

공학석사 학위논문

CFT 기둥을 가진 초고층 건물의
확률론적 축소량 해석

*Probability Analysis of Column Shortening for Tall
Buildings with Concrete Filled Tube Column*

지도교수 송 화 철

2007년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 건 축 공 학 과

장 승 우

목 차

목 차	i
표 목 차	iv
그림목차	v
<i>Abstract</i>	vi
1. 서론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구범위 및 방법	4
2. CFT 기둥의 장기거동	7
2.1 일반콘크리트와 비교한 CFT 기둥의 장기거동	8
2.1.1 크리프	8
2.1.2 건조수축	10
2.2 가압 조건과 길이에 따른 CFT 기둥의 장기거동	11
3. 확률론적 CFT 기둥축소량 해석	15
3.1 기둥축소량 일반사항	15
3.1.1 탄성 축소량	16
3.1.2 비탄성 축소량	17
3.2 Monte-Carlo 기법	20
3.2.1 균일분포의 난수발생	20
3.2.2 표준정규분포난수의 발생	21

3.3 몬테카를로 기법에 의한 확률론적 기둥축소량 해석법	22
3.4 CFT 기둥축소량 모델에 대한 확률변수	23
3.4.1 콘크리트 강도	23
3.4.2 크리프계수	26
3.4.3 하중	27
4. 예제건물 CFT 기둥의 결정론적 방법에 의한 해석	28
4.1 예제건물 일반사항	28
4.1.1 예제건물 개요	28
4.1.2 기둥축소량 입력값	30
4.1.3 해석기준일	34
4.2 결정론적 방법의 의한 해석	34
4.2.1 슬래브타설 이후의 축소량	34
4.2.2 전체 축소량	35
5. 예제건물 CFT 기둥의 확률론적 방법에 의한 해석	38
5.1 시뮬레이션 반복수와 정확성	38
5.2 각 매개변수에 대한 확률론적 해석결과	42
5.2.1 콘크리트 강도 변동에 대한 확률론적 해석결과	42
5.2.2 크리프계수 변동에 대한 확률론적 해석결과	43
5.2.3 하중 변동에 대한 확률론적 해석결과	44
5.3 확률변수에 따른 신뢰구간 해석	45
5.3.1 콘크리트 강도 변동에 대한 신뢰수준별 축소량	45
5.3.2 크리프계수 변동에 대한 신뢰수준별 축소량	49
5.3.3 하중 변동에 대한 신뢰수준별 축소량	53
5.4 복수의 매개변수 변동에 대한 축소량의 변동	56

6. 결론	60
참고문헌	62

표 목차

표 2.1 CFT 기둥의 시험체 실험값	9
표 2.2 콘크리트와 강관에 작용하는 하중의 비	11
표 3.1 기둥축소량에 영향을 미치는 요인	15
표 3.2 관리정도와 변동계수와의 관계	24
표 3.3 시험횟수가 15회 미만이거나 기록이 없는 경우의 소요배합강도	25
표 3.4 크리프계수의 변동계수에 대한 데이터	26
표 4.1 예제건물 현장개요	28
표 4.2 기둥단면 정보	30
표 4.3 대상 부재의 재료특성	30
표 4.4 하중의 크기	32
표 4.5 부재 타설 일정 및 하중 재하시점	33
표 4.6 결정론적 방법에 의한 최고층 전체 축소량	36
표 5.1 콘크리트 강도의 변동계수에 따른 축소량 변동	42
표 5.2 크리프계수의 변동계수에 따른 축소량 변동	43
표 5.3 하중의 변동계수에 따른 축소량 변동	44
표 5.4 콘크리트 강도의 변동계수에 따른 신뢰구간별 축소량	46
표 5.5 크리프계수의 변동계수에 따른 신뢰구간별 축소량	50
표 5.6 하중의 변동계수에 따른 신뢰구간별 축소량	53
표 5.7 다중매개변수의 변동에 대한 축소량의 변동계수	57

그림 목차

그림 1.1 연구방법	6
그림 2.1 콘크리트의 시간에 따른 변형률	7
그림 2.2 콘크리트에 전달되는 응력의 상관관계	12
그림 2.3 CFT 기둥의 가력조건에 따른 특정크리프값	13
그림 2.4 CFT 기둥의 길이에 따른 축소량 결과	13
그림 3.1 콘크리트 강도의 분포	23
그림 3.2 정규분포 곡선	25
그림 4.1 고층부 기준층 평면도	29
그림 4.2 슬래브타설 이후 축소량	35
그림 4.3 슬래브타설 이전 축소량	36
그림 4.4 전체 축소량	37
그림 5.1 시뮬레이션 횟수에 의한 콘크리트 강도의 정확도	38
그림 5.2 시뮬레이션 횟수에 의한 특정크리프값의 정확도	39
그림 5.3 시뮬레이션 횟수에 의한 하중의 정확도	39
그림 5.4 시뮬레이션 10000회의 콘크리트 강도 분포도	40
그림 5.5 시뮬레이션 10000회의 특정크리프값 분포도	41
그림 5.6 시뮬레이션 10000회의 하중 분포도	41
그림 5.7 신뢰수준에 따른 정규분포의 확률	45
그림 5.8 콘크리트 강도의 변동에 따른 슬래브타설 이후 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값	47
그림 5.9 콘크리트 강도의 변동에 따른 전체 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값	47
그림 5.10 콘크리트 강도의 변동에 따른 신뢰수준별 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수	48

그림 5.11 콘크리트 강도의 변동에 따른 신뢰수준별 최고층 전체 축소량의 변동계수	48
그림 5.12 크리프계수의 변동에 따른 슬래브타설 이후 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값	51
그림 5.13 크리프계수의 변동에 따른 전체 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값	51
그림 5.14 크리프계수의 변동에 따른 신뢰수준별 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수	52
그림 5.15 크리프계수의 변동에 따른 신뢰수준별 최고층 전체 축소량의 변동계수	52
그림 5.16 하중의 변동에 따른 슬래브타설 이후 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값	54
그림 5.17 하중의 변동에 따른 전체 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값	54
그림 5.18 하중의 변동에 따른 신뢰수준별 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수	55
그림 5.19 하중의 변동에 따른 신뢰수준별 최고층 전체 축소량의 변동계수	56
그림 5.20 콘크리트 강도 20%, 크리프계수 50%, 하중 20%의 변동성에 따른 신뢰지수별 슬래브타설 이후 축소량의 상·하한값	58
그림 5.21 콘크리트 강도 20%, 크리프계수 50%, 하중 20%의 변동성에 따른 신뢰지수별 전체 축소량의 상·하한값	58

ABSTRACT

Probability Analysis of Column Shortening for Tall Buildings with Concrete Filled Tube Columns

Jang, Seung-Woo

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

The prediction of Concrete Filled in steel Tube(CFT) column shortening, causing serviceability problem and additional stresses in horizontal structural members, is of fundamental importance.

According to the available study and experimental data about the long term behavior of CFT 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 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.

The results in this research are as follows:

1. CFT column shortening can be analyzed with 60% of creep coefficient and 10% of shrinkage coefficient of inner concrete. And the total Shortening of CFT column consists of 74% elastic, 23% creep, and 3% shrinkage shortening.

2. According to the results obtained by the stochastic approach with 20% of concrete strength, 50% of creep coefficient, and 20% of load, the variation coefficient of total shortening is 0.27% for concrete strength, 1.07% for creep, and 2.30% for load, respectively.

3. According to the results obtained by the probability analysis with multi parameter, the effect of variation coefficient for load is the largest. In order to correct prediction of CFT column shortening, characteristics of the load variation should be applied.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 국내에는 초고층 건축의 붐이 일면서 전국 곳곳에서 경쟁하듯이 초고층 건물들이 시공되고 있거나 계획 중에 있다. 이러한 초고층 건물들은 여러 가지 구조형식을 취하게 되는데 초기의 고층건물은 대부분 철근콘크리트 구조를 사용하고 있지만 최근에는 복합구조의 사용 또한 점점 증가하고 있다.

콘크리트 충전 강관(Concrete Filled steel Tube, 이후로 CFT) 기둥은 복합구조 중의 하나로 각형 또는 원형 강관 속에 콘크리트가 충전되어 있는 기둥을 말하며, 강관 내부의 콘크리트가 강관에 의해 구속력을 가지며 압축강도가 증가하고 충전된 콘크리트에 의해 강관의 좌굴에 대한 위험이 줄어들어 일반 철근콘크리트 구조보다 우수한 변형특성을 발휘한다. 때문에 경제성이 우수하고 범용성이 높아 미국, 일본, 중국, 캐나다 등 외국에서는 이미 저층 구조물에서 초고층 구조물에 이르기까지 다양한 구조물에 사용하고 있다. 우리나라도 근래에 들어 CFT 기둥에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있으며 CFT 기둥을 가진 건물의 설계가 이루어지고 또 시공되고 있다.

초고층 건물은 현대 과학과 기술의 집약체이다. 이러한 초고층 건물은 안전성 및 사용성 등을 위해 고려해야 할 사항이 많은데 그 중 하나가 기둥이나 전단벽과 같은 수직부재에 장기적으로 발생하는 축소량에 대한 것이다. 초고층 건물에 사용되는 수직부재들은 단면형상이나 재료특성, 재하조건 등의 차이로 인해서 부재들 간에 발생하는 부등축소량으로 인해 사용성 및 안전성에서 여러 가지 문제를 유발할 수 있으므로 각각의 수직부재에 대한 축소량의 정확한 예측과 보정이 필요하다. 이에 따라 1960년대부터 철근콘크리트에 대한 재료 연구가 진행되어 철근콘크리트 건물의 기둥축소량 계산식이 개발되었으며 현재 수많은 초고층 건물의 기둥축소량 해석에 사용되고 있다. 그러나 최근 수요가

늘어나고 있는 복합구조의 축소량에 대한 연구는 재료실험을 통한 시험체의 장기거동에 대한 연구만이 수행되고 있는 실정이다. 이러한 연구는 CFT 기둥의 축소량 해석에 필요한 재료적 특성인 크리프계수나 건조수축계수 등 장기거동 특성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그러나 실제 건물의 CFT 기둥 축소량 해석은 이러한 특성을 토대로 시공단계에 따른 재하하중과 재하시점, 시간 의존적 성질이 있는 재료특성을 고려하여 축소량 해석을 수행하여야 하지만 이에 대한 연구는 아직까지 미미한 실정이다. 그리고 실제 현장 시공시 사용되는 콘크리트는 똑같은 제품을 생산하기가 어려우며 똑같은 제품을 생산하더라도 양생되는 과정에서 자연적 또는 인위적 요인에 따라 콘크리트의 성질에 차이가 날 수 있기 때문에 실제로 발생할 기둥축소량은 기둥축소량 해석값과 다르게 발생할 수 있다. 따라서 이러한 해석값과 실제 축소량과의 차이를 조금 더 정확하게 예측하기 위하여 변동성이 크고 기둥축소량에 영향을 많이 미치는 콘크리트의 특성 중 콘크리트 강도, 크리프계수, 건조수축계수를 매개변수로 하여 통계적인 변동값을 적용하여 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기둥축소량 해석에 대한 연구가 수행되었지만 이러한 콘크리트의 재료적 특성 외에도 기둥축소량 발생의 직접적인 원인인 하중 또한 변동성을 가지고 있으나 하중에 대한 변동성을 고려한 연구는 아직 수행되지 않고 있다.

본 논문에서는 기존에 수행되었던 연구를 통한 CFT 기둥의 장기거동 특성을 바탕으로 CFT 기둥을 주요 구조부재로 기 시공된 37층 건물의 CFT 기둥 축소량 해석에 필요한 입력값을 산출하고 기둥축소량 해석 프로그램(CSA)을 사용하여 CFT 기둥의 축소량 해석을 수행하고 CFT 기둥 축소량의 특징을 알아보하고자 한다. 그리고 일반콘크리트의 기둥축소량에 많은 영향을 미치는 변동성이 큰 콘크리트의 재료특성이 CFT 기둥의 축소량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 콘크리트 강도와 크리프계수를 확률매개변수로 하였으며, 콘크리트 재료특성과 더불어 기둥축소량에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되는 하중 또한 확률매개변수로 하여 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기둥축소량 해석을 수행하였다. 이러한 확률론적 해석결과의 분포도를 조사하여 신뢰지수별 기둥

축소량의 상·하한값을 산출하고 각 매개변수의 변동에 대한 축소량의 변동폭을 제시함으로써 콘크리트의 재료특성과 하중의 변동을 고려한 CFT 기둥의 축소량 해석값의 예측범위를 알아보고자 한다.

1.2 연구동향

건물이 초고층화 되면서 수직부재의 장기축소에 대한 문제가 발생하였고 이에 따라 기둥축소량에 대한 연구가 1960년대 미국에서 Fintel과 Khan[1]에 의해 시작되었는데 고층 철근콘크리트건물의 비탄성 변형을 고려하여 기둥축소량 예측방법을 제시하였고 이후로 제안식이 수정되어졌으며 현재 포틀랜드시멘트 협회(Portland Cement Association)에서 제안된 계산법[2]을 사용하고 있다. PCA에서 제안한 기둥축소량 계산식은 ACI모델을 기본으로 하고 CEB-FIP모델과 다른 연구 결과를 참조하여 수정한 모델이다. 국내에서는 1997년에 송화철, 정석창[3] 등에 의해 PCA 기둥축소량 알고리즘을 바탕으로 한 CSA(Column Shortening Analysis) 기둥축소량 해석프로그램이 개발되었고, 정은호, 김희철[4] 역시 1997년에 PCA에서 제안하는 계산식을 기본으로 한 기둥축소량 해석프로그램(CSCP)을 개발하였다. 그리고 김한수[5]에 의해 일반 철근콘크리트보다 철골기둥의 효과가 큰 SRC 합성기둥의 축소량 해석에 대한 연구가 수행되었다.

CFT기둥의 장기거동에 관한 연구는 P.J. Terrey[6], Hiroshi Nakai[7], Shosuke Morino[8], Brian Uy[9] 등에 의해 일반콘크리트 시험체와 CFT 기둥의 시험체를 같은 조건에서 비교·분석하는 실험연구가 수행되었으며 연구자들은 각자의 실험값을 바탕으로 일반콘크리트와 비교한 CFT 기둥의 특정크리프값과 극한건조수축값을 제시하였다. 국내에서는 권승희, 김진근[10], 최내원[11], 김태환[12] 등에 의해 CFT 기둥의 장기거동에 대한 연구와 CFT 기둥 내부의 격벽에 의한 콘크리트의 가압면적에 따른 CFT 기둥 축소량의 차이와 CFT 기

등의 길이가 축소량에 미치는 영향을 연구하였다. 1998년 정석창, 유은종 등 [13]에 의해서 실제 시공되지는 않았지만 CFT 기둥을 주요 구조부재로 설계된 초고층 건물의 기둥축소량 해석을 수행하여 내부 콘크리트 Core의 전단벽과 CFT 기둥 사이에 발생하는 부등축소량에 대한 연구가 수행되었다.

기둥축소량에 영향을 미치는 요소에 대하여 정은호, 김희철[14]이 콘크리트 탄성계수, 크리프, 건조수축, 시공기간 등을 매개변수로 하여 각 매개변수가 기둥축소량에 미치는 영향을 연구하였으며, 조용수, 송화철[15]은 기둥축소량에 영향을 많이 미치면서 변동성이 큰 재료특성인 콘크리트 강도, 특정크리프값, 극한건조수축값을 확률매개변수로 하여 확률·통계적인 데이터를 근거로 확률 매개변수의 변동계수를 산정하여 적용하고 몬테카를로 기법을 이용한 확률론적 기둥축소량 해석을 수행하여 그 결과를 신뢰구간별로 분석하여 시공시 발생할 수 있는 자연적 또는 인위적 요인에 의한 기둥축소량 해석값의 변동범위에 대한 연구가 수행되었다.

1.3 연구범위 및 방법

본 논문은 CFT 기둥을 주요구조부재로 시공된 건물의 CFT 기둥에 대하여 CFT 기둥의 장기거동특성을 고려하여 축소량 해석에 필요한 입력값을 산출하고 이 값을 적용하여 결정론적 해석방법으로 CFT 기둥의 축소량을 해석하고 그 특징을 분석하였다. 그리고 변동성이 큰 콘크리트 재료특성 중 콘크리트 강도와 크리프계수를 매개변수로 하고 기둥축소량 발생의 주요원인인 하중 또한 매개변수에 추가하여 각 매개변수의 변동계수를 일정한 값으로 변동시키면서 몬테카를로 기법을 사용한 CFT 기둥에 대한 확률론적 기둥축소량 해석을 수행하였다. 확률론적 방법에 의한 해석의 정확성을 검증하기 위해서 변동성을 고려한 입력값과 결정론적 방법에 사용된 입력값을 비교하였으며, 데이터의 통계적인 분포를 산출하여 신뢰구간별 축소량의 데이터를 계산하였다. 또한

다중매개변수를 동시에 적용하여 축소량이 매개변수의 변동에 따라 신뢰지수별 변동폭을 산정하였다.

그림 1.1은 본 논문의 전체적인 흐름을 나타낸 flowchart로써 간략하게 설명하면 사전에 수행된 연구를 바탕으로 CFT 기둥의 장기거동특성을 분석하여 예제건물로 선택한 수원 S 연구소 건물의 CFT 기둥의 기둥축소량 해석 입력값을 산정하여 CFT 기둥을 결정론적 방법으로 해석하고 그 특징을 분석한다. 그리고 콘크리트 강도, 크리프계수, 하중을 매개변수로 선정하여 각 매개변수의 변동계수를 일정한 값으로 변화시키면서 몬테카를로 기법을 이용하여 확률론적 해석을 수행한다. 그리고 확률론적 해석 결과값의 통계적인 분포를 분석하고 신뢰지수별 축소량의 상·하한값을 계산하여 각 변동계수의 변동에 따른 축소량의 변동폭을 알아본다. 마지막으로 다중매개변수를 적용하였을 경우의 축소량 변동폭을 신뢰지수별로 비교 검토하고 결론을 도출하였다.

