

초고층 구조물에서 기둥축소에 대한 시공기간의 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Construction Time in the Column Shortening in High-Rise Building

정은호* 김희철**
Jeong, Eun-Ho Kim, Hee-Cheul

ABSTRACT

Differential shortening of vertical members in high-rise buildings affect other structural members that have to be considered such as horizontal members and exterior cladding. of many elements which affect the total amount of shortening, different loading history mainly comes from the different construction time. Shortening of 66 story concrete columns were investigated and compared according to the different construction time. Little difference was found between the total shortening of interior and that of exterior column.

1. 서 론

1-1. 배경 및 목적

최근 건축물은 지가상승 및 용지 난과 대지의 효율적 이용을 위하여 고층화되는 추세이며, 건축 재료의 질적 향상과 구조 및 시공기술의 발달로 인하여, 그 공사기간이 급속도로 진행되고 있는 실정이다. 이러한 고층화 현상으로 인한 수직하중의 증가는 기둥이나 벽과 같은 수직적인 구조 요소에 심한 축소현상을 일으키게 하는 문제를 야기시킨다.

수직부재의 축방향 감소는 기본설계와는 다른 충고를 갖게 하며, 수직부재별 분담하중의 차이로 인한 변위량의 차이는 내부간벽, 설비체계와 같은 비구조적인 요소에 영향을 줄 뿐만아니라, 사용성을 크게 저하시킨다. 또한 지점의 상대적인 수직변위차로 인하여, 연결재인 보와 슬래브에 전단력과 모멘트를 발생시킨다. 따라서 적은 축소량을 가진 기둥으로의 하중전달과 같은 하중의 재분배가 발생하여 구조물 전체에 대하여 해로운 영향을 미칠 수 있다.

일반적으로 철근콘크리트 수직요소의 탄성축소 및 비탄성축소로 인한 축소현상의 조합에 의해 영향을 받는 한편, 철골수직요소는 탄성축소에 의해서만 영향을 받으므로 탄성 축소량만을 산출함으로써 그 축소량을 용이하게 계산할 수 있다.

* 경희대학교 건축공학과 강사
** 경희대학교 건축공학과 조교수

철근콘크리트 수직요소와 철골 수직요소가 혼합된 경우는 각각에 대한 축소현상을 고려함으로써 전체적인 거동을 이해할 수 있다. 따라서 철근콘크리트 수직요소에 대한 축소량을 산정하는 방법에 대해 엄밀한 연구가 구축된다면, 철골 수직요소의 축소량 계산은 물론 합성 구조물 수직요소의 축소량을 예측하는데 있어 용이하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

콘크리트 수직부재의 축소현상은 그 재료의 특성으로 인하여, 탄성축소와 비탄성축소로 분류되며 시공의 진행과정에 따른 축소 또한 분류되어야 한다. 탄성축소량의 계산은 하중-변형의 관계로부터 쉽게 얻어질 수 있다. 그러나 비탄성 축소량 계산은 콘크리트의 재료적인 특성으로 인해 탄성 축소량에 비해 상대적으로 복잡하다.

콘크리트의 비탄성 축소에 영향을 주는 요소는 크게 Creep과 건조수축으로 나눌 수 있다. 먼저 Creep에 영향을 주는 요소들은 응력상태의 차이, 하중이력, 철근비, 체적에 대한 표면적의 비율 및 환경적인 요인들이 있고, 건조수축에 영향을 주는 요소는 응력상태와는 무관하게 철근비, 체적에 대한 표면적의 비율 및 환경적인 요인등으로 나눌 수 있다.

또한 시공의 진행 과정에 따른 축소는 우선 수직요소에서 탄성축소현상이 발생하게 되며, 수분의 감소로 인한 건조수축 및 압축하중의 작용으로 인한 Creep이 발생하기 시작한다. 이미 설치된 수직요소에 미치는 축소현상과 더불어 시공이 진행되는 동안 발생할 축소량의 예측은 슬래브의 바른 위치확보를 위하여 매우 중요하게 고려되어야 할 사항이다.

이러한 수직요소의 축소현상에 영향을 미치는 요인에 관한 연구는 1960년대 후반부터 미국을 중심으로 연구되었고, 수직요소의 축소량 측정 방법이 관련 연구분야의 협력으로 발전되고 있다. 그러나, 작용하중과 재료의 특성 및 주변환경으로 인한 영향 이외에, 급속도로 진행되는 시공기간이 수직요소의 축소량 결정에 미치는 요인에 대한 연구사례는 찾아보기 어려운 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 초고층 구조물에서 수직요소의 축소현상에 영향을 미치는 제 요소에 대해 충분히 고려하여, 수직부재의 축소량을 계산하고, 서로 다른 시공시간이 총 축소량에 미치는 영향에 대해 연구함으로써 그 축소량을 예측하고, 보정하여 수평요소가 예정된 위치를 확보할 수 있게 하는 기초차료를 제공함에 있다.

