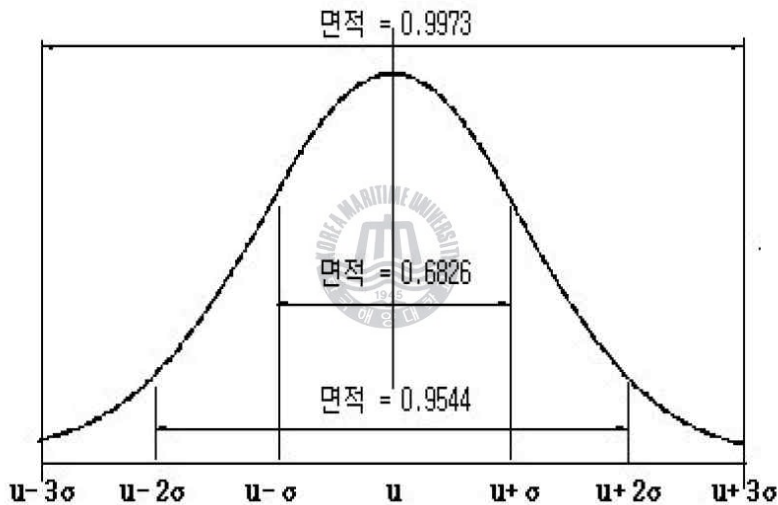


그림 4.52 신뢰수준에 따른 정규분포의 확률

표 4.8과 표 4.9에서는 각 신뢰구간에 대한 축소량의 상한값과 하한값을 계산한 것이다. 표 4.8은 신뢰구간별 슬래브 타설이후 발생한 축소량이며, 표 4.9는 신뢰구간별 전체축소량을 나타낸다.

표 4.8 신뢰구간별 슬래브 타설이후 축소량

(단위 : mm)

신뢰구간 축소량 종류			$\mu + \sigma \leq X \leq \mu - \sigma$ (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%)	
			ACI	PCA	ACI	PCA	ACI	PCA
WC1	탄 성	upper	6.397	6.397	6.431	6.431	6.45	6.45
		lower	6.293	6.293	6.259	6.259	6.24	6.24
	크리프	upper	10.413	10.208	10.992	10.782	11.312	11.098
		lower	8.615	8.429	8.036	7.855	7.717	7.54
	건조수축	upper	3.999	7.058	4.312	7.611	4.485	7.916
		lower	3.026	5.342	2.712	4.789	2.54	4.485
	전 체	upper	20.396	23.102	21.056	23.9	21.42	24.34
		lower	18.347	20.626	17.686	19.827	17.323	19.387
WC2	탄 성	upper	6.698	6.698	6.734	6.734	6.754	6.754
		lower	6.586	6.586	6.549	6.549	6.529	6.529
	크리프	upper	11.499	11.456	12.143	12.104	12.498	12.46
		lower	9.502	9.448	8.858	8.8	8.504	8.444
	건조수축	upper	4.735	7.655	5.106	8.255	5.311	8.586
		lower	3.583	5.794	3.211	5.193	3.007	4.863
	전 체	upper	22.457	25.19	23.202	26.075	23.612	26.562
		lower	20.146	22.446	19.4	21.561	18.99	21.074

표 4.8에서 확률론적 방법에 의한 WC1 기둥의 축소량의 변화량을 살펴보면, $\mu \pm 2\sigma$ 의 전체축소량의 경우 ACI 모델 변화범위는 17.323~21.42mm, PCA 모델 변화범위는 19.387~24.34mm로 나타난다. 결정론적 해석 결과에서 ACI 모델은 19.573mm, PCA 모델은 22.053mm로 나타났는데 신뢰구간의 개념에 따라 실제 결정론적 방법에서 제시하지 못하는 축소량의 변화범위를 예측할 수 있다. 이러한 결과는 탄성, 크리프, 건조수축 축소량에서도 나타나고 있다.

WC1 기둥에서와 마찬가지로 WC2 기둥에 대해서도 축소량 변동범위를 알 수 있다. 따라서 WC1 기둥과 WC2 기둥의 축소량의 변동범위를 상한값과 하

한값으로 지정 할 수 있다. 이러한 결과에서 WC1 기둥과 WC2 기둥의 슬래브 타설이후 확률론적 최대 부등축소량을 예측할 수 있다.