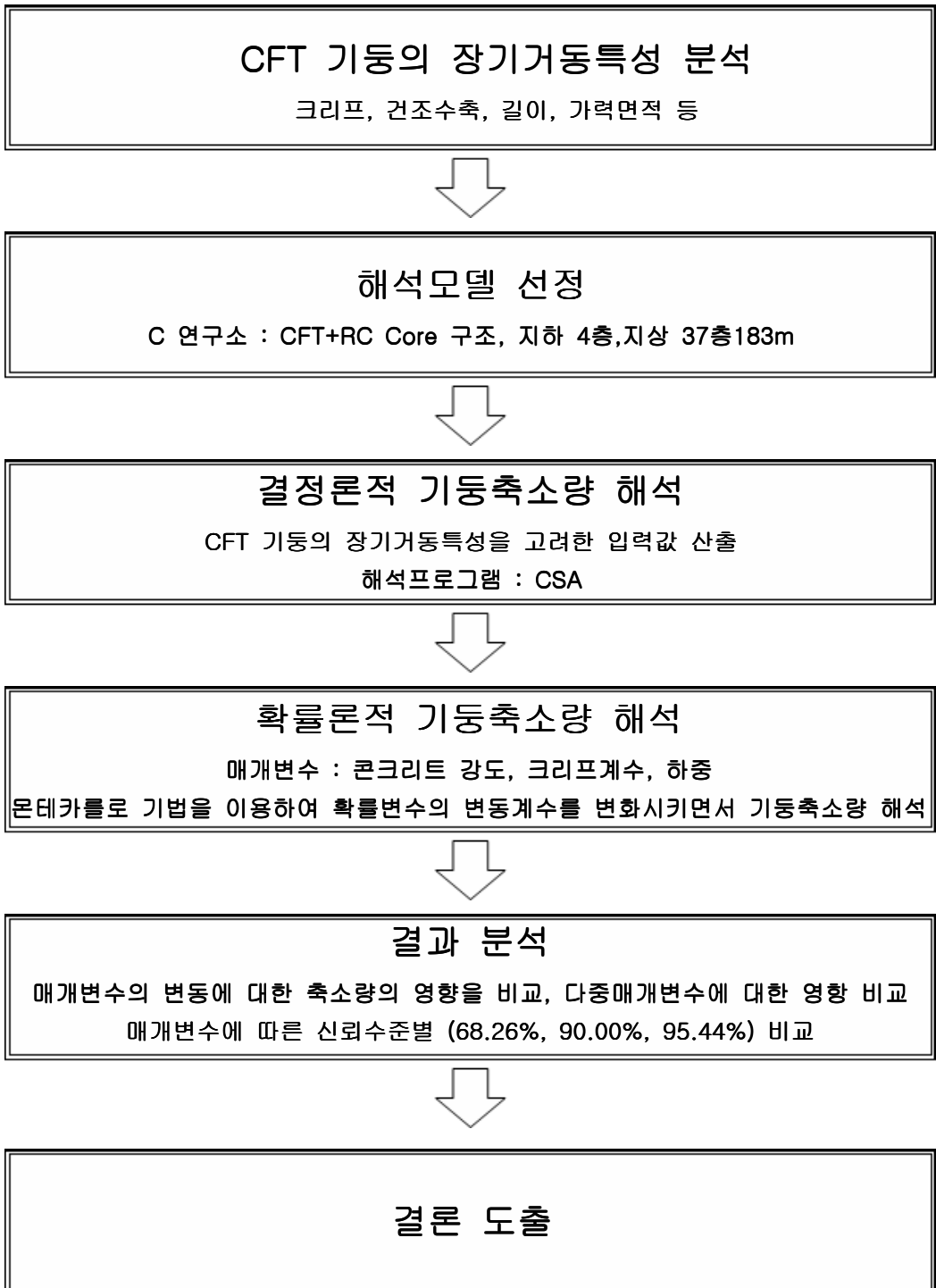


그림 1.1 연구방법

2. CFT 기둥의 장기거동

콘크리트 재료의 시간에 따른 장기변형은 그림 2.1과 같다. 하중이 가해진 콘크리트는 외부대기에 노출이 되면서 건조에 의한 건조수축이 발생하고 장기적인 하중에 의한 크리프도 발생하게 되는데 이때 발생하는 크리프는 기본크리프와 건조크리프로 구분이 된다. 기본크리프는 콘크리트가 외부대기에 노출되지 않은 상태, 즉 건조가 일어나지 않는 상태에서 발생하는 크리프이고 외부 대기에 노출될 경우 발생하는 크리프는 기본크리프보다 더 크게 나타나는데 이때 증가된 크리프 변형을 건조크리프라고 한다. CFT 기둥의 경우 원형 및 각형 강관 속에 콘크리트가 채워져 있는 형태로 콘크리트가 직접 외부대기와 접하지 않기 때문에 일반콘크리트에 비해 건조 크리프와 건조수축이 거의 발생하지 않고 기본크리프만이 발생하게 된다.

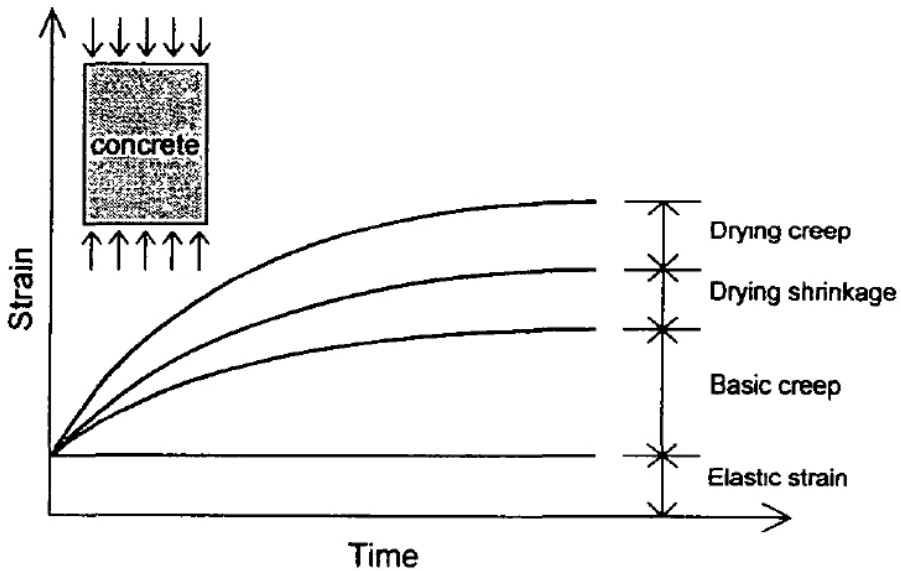


그림 2.1 콘크리트의 시간에 따른 변형을

2.1 일반콘크리트와 비교한 CFT 기둥의 장기거동

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 비탄성변형은 시간의존적인 성질이기에 때문에 많은 차이점을 보이고 있다. CFT 기둥의 비탄성 거동은 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 비탄성 거동을 산정할 수 있다.

2.1.1 크리프

국외에서 P.J. Terrey[6], Hiroshi Nakai[7], Shosuke Morino[8], Brian Uy[9] 등에 의해 일반콘크리트와 CFT 기둥의 장기거동에 대한 실험적 연구가 실행되었으며 연구자들의 실험결과와 CFT 기둥의 비탄성 특성에 대한 값은 표 2.1과 같다. 여기서 특정크리프값은 식(2.1)과 같이 탄성변형도와 크리프변형도의 비를 나타내는 크리프계수(ϕ)로 표현되어 있으며 특정크리프값은 식(2.1)에 탄성변형을 곱함으로써 구할 수 있다.

$$\phi = \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_i} = \frac{\text{크리프변형}}{\text{탄성변형}} \quad (2.1)$$

CFT 기둥의 경우 강관 내부의 콘크리트에 의해 비탄성 거동이 발생을 한다. 그러나 일반콘크리트보다 높은 철골비율과 형태특성으로 인해 일반콘크리트의 비탄성 거동과는 차이를 보이지만 일반콘크리트의 비탄성 거동과 일정한 관계를 보인다면 CFT 기둥의 비탄성 거동은 위의 수행된 실험처럼 일반 콘크리트를 기준으로 설정하는 것이 가능할 것이다. 콘크리트와 CFT 간의 특정크리프

값의 일정한 관계를 산정하여 콘크리트기둥 축소량 계산알고리즘을 기본으로 하여 CFT기둥의 축소량 산정식을 작성할 수 있다.

한편, PCA(Portland Cement Association)에서는 철근콘크리트 구조물의 기둥 축소량 계산시 실제 시공될 콘크리트에 대한 특정크리프의 실험값이 없을 경우 다음 식(2.2)를 사용하고 있다.

$$\epsilon_c^\infty = 0.003/f'_c \sim 0.005/f'_c \quad (2.2)$$

여기서 f'_c 는 압축강도를 나타내며 단위는 psi 이다.

표 2.1 CFT 기둥의 시험체 실험값

연구자	시험체 재료특성	크리프계수	극한건조수축
P.J.Terrey	$f_c=45.2\text{MPa}$ $E_c=30,800\text{MPa}$ CFT-○- $\phi 200 \times 1.5(3.0\%)$ CFT-○- $\phi 200 \times 1.0(2.0\%)$	콘크리트 $\phi^\infty=2.15 \sim 2.3$	625 $\mu\epsilon$ 정도에 근접함
		CFT $\phi^\infty=1.15 \sim 1.25$	콘크리트의 약 11% 정도 발생
Hiroshi Nakai	$f_c=27.83\text{MPa}$ $E_c=22,736\text{MPa}$ CFT-○- $\phi 165.2 \times 4.5(10.6\%)$ CFT-○- $\phi 165.2 \times 5.0(11.7\%)$	콘크리트 $\phi^\infty=2.72 \sim 2.84$	426 $\mu\epsilon$ 정도에 근접함
		CFT $\phi^\infty=1.44 \sim 1.61$	콘크리트의 약 9% 정도 발생
Shosuke Morino	$f_c=19.87\text{MPa}$ $E_c=20,720\text{MPa}$ CFT-□- $100 \times 100 \times 4.5(17.4\%)$ CFT-□- $100 \times 100 \times 3.2(12.4\%)$ CFT-□- $100 \times 100 \times 2.3(9.0\%)$	200일 후 CFT $\phi=0.26 \sim 0.44$	-
Brian Uy	$f_c=56\text{MPa}$ $E_c=35,400\text{MPa}$ CFT-□- $100 \times 100 \times 3(12.9\%)$	콘크리트 $\phi^\infty=2.5$	700 $\mu\epsilon$ 정도에 근접함
		CFT $\phi^\infty=1.25$	200 $\mu\epsilon$ 정도에 근접함

표 2.1에서 Terrey의 콘크리트 시험체의 주어진 탄성계수값으로 구한 단위응력(psi)당 탕성변형($\epsilon_e=1/E_c$)은 $0.224\mu\epsilon$ 이다. 이 값에 크리프계수(2.15~2.3)를 곱하여 구한 특정크리프값은 $0.48\mu\epsilon\sim 0.51\mu\epsilon$ 이며 PCA 제안식에 의한 값은 $0.46\mu\epsilon\sim 0.76\mu\epsilon$ 으로 Terrey의 시험체 특정크리프값은 PCA에서 제안하는 식으로 추정할 수 있다. 이 실험에서 CFT 기둥의 특정크리프값은 일반콘크리트 시험체에 비해 약 54%정도 발생한 것으로 나타났다. 다음으로 Nakai에 의한 실험의 경우 콘크리트 시험체 특정크리프값은 $0.83\mu\epsilon\sim 0.86\mu\epsilon$ 이며 PCA 제안식에 의한 값은 $0.74\mu\epsilon\sim 1.2\mu\epsilon$ 으로 Nakai의 시험체 특정크리프값도 PCA에서 제안하는 식으로 추정할 수 있다. CFT 기둥의 특정크리프값은 일반콘크리트 시험체에 비해 약 55%정도로 Terrey의 실험결과와 비슷하다. Uy의 경우 일반콘크리트 시험체는 크리프계수 2.5와 근접하게 크리프 축소가 발생하고 CFT 기둥의 경우 크리프계수 1.25에 비슷하게 크리프 축소가 발생하였다. Uy의 경우도 CFT 기둥의 특정크리프값은 일반콘크리트의 약 50% 정도이다.

2.1.2 건조수축

Terrey[6]의 시험체의 경우 일반콘크리트의 건조수축값은 140일 지났을 때 약 $500\mu\epsilon$ 정도로 발생하였으며 CFT 기둥의 경우는 140일 후에 $130\mu\epsilon$ 정도의 건조수축이 발생하였다. Terry의 경우 CFT 기둥의 경우 실험 기간 동안 온도의 변화로 인한 온도 변화로 실제 CFT 기둥의 축소량은 무시할 정도라고 언급하였다. Nakai[7]의 실험의 경우 160일 경과한 후의 콘크리트 건조수축값은 $360\mu\epsilon$ 정도 발생하였고 CFT 기둥의 경우 $40\mu\epsilon$ 정도 발생하였다. Uy[9]의 실험의 경우 일반콘크리트의 건조수축의 경우 $700\mu\epsilon$ 의 극한건조수축값과 비슷하게 진행하였고, CFT 기둥의 경우 $200\mu\epsilon$ 극한건조수축값과 비슷하게 진행한 것으로 나타났다.

2.2 가압 조건과 길이에 따른 CFT 기둥의 장기거동

국내에서는 김진근, 권승희[10], 최내원[11], 김태환[12] 등에 의해 CFT기둥의 장기거동에 대한 연구가 이루어졌다. CFT 기둥의 장기거동은 가압하는 조건에 따라 거동이 조금씩 다른데 김진근[16], 권승희[17]는 □ - 150×150, 콘크리트 강도 49MPa의 일반콘크리트와 같은 강도의 콘크리트가 충전된 CFT 기둥 시험체에 강관과 콘크리트 동시 가압, 강관과 콘크리트 면적의 4/3 가압, 강관과 콘크리트 면적의 2/1 가압, 콘크리트만 가압하는 5가지 방법으로 구분하여 가압조건에 따른 CFT 기둥의 장기거동을 연구하였다. 그리고 길이에 대한 축소량의 영향을 알아보기 위하여 길이가 각각 600mm, 900mm, 1200mm인 CFT 기둥 시험체를 제작하여 비교하는 실험을 수행하였다.

표 2.2 콘크리트와 강관에 작용하는 하중의 비

	P_s/P_{total}	P_c/P_{total}	P_c/P_{SCE}
콘크리트만 가력	0.48	0.51	1
강관+콘크리트 면적1/2 가력	0.57	0.43	0.83
강관+콘크리트 면적3/4 가력	0.63	0.37	0.71
강관만 가력	1	0	0

표 2.2에서 P_s 와 P_c 는 강관과 콘크리트가 받는 하중이다. 전체 하중에서 콘크리트와 강관에 하중이 얼마나 전달되는지에 대해 알아보기 위해 전체 하중을 기준으로 하여 가압 조건에 따라 콘크리트에 전달되는 하중의 비를 구한 것이다. P_{SCE} 는 콘크리트만 가압할 때 콘크리트가 받는 하중으로 이 하중을 기준으로 각각의 가압방법에 따른 하중의 비를 구하였다. 그림 2.2에서 A_{SCE} 는 콘크리트만 가압할 때의 콘크리트 가압면적이다. 콘크리트 면적 3/4과 콘크리트 면적

1/2를 가압하는 경우에 콘크리트에 전달되는 하중은 전체면적을 가압하는 면적의 비에 따른 0.75, 0.5보다 더 큰 초기압력이 콘크리트에 가해지는 것을 알 수 있다.

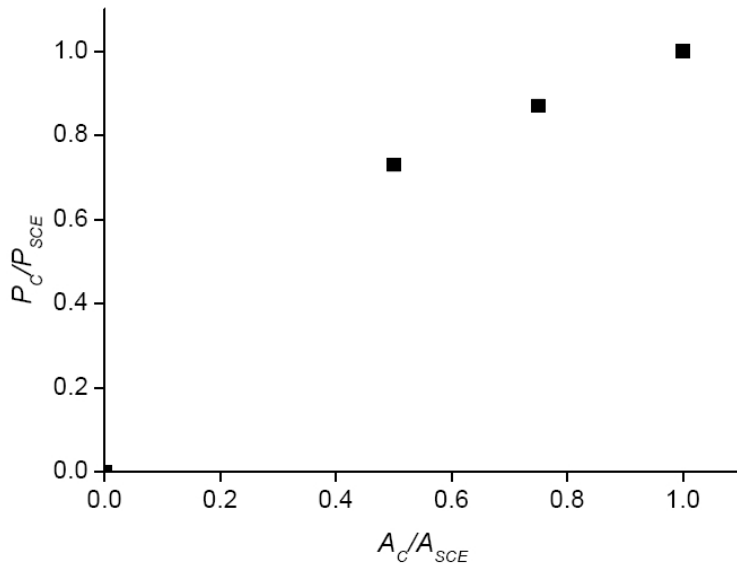


그림 2.2 콘크리트에 전달되는 응력의 상관관계[16]

그림 2.3은 가압 시험에 따른 CFT 기둥의 특정크리프값을 나타낸 그래프이다. 일반콘크리트(S-PC)의 경우가 가장 크고 CFT 기둥에서 콘크리트부분만 가압(S-CFT-C)한 경우가 일반콘크리트에 비해 조금 작게 나타났다. 그 이유는 콘크리트의 프와송 효과에 의한 강관과의 마찰력으로 인해 그 차이가 발생하는 것이다. 강관과 콘크리트 전체면적을 가압(S-CFT-E)한 경우와 강관과 콘크리트 면적의 3/4(SCQ)을 가압한 경우, 강관과 콘크리트 면적 1/2(SCH)을 가압한 경우는 시간에 따른 특정크리프값이 비슷하게 나타났다. 이는 강관 내부에 설치되는 격벽의 크기가 콘크리트 면적의 1/2 이상일 경우에는 전체를 가압한 경우와 같은 조건으로 장기거동을 한다는 것을 알 수 있다.

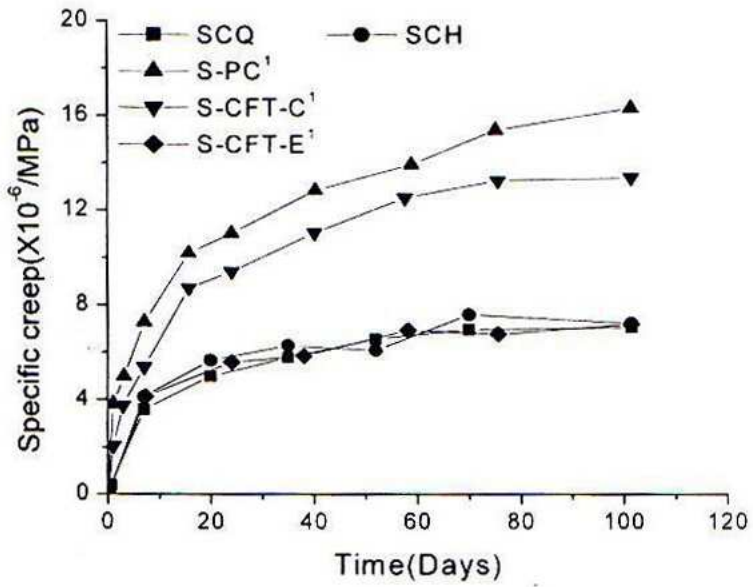


그림 2.3 CFT 기둥의 가력조건에 따른 특정크리프값 [17]

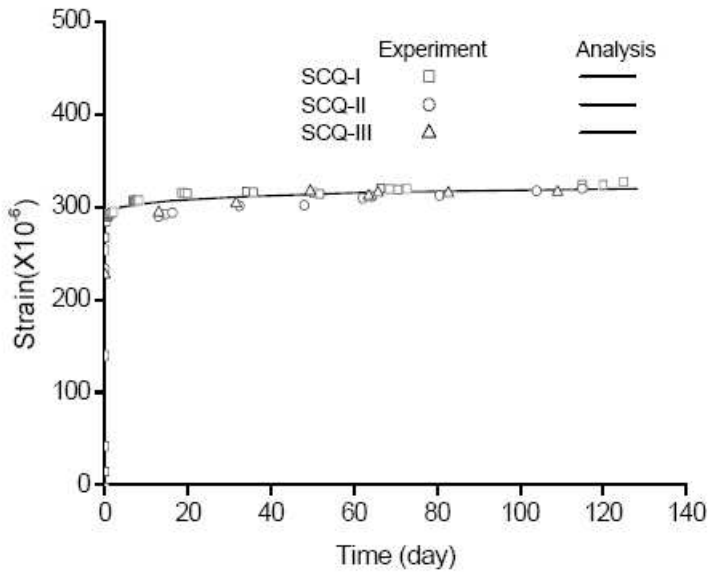


그림 2.4 CFT 기둥의 길이에 따른 축소량 결과 [17]

그림 2.4에서 SCQ-I, SCQ-II, SCQ-III는 각각 길이가 600mm, 900mm, 1200mm의 CFT 기둥 시험체이다. 다른 길이의 CFT 기둥 시험체는 축소량이 시간이 지남에 따라 거의 일치하는 결과를 보이는 것으로 보아 CFT 기둥의 시간에 따른 거동은 CFT 기둥의 길이에 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

3. 확률론적 CFT 기동축소량 해석

3.1 기동축소량 일반사항

수직부재에 발생하는 축소는 크게 탄성축소와 비탄성축소로 나눌 수 있다. 비탄성축소는 다시 크리프 축소와 건조수축에 의한 축소로 나누어 해석한다. 단순 철골조의 경우 탄성축소만 발생하기 때문에 해석에 그리 어려움이 없으나 RC조나 복합부재의 경우 콘크리트의 재료적 특성에 의해 탄성축소와 함께 시간에 따라 비탄성축소인 크리프와 건조수축이 발생하여 축소량 예측에 어려움이 있다.