1-2. 범위 및 방법

초고층 구조물의 기동축소현상에 영향을 미치는 주된 요인은 재료의 특성, 설계적 조건 그리고 하중적 조건 및 환경적인 조건으로 구분될 수 있다. 재료의 특성은, 시간에 따른 탄성계수, 건조수축, 그리고 Creep 등이 있다. 설계적 조건이 축소현상에 영향을 미치는 요인은 부재의 단면적, 체적에 대한 표면적의 비율, 그리고 보강 재의 비율에 의해 결정된다. 다음으로 하중적 조건 및 환경적 조건은 시공 진행순서 및 온도, 습도와 같은 주변환경을 들 수 있다.

그러나 이러한 조건중 일부는 상호간에 밀접한 관계로 구성될 뿐 아니라, 장기간 진행되므로 실측에 상당한 어려움이 따른다. 따라서 본 연구는 다음과 같은 사항을 주된 연구범위로 선별하여 진행하였다.

- (1) 해석대상은 정적하중만을 받는 초고층 철근콘크리트 구조물의 내부 및 외부 기동요소로 한다.
- (2) 기동 축소량 산출범위는 슬래브 타설시점과 타설 후 발생하는 탄성 및 비탄성 축소량으로 한다.

(3) 탄성 및 비탄성 축소량을 결정하는 요소에 대한 계산 식은 ACI-209에서 제안한 식을 이용하였다.

본 연구는 초고층 철근콘크리트 구조물의 기동축소현상에 대한 이론식 및 실측자료를 토대로 하여, 기동축소현상에 영향을 미치는 제반요소에 대해 검토한다. 또한 서로 다른 공사기간이 총 축소량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해석 모델을 선정하고, 기동 축소량 산출 전산해석 프로그램을 이용하여 서로 다른 공사기간별 총 축소량을 산출한 후 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 이론 해석 방법

2-1. 탄성 축소량

구조물에 있어서 탄성 축소량 계산은 초기하중으로 인한 축소량과 부가하중으로 인한 축소량을 더함으로써 구할 수 있다. 먼저 초기하중으로 인한 축소량 계산은 임의의 층 슬래브를 설치할 시점에서의 축소량 산출과 연속되는 구조체의 작용하중으로 인한 축소량 산출로 분리하여 고려할 수 있다. 임의의 층 슬래브를 설치할 시점에서의 축소량 계산 식은 식 (1)과 같다.

$$\Delta_{1,p}^e = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^N \frac{P_i h_j}{A_{t,i} E_{\alpha,i}} \quad (1)$$

또한 연속되는 구조체의 작용하중으로 인한 축소량 산출은 식(2)을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

$$\Delta_{1,s}^e = \sum_{j=1}^N \sum_{i=N+1}^N \frac{P_i h_j}{A_{t,i} E_{\alpha,i}} \quad (2)$$

위 식에서 사용된 기호는 다음과 같다.

- i = 특정층 또는 하중 증가량
- j = 특정기둥
- P = 작용하중
- h = 층고
- A_t = 기둥단면의 시간중속 치환 면적
- E_{α} = 콘크리트의 시간중속 탄성계수, psi
- N = 전체층수

다음으로 부가하중으로 인한 축소량 산출 식은 위의 초기하중으로 인한 축소량 산출과 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$\Delta_2^e = \sum_{j=1}^N \sum_{k=j}^N \frac{P_k h_j}{A_{t,k} E_{\alpha,k}} \quad (3)$$

2-2. 비탄성 축소량

2-2-1. 건조수축에 의한 축소량

초고층 구조물에 있어서 건조수축으로 인한 축소량 산정은 슬래브 설치시까지의 축소량과 슬래브 설치 후의 축소량을 더함으로써 구할 수 있다. 슬래브 설치시까지의 축소량은, 슬래브 설치 전까지 건조수축으로 인하여 발생하는 축소량에 기여하는 모든 요소들이 전부 고려되어야 한다. 따라서 전체적인 축소량은 식(4)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta_p^s = \sum_{j=1}^N h_j \cdot \varepsilon_{s,j} \cdot SH_{us,j} \cdot SH_H \cdot SH_{t,j} \cdot SH_{R,j} \quad (4)$$

식(4)에서 고려되고 있는 건조수축에 의한 축소량 산정에 기여하는 요인들은 다음과 같다.