표 4.9 신뢰구간별 전체축소량

(단위 : mm)

신뢰구간 축소량 종류			$\mu + \sigma \leq X \leq \mu - \sigma$ (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%)	
			ACI	PCA	ACI	PCA	ACI	PCA
WC1	탄 성	upper	13.949	13.949	14.005	14.005	14.036	14.036
		lower	13.776	13.776	13.72	13.72	13.689	13.689
	크리프	upper	19.986	20.854	20.796	21.695	21.242	22.158
		lower	17.475	18.246	16.665	17.405	16.22	16.942
	건조수축	upper	26.043	45.824	27.248	47.944	27.912	49.111
		lower	22.307	39.251	21.102	37.131	20.438	35.964
	전 체	upper	59.005	79.467	60.449	81.736	61.243	82.985
		lower	54.531	72.432	53.088	70.164	52.294	68.915
WC2	탄 성	upper	14.469	14.469	14.528	14.528	14.56	14.56
		lower	14.285	14.285	14.226	14.226	14.193	14.193
	크리프	upper	21.417	22.666	22.294	23.587	22.777	24.095
		lower	18.698	19.808	17.821	18.887	17.339	18.38
	건조수축	upper	30.073	48.504	31.46	50.742	32.224	51.973
		lower	25.77	41.564	24.383	39.326	23.619	38.094
	전 체	upper	64.886	84.381	66.518	86.788	67.416	88.113
		lower	59.827	76.915	58.195	74.507	57.297	73.182

표 4.9의 WC1 기둥의 $\mu \pm 2\sigma$ 의 전체축소량의 변화는 ACI 모델은 52.294~61.243mm, PCA 모델은 68.915~82.985mm의 변동이 생길 수 있음을 알 수 있다. 그리고 WC2 기둥의 전체축소량은 ACI 모델 57.297~67.416mm, PCA 모델 73.182~88.113mm의 변화를 나타낸다. 이러한 결과에서 ACI 모델과 PCA 모델 각각의 최대 부등축소량을 예측할 수 있다. 따라서 표 4.8과 표 4.9에서 해석한 결과를 바탕으로 확률론적 기둥축소량의 부등축소량을 예측할 수 있다.

4.4 결정론적 방법과 확률론적 방법의 비교 분석

4.4.1 슬래브 타설이후 축소량의 비교

확률론적 방법 축소량 해석법의 정확성을 알아보기 위해서 결정론적 방법의 결과값과 비교해 보아야 한다.

표 4.10에서 예제건물 23층에 대한 슬래브 타설이후의 축소량 값을 비교해 놓았다. 표에서 보듯이 WC1 기둥의 결정론적 탄성축소량이 6.335mm이고, 확률론적 탄성축소량은 6.345mm로 99% 이상의 정확성을 보이고 있다. 크리프 축소량과 건조수축 축소량도 마찬가지로 이러한 정확성이 나타나고 있다.

표 4.10 결정론적 방법과 확률론적 방법의
슬래브 타설이후의 축소량 비교 (단위 : mm)

		WC1			WC2		
		탄 성	크리프	건조수축	탄 성	크리프	건조수축
ACI	결정론	6.335	9.736	3.502	6.63	10.697	4.15
	확률론	6.345	9.514	3.512	6.642	10.501	4.159
비 율		99.8%	98%	99.7%	99.8%	98%	99.8%
PCA	결정론	6.335	9.535	6.183	6.63	10.65	6.71
	확률론	6.345	9.319	6.2	6.641	10.452	6.724
비 율		99.8%	98%	99.7%	99.8%	98%	99.8%

슬래브 타설이후 기둥축소량의 최대변화량을 알아 보기 위해서 표 4.8의 2σ 에 대한 축소량의 변화를 비율로 나타내 보면 표 4.11과 같다. 표에서의 각 축소량에 대한 비율은 신뢰성해석한 결과와 결정론적 방법에 의한 결과의 증감에 대한 비율이다.

크리프와 건조수축 축소량의 증가율이 훨씬 크게 나타난 이유는 확률변수의 변동계수를 탄성보다는 크리프와 건조수축에서 더 큰 값을 적용했기 때문이다.