기동의 시간에 따른 장기 변형은 슬래브타설 이후에도 발생하여 수직부재간의 부등변형을 야기하므로 이에 따른 해석이 이루어져야 하며 수직부재간의 부등변형으로 인한 사용성이나 안전성 등에 문제가 발생하지 않도록 정확한 예측과 보정이 필요하다. 표 3.1은 각 기동축소량에 영향을 미치는 요인이다.

표 3.1 기동축소량에 영향을 미치는 요인

축소량의 종류	영향을 미치는 요인
탄성 축소량	하중, 탄성계수, 층고, 기동의 변환단면적
크리프 축소량	특정크리프계수, 하중, 하중작용시점, 하중작용시간, 체적-표면적비, 상대습도, 철근비, 층고
건조수축 축소량	극한건조수축변형도, 경과시간, 체적-표면적비, 상대습도, 철근비, 층고

3.1.1 탄성 축소량

기둥축소량의 탄성 축소량은 식 3.1과 같다. 탄성 축소량은 건물이 건설되면서 누적되는 하중과 시간의 변화에 따른 기둥의 변환단면적, 층고, 시간에 따른 콘크리트 탄성계수의 변화에 의해 구해진다.

$$\Delta_{EL} = \sum \frac{P \times h}{A_t \times E_{ct}} \quad (3.1)$$

$$A_t = A_g + A_s \times (n_t - 1) \quad (3.2)$$

$$n_t = \frac{E_s}{E_{ct}} \quad (3.3)$$

$$E_{ct} = 33w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}} \quad (3.4)$$

$$f_{ct} = f_{28} \times \frac{t_{la}}{4 + 0.85t_{la}} \quad (3.5)$$

여기서,

P : 작용하중

A_t : 시간 종속적 기둥의 변환단면적

h : 층고

E_{ct} : 시간 종속적 콘크리트 탄성계수

A_g : 기둥의 전체단면적

A_s : 철근의 단면적

E_s : 철근의 탄성계수

n_t : 시간 종속적 탄성계수비

w : 콘크리트의 밀도(kg/m^3)

f'_{ct} : 콘크리트의 강도 (psi)

f'_{28} : 콘크리트의 28일 재령강도 (psi)

3.1.2 비탄성 축소량

1) 크리프 축소량

크리프는 콘크리트가 수년간 지속적으로 하중을 받을 때 발생하는 변형으로서 기본크리프와 건조크리프가 있다. 기본크리프는 수분 평형 상태에서 발생하는 것으로서 주위 환경과 어떠한 수분의 이동도 없을 때 발생하는 크리프를 의미한다. 반면 건조 크리프는 하중을 받는 부재와 주위환경과의 수분교환에 의해 발생하는 것으로서 재하 초기에만 영향을 끼친다. 식 3.6a는 슬래브타설 이전, 식 3.6b는 슬래브타설 이후의 크리프 축소량을 나타낸 것이다.

$$\Delta_{CR}^{UPTO} = \sum (P/A_t) \times C_u \times CR_t \times h \times CR_{ia} \times CR_{v/s} \times CR_{RH} \times CR_{sr} \quad (3.6a)$$

$$\Delta_{CR}^{SUBTO} = \sum (P/A_t) \times C_u \times (1 - CR_t) \times h \times CR_{ia} \times CR_{v/s} \times CR_{RH} \times CR_{sr} \quad (3.6b)$$

$$CR_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \quad (3.7)$$

$$CR_{ia} = 2.3(t_{ia})^{-0.25} \quad (3.8)$$

$$CR_{vs} = \frac{0.00173(v/s) + 0.934}{0.00394(v/s) + 0.85} \quad (3.9)$$

$$CR_{RH} = 1.0 \quad (RH < 40) \quad (3.10)$$

$$= 1.40 - 0.01 \times RH \quad (RH \geq 40)$$

$$CR_{sr} = 1 - \exp[-\rho \times n_t \times C_u \times CR_{ia} \times CR_{vs} \times E_{ct} / (1 + \rho \times n)] \quad (3.11)$$

$$/ [(C_u \times CR_{ia} \times CR_{vs}) \times E_s \times \rho]$$

여기서

P : 작용하중

A_t : 시간 종속적 기둥의 변환단면적

C_u : 특정크리프계수

CR_{ta} : 하중작용시점의 재령효과

CR_t : 시간에 대한 creep 비율

CR_{vs} : 체적-표면적비 효과

CR_{RH} : 상대습도 효과

CR_{sr} : 철근비 효과

(v/s) : 체적-표면적비(mm)

RH : 상대습도

크리프에 대한 전체 축소량은 슬래브타설 이전과 타설 이후에 대한 합과 같으며 다음 식 3.12와 같다.

$$\Delta_{CR} = \Delta_{CR}^{UPTO} + \Delta_{CR}^{SUBTO} \quad (3.12)$$

2) 건조수축 축소량

콘크리트의 건조수축은 부재 표면에서 수분이 증발함으로써 발생하게 된다. 건조수축의 진행속도는 초기재령에서 높으며 재령이 증가함에 따라 진행속도가 느려진다. 또한 건조수축은 콘크리트 재령뿐만 아니라 주위환경의 상대습도, 부재크기, 콘크리트 배합비 등에 의해 많은 영향을 받는다. 식 3.13a는 슬래브타설 이전, 식 3.13b는 슬래브타설 이후의 건조수축 축소량을 나타낸 것이다.

$$\Delta_{SH}^{UPTO} = \sum \epsilon_{shu} \times SH_t \times SH_{vs} \times SH_{RH} \times SH_{sr} \times h \quad (3.13a)$$

$$\Delta_{SH}^{SUBTO} = \sum \epsilon_{shu} \times (1 - SH_t) \times SH_{vs} \times SH_{RH} \times SH_{sr} \times h \quad (3.13b)$$

$$SH_t = \frac{t_s}{35 + t_s} \quad (3.14)$$

$$SH_t = \frac{0.00146(v/s) + 0.944}{0.00697(v/s) + 0.734} \quad (3.15)$$

$$SH_{RH} = 1.0 \quad (RH < 40) \quad (3.16)$$

$$= 1.40 - 0.01 \times RH \quad (40 \leq RH < 80)$$

$$= 3.00 - 0.03 \times RH \quad (80 \leq RH)$$

$$SH_{sr} = 1 - \exp[-\rho \times n_t \times C_u \times CR_{ia} \times CR_{v/s} \times E_{ct} / (1 + \rho \times n_t)] \quad (3.17)$$

$$/ [(C_u \times CR_{ia} \times CR_{vs}) \times E_s \times \rho]$$

여기서

ϵ_{shu} : 극한건조수축 변형

SH_{vs} : 체적-표면적비 효과

SH_{RH} : 상대습도 효과

SH_{sr} : 철근비 효과

SH_t : 시간에 대한 건조수축 비율

RH : 상대습도

t_s : 타설 후 경과시간(일)

C_u : 특징크리프계수

CR_{ia} : 하중작용시점의 재령효과

CR_{vs} : 체적-표면적비 효과

건조수축 축소량의 전체 축소량은 슬래브타설 이전과 타설 이후에 대한 합과 같으며 다음 식 3.18과 같다.

$$\Delta_{SH} = \Delta_{SH}^{UPTO} + \Delta_{SH}^{SUBTO} \quad (3.18)$$

3.2 Monte-Carlo 기법

Monte-Carlo 추출법은 컴퓨터 등의 전산기를 이용한 모의실험을 통해 현실 세계를 가상적으로 모사하는 방법으로 1940년대에 미국에서 핵무기에 대한 연구를 위해 개발되었다. Monte-Carlo 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.

3.2.1 균일분포의 난수발생

0에서 1사이에서 균일하게 분포하도록 발생된 난수는 통계적으로 독립이고 재생산이 용이해야 한다. 이러한 성질을 만족하는 균일분포 난수의 발생을 위해서는 Power Residue Method를 이용하는데 이는 간단한 선형변환으로부터 계산된 값을 modulus m 으로 나눈 나머지를 반복하여 계산하는 방법이다. 음이 아닌 정수 a 와 c , 그리고 m 을 이용하여 식 3.19와 같이 x_i 를 modulus m 으로 나눈 나머지를 x_{i+1} 로 발생하여 이용한다.

$$x_{i+1} = (ax_i + c)(\text{mod } m) \quad (3.19)$$

이를 위해서 $ax_i + c$ 를 modulus m 으로 나눈 값의 정수부분을 k_i 라고 하면

$$k_i = \text{Int}\left(\frac{ax_i + c}{m}\right) \quad (3.20)$$

식 3.19의 x_{i+1} 은 다음과 같이 구할 수 있으며

$$x_{i+1} = ax_i + c - mk_i \quad (3.21)$$

이를 다시 module m 으로 나누어 얻어지는 u_{i+1} 는

$$u_{i+1} = \frac{x_{i+1}}{m} \quad (3.22)$$

0에서 1 사이의 균일분포 난수가 된다.

3.2.2 표준정규분포난수의 발생

표준정규분포는 통계·확률 이론에서뿐만 아니라 구조 신뢰성 이론에서도 가장 중요하고 보편적으로 이용되는 분포이다. 본 논문에서는 기동축소량의 확률 매개변수를 정규분포로 가정한다.

Box[18] 등에 의해 0과 1 사이에서 추출된 서로 독립인 두 균일분포 난수 u_1 과 u_2 에 의해 정의되는 다음 식 3.23a와 3.23b와 같은 변수 x_1 과 x_2 는 서로 독립인 표준정규분포 확률변수의 짝을 이룬다는 사실이 알려졌다.

$$x_1 = (-2\ln u_1)^{1/2} \cos(2\pi u_2) \quad (3.23a)$$

$$x_2 = (-2\ln u_1)^{1/2} \sin(2\pi u_2) \quad (3.23b)$$

따라서 평균이 μ 이고 표준편차가 σ 인 정규분포함수에 대한 난수는 다음 식 3.24a와 3.24b를 이용하여 추출할 수 있다.

$$x_1 = \mu + \sigma(-2\ln u_1)^{1/2} \cos(2\pi u_2) \quad (3.24a)$$

$$x_2 = \mu + \sigma(-2\ln u_1)^{1/2} \sin(2\pi u_2) \quad (3.24b)$$

위의 두 식 3.24a와 3.24b를 이용하여 기동축소량 모델에 대한 변수들의 난수를 발생시킬 수 있다.[19]

본 논문에서는 L'Ecuyer[20]가 제안한 난수 생성기를 이용한 프로그램[21]을 이용하였다.

3.3 몬테카를로 기법에 의한 확률론적 기동축소량 해석법

기동축소량에 대한 계산식을 바탕으로 유추한 확률론적 기동축소량 해석법은 다음과 같다.

$$\Delta_{D.T} = \Delta_{el} + \Delta_{cr} + \Delta_{sh} \quad (3.25)$$

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.

$$\Delta_{S.T} = \Delta_{el}^S + \Delta_{cr}^S + \Delta_{sh}^S \quad (3.26)$$

$$\Delta_{el}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{el}) \quad (3.27)$$

$$\Delta_{cr}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{cr}) \quad (3.28)$$

$$\Delta_{sh}^S = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^m (\Delta_{sh}) \quad (3.29)$$

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.

3.4 CFT 기둥 축소량 모델에 대한 확률변수

3.4.1 콘크리트 강도

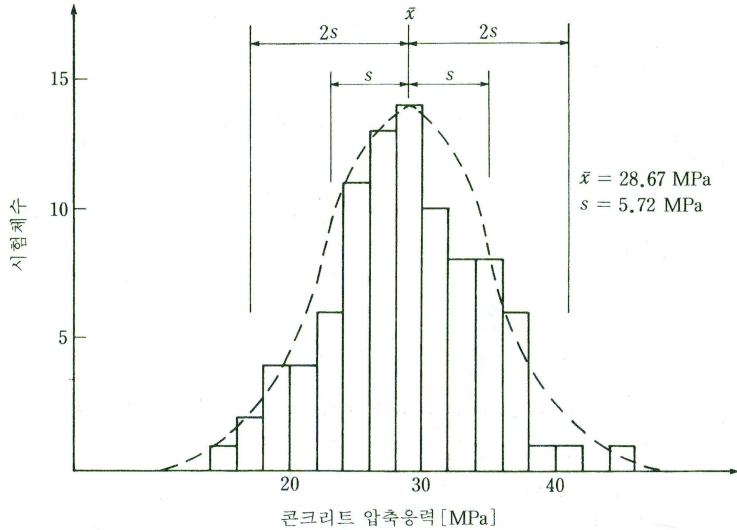


그림 3.1 콘크리트 강도의 분포[22]

콘크리트는 구성 재료의 혼합비에 따라 재료의 성질이 달라지며, 같은 배합 설계에서도 운반, 타설, 다짐, 양생 등에 따라서도 강도에 변화가 생긴다.

따라서 어떤 배합비를 가진 콘크리트의 강도를 결정하기 위해서는 충분한 수의 강도시험을 거쳐야 하며, 여기서 얻은 값들을 통계 처리하여 강도와 그 변화의 폭을 평가하게 된다. 그림 3.1은 압축강도 21MPa의 콘크리트 배합의 표준 공시체 90개의 압축강도 시험 결과를 막대그래프와 분포곡선으로 나타낸 것인데 시험 결과 평균 압축강도는 28.67MPa이나, 15MPa부터 45MPa까지 다양한 분포를 보이고 있다.[22]

30회를 넘는 많은 시험을 할 경우 그 분포는 일반적으로 그림 3.1의 파선과 같은 정규분포를 보인다. 정규분포는 평균값에 대하여 대칭인 곡선이다. 하지만

매우 많은 시험을 하지 않는 경우에는 진평균치를 얻을 수 없기 때문에 실용적으로 산술평균치는

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.30)$$

으로 계산하며, 여기에서 얻게 되는 평균치 \bar{x} 에 대하여 추정 표준편차는

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.31)$$

으로 계산된다.

표준편차를 평균치로 나눈 값

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (3.32)$$

은 변동계수를 나타낸다. 변동계수는 콘크리트강도의 품질관리를 나타내는 것으로 표 3.2와 같다.

표 3.2 관리정도와 변동계수와의 관계 [22]

관리의 정도	우수	보통	불량
변동계수(%)	10% 이하	15%	20% 이상

어느 범위에서 확률을 나타내는 한계를 신뢰한계(confidence limit)라고 하며, 그 이외의 부분을 결여분(defection)이라고 한다. 예를 들어 그림 3.2의 경우처럼

범위 $\bar{x} \pm 1.34s$ 의 범위에서 82%의 신뢰한계를 가지며 결여분은 \bar{x} 의 전후에 각각 9%가 된다.

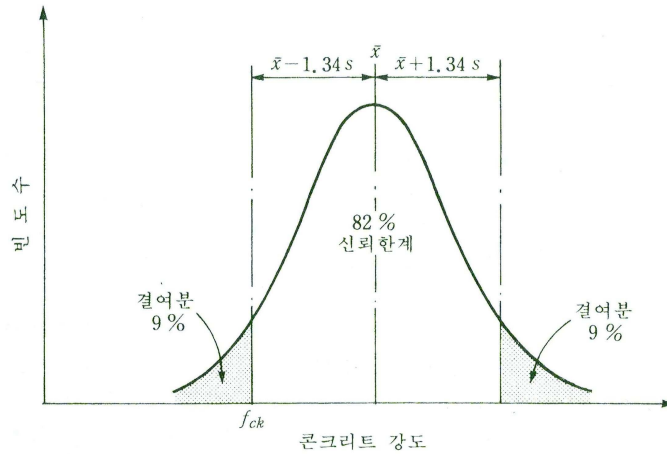


그림 3.2 정규분포 곡선 [24]

건축구조설계기준[23]에서 제시하는 평균 소요배합강도 f_{cr} 은

$$f_{cr} = f_{ck} + 1.34s \quad (3.33a)$$

$$f_{cr} = (f_{ck} - 3.5) + 2.33s \quad (3.33b)$$

에 의하여 계산된 두 값 중에서 큰 값보다 커야 한다. 그리고 표준편차의 계산을 위한 현장강도 기록 자료가 없는 경우 표 3.3에 따라 결정하여야 한다.

표 3.3 시험횟수가 15회 미만이거나 기록이 없는 경우의 소요배합강도 [23]

설계기준강도, $f_{ck} MPa$	소요배합강도, $f_{ck} MPa$
21 미만	$f_{ck} + 7$
21 이상 35 이하	$f_{ck} + 8.5$
35 초과	$f_{ck} + 10$

3.4.2 크리프계수

표 3.4 크리프계수의 변동계수에 대한 데이터[24]

기본 크리프의 변동계수		건조 크리프의 변동계수	
Test data	ω	Test data	ω
1. Keeton	37.5	1. Hansen and Mattock	32.1
2. Kommendant	31.8	2. Keeton	46.3
3. L'Hermite et al.	133.4	3. Troxell et al.	33.0
4. Rostasy et al.	47.6	4. L'Hermite et al.	55.8
5. troxell et al.	13.9	5. Rostasy et al.	20.9
6. York et al.	37.7	6. York et al.	42.1
7. McDonald	48.4	7. Mcdonald	40.4
8. Maity and Meyers	30.0	8. Hummel	46.2
9. Mossiossian and Gamble	51.5	9. L'Hermite and Mamillan	62.5
10. Hassen and Harboe et al. (Ross Dam)	51.2	10. Mossiossian and Gamble	71.7
11. Browne et al. (Wylfa vessel)	47.3	11. Maity and Meyer	45.9
12. Hansen and Harboe et al. (Shasta Dam)	107.8	12. Russel and Burg (Water Tower Place)	41.2
13. Brooks and Wainwright	14.9		
14. Pirtz (Dworshak Dam)	58.2		
15. Hansen and Harboe et al. (Canyon ferry Dam)	70.2		
16. Russel and Burg (Water Tower Place)	19.3		
17. Hanson	63.3		
ω_{all}	58.1	ω_{all}	46.8

CFT 기둥의 크리프값 역시 강재 내부에 충전되는 콘크리트의 배합에 따라 달라지므로 실제 기둥축소량 계산시에는 동일한 배합비를 사용하여 콘크리트 재료실험을 통한 정확한 측정이 필요하다. 하지만 이러한 현장 실험값이 없을 경우 어느 정도 변동값을 가정하여 확률론적으로 기둥축소량을 예측할 수 있

다. 일반콘크리트의 기본크리프와 건조크리프의 변동계수의 경우 연구를 통하여 많은 수의 데이터들이 축적되어 있어 각각의 크리프계수의 확률·통계적인 특성이 Bazant와 Baweja[24]에 의해 표 3.4에 변동계수가 제안되었다.

위의 표와 같이 일반적인 콘크리트의 크리프는 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 임의로 10%에서 50%까지 10%씩 변화시켜 본다.

3.4.3 하중

기둥축소량에 많은 영향을 미치는 요인 중 하나가 하중이다. 기둥에 작용하는 하중은 기본적으로 고정하중인 골조 자중, 슬래브 하중, 마감하중이 있다. 그리고 활하중이 있고 그 외에 풍하중, 지진하중, 설하중 등이 있는데 후자의 경우는 항상 작용하는 것이 아니라 건물이 존재하는 동안 일어날 수 있는 경우에 대비해 설계를 위한 하중이다. 따라서 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 사용용도에 따라 설계하중이 정해지는데 이는 변동성이 고정하중에 비해 큰 편이다. 기둥축소량 해석에는 설계하중이 아니라 실하중이 사용되어야 하는데 활하중의 실하중을 측정하는 것은 상당히 어렵다. 때문에 기둥축소량 해석시 하중의 변동성을 고려하기 위하여 하중의 변동계수를 5%에서 20%까지 5%씩 변화시켜 본다.