- $\varepsilon_{c,j}$ = 7일 동안의 수분양생 후 40%의 상대 습도 하에 노출하여 양생된 150mm 표준 실린더의 극한 건조수축
- $SH_{v,s,j}$ = 체적대 표면적의 비율에 따른 효과
- $SH_{t,j}$ = 시간 경과에 따른 효과
- SH_H = 상대습도에 따른 효과
- $SH_{R,j}$ = 잔여 creep 요소에 따른 효과

슬래브 설치 후의 축소량 계산은 식 (4)의 계산 과정과 유사하나 시간의 경과에 따른 요소를 변환하여 식(5)과 같이 구성 할 수 있다.

$$\Delta_p^s = \sum_{j=1}^N h_j \cdot \varepsilon_{s,j} \cdot SH_{us,j} \cdot SH_H \cdot (1 - SH_{t,j}) \cdot SH_{R,j} \quad (5)$$

2-2-2. Creep에 의한 축소량

Creep에 의한 축소량 계산은 탄성 축소량과 마찬가지로 초기하중에 의한 축소량과 부가하중으로 인한 축소량을 단순히 합함으로써 구할 수 있다. 먼저 초기 하중으로 인한 축소량 산출 식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{1,p}^c = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^N \frac{P_i CR_{LA,i,j}}{A_{t,i}} \varepsilon_{c,i} \cdot h_j \cdot CR_{us,j} \cdot CR_H \cdot CR_{t,j} \cdot CR_{R,j} \quad (6)$$

연속되는 구조체에 대한 축소량 산출 식은 식(7)과 같다.

$$\Delta_{1,s}^c = \sum_{j=1}^N \sum_{i=j}^N \frac{P_i CR_{LA,i,j}}{A_{t,i}} \varepsilon_{c,i} \cdot h_j \cdot CR_{us,j} \cdot CR_H \cdot (1 - CR_{t,j}) \cdot CR_{R,j} \quad (7)$$

식(7)에서 사용된 기호는 다음과 같다.

- $\varepsilon_{c,j}$ = 7일 동안의 수분양생 후 40%의 상대습도하에 노출하여 양생된 150mm 표준 실린더에 28일 동안 하중을 가한 공칭 Creep 변형

- $CR_{LA,\dot{u}}$ = 하중을 가했을 당시의 콘크리트의 재령효과
- $CR_{V,S,\dot{u}}$ = 체적대 표면적의 비율에 따른 효과
- $CR_{t,j}$ = 시간경과에 따른 효과
- CR_H = 상대습도에 따른 효과
- $CR_{R,j}$ = 잔여 Creep 계수

또한 부가하중으로 인한 축소량 산출은 식(8)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\Delta^c_2 = \sum_{j=1}^N \sum_{k=j}^N \frac{P_k CR_{LA,\dot{u}}}{A_{t,\dot{u}}} \epsilon_{c,j} \cdot h_j \cdot CR_{v,s,j} \cdot CR_H \cdot CR_{R,k} \quad (8)$$

2-3. 시공 과정과 관련된 거동

초고층 구조물에 있어서 시공 과정과 관련된 축소현상은, 이미 설치된 수직요소에 미치는 축소현상과 더불어 시공이 진행되는 동안 발생할 축소현상 또한 고려되어야 한다. 첫 번째로 고려하여야 할 사항은 수평요소가 예정된 위치에 설치되어서 적합한 보정이 이루어 질 수 있도록 유도하기 위해 슬래브를 타설할 시점에 있어서 기둥의 상부위치 결정이다. 다음으로 고려할 사항은 슬래브 타설 후 발생할 부가하중에 의한 탄성응력, 부가하중 및 기존하중에 의한 Creep 및 건조수축에 의한 수직요소의 변화량이다. 슬래브의 타설 시점은 다음과 같은 두 가지 형태의 수직요소 축소에 대한 분기점이 된다.

1. 슬래브 타설 시점까지의 축소량 - 수직요소의 높이를 조절하여 슬래브가 예정된 위치에 설치 되도록 하기 위한 해석적 예측 또는 현장 측정이 필요하다.
2. 슬래브 타설 후의 축소량 - 모든 하중이 작용하고 Creep와 건조수축이 발생한 후에 슬래브가 예정된 위치에 있도록 하기 위한 해석적 예측이 필요하다.