표 4.11 슬래브 타설이후의 결정론적 방법과 신뢰구간별 축소량의 비교

		WC1			WC2		
		탄 성	크리프	건조수축	탄 성	크리프	건조수축
+ 2 σ	ACI	1.8%	16.2%	28.1%	1.9%	16.8%	28%
	PCA	1.8%	16.4%	28%	1.9%	17%	28%

4.4.2 전체 축소량의 비교

예제건물의 결정론적 방법과 확률론적 방법의 전체축소량 비교를 위해서 54층의 축소량 값을 비교한다. 표 4.12는 예제건물 54층에 대한 전체축소량 값을 결정론적 방법과 확률론적 방법에 대해 비교해 놓은 것이다. 슬래브 타설이후의 축소량 비교와 마찬가지로 탄성, 크리프, 건조수축 축소량은 98% 이상의 정확성을 보이고 있다.

확률론적 방법에 의한 기둥축소량 해석은 결정론적 방법에서 보이는 축소량 값을 산출함과 동시에 각 축소량별 신뢰구간에 따라 정의하여 실제 축소량의 변동값을 예측 할 수 있다.

표 4.12 결정론적 방법과 확률론적 방법의 전체축소량 비교 (단위 : mm)

		WC1			WC2		
		탄 성	크리프	건조수축	탄 성	크리프	건조수축
ACI	결정론	13.836	19.129	24.154	14.348	20.431	27.907
	확률론	13.863	18.731	24.175	14.377	20.258	27.922
비 율		99.8%	98%	99.9%	99.8%	99%	99.9%
PCA	결정론	13.836	19.994	42.503	14.348	21.671	45.01
	확률론	13.863	19.55	42.537	14.377	21.237	45.034
비 율		99.8%	98%	99.9%	99.8%	98%	99.9%

결정론적 방법에 의한 전체축소량의 최대변화량을 알아 보기 위해 표 4.9의 2σ 값의 상한값에 대한 축소량의 변화를 비율로 나타내 보면 표 4.13과 같다. 확률론적 방법에 의한 2σ 값에 대한 탄성, 크리프, 건조수축 축소량은 결정론적 방법보다 표 4.13과 같이 증가를 보이고 있다.

표 4.13 전체축소량의 결정론적 방법과 신뢰구간별 축소량의 비교

		WC1			WC2		
		탄 성	크리프	건조수축	탄 성	크리프	건조수축
$+2\sigma$	ACI	1.4%	11%	15.6%	1.5%	11.5%	15.5%
	PCA	1.4%	10.8%	15.5%	1.5%	11.2%	15.5%

4.4.3 부등축소량의 비교

표 4.14는 각 모델별 신뢰구간에 따른 최대 부등축소량과 결정론적 방법에 의한 부등축소량과의 차이를 보여주고 있다. 신뢰구간에 대한 부등축소량 계산 방법은 표 4.8과 표 4.9의 신뢰구간별 축소량 데이터에서 신뢰구간별 WC2 기둥의 상한값과 신뢰구간별 WC1 기둥의 하한값의 차이로써 구할 수 있다.

표 4.14 신뢰구간에 따른 최대 부등축소량 (단위 : mm)

		σ	1.645σ	2σ	결정론
슬래브 타설이후 축소량 (23층)	ACI	4.11	5.516	6.29	1.904
	PCA	4.564	6.248	7.175	1.937
비 율		111%	113.3%	114.1%	101.7%
전체축소량 (54층)	ACI	10.355	13.43	15.122	5.567
	PCA	11.948	16.625	19.198	4.695
비 율		115.4%	123.8%	127%	84%

표 4.14에서 ACI식과 PCA식의 부등축소를 비교해보면 슬래브 타설이후 부등축소량은 신뢰구간별로 11~14% 정도로 PCA식에 의한 결과 값이 크게 나타나고, 전체의 부등축소량의 경우 신뢰구간별로 15~27% 정도 PCA식에 의한 결과 값이 크게 나타났다. PCA식에 의한 결과 값이 ACI식에 의한 결과 값보다 크게 나오는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 비탄성 축소량 중 건조수축에 의한 결과 값이 큰 차이를 보이기 때문이다.