4. 예제건물 CFT 기둥의 결정론적 방법에 의한 해석

4.1 예제건물 일반사항

4.1.1 예제건물 개요

수원 S 연구소는 CFT 기둥을 주요 구조부재로 한 초고층 건물로 국내에서 최초로 건설되었다. 이 건물의 현장개요는 표 4.1과 같이 RC Core+CFT 기둥 구조로 되어 있으며 37층의 건물이지만 연구소의 용도 때문에 기준층 층고가 4.2m이며 특수실험실의 경우 층고가 14m에 달한다. 따라서 높은 층고 때문에 건물의 총 높이는 183.75m로 50층의 초고층 아파트와 비슷한 높이이다. 아래의 그림 4.1은 예제건물의 고층부 기준층 평면도이며 축소량 해석을 수행한 기둥의 위치가 표시되어 있다. 해석대상인 C1기둥은 지하 4층부터 최고층까지 뻗어 있으며 표 4.2에 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.

표 4.1 예제건물 현장개요

대지면적	197,045m ² (59,606평)		
건축면적	117,452m ² (35,500평)	건폐율	41.51%
지상연면적	214,877m ² (65,000평)	용적율	109.05%
구조	RC CORE+CFT 구조		
규모	지하5층, 지상 37층		
최고높이	183.75m		
공사 기간	'03.09~'05.09(24.5개월)		

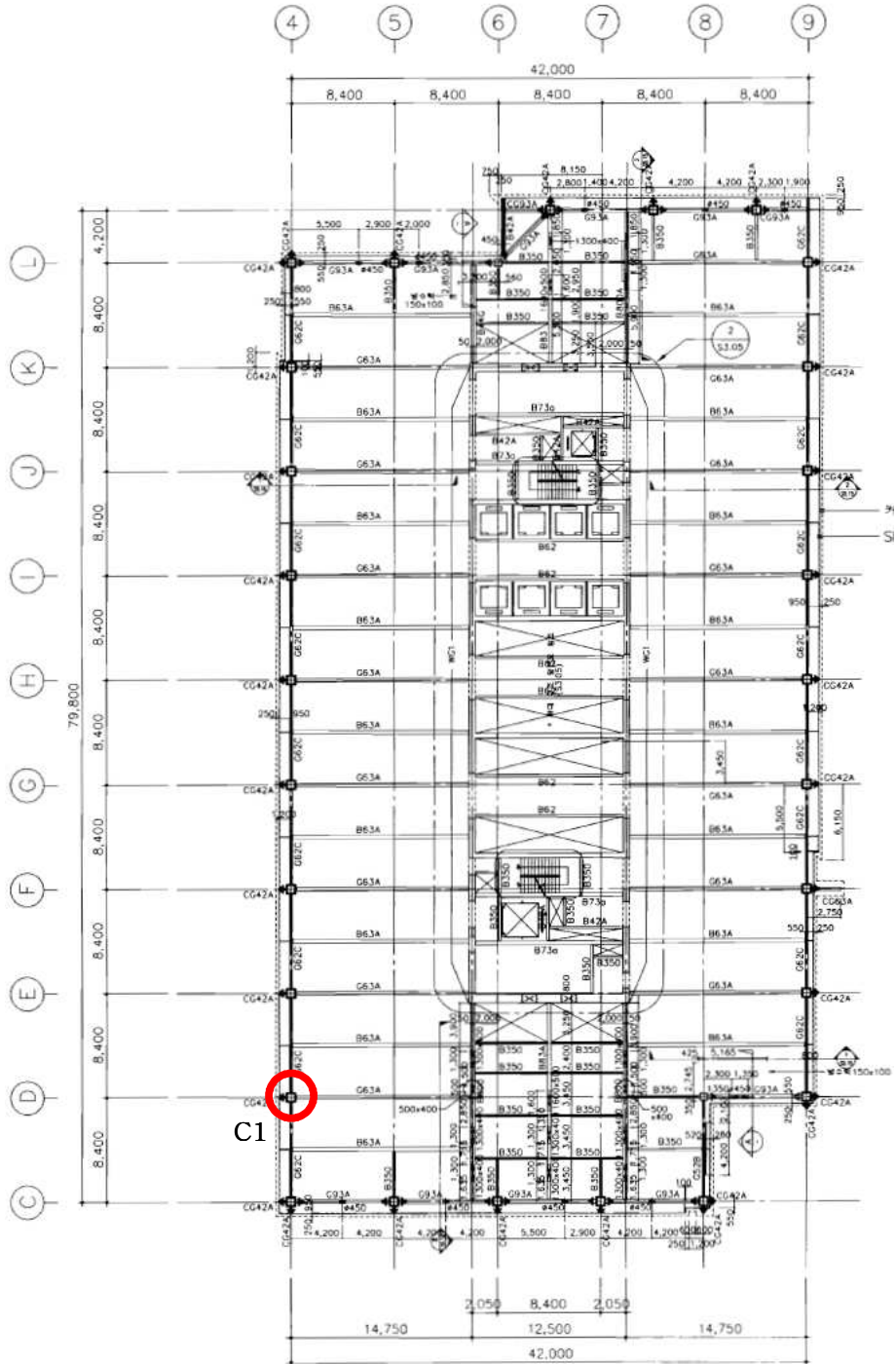
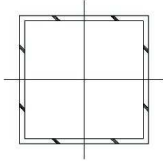


그림 4.1 고층부 기준층 평면도

표 4.2 기둥단면 정보

	C1
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

4.1.2 기둥축소량 입력값

표 4.3은 예제 건물의 CFT 기둥축소량 계산에 사용하게 될 입력값인 재료특성과 재하하중을 정리한 것이다. 그 상세 내용은 다음과 같다.

표 4.3 대상 부재의 재료특성

	콘크리트 강도	크리프 값	건조수축 값	하 중
입력값	49.04 MPa	3.377×10^{-7}	6.50×10^{-5}	표 4.4 참조

기둥축소량 해석시 콘크리트 압축강도는 일반적으로 재료실험값을 사용하여

야 한다. 그러나 재료실험값이 없을 경우에는 설계강도를 사용하여 기둥축소량 해석을 수행한다. 본 논문에서는 콘크리트 압축강도를 설계기준강도인 49.04MPa를 사용하였다. CFT기둥의 특정크리프값은 강관 내부에 채워지는 콘크리트의 특정크리프값을 근거로 추정한다. 콘크리트의 특정크리프값은 콘크리트의 재료시험결과를 사용하지만 재료실험값이 없는 경우 PCA에서 제시하는 일반적인 콘크리트의 특정크리프값인 $0.003/f'_c \sim 0.005/f'_c$ 를 사용한다. 여기서 f'_c 는 콘크리트 압축강도이며 단위는 psi이다. 본 논문에서는 PCA에서 제시하는 값의 평균값 $0.004/f'_c$ 을 사용하여 예제건물의 콘크리트 강도로 계산된 콘크리트의 특정크리프 값은 5.628×10^{-7} 이다. CFT 기둥의 특정크리프값은 앞장에 소개한 기존의 연구에 따르면 콘크리트의 특정크리프 값의 50%~60%정도이며 최대치인 60%를 적용하면 해석모델의 최종 CFT기둥의 특정크리프값은 3.377×10^{-7} 으로 계산된다.

극한건조수축값 역시 일반적으로 콘크리트의 재료시험을 통하여 그 값을 결정하여야 하지만 재료실험값이 없는 경우 PCA에서 제시하는 일반적인 콘크리트의 극한건조수축값인 $500\mu\epsilon \sim 800\mu\epsilon$ 사이의 값을 사용하며, 본 논문에서는 PCA에서 제시하는 값의 평균값인 $650\mu\epsilon$ 사용하였다. CFT 기둥의 극한건조수축값 역시 특정크리프값처럼 일반콘크리트의 극한건조수축값을 기준으로 CFT 기둥의 극한건조수축값을 계산하였다. 앞장에서 설명하였듯이 CFT 기둥의 건조수축은 거의 없거나 무시해도 될 정도라고 선행연구에서 실험결과를 제시하였지만, 건조수축이 완전히 발생하지 않는다고는 볼 수 없으므로 일반적인 콘크리트에서 발생하는 값의 10%를 적용하여 CFT 기둥의 극한건조수축값을 $65\mu\epsilon$ 로 하여 해석을 수행하였다.

예제 건물은 국내에서 상용되고 있는 MIDAS Gen 프로그램을 이용하여 구조설계 되었으며 CFT 기둥 축소량 계산에 사용하게 될 하중 역시 위의 프로그램 결과값을 사용하였다. 각 층별 하중은 표 4.4와 같으며 그 하중이 재하시점은 표 4.5와 같다.

표 4.4 하중의 크기

층 수	고정하중				활하중
	골조자중(tf)	슬래브하중(tf)	마감하중(tf)	커튼월(tf)	활하중(tf)
37F	16.03	21.68	0.00	1.57	31.1663
36F	10.80	21.61	0.00	0.91	30.9319
35F	11.85	22.91	7.98	1.04	14.3729
34F	7.83	22.99	8.03	0.53	14.3613
33F	7.84	22.96	8.02	0.53	20.9981
32F	7.84	22.98	8.02	0.53	21.0344
31F	7.84	23.00	8.03	0.53	21.0512
30F	7.84	23.03	8.04	0.53	21.0761
29F	7.84	23.06	8.05	0.53	21.1033
28F	7.84	23.09	8.05	0.53	21.1341
27F	7.85	23.13	8.07	0.53	21.1682
26F	7.85	23.16	8.08	0.53	21.2055
25F	7.85	23.21	8.09	0.53	21.2461
24F	7.85	23.25	8.10	0.53	21.2899
23F	7.86	23.30	8.12	0.53	21.3368
22F	7.86	23.36	8.14	0.54	21.3869
21F	7.86	23.41	8.15	0.54	21.4401
20F	7.87	23.47	8.17	0.54	21.496
19F	7.87	23.53	8.19	0.54	21.5563
18F	8.13	23.59	8.21	0.54	21.6115
17F	8.13	23.65	8.23	0.54	21.6646
16F	8.14	23.71	8.25	0.54	21.7269
15F	8.39	23.78	8.27	0.54	21.7861
14F	8.40	23.84	8.29	0.54	21.843
13F	8.40	23.90	8.31	0.54	21.9051
12F	8.65	23.97	8.33	0.54	21.9674
11F	8.65	24.03	8.35	0.55	22.0253
10F	8.65	24.09	8.37	0.55	22.0865
9F	8.89	24.16	8.39	0.55	22.1483
8F	8.89	24.22	8.41	0.56	22.2079
7F	8.89	24.29	8.43	0.56	22.2669
6F	13.83	24.35	8.44	0.92	22.3398
5F	12.35	23.11	0.00	0.79	32.4598
4F	12.35	24.55	9.85	0.79	32.5688
3F	14.42	44.04	17.62	0.00	59.0357
2F	15.59	43.86	17.54	0.00	58.7648
1F	19.26	44.91	17.91	0.00	59.8737
B1	17.50	20.69	8.44	0.00	21.6984
B2	13.68	24.01	0.00	0.00	32.6699
B3	15.40	23.10	0.00	0.00	25.9758
B4	26.28	23.92	0.00	0.00	26.7995
합 계	427.11	1020.90	315.67	21.11	1044.78

표 4.5 부재 타설 일정 및 하중 재하시점

층 수	타설일(일)	고정하중				활하중
		골조자중(일)	슬라브하중(일)	마감하중(일)	커튼월(일)	활하중(일)
37F	235	235	250	415	259	800
36F	229	229	244	408	254	800
35F	223	223	238	401	249	800
34F	217	217	232	394	244	800
33F	211	211	226	387	239	800
32F	205	205	220	380	234	800
31F	199	199	214	373	229	800
30F	193	193	208	366	225	800
29F	187	187	202	359	221	800
28F	183	183	198	352	217	800
27F	179	179	194	345	213	800
26F	175	175	190	338	209	800
25F	171	171	186	331	205	800
24F	167	167	182	324	201	800
23F	162	162	178	317	197	800
22F	157	157	174	310	193	800
21F	152	152	170	303	189	800
20F	147	147	166	296	185	800
19F	142	142	162	289	181	800
18F	138	138	158	282	177	800
17F	134	134	154	275	173	800
16F	130	130	150	268	169	800
15F	126	126	146	261	165	800
14F	122	122	142	254	161	800
13F	118	118	138	247	157	800
12F	114	114	134	240	153	800
11F	110	110	130	233	149	800
10F	106	106	126	226	145	800
9F	102	102	122	219	141	800
8F	98	98	118	212	137	800
7F	94	94	114	205	133	800
6F	90	90	110	198	129	800
5F	83	83	103	191	125	800
4F	76	76	96	184	121	800
3F	69	69	87	177	설치	800
2F	62	62	78	304		800
1F	55	55	69	279		800
B1	48	48	60	254		800
B2	26	26	48	229	안함	800
B3	24	24	36	204		800
B4	12	12	24	179		800

4.1.3 해석기준일

기동축소량은 재하 즉시 발생하는 탄성 축소량 이외에 시간이 지남에 따라 축소량이 발생하는 비탄성 축소량도 발생하기 때문에 해석기준일에 따라서 축소량의 값은 달라진다.

CFT 기둥의 구조는 다른 구조에 비해 공기가 빠른 편이다. 해당 예제 건물의 경우 착공 이후로 기초 공사를 제외하고 골조 완성까지 6개월이 소요되었고 건물이 완공되기까지 총 24.5개월이 소요되었다. 따라서 기동축소량 해석시점을 추가 고정하중이 거의 없는, 건물이 완공되고 사용자들이 입주하기 직전인 착공 후 750일로 하였다. 따라서 본 논문에서는 기동축소량 해석에 사용되는 하중은 골조 자중과 슬래브 하중, 마감하중, 커튼월 등 4가지의 고정하중을 고려하여 해석을 수행하였다.

4.2 결정론적 방법에 의한 해석

결정론적 방법에 의한 기동축소량 해석은 앞 절에서 산출된 정량적인 입력값을 사용하였으며, 적용성이 입증된 CSA프로그램으로 수행한 결과로 다음과 같다.

4.2.1 슬래브타설 이후의 축소량

슬래브타설 이후(Sub to)의 축소량은 해당층의 슬래브가 타설된 이후에 해당층의 수직부재에 발생하는 축소량으로써 보와 슬래브에 부가응력을 발생하거나 파티션이나 조적벽 등 비구조체에 균열을 발생시키는 주요원인이 될 수 있기 때문에 슬래브타설 이후의 축소량을 정확히 추정하여 보정하여야 한다.

그림 4.2는 CFT 기둥 축소량을 해석한 후의 결과값 중 슬래브타설 이후의 각 축소량을 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타나 있듯이 탄성 축소량의 경우

는 22층(해석의 편의를 위해 지하 4층을 1층으로 하여 해석을 수행하였기에 그래프의 1층은 지하4층임)에서 37.31mm, 크리프의 경우는 28층에서 13.92mm, 건조수축의 경우는 37층에서 0.80mm의 최대값을 나타내고 있다. 각 축소량의 합인 슬래브타설 이후 전체 축소량값은 22층에서 50.98mm의 최대값이 나타난다. 슬래브타설 이후의 축소량은 최대 축소량이 일어나는 22층의 경우는 탄성 축소량이 전체 축소량의 약 73% 정도로 탄성 거동이 CFT 기둥의 슬래브타설 이후 축소량에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

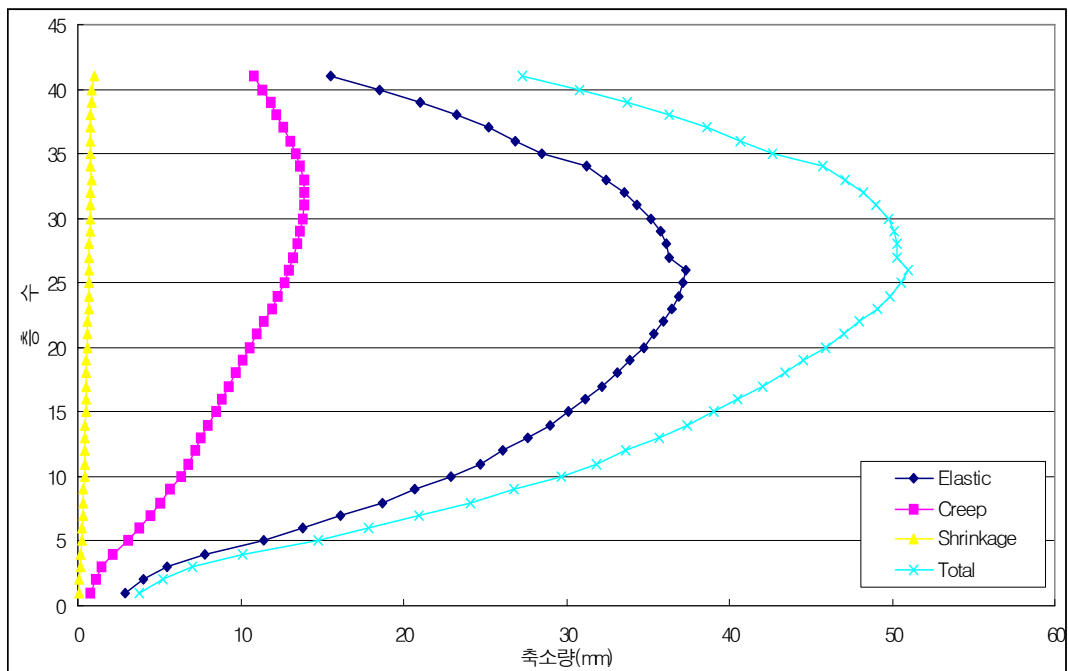


그림 4.2 슬래브타설 이후 축소량

4.2.2 전체 축소량

전체 축소량은 기둥축소량의 비교·분석 시 중요한 기준이 되며 그림 4.3의 슬래브타설 이전 축소량과 타설 이후 축소량을 합하면 그림 4.4의 전체 축소량 그래프를 구할 수 있다.

표 4.6은 최고층의 전체 축소량에서 각 축소량의 값과 비율을 나타낸 결과이

다. 예제 건물의 CFT 기둥의 축소량 해석결과 탄성 축소량이 전체 축소량의 74%를 차지하고 크리프가 23%, 건조수축의 경우는 3%로 나타났다. 이 결과 CFT 기둥의 축소량은 탄성 변형에 많은 영향을 받고 그 다음으로 크리프의 영향을 받고 건조수축의 경우는 영향이 아주 작은 것으로 나타났다. 이 자료를 바탕으로 확률론적 해석시 일반적인 콘크리트에서는 많은 영향을 주는 극한건조수축값의 변동에 대한 연구는 제외하도록 하였다.