현장에서 철근 콘크리트 구조물을 타설할 경우 슬래브의 설치시 수평을 조절하므로 슬래브의 타설 전에 발생하는 축소량은 별 의미가 없다. 그러나 슬래브의 설치후 계속되는 하중 및 체적의 변화로 인한 변화량의 예측이 필요하다. 이러한 예측 값은 형틀을 반대 방향으로 경사지도록 제작하여 슬래브가 바른 위치를 확보하는데 사용된다.

3. 축소량 계산 및 해석 결과의 고찰

3-1. 축소량 계산

기둥축소량 산출 전산해석 프로그램을 이용하여, 66층 철근콘크리트 구조물의 시공시간이 기둥축소현상에 미치는 영향을 평가하기 위해 사용된 제 요소는 다음과 같다.

- (1) 재료의 성질 및 적용된 하중은 표 1과 같다.
- (2) 극한 건조수축값(Ultimate Shrinkage value)은 현장에서 타설되는 콘크리트에 대한 실질적인 조사를 통하여 그 값을 측정하여야 하나 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 $500 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ 의 중간 값인 650×10^{-6} 값을 사용하였다.
- (3) 특정 Creep값(Specific Creep value)은 실제 건물에 사용된 자료가 없는 경우 일반적으로 $0.003/f'c \sim 0.005/f'c$ 의 값이 사용된다. 그러나 본 연구에서는 해석모델의 실측된 평균값인

0.25×10⁻⁶을 사용하였다.

(4) 기타 기둥 축소량 산출 식에 사용된 요소는 ACI규준에서 제안한 값을 적용하였다.

(5) 골조의 시공기간은 다음 3가지 서로 다른 시공일정에 대하여 계산하였다.

- ㉠ CASE I - 7일/매층 슬래브
- ㉡ CASE II - 15일/1-33층 슬래브
- 10일/34-66층 슬래브
- ㉢ CASE III - 실제 작업공정

Floor Level (story)	Concrete Strength (Kips/inch ²)	Column Area(inch ²)	Steel Area (inch ²)	Floor Load (Kips)	Steel Ratio (%)
B6 - B3	5.7	3038	161.91	193.5	5.33
B2	5.7	3038	161.91	253.5	5.33
B1	5.7	3038	161.91	258.5	5.33
1-3	5.7	2386	121.07	165.3	5.07
4	5.7	2386	121.07	178.1	5.07
5	5.7	2386	121.07	162.6	5.07
6-11	5.7	2386	91.54	162.6	3.84
12	5.7	2386	91.54	189.1	3.84
13	5.7	2386	91.54	372.5	3.84
14	5.7	2386	91.54	153.5	3.84
15-18	5.7	1860	34.36	69.9	1.85
19-38	5.7	1860	34.46	131.9	1.85
39-66	5.7	1116	24.61	131.9	2.21

표 1. 단면 및 하중

기둥의 축소량을 계산하는 주요한 목적은 건물을 사용하는 동안 각 슬래브에 대해 올바른 최종 위치를 확보하도록 하는 것이다. 보통 거푸집은 슬래브 타설 시점에 설치되기 때문에 슬래브 타설 전에 발생한 건물의 축소량은 콘크리트 구조물의 양생기간에 있어 중요하지 않다. 슬래브의 거푸집은 순차적인 하중으로 인한, 그리고 시간에 의존하는 건조수축과 Creep으로 인한 추가적인 축소량에 대해 보정되도록 반대 방향으로 올려져야한다.

3-2. 전산해석 결과의 고찰

그림 1에 나타낸 것처럼 각층 바닥의 콘크리트 타설까지 서로 다른 시공 시간에 대하여 축소량은 작은 차이가 나타났고, 최대 축소량은 건물의 상부에서 발생한다는 것을 알 수 있었다. 그러나 그림 2에서 보여주는 것처럼 서로 다른 시공 시간으로 인해 큰 차이가 각층 바닥에 순차적으로 나타난다는 것을 알 수 있다.

또한 최대 축소량은 건물의 최상부에서 발생하지 않고 약 50층 부근에서 발생하였다 표 2는 최상층에서의 축소량을 나타낸 것이다. 각 슬래브의 타설시까지 발생한 축소량은 슬래브 설치후의 축소량보다 약 2배정도 더 크게 나타났으며, 변경된 시공 일정까지 총 축소량은 약간의 차이가 나타났다. 이것은 최상층 위에 작용하는 추가하중이 없으므로 기둥의 상부에서 발견된 탄성으로 인한 축소현상이 발생하지 않기 때문으로 판단된다. 그러나 슬래브 타설 후에 발생하는 비탄성 축소량은 표 2에서 보는 바와 같이 실제 시공 일정과 비교할 때, 총 축소량은 -1 ~ 3% 정도의 작은 차이가 발생하였음을 알 수 있다.