각 신뢰구간별 최대 부등축소량과 결정론적 방법에 의한 최대 부등축소량의 값을 비교해보면 약 2~4배 이상의 증가가 있음을 알 수 있다. 따라서 확률론적 방법으로 신뢰구간의 개념에 따라 실제 결정론적 방법에서 제시하지 못하는 축소량의 변동을 제안식별로 예측하여 실제로 건물에 일어날 수 있는 부등축소 등을 예상할 수 있다.

4.5 장기계측 결과와 비교 분석

그림 4.53~그림 4.58은 W122, W211, W311 벽체의 시간에 따른 신뢰구간별 확률론적 축소량과 현장 계측치를 ACI식과 PCA식에 의해 나타낸 그래프이다. 벽체의 현장계측은 참고문헌[13]에서 실시하였다. 그래프를 살펴보면, 전체적으로 PCA식에 의한 결과 값이 크게 나타나고, 현장 계측치는 ACI, PCA 모델의 두 그래프 모두 평균값과 신뢰수준 68.26% 하한치($\mu - \sigma$)에 사이에 위치하고 있다.

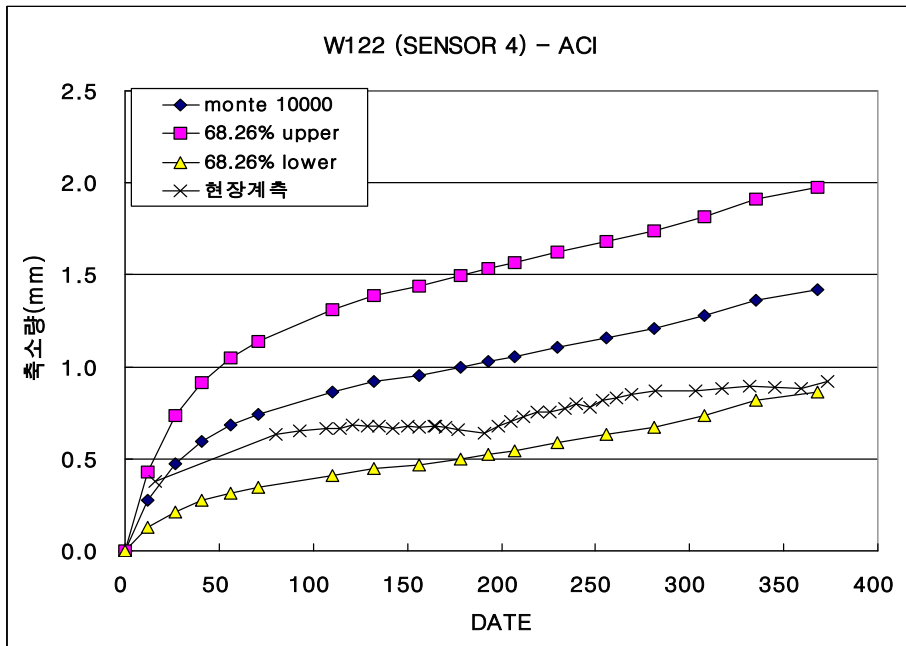


그림 4.53 W122 벽체의 확률론적 축소량(ACI)