표 4.6 결정론적 방법에 의한 최고층 전체 축소량

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

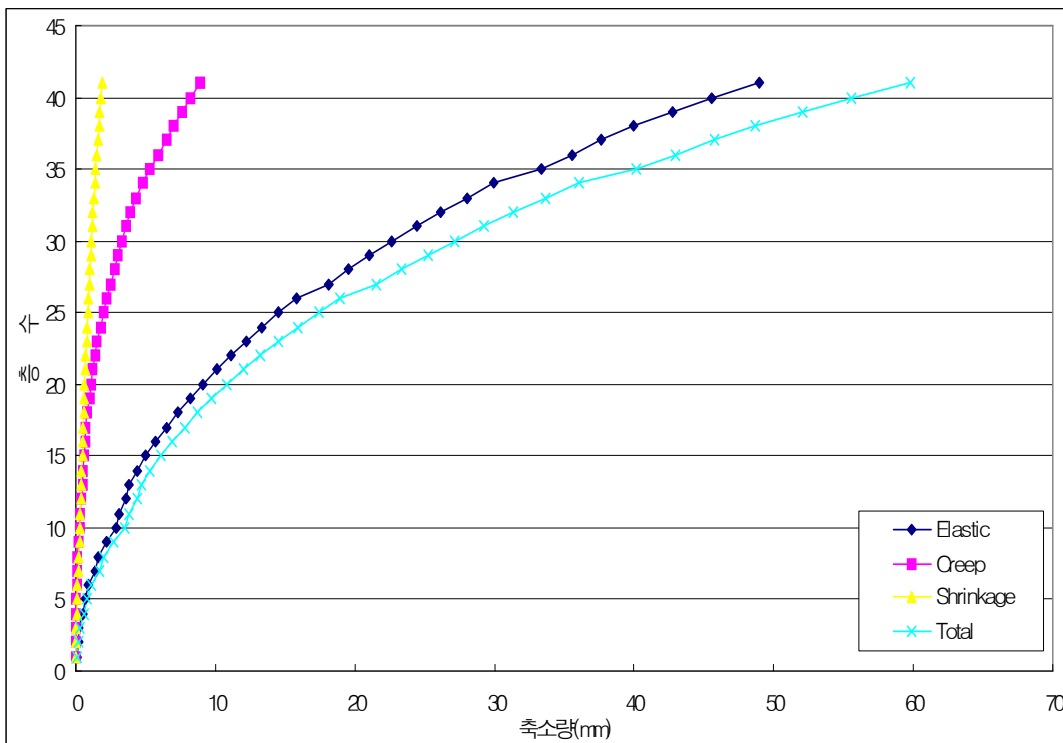


그림 4.3 슬래브타설 이전 축소량

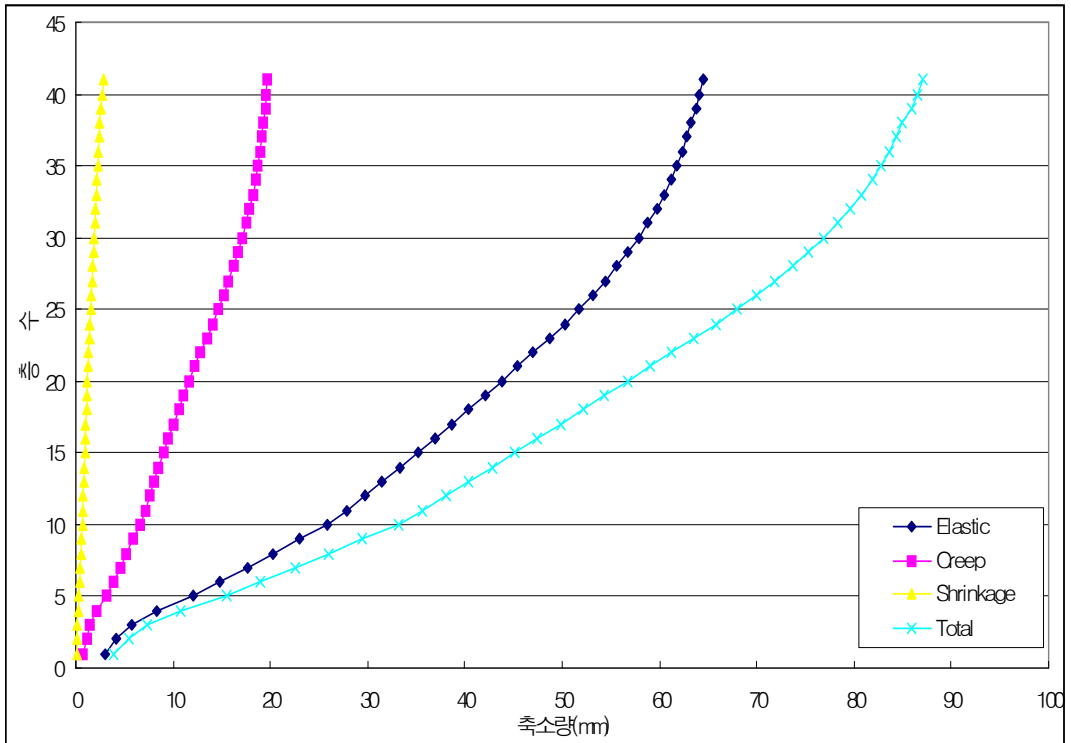


그림 4.4 전체 축소량

5. 예제건물 CFT 기둥의 확률론적 방법에 의한 해석

콘크리트 강도, 크리프계수, 하중의 3가지 매개변수를 정하여 매개변수의 변동계수를 변화시키면서 확률론적 기둥축소량 해석프로그램[21]을 사용하여 예제 건물의 CFT 기둥 축소량을 해석하고 그 결과값을 분석하여 산출된 슬래브 타설 이후 축소량과 전체 축소량의 평균과 표준편차를 이용해 신뢰구간별 축소량의 변화량을 비교하였다.

5.1 시뮬레이션 반복수와 정확성

확률론적 방법에 의한 해석의 정확성을 검증하기 위해서 변동성을 고려한 입력값과 결정론적 방법에 사용된 입력값을 비교할 필요가 있다. 확률론적 방법에 사용된 몬테카를로 기법의 정확성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 반복횟수에 따른 입력값의 평균과 결정론적 방법의 입력값의 일치율을 분석한다.

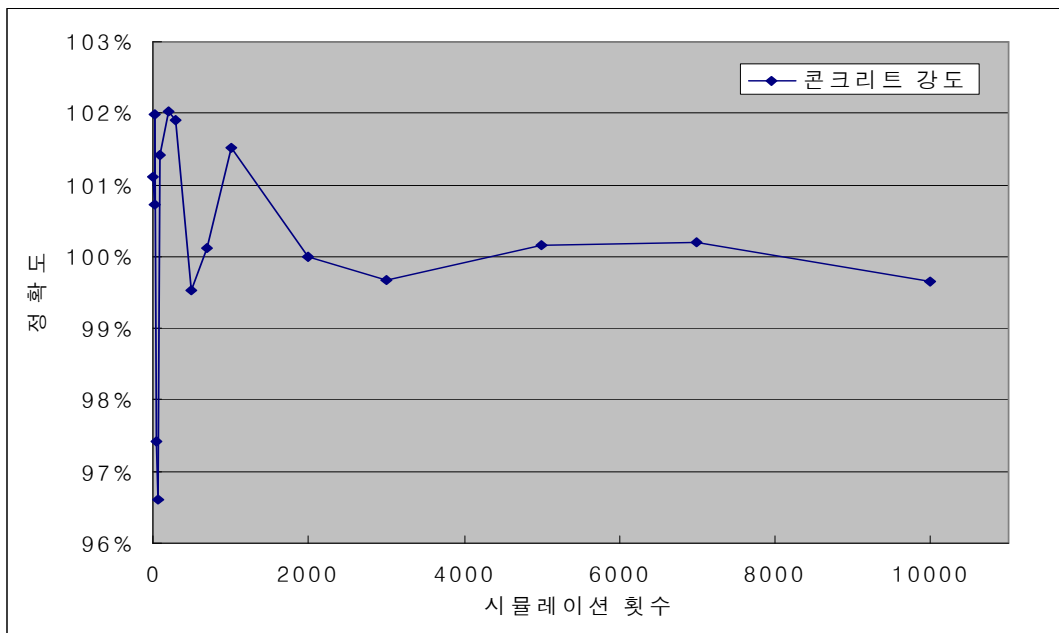


그림 5.1 시뮬레이션 횟수에 의한 콘크리트 강도의 정확도

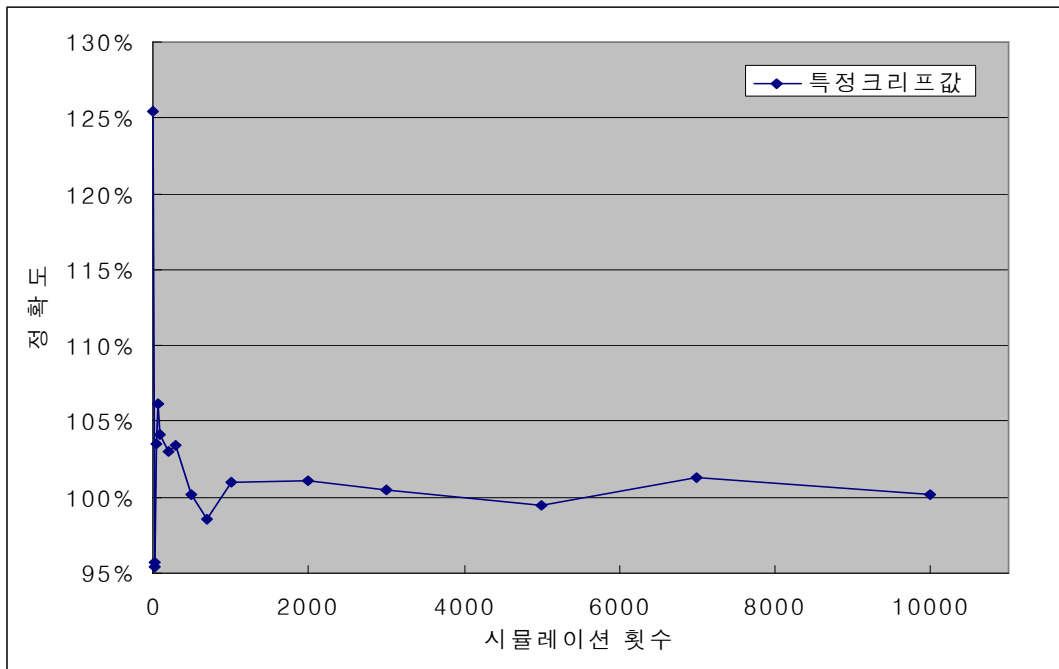


그림 5.2 시뮬레이션 횟수에 의한 특정크리프값의 정확도

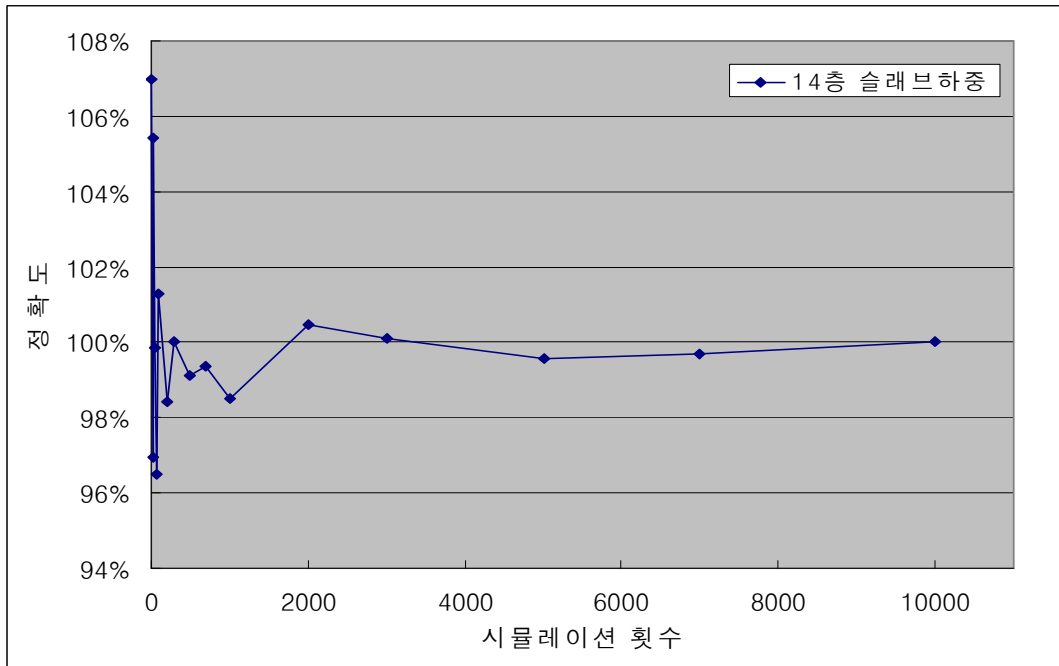


그림 5.3 시뮬레이션 횟수에 의한 하중의 정확도

그림 5.1 ~ 그림 5.3은 콘크리트 강도의 변동계수 20%, 특정크리프값의 변동계수 50%, 하중의 변동계수 20%를 적용한 입력값을 시뮬레이션 반복횟수에 따라 각 매개변수 입력값의 평균과 결정론적 입력값의 일치율을 나타낸 것이다. 그래프를 보면 시뮬레이션 반복횟수가 2000회를 넘어서면 오차율이 0.5%미만으로 결정론적 입력값에 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 시뮬레이션 반복횟수를 2000회 이상으로 하여 확률론적 해석을 수행할 수 있으나 몬테카를로 기법의 임의성을 배제하기 위하여 시뮬레이션 반복횟수 10000회를 실시하여 확률론적 해석을 수행하였다.

그림 5.4 ~ 그림 5.6은 시뮬레이션 반복횟수 10000회를 실시하였을 때 매개변수 입력값의 분포도를 히스토그램으로 나타낸 것이다. 히스토그램에서 보이듯이 각 입력값은 결정론적 해석시 사용하였던 값인 콘크리트 강도 49.04MPa, 특정크리프값 3.377×10^{-7} , 하중 23.84tf를 중심으로 정규분포형태를 보이고 있어 몬테카를로 기법 적용시 입력값을 정규분포형태로 가정하였던 조건에 부합하는 것을 알 수 있다.

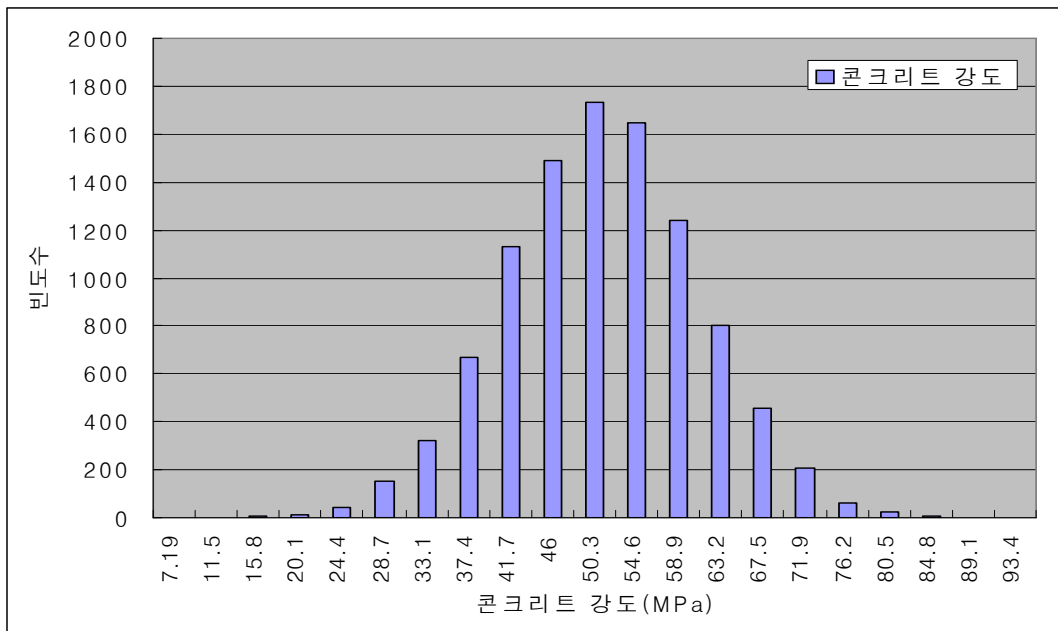


그림 5.4 시뮬레이션 10000회의 콘크리트 강도 분포도

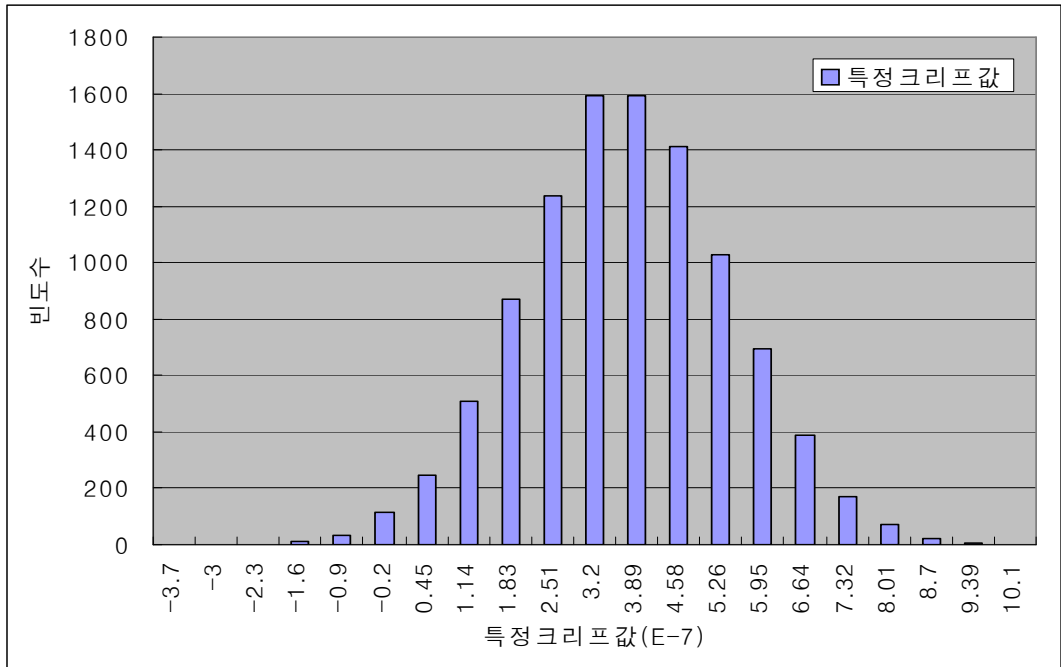


그림 5.5 시뮬레이션 10000회의 특정크리프값 분포도

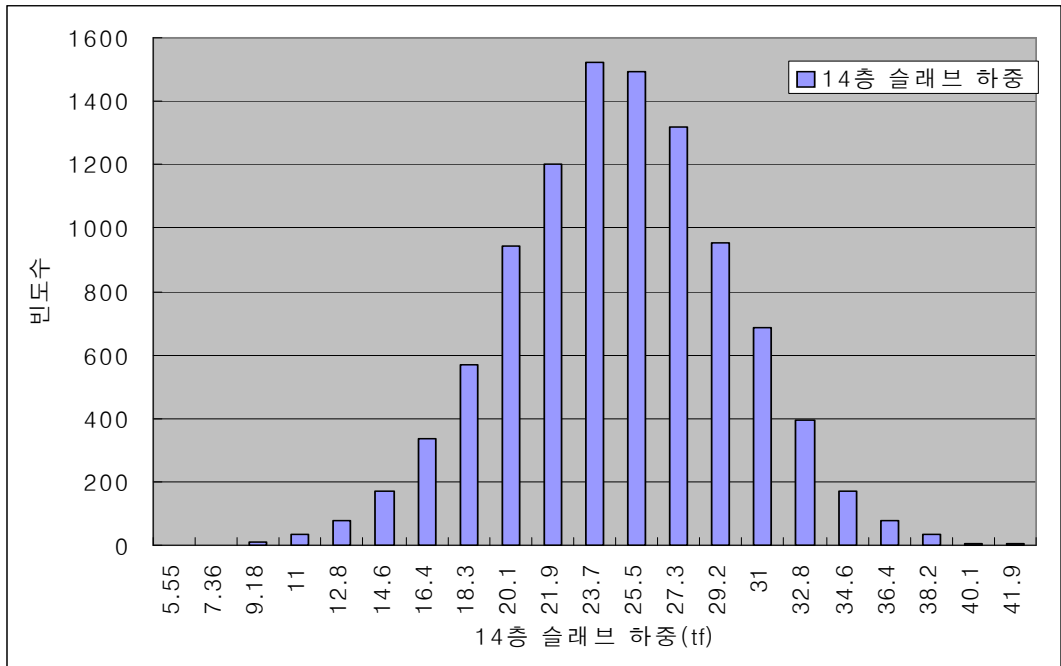


그림 5.6 시뮬레이션 10000회의 하중 분포도

5.2 각 매개변수에 대한 확률론적 해석결과

5.2.1 콘크리트 강도 변동에 대한 확률론적 해석결과

실제로 시공되는 콘크리트 강도는 일정한 분포로 나타난다. 콘크리트 강도의 변화의 폭에 따라 품질관리의 정도가 결정되며 본 해석에서는 품질관리의 정도에 따라 CFT 기둥 축소량이 변화하는 정도를 알아보기 위하여 콘크리트 강도의 변동계수를 10%, 15%, 20%로 변화하면서 확률론적 해석을 수행하였다.