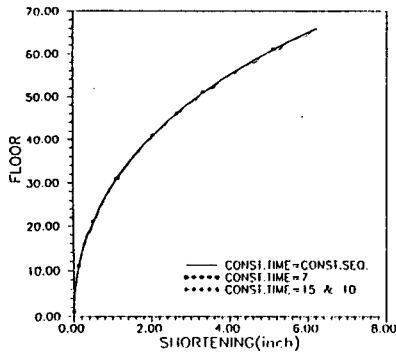


그림 1. 슬래브 설치시

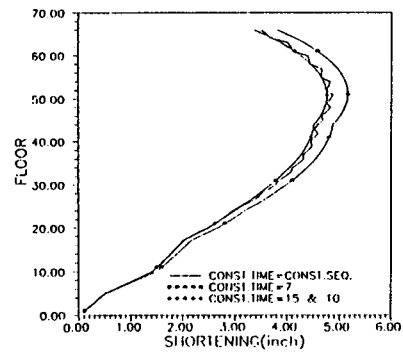


그림 2. 슬래브 설치 후

		CASE I (inch)	CASE II (inch)	CASE III (inch)
슬래브 타설시	탄성 축소량	3.23	3.19	3.23
	비탄성 축소량	2.97	3.04	2.96
	소 계	6.20	6.23	6.19
슬래브 타설 후 상층 타설시	탄성 축소량	0.00	0.00	0.00
	비탄성 축소량	3.81	3.36	3.51
	소 계	3.81	3.36	3.51
총 축소량(inch)		10.01	9.59	9.70
차이율(%)		1.03	0.99	1.00

표 2. 서로 다른 시공기간에 따른 최상층 축소량

4. 결 론

66층 건물에서 특정한 내부기둥을 전산화된 축소량 계산 프로그램을 이용하여 해석하였다. 또한 3가지의 서로 다른 시공 순서가 수직구조요소의 축소량 결정에 미치는 효과를 고찰하는데 적용되었다.

전산해석 결과 각 슬래브의 설치시까지 작은 차이가 발견되었다. 그러나 서로 다른 시공진행 순서에 따라서 상대적으로 큰 축소량의 차이가 발견되었다. 시공기간이 다른 것에 비해 2배 이상 걸리는 경우 단지 4%만의 축소량의 차이가 발견되었다. 따라서 초고층 구조물의 축소량을 결정하는 요인 중에서 시공 기간은 중요한 요소라 할 수 없다.

그러나, 구조기술자는 초고층 구조물을 설계하는데 있어서 슬래브 타설 후의 축소량을 주의 깊게 고려해야 할 것이다. 또한 인접한 부재들의 차이인 축소량은 비구조적인 요소들의 예상치 못한 변형을 방지하기 위해 시공기간동안 반드시 보정되어야만 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 1996년 경희대학교 신입교수 연구과제 지원에 의해 수행된 연구결과의 일부로써, 재정적인 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김희철, 김상대의 : 고층건물 수직구조계의 축소량에 관한 연구, 대한건축학회지, 1993, 4월, pp 283-286
2. 김희철 : 고층 합성건물 기둥의 축소량 예측 및 보정, 대한건축학회지, 1992, 6월, pp 44-49
3. Colaco, J.P. , "75-Story Texas Commerce Plaza, Houston-the Use of High-Strength Concrete," Publication SP-87, ACI, Detroit, pp 1-8, 1985
4. Fintel, M., Ghosh, S. K. and Iyanger, H., *Column Shortening in Tall Structures*, Portland Cement Association, 1987.
5. Fintel, M. and Gosh, S. K., "Column Length Change in Ultra High-Rise Building," *Advances in Tall Building*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, Van Nostrand Reinhold Co., pp 503-515, 1986.
6. Fintel, M. and Ghosh, S. K., "High-Rise Design : Accounting for Column Length Change," *Civil Engineering*, ASCE, April, pp 55-59, 1984
7. Russell, H. G., "High-Rise Concrete Buildings : Shrinkage, Creep and Temperatures Effects," *Analysis and Design of High-Rise Concrete Buildings*, Publication SP-97, ACI, Detroit, pp 125-137, 1986.
8. Russell, H. G., *Shortening of High-Strength Concrete Members*, High-Strength Concrete, Publication SP-121, ACI, Detroit, 1990.