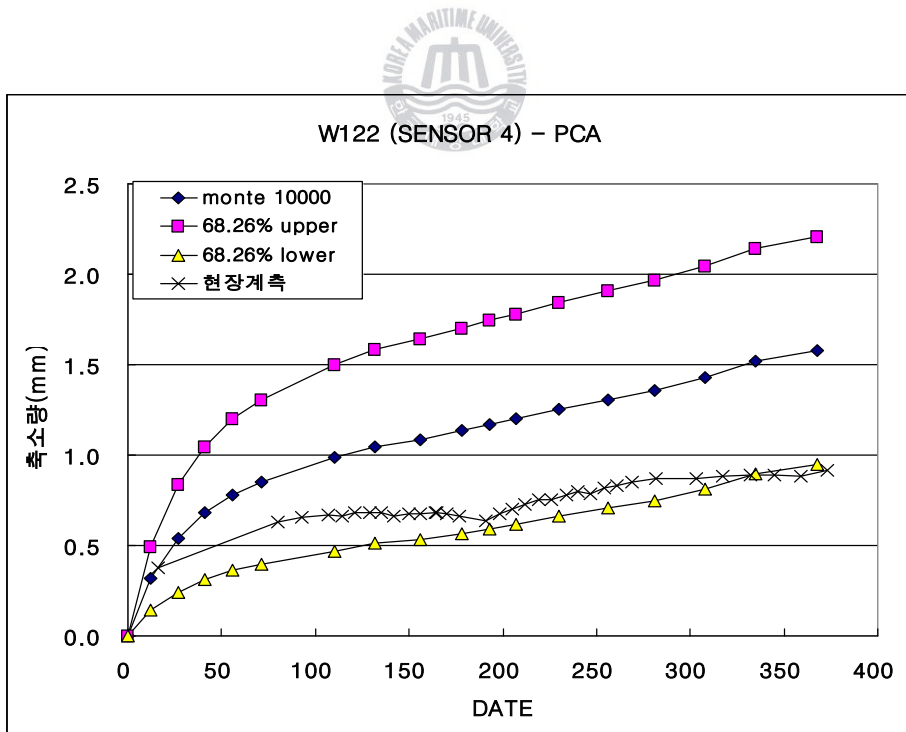


그림 4.54 W122 벽체의 확률론적 축소량(PCA)

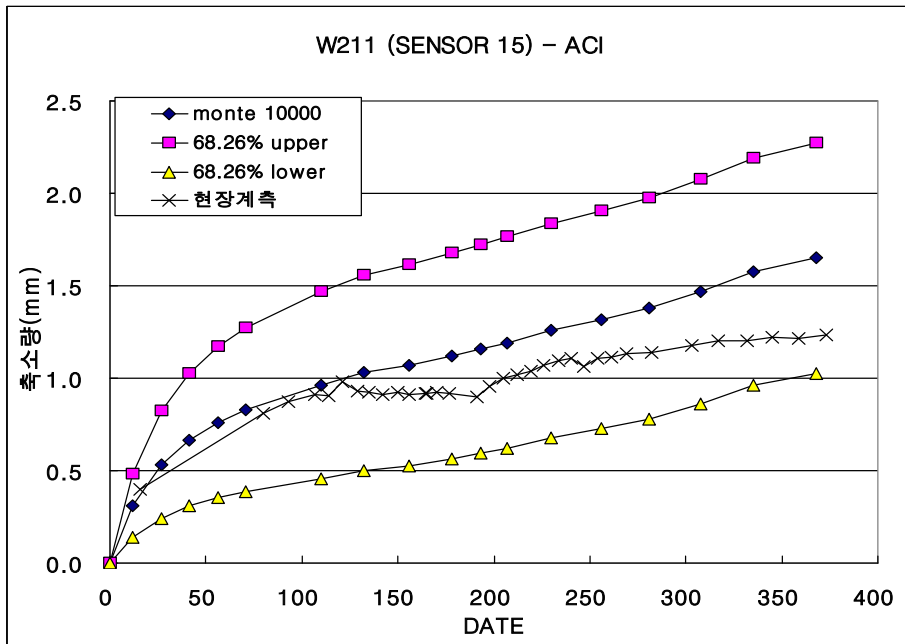


그림 4.55 W211 벽체의 확률론적 축소량(ACI)