표 5.1 콘크리트 강도의 변동계수에 따른 축소량 변동

콘크리트 강도 변동계수		22층 슬래브타설 이후 축소량	최고층 전체 축소량
결정론적 해석		50.98mm	87.12mm
10%	평균	51.00mm	87.15mm
	표준편차	0.07mm	0.11mm
15%	평균	51.02mm	87.21mm
	표준편차	0.11mm	0.17mm
20%	평균	51.06mm	87.29mm
	표준편차	0.15mm	0.24mm

확률론적 해석결과값은 입력값처럼 정규분포 형태로 나타났으며 그 평균값은 결정론적 해석값과 비슷하였다. 표 5.1은 확률론적 해석 결과값의 정규분포를 분석한 것으로 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량이 가장 많이 발생하는 층의 축소량 변동폭을 알아보기 위해 표준편차를 계산한 값으로 품질관리에 따른 콘크리트 강도의 변동계수는 10%~ 20%까지 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 표준편차는 0.07mm에서 0.15mm로 슬래브타설 이후 축소량 50.98mm에 비해 아주 작게 변하는 것으로 나타났으며, 최고층 전체 축소량의 표준편차는 0.11mm에서 0.24mm로 이 역시 전체 축소량 87.12mm에 비해 아주

작은 것으로 나타났다.

5.2.2 크리프계수 변동에 대한 확률론적 해석결과

CFT 기둥의 크리프 변동량에 대한 연구가 확률·통계적인 특성을 얻을 수 있을 만큼 데이터 축적이 되어있지 않기 때문에 크리프의 변동계수를 임의로 10%에서 50%까지 10%씩 변화시키면서 확률론적 해석을 수행하였다.

표 5.2 크리프계수의 변동계수에 따른 축소량 변동

크리프 변동계수		22층 슬래브타설 이후 축소량	최고층 전체 축소량
결정론적 해석		50.98mm	87.12mm
10%	평균	50.96mm	87.09mm
	표준편차	0.14mm	0.18mm
20%	평균	50.90mm	87.00mm
	표준편차	0.23mm	0.36mm
30%	평균	50.79mm	86.84mm
	표준편차	0.43mm	0.54mm
40%	평균	50.65mm	86.62mm
	표준편차	0.58mm	0.73mm
50%	평균	50.45mm	86.32mm
	표준편차	0.73mm	0.92mm

표 5.2는 크리프계수의 변동을 고려한 확률론적 해석 결과값의 정규분포를 분석한 것으로 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량이 가장 많이 발생하는 층의 축소량 변동폭을 알아보기 위해 표준편차를 계산한 값이다. 크리프의 변동계수가 10%에서 50%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 표준편차는 0.14mm에서 0.73mm로 슬래브타설 이후 축소량인 50.98mm에 비해 작게 변하는 것으로 나타났으며, 최고층 전체 축소량의 표준편차는 0.18mm에서 0.92mm로 전체 축소량인 87.12mm에 비해 작게 변하는 것으로 나타났다. 하지

만 크리프계수의 변동에 대한 축소량의 변동폭은 콘크리트 강도의 변동에 대한 축소량의 변동폭보다는 큰 값으로 콘크리트 강도에 비해 크리프계수의 변동성이 CFT 기둥 축소량에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

5.2.3 하중의 변동에 대한 확률론적 해석

본 해석에서는 해석일자의 조정으로 고정하중인 골조자중, 슬래브하중, 마감하중, 커튼월 하중을 고려하여 해석하였다. 고정하중의 경우 그 변동량이 적지만 시공오차 등에 의해서 어느 정도 변동성을 가지고 있으며 이러한 변동폭은 기둥축소량에는 어느 정도 영향을 미칠 수 있으므로 그 영향력을 알아보기 위하여 하중의 변동계수를 5%에서 20%까지 5%씩 증가하면서 확률론적 해석을 수행하였다.

표 5.3 하중의 변동계수에 따른 축소량 변동

하중 변동계수		22층 슬래브타설 이후 축소량	최고층 전체 축소량
결정론적 해석		50.98mm	87.12mm
5%	평균	50.98mm	87.12mm
	표준편차	0.33mm	0.50mm
10%	평균	50.97mm	87.11mm
	표준편차	0.67mm	1.0mm
15%	평균	50.98mm	87.13mm
	표준편차	1.02mm	1.50mm
20%	평균	50.99mm	87.14mm
	표준편차	1.38mm	2.0mm

하중의 변동에 대한 축소량의 변동은 표 5.3과 같이 나타났다. 하중의 변동계수가 5%에서 20%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 표준편차는 0.33mm에서 1.38mm까지 변하는 것으로 나타났으며, 최고층 전체 축소량의 표

준편차는 0.50mm에서 2.0mm까지 변하는 것으로 나타났다. 이 값들은 슬래브 타설 이후 축소량이나 전체 축소량에 비해서 큰 값은 아니지만 앞서 해석한 콘크리트 강도나 크리프계수에 비해서는 큰 값으로 CFT 기둥의 축소량은 매개변수 중 하중의 변동에 대한 영향을 가장 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

5.3 확률변수에 따른 신뢰구간 해석

그림 5.7은 정규분포의 그래프에서 각 신뢰구간별로 차지하는 신뢰수준을 보여주고 있으며 정규분포의 평균(μ)과 표준편차(σ)를 이용하여 신뢰수준에 상응하는 신뢰구간을 산출할 수 있다. $\mu \pm \sigma$ 일 때의 신뢰수준은 68.26%이고, $\mu + 1.645\sigma$ 일 때의 신뢰수준은 90.00%, $\mu + 2\sigma$ 일 때의 신뢰수준은 95.44%이다.

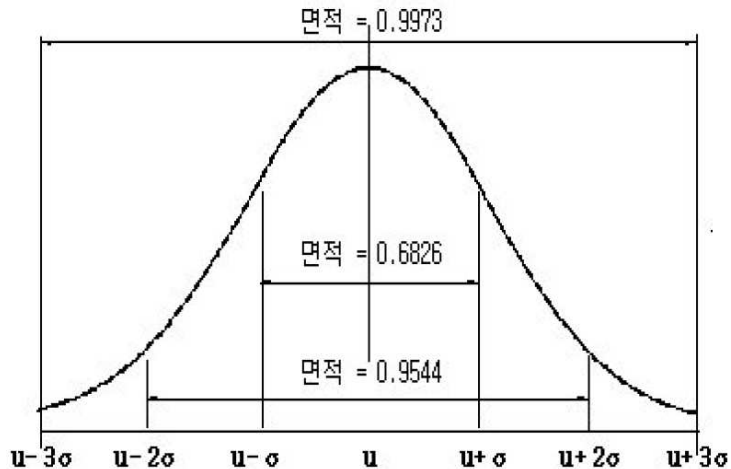


그림 5.7 신뢰수준에 따른 정규분포의 확률

5.3.1 콘크리트 강도 변동에 따른 신뢰수준별 축소량

앞 절에서 콘크리트 강도를 매개변수로 하여 확률론적 해석을 수행한 축소량의 정규분포 히스토그램을 가지고 축소량의 평균값과 표준편차를 바탕으로 신뢰수준별 축소량의 신뢰구간 범위를 조사하였다.

표 5.4 콘크리트 강도의 변동계수에 따른 신뢰구간별 축소량

콘크리트 강도 변동계수	항목	$\mu-2\sigma$ -95.44%	$\mu-\sigma$ -68.26%	μ 평균	$\mu+\sigma$ 68.26%	$\mu+2\sigma$ 95.44%
10%	콘크리트 강도	39.38MPa	44.24MPa	49.11MPa	53.97MPa	58.84MPa
	22층 Sub to 축소량	50.86mm	50.93mm	51.00mm	51.07mm	51.13mm
	37층 전체 축소량	86.94mm	87.05mm	87.16mm	87.27mm	87.38mm
15%	콘크리트 강도	34.67MPa	41.91MPa	49.16MPa	56.40MPa	63.64MPa
	22층 Sub to 축소량	50.81mm	50.92mm	51.03mm	51.13mm	51.24mm
	37층 전체 축소량	86.86mm	87.04mm	87.21mm	87.38mm	87.56mm
20%	콘크리트 강도	29.72MPa	39.17MPa	49.06MPa	58.96MPa	68.86MPa
	22층 Sub to 축소량	50.78mm	50.92mm	51.07mm	51.21mm	51.36mm
	37층 전체 축소량	86.81mm	87.05mm	87.29mm	87.53mm	87.76mm

표 5.4는 콘크리트 강도의 변동에 따른 확률론적 해석 결과의 정규분포 히스토그램을 바탕으로 콘크리트 강도 변동에 따른 신뢰지수별 축소량의 신뢰구간을 나타낸 것이다. 축소량 변동의 폭은 슬래브타설 이후 축소량이 가장 큰 22층과 전체 축소량이 가장 큰 최고층을 선택하여 비교하였다. 콘크리트 강도의 변동계수가 10%일 경우 신뢰수준 95.44%에서 축소량의 변화를 살펴보면 콘크리트 강도가 39.38MPa에서 58.84MPa사이에서 변동할 경우 22층 슬래브타설 이후 축소량은 0.27mm의 변동폭을 가지며, 최고층 전체 축소량은 0.44mm의 변동폭을 가진다. 콘크리트 강도의 변동계수가 20%일 경우 신뢰수준 95.44%에서 축소량의 변화를 살펴보면 콘크리트 강도는 29.72MPa에서 68.86MPa사이의 분포를 보이고 있으며 이때 22층 슬래브타설 이후 축소량은 0.58mm의 변동폭을 가지며, 최고층 전체 축소량은 0.95mm의 변동폭을 가진다.

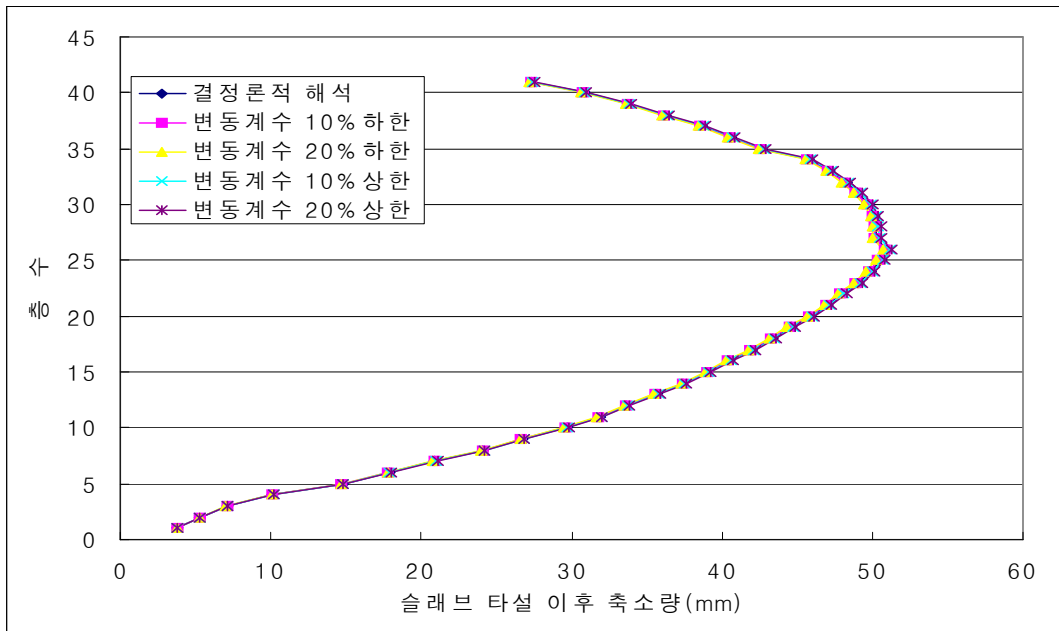


그림 5.8 콘크리트 강도의 변동에 따른 슬래브타설 이후 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값

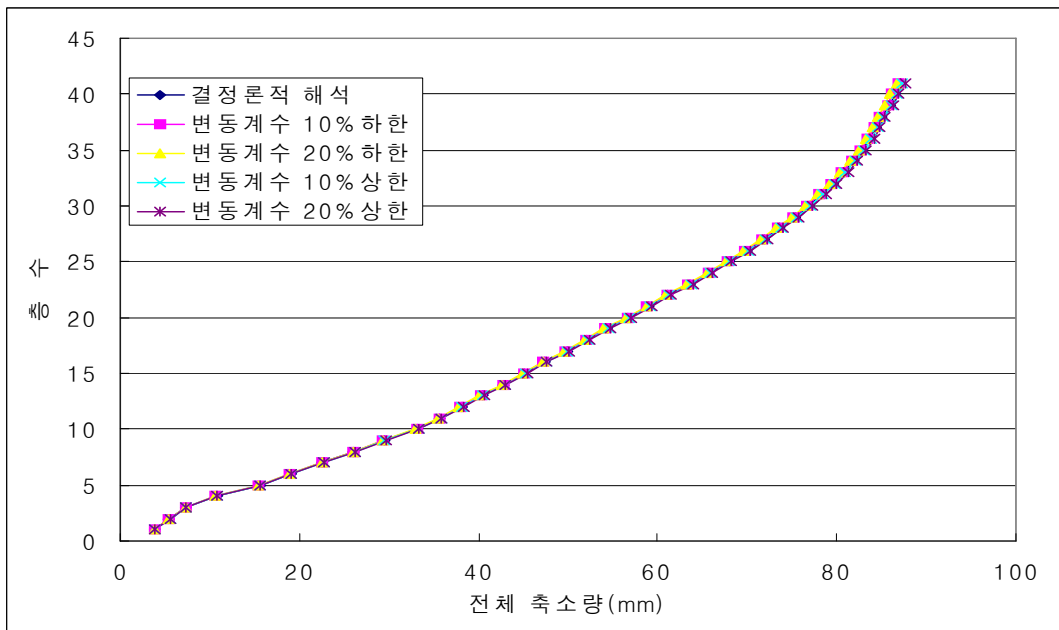


그림 5.9 콘크리트 강도의 변동에 따른 전체 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값

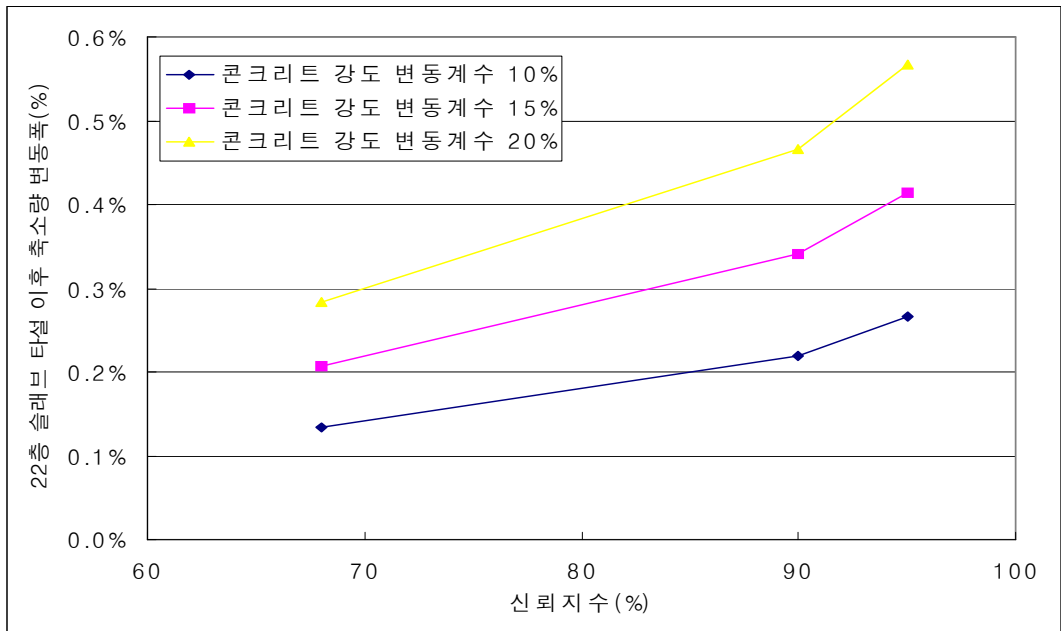


그림 5.10 콘크리트 강도의 변동에 따른 신뢰수준별
22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수

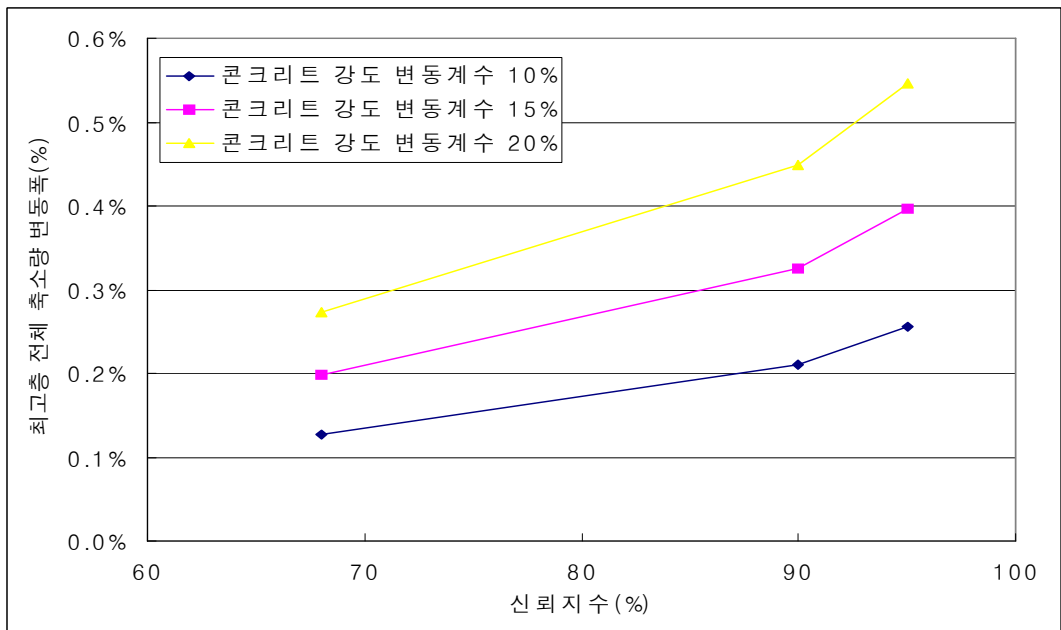


그림 5.11 콘크리트 강도의 변동에 따른 신뢰수준별
최고층 전체 축소량의 변동계수

그림 5.8과 5.9는 콘크리트 강도의 변동에 대한 신뢰수준 95.44%일 경우 각 층의 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량의 상·하한값을 나타낸 그래프로 콘크리트 강도의 변동에 기동축소량은 영향을 적게 받는다는 것을 알 수 있다.