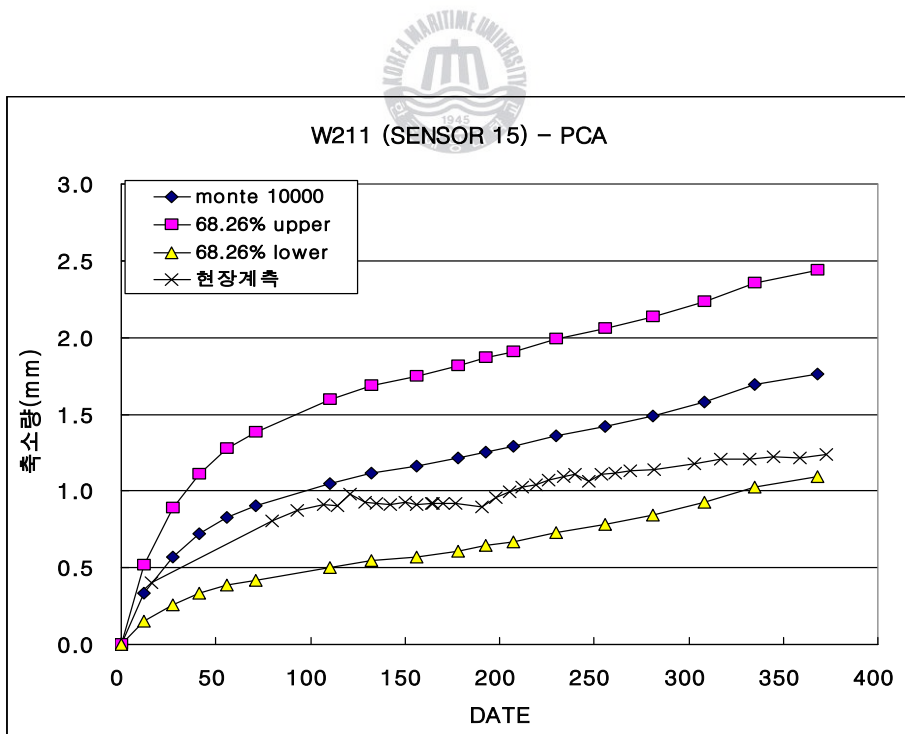


그림 4.56 W211 벽체의 확률론적 축소량(PCA)

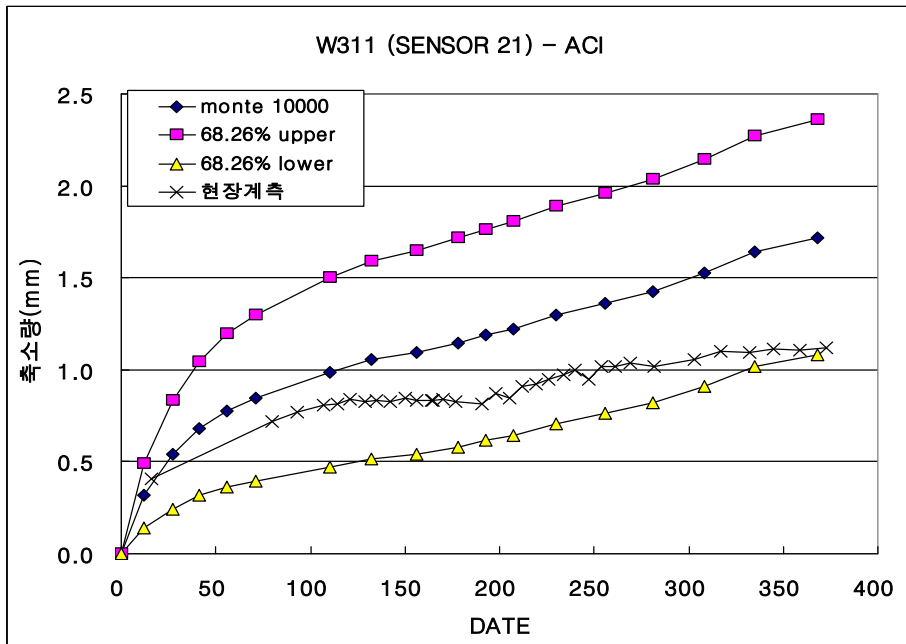


그림 4.57 W311 벽체의 확률론적 축소량(ACI)

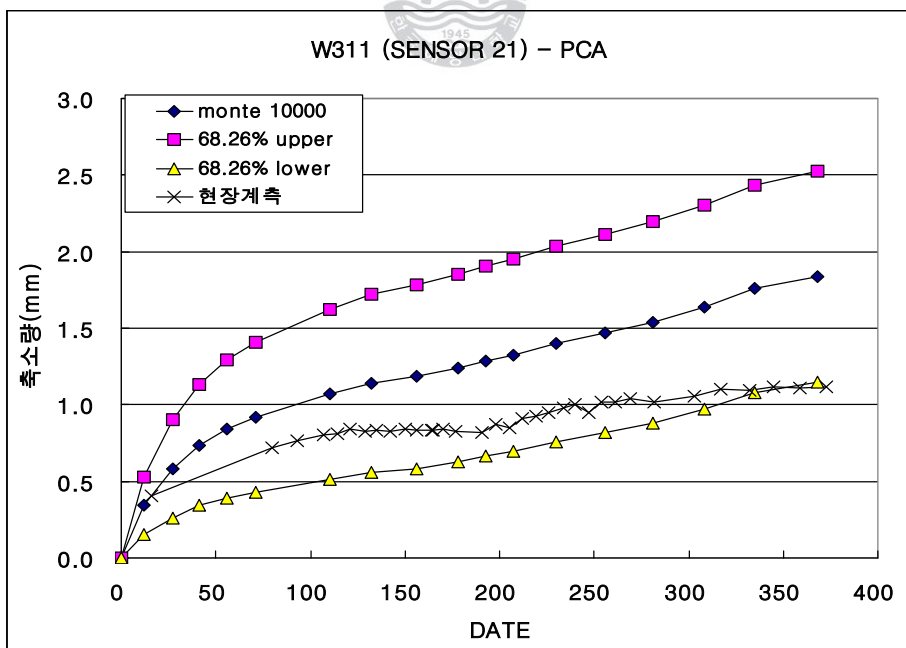


그림 4.58 W311 벽체의 확률론적 축소량(PCA)

표 4.15는 W122, W211, W311 벽체에 대한 신뢰수준별 확률론적 해석치와 현장 계측치를 정리하여 나타낸 것이다. W122 벽체의 신뢰수준별 확률론적 해석치를 살펴보면 ACI식의 경우 신뢰수준 68.26%, 90.00%, 95.44%에 따라 상한치는 1.97mm, 2.33mm, 2.53mm, 하한치는 0.86mm, 0.51mm, 0.31mm로 나타났고, PCA식의 경우 상한치는 2.21mm, 2.62mm, 2.84mm, 하한치는 0.95mm, 0.54mm, 0.31mm로 나타났다. 확률론적 해석치와 현장 계측치를 비교해보면 두 모델식 모두 초기에는 평균값에 근접하다가 시간이 지남에 따라 신뢰수준 68.26% 하한치에 근접하고 있다는 것을 알 수 있다. W211, W311 벽체도 마찬가지로 두 모델식 모두 초기에는 평균값에 근접하다가 시간이 지남에 따라 신뢰수준 68.26% 하한치에 근접하고 있다.

현장 계측치와 두 모델식별 평균값을 비교해보면 ACI 모델의 평균값이 65~75%로 PCA 모델의 평균값 58~61% 보다 근접하지만 두 모델 모두 현장 계측치와 차이가 있다. 하지만 이를 통해 축소량의 범위를 알 수 있다.



표 4.15 현장 계측치와 신뢰구간별 축소량

(단위 : mm)

신뢰구간 축소량 종류			$\mu + \sigma \leq X \leq \mu - \sigma$ (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%)	
			ACI	PCA	ACI	PCA	ACI	PCA
W122	upper		1.97	2.21	2.33	2.62	2.53	2.84
	lower		0.86	0.95	0.51	0.54	0.31	0.31
	mean	ACI	1.42					
		PCA	1.58					
	현장 계측치		0.92					
현장 계측치에 대한 비율			ACI : 65%			PCA : 58%		
W211	upper		2.27	2.44	2.68	2.87	2.9	3.11
	lower		1.03	1.09	0.62	0.65	0.4	0.42
	mean	ACI	1.65					
		PCA	1.76					
	현장 계측치		1.24					
현장 계측치에 대한 비율			ACI : 75%			PCA : 70%		
W311	upper		2.36	2.53	2.77	2.97	3.0	3.22
	lower		1.08	1.15	0.67	0.7	0.45	0.46
	mean	ACI	1.72					
		PCA	1.84					
	현장 계측치		1.12					
현장 계측치에 대한 비율			ACI : 65%			PCA : 61%		

5. 결 론

본 연구에서는 초고층 콘크리트 건물 기둥축소량에 영향을 미치는 적용 모델들의 매개변수들에 대해 알아보기 위해 ACI 모델, PCA 모델, CEB-FIP 모델, B3 모델들의 매개변수를 비교 하였고, 54층 초고층 콘크리트 건물을 예제로 하여 기존에 연구되었던 PCA 모델과 매개변수의 영향을 비교하기 용이한 ACI 모델의 결정론적 및 확률론적 기둥축소량 해석을 하였다. 결정론적 방법과 신뢰구간별 기둥축소량 및 부등축소량을 분석한 결과와 현장 계측치와 확률론적 축소량 해석 값을 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1. CEB-FIP 모델과의 시간에 대한 크리프 비율과 건조수축 비율을 비교한 결과 준공시점인 1,000일 대한 값이 ACI, PCA 모델의 결과와 차이가 크게 나타나 확률해석을 통한 매개변수의 영향을 비교하기가 적합하지 않았고, B3 모델의 경우 크리프 축소량 계산식이 다른 모델들의 매개변수와 비교하기에 적합하지 않았다. 따라서 기존에 연구되었던 PCA 모델과 매개변수의 영향 비교가 용이한 ACI 모델을 적용한 확률론적 기둥축소량 해석법을 개발하였다.