콘크리트 강도의 변동계수에 따른 신뢰지수별 축소량의 변동은 평균값이 차이가 나기 때문에 정확한 비교를 위하여 콘크리트 강도의 변동계수에 대한 축소량의 변동계수를 사용하여 비교할 수 있다. 그림 5.10과 5.11은 콘크리트 강도의 변동계수에 따라 22층의 슬래브타설 이후 축소량 변동계수와 최고층의 전체 축소량의 변동계수의 신뢰구간별 변화값을 나타낸 그래프이다. 신뢰지수 95.44%에서 콘크리트 강도의 변동계수가 10%에서 20%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수는 0.33%에서 0.83%로 변하는 것으로 나타났으며, 최고층 전체 축소량의 변동계수는 0.3%에서 0.77%로 변하는 것으로 나타났다.

5.3.2 크리프계수 변동에 따른 신뢰수준별 축소량

크리프계수를 매개변수로 하여 확률론적 해석을 수행한 축소량의 정규분포 히스토그램을 가지고 계산한 축소량의 평균값과 표준편차를 바탕으로 신뢰수준별 축소량의 신뢰구간 범위를 조사하였다.

표 5.5는 크리프계수의 변동에 따른 확률론적 해석 결과의 정규분포 히스토그램을 바탕으로 크리프계수의 변동에 따른 신뢰지수별 축소량의 신뢰구간을 나타낸 것이다. 크리프계수의 변동계수가 10%일 경우 신뢰수준 95.44%에서 축소량의 변화를 살펴보면 특정크리프값이 2.71×10^{-7} 에서 4.05×10^{-7} 사이의 분포를 보이고 있으며 22층 슬래브타설 이후 축소량은 0.66mm의 변동폭을 가지며, 최고층 전체 축소량은 0.72mm의 변동폭을 가진다. 크리프계수의 변동계수가 50%일 경우 신뢰수준 95.44%에서 축소량의 변화를 살펴보면 특정크리프값은 0.02×10^{-7} 에서 6.76×10^{-7} 사이의 분포를 보이고 있으며 이때 22층 슬래브타설 이후 축소량은 2.92mm의 변동폭을 가지며, 최고층 전체 축소량은 3.68mm의 변동폭을 가진다.

표 5.5 크리프계수의 변동계수에 따른 신뢰구간별 축소량

특정크리프값 변동계수	항목	$\mu-2\sigma$ -95.44%	$\mu-\sigma$ -68.26%	μ 평균	$\mu+\sigma$ 68.26%	$\mu+2\sigma$ 95.44%
10%	특정크리프값	2.71×10^{-7}	3.04×10^{-7}	3.38×10^{-7}	3.71×10^{-7}	4.05×10^{-7}
	22층 Sub to 축소량	50.68mm	50.82mm	50.96mm	51.10mm	51.24mm
	37층 전체 축소량	86.73mm	86.79mm	87.09mm	87.27mm	87.45mm
20%	특정크리프값	2.05×10^{-7}	2.72×10^{-7}	3.38×10^{-7}	4.06×10^{-7}	4.73×10^{-7}
	22층 Sub to 축소량	50.34mm	50.67mm	50.90mm	51.17mm	51.44mm
	37층 전체 축소량	86.28mm	86.41mm	87.00mm	87.35mm	87.71mm
30%	특정크리프값	1.35×10^{-7}	2.36×10^{-7}	3.38×10^{-7}	4.39×10^{-7}	5.41×10^{-7}
	22층 Sub to 축소량	49.93mm	50.36mm	50.79mm	51.22mm	51.65mm
	37층 전체 축소량	85.75mm	85.94mm	86.83mm	87.37mm	87.91mm
40%	특정크리프값	0.66×10^{-7}	2.03×10^{-7}	3.39×10^{-7}	4.76×10^{-7}	6.10×10^{-7}
	22층 Sub to 축소량	49.49mm	50.07mm	50.65mm	51.23mm	51.80mm
	37층 전체 축소량	85.16mm	85.42mm	86.62mm	87.35mm	88.08mm
50%	특정크리프값	0.02×10^{-7}	1.70×10^{-7}	3.39×10^{-7}	5.07×10^{-7}	6.76×10^{-7}
	22층 Sub to 축소량	48.99mm	49.72mm	50.45mm	51.18mm	51.91mm
	37층 전체 축소량	84.48mm	85.40mm	86.32mm	87.24mm	88.16mm

그림 5.12와 5.13은 크리프계수의 변동에 따라 신뢰수준 95.44%에서 슬래브 타설 이후 축소량과 전체 축소량의 상·하한값을 그래프로 나타낸 것이다.

크리프계수의 변동계수에 따른 신뢰지수별 축소량의 변동과 다른 변동계수와 의 축소량 변동에 대한 정확한 비교를 위하여 크리프계수의 변동계수에 대한 축소량의 변동계수를 비교한다. 그림 5.14와 5.15는 크리프계수의 변동계수에 따라 22층의 슬래브타설 이후 축소량 변동계수와 최고층의 전체 축소량의 변동 계수의 신뢰구간별 변화값을 나타낸 그래프이다. 신뢰지수 95.44%에서 크리프 계수의 변동계수가 10%에서 50%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량 의 변동계수는 0.55%에서 2.87%로 변하는 것으로 나타났으며, 최고층 전체 축 소량의 변동계수는 0.48%에서 2.50%로 변하는 것으로 나타났다.

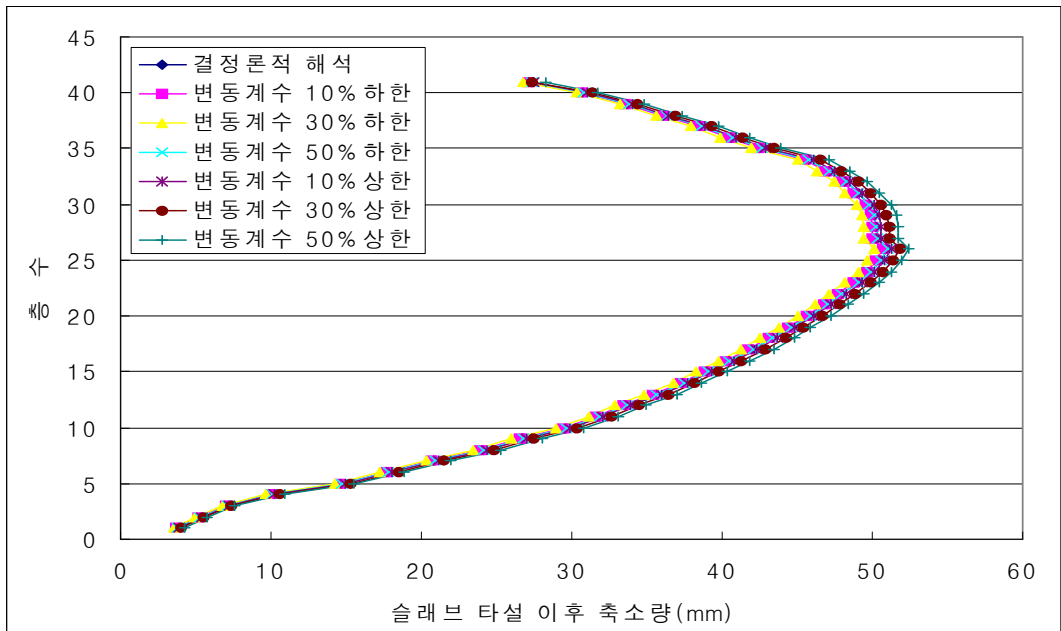


그림 5.12 크리프계수의 변동에 따른 슬래브타설 이후 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값

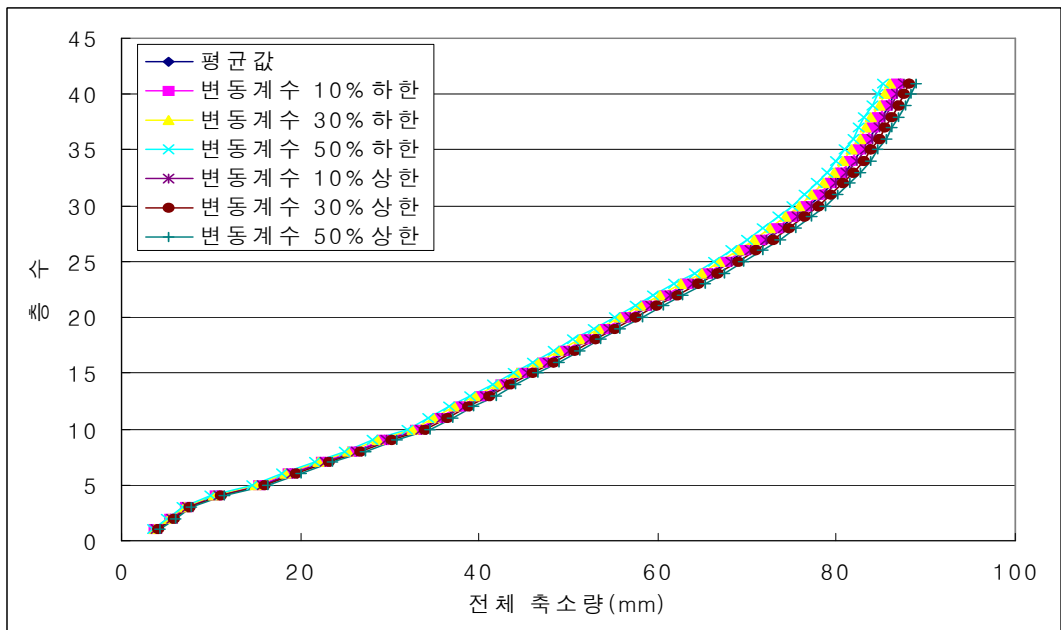


그림 5.13 크리프계수의 변동에 따른 전체 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값

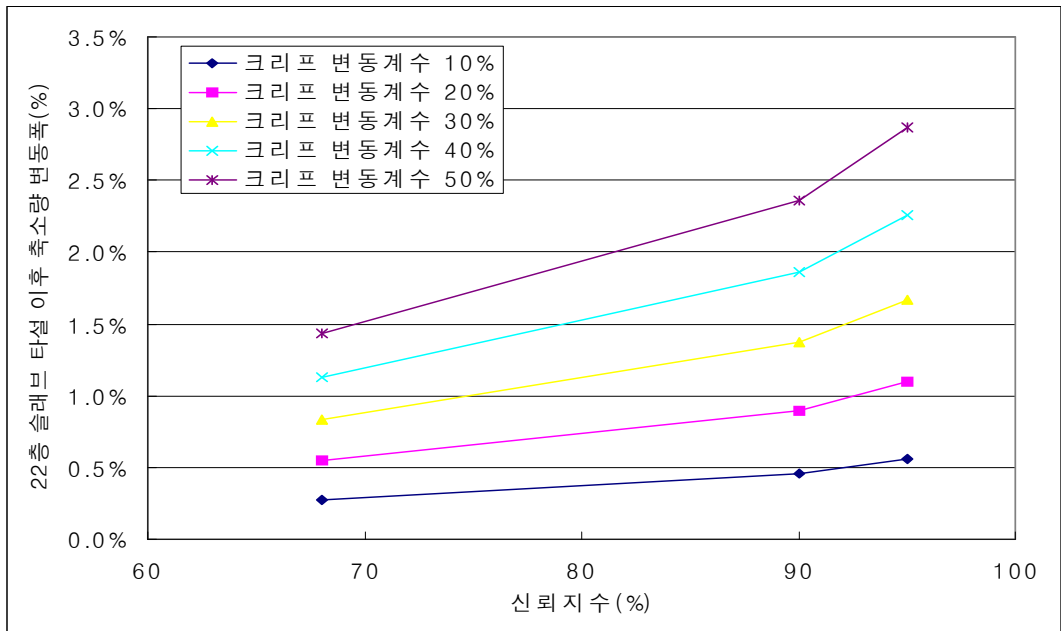


그림 5.14 크리프계수의 변동에 따른 신뢰수준별
22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수

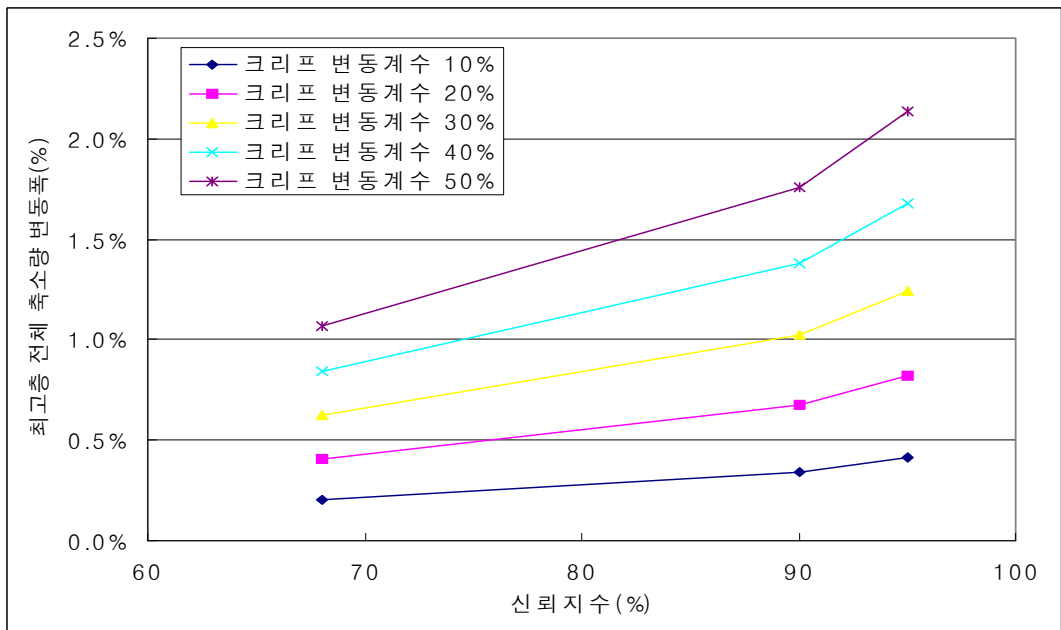


그림 5.15 크리프계수의 변동에 따른 신뢰수준별
최고층 전체 축소량의 변동계수

5.3.3 하중 변동에 대한 신뢰수준별 축소량

표 5.6은 하중의 변동에 따른 확률론적 해석 결과의 정규분포 히스토그램을 바탕으로 하중의 변동에 따른 신뢰지수별 축소량의 신뢰구간을 나타낸 것이다. 하중의 변동계수가 5%일 경우 신뢰수준 95.44%에서 축소량의 변화를 살펴보면 하중이 21.45tf에서 26.21tf사이의 분포를 보이고 있으며 22층 슬래브타설 이후 축소량은 1.33mm의 변동폭을 가지며, 최고층 전체 축소량은 2.0mm의 변동폭을 가진다. 하중의 변동계수가 20%일 경우 신뢰수준 95.44%에서 축소량의 변화를 살펴보면 하중은 14.29tf에서 33.26tf사이의 분포를 보이고 있으며 이때 22층 슬래브타설 이후 축소량은 5.51mm의 변동폭을 가지며, 최고층 전체 축소량은 8.02mm의 변동폭을 가진다.

표 5.6 하중의 변동계수에 따른 신뢰구간별 축소량

하중 변동계수	항목	$\mu-2\sigma$ -95.44%	$\mu-\sigma$ -68.26%	μ 평균	$\mu+\sigma$ 68.26%	$\mu+2\sigma$ 95.44%
5%	하중	21.45tf	22.63tf	23.82tf	25.02tf	26.21tf
	22층 Sub to 축소량	50.31mm	50.65mm	50.98mm	51.31mm	51.64mm
	37층 전체 축소량	86.12mm	86.62mm	87.12mm	87.62mm	88.12mm
10%	하중	19.06tf	21.44tf	23.82tf	26.19tf	28.57tf
	22층 Sub to 축소량	49.65mm	50.30mm	50.97mm	51.63mm	52.26mm
	37층 전체 축소량	85.11mm	86.11mm	87.11mm	88.11mm	89.11mm
15%	하중	16.66tf	20.26tf	23.86tf	27.46tf	31.06tf
	22층 Sub to 축소량	48.94mm	49.96mm	50.98mm	52mm	53.02mm
	37층 전체 축소량	84.11mm	85.62mm	87.13mm	88.63mm	90.14mm
20%	하중	14.29tf	19.03tf	23.77tf	28.52tf	33.26tf
	22층 Sub to 축소량	48.24mm	49.61mm	50.99mm	52.37mm	53.75mm
	37층 전체 축소량	83.13mm	85.13mm	87.14mm	89.14mm	91.15mm

※ 하중은 14층의 슬래브 하중을 사용하였음

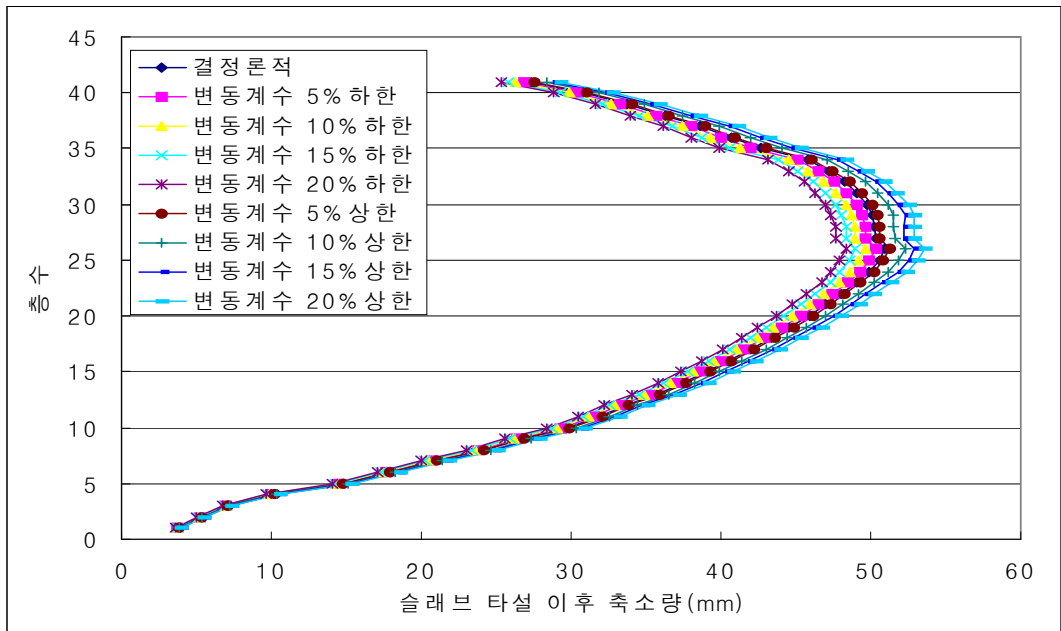


그림 5.16 하중의 변동에 따른 슬래브타설 이후 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값

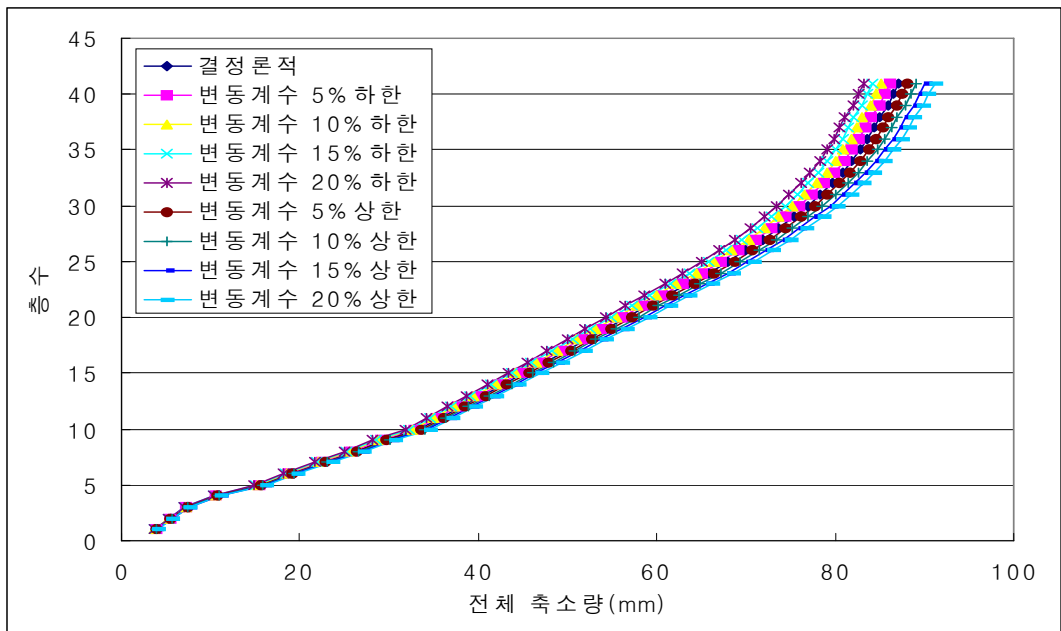


그림 5.17 하중의 변동에 따른 전체 축소량의 신뢰수준 95.44%의 상·하한값

그림 5.16과 5.17은 하중의 변동계수에 따라 신뢰지수 95.44%일 때의 상한값과 하한값의 층별 축소량을 그래프로 나타낸 것이다.

하중의 변동계수에 따른 신뢰지수별 축소량의 변동과 다른 변동계수와의 축소량 변동에 대한 정확한 비교를 위하여 하중의 변동계수에 대한 축소량의 변동계수를 비교한다. 그림 5.18과 5.19는 하중의 변동계수에 따라 22층의 슬래브 타설 이후 축소량 변동계수와 최고층의 전체 축소량의 변동계수의 신뢰구간별 변화값을 나타낸 그래프이다. 신뢰지수 95.44%에서 하중의 변동계수가 5%에서 20%로 변하는 동안 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수는 1.4%에서 5.2%로 변하는 것으로 나타났으며, 최고층 전체 축소량의 변동계수는 1.1%에서 4.6%로 변하는 것으로 나타났다.

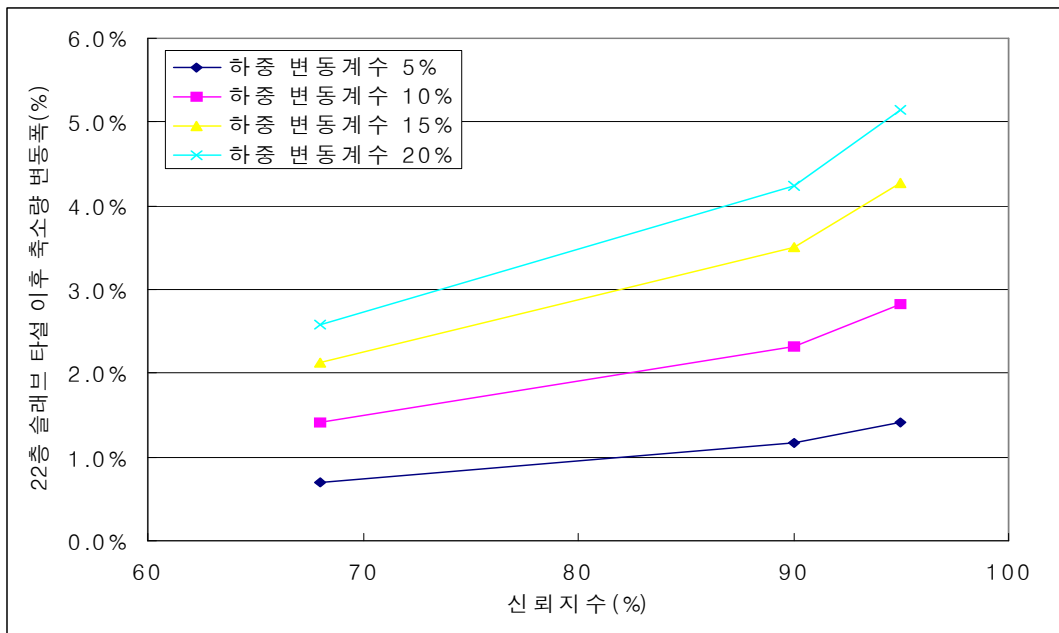


그림 5.18 하중의 변동에 따른 신뢰수준별 22층 슬래브타설 이후 축소량의 변동계수

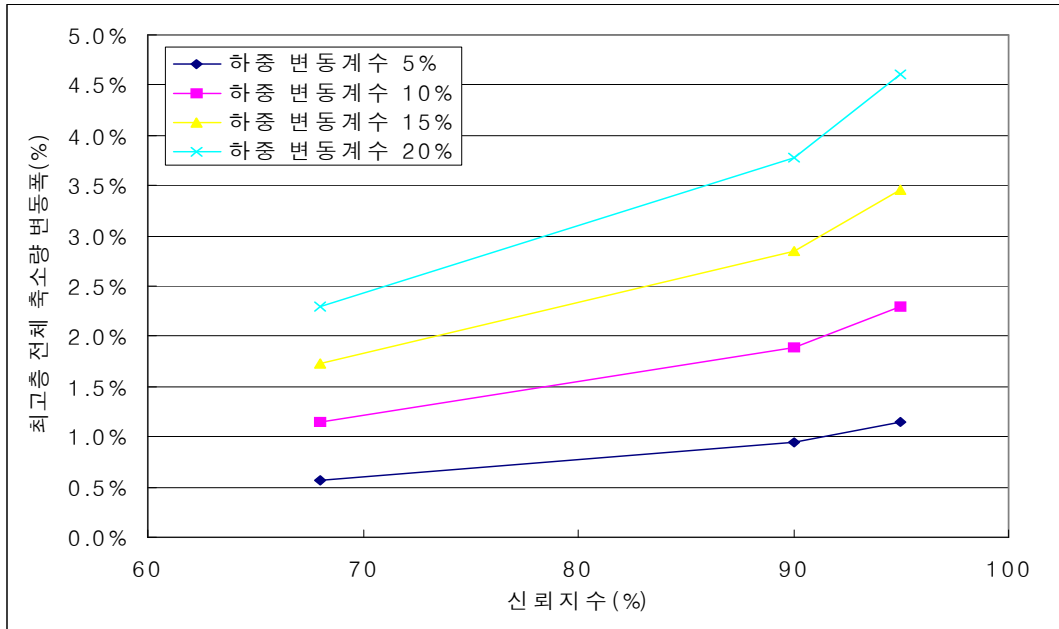


그림 5.19 하중의 변동에 따른 신뢰수준별
최고층 전체 축소량의 변동계수

5.4 다중매개변수 변동에 대한 축소량의 변동

실제 현장에서는 매개변수로 선정된 입력값들이 개별적으로 변하는 것이 아니라 복합적으로 변화한다. 따라서 다중매개변수에 대한 축소량의 변동에 대한 영향을 비교해볼 필요가 있다.

표 5.7은 다중매개변수를 적용하여 CFT 기둥 축소량 해석을 수행한 결과이며, 표에 보이는 매개변수의 변동계수에서 f_c 는 콘크리트 강도, C 는 크리프계수, L 은 하중을 표시하는 것이다. 축소량의 변동계수는 확률론적 해석 결과가 이루는 정규분포 형태의 축소량 분산표의 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 축소량의 변동성을 의미하는 것으로 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 크리프계수나 하중의 변동계수가 큰 경우 오히려 축소량의 변동계수가 감소하는 모습을 보이는데 이는 콘크리트 강도의 변동에 대한 축소량의 영향이 아주 작기 때문인 것으로 판단된다. 크리프계수의 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. 따라서 실제 CFT 기둥 축소량 해석시 하중의 변동에 대하여 가장 많은 고려를 해야 하고 크리프계수, 콘크리트 강도의 순으로 고려해야 할 것으로 사료된다.

표 5.7 다중매개변수의 변동에 대한 축소량의 변동계수

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

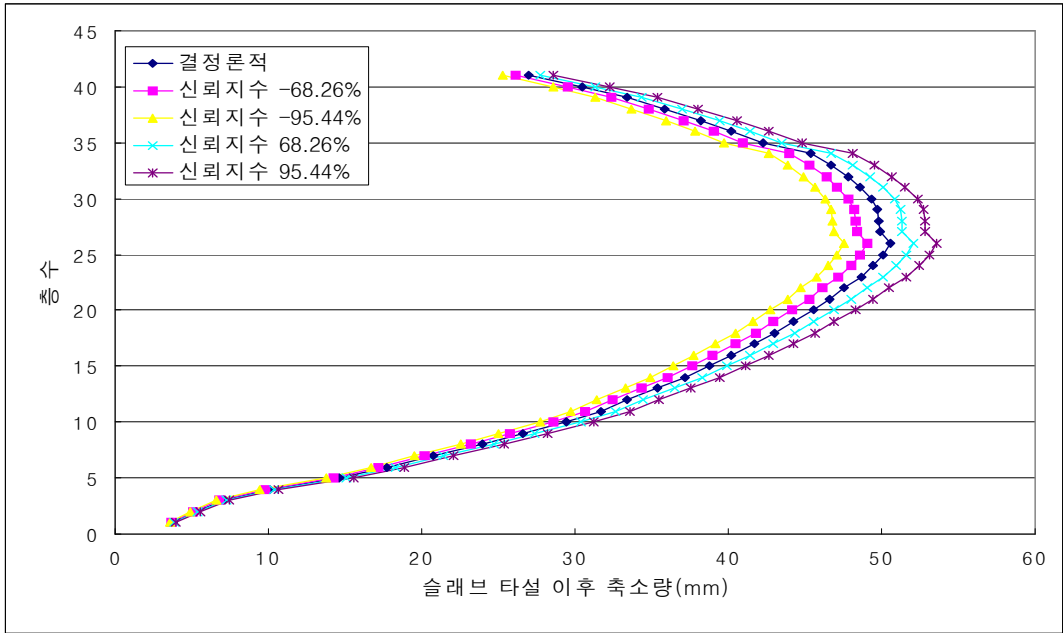


그림 5.20 콘크리트 강도 20%, 크리프계수 50%, 하중 20%의 변동성에 따른 신뢰지수별 슬래브타설 이후 축소량의 상·하한값

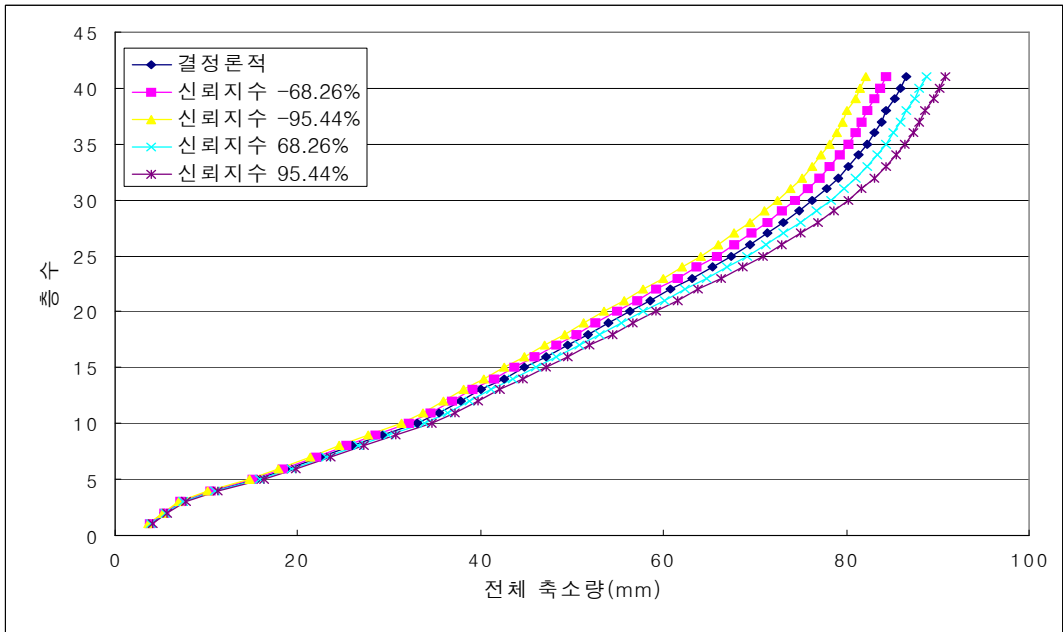


그림 5.21 콘크리트 강도 20%, 크리프계수 50%, 하중 20%의 변동성에 따른 신뢰지수별 전체 축소량의 상·하한값

그림 5.20과 5.21은 확률론적 해석에 사용된 실험값들 중 매개변수의 변동계수가 콘크리트 강도 변동계수 20%, 크리프계수 변동계수 50%, 하중 변동계수 20%로 가장 크게 적용하여 해석한 결과로 신뢰지수별 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량의 상·하한값을 나타낸 그래프이다.

6. 결 론

본 연구에서는 CFT 기둥의 장기거동특성을 고려하여 기 시공된 37층 예제 건물의 CFT 기둥 축소량 해석을 수행하여 그 특성을 분석하였다. 그리고 해석 값과 실제 기둥에 발생하는 축소량과의 차이를 야기할 수 있는 콘크리트의 재료특성 중 콘크리트 강도 품질, 크리프계수, 그리고 기둥축소량 발생 원인인 하중에 대해 변동성을 부여하고 몬테카를로 기법을 이용하여 확률론적 해석을 수행한 후 해석결과의 분포도를 분석하여 신뢰지수별 기둥축소량을 비교한 결과는 다음과 같다.

1. CFT 기둥의 경우 일반콘크리트에 비해 건조수축 및 건조크리프가 거의 발생하지 않고 기본크리프만 발생하는 특성을 고려하여 일반 콘크리트를 기준으로 특정크리프값은 일반콘크리트의 60%, 건조수축값은 10%로 가정하여 예제 건물의 CFT 기둥 축소량을 계산할 수 있다. 그리고 변동성이 큰 콘크리트 강도, 크리프계수, 하중을 매개변수로 하여 몬테카를로 기법을 사용한 확률론적 기둥축소량 해석을 수행하여 축소량의 변동성을 예측할 수 있다.

2. 예제건물의 CFT 기둥축소량 해석 결과 최고층의 전체 축소량에서 탄성 축소량은 약 74%, 크리프 축소량은 23%, 건조수축 축소량은 3%로 탄성 거동은 CFT 기둥의 축소량에 많은 영향을 미치지만 건조수축에 대한 영향은 아주 작은 것을 알 수 있다.

3. 매개변수의 변동에 대한 축소량의 변동은 축소량의 변동계수를 계산하여 슬래브타설 이후 축소량과 전체 축소량에 미치는 영향을 비교할 수 있다. 콘크리트 강도 변동계수 20%일 때 슬래브타설 이후는 0.28%, 전체 축소량은 0.27%이고 크리프의 변동계수 50%일 때 슬래브타설 이후는 1.44%, 전체 축소량은 1.07%이다. 하중의 변동계수 20%일 때 슬래브타설 이후는 2.68%, 전체 축소량

은 2.30%의 축소량 변동계수를 보인다.

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

5. 다중매개변수의 변동성을 고려하여 확률론적 해석을 수행한 결과 기둥 축소량에 미치는 영향은 하중의 변동성에 따라 많은 영향을 받으며 하중의 변동성이 클 경우 다른 매개변수에 대한 축소량의 영향은 줄어든다. 따라서 CFT 기둥축소량을 정확히 예측하기 위해서는 하중에 대한 검토가 더 필요한 것으로 사료된다.

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. Mark Fintel, Fazlur F.Khan, "Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structures-Prediction of Inelastic Column Shortening, ACI Journal, pp.957-967, 1969,12
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, 제 13권 12호, 통권 110호, 1997, 12
4. 정은호, 김희철, "고층건물 기둥축소량 계산을 위한 프로그램 개발에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제 13권 11호, 통권 109호, 1997, 11
5. 김한수, "SRC 합성기둥의 축소량 해석에 있어서 철골기둥의 효과", 대한건축학회 창립60주년기념 학술발표대회논문집 제 25권 제 1호(통권 제 49집), 2005,10
6. P.J.Terrey, M.A.Bradford& R.I.Gilbert, "Creep and shrinkage in concrete-filled steel tubes", Grundy P, Holgate A Wong SM, editors. Tubular Structures VI. Rotterdam, Netherlands: Balkema; pp.293-298 1994
7. L.H.Ichinose, E. Watanabe, H.Nakai, "An experimental study on creep of concrete filled steel pipes", Journal of constructional Steel Research, pp.453-466, 2001,57(4)
8. Morino S, Kswaguchi J, Cao ZS, "Creep behavior of Concrete-filled steel tubular members", In: Proceedings of engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete III, Irsee, Germany, ASCE, pp.514-525, 1997

9. Brian Uy, "Static long-Term Effects in Short Concrete-Filled Steel Box Columns under Sustained Loading", ACI Structural Journal/ January-February, pp.96-104, 2001
10. 권승희, 김진근, "CFT 기둥의 장기거동 특성에 관한 연구", 초대형 고층건물 : 건축세계, 구조, 설비 및 시공 기술개발, pp.77-88, 2001,02
11. 최내원, 권승희, 김진근, 이수근, 이강일, "각형 CFT 기둥의 장기거동에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회 논문집, pp.213-216, Vol. 2002, No.1
12. 김태환, 김진근, 이명재, "다이어프램(diaphragm)의 형태에 따른 각형 CFT 기둥의 장기거동에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회 논문집 pp.265-70, Vol. 2002, No.2
13. 정석창, 유은중, 주영규, 최항, 박철립, "콘크리트 충전 강관기둥을 사용한 초고층 구조물의 기둥축소량 해석", 대한건축학회 논문집, 제 14권 11호, 통권 121호, 1998,11
14. 정은호, 김형래, "매개변수에 따른 기둥축소량 변화에 따른 연구", 콘크리트 학회 논문집, 제 58호, 2000,08
15. 조용수, 송화철, "몬테카를로 기법을 이용한 기둥축소량 예측", 대한건축학회 학술발표대회논문집 Vol 21. No2 2001,10
16. 김진근, "CFT기둥 크리프 실험 1", 콘크리트충전 강관 구조 설계 및 시공 기술세미나 자료집, 2002,04
17. 권승희, 김태환, 김윤용, 김진근, "격막이 설치된 각형 CFT 기둥의 장기거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집 제 17권 6호pp.1025-1032, 2005,07,
18. Box, G. E. P and Muller, M. E., "A Note on the Generation of Random Normal Deviates", Annals of Mathematical Statistics, Vol. 29, pp.610-611, 1958
19. 양영순, 서용석, 이재욱, "구조신뢰성공학", 서울대학교출판부, 1999

20. L'Ecuyer, P., "Communications of the ACM", Vol. 31, pp.742-774, 1988
21. 조용수, "몬테카를로 기법을 이용한 초고층건물 기둥축소량의 해석법", 한국해양대학교 석사학위논문, 2002
22. 김상식, "철근콘크리트 구조설계 3판", 기문당, 2003
23. 대한건축학회. "(건설교통부 고시)건축구조설계기준 2005", 기문당, 2005
24. Bazant, Z.P. and Baweja, S., "Justification and Refinement of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage - 1. Statistics and Sensitivity", Materials and Structures, 28, pp.415-30, 1995