2. ACI 모델과 PCA 모델의 결정론적 해석 결과 크리프 축소량의 차이는 크게 나지 않지만, 건조수축 축소량의 경우 PCA 모델 결과 값이 1.6~1.7배 이상 크게 나타났다. 슬래브 타설이후 총 축소량은 114~116%, 전체 총 축소량은 129~134%로 PCA 모델 결과 값이 크게 나타났다. 확률론적 해석 결과도 결정론적 해석 결과와 거의 비슷한 비율로 PCA 모델의 결과 값이 크게 나타났다.

3. PCA 모델의 부등축소량은 슬래브 타설이후 신뢰구간의 폭이 늘어남에 따라 1.11~1.14배, 전체축소량은 1.15~1.27배 정도로 ACI 모델에 비해 결과 값이 크게 나타났다.

4. 현장 계측치와 확률론적 해석치를 비교한 결과 ACI 모델을 적용한 결과가 PCA 모델을 적용한 결과 값보다 현장 계측치와 근접함을 알 수 있다. 또한, 현장 계측치가 ACI 모델과 PCA 모델 모두 평균값과 신뢰구간 68.26%의 하한치 사이의 값을 나타냈다. 따라서 적용식에 상관없이 발생 가능한 최대 축소량을 예측할 수 있다.

향후 더 많은 초고층 구조물에 대한 해석과 ACI 모델과 PCA 모델 등 여러 가지 모델들의 매개변수들을 연구하여 비교하고, 더불어 각 모델별 결정론적 해석 방법과 확률론적 해석 방법으로 얻어진 기동축소량 결과 값을 비교하는 연구가 필요하다.



참고문헌

1. Fintel M., Khan F. R., “ Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structures Prediction of inelastic Column Shortening”, ACI Journal Preceedings, Vol. 6, No.12, American Concrete Institute, Detroit, Mich, December 1969, pp 957-967
2. Fintel, M., Ghosh, S. K. and Iyengar, H., “ Column Shortening in Tall Structures Prediction and Compensation”, engineering Bulletin No.eb108D, Portland Cement Association, 1987
3. 송화철, 유은중, 정석창, 주영규, 박칠림, “ 초고층 콘크리트 건물의 기둥축소량 효과”, 대한건축학회 논문집, 제13권 12호, 통권110호, 1997, 12
4. Alder, B., Fernbach, S., Rotenberg, M., “ Methods in Computational Physics - Advances in research and applications”, New York, Academic, 1963
5. Hammersley, J. M., Handscomb, D. C., “ Monte Carlo Methods”, Methuen, 1964
6. Lehmer, D. H. (1949), see Proc. 2nd. Symp. “ On Large-Scale Digital Calculating Machinery”, Harvard Univ. Press, 1951
7. 정은호, 김형래, “ 매개변수에 따른 기둥축소량 변화에 따른 연구”, 콘크리트학회 논문집, 제 58호, 2000, 08

8. 조용수, 송화철, “ 몬테카를로 기법을 이용한 기둥축소량 예측”, 대한건축학회 학술발표대회논문집 Vol 21. No2 2001, 10
9. ACI Committee 209, “ Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures”, ACI 209-R92, American Concrete Institute, Detroit, 1992
10. CEB-FIP, “ CEB-FIP Model Code 1990”, Comite Euro-International Du Beton, 1991.
11. Z. P. Bazant, and S. Baweja, "Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage, 2. Updating and Theoretical Basis:, Materials and Structures, RILEM, Vol. 28, 1995
12. 조용수, “ 몬테카를로 기법을 이용한 초고층건물 기둥축소량의 해석법”, 한국해양대학교 석사학위논문, 2002
13. 장윤성, “ 초고층 건물의 기둥축소량에 대한 현장계측 및 확률론적 예측”, 한국해양대학교 석사학위논문, 2004