

# 고층건물의 부등축소량 예측 및 계측

## Prediction and Measurement of Differential Column Shortening in High-rise Building Structures

정금진 <sup>*</sup>	양근혁 <sup>**</sup>	이정환 <sup>***</sup>
Chung, Kum-Jin	Yang, Keun-Hyeok	Lee, Jung-Han
홍재원 <sup>****</sup>	이원호 <sup>*****</sup>	정현수 <sup>*****</sup>
Hong, Jae-Won	Yi, Waon-Ho	Chung, Heon-Soo

### ABSTRACT

A Hybrid Wall System (HWS) building, Kolon Bundang Tripolis was instrumented to measure the vertical deformation of core-walls and columns. The vertical shortenings of individual members were measured at selected floor levels such as 1F, 12F, 25F, and 34F. The measurement has been taken during one year after the construction was started. Together with the measurement, concrete property tests were performed in the laboratory using the concrete obtained in the field. The measured vertical shortenings were compared with the calculated prediction values and the satisfactory agreement was obtained.

### 1. 서론

최근 구조물의 초고층화에 따라 구조체 및 부재의 요구에 맞는 재료의 장점을 활용한 이종재료 부재를 사용한 혼합구조 및 합성구조 형식의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 재료 및 특성을 활용한 합성구조 중에서 HWS (Hybrid Wall System) 구조형식은 구조적으로 휨력과 수직력이 조합된 하중에 효율적으로 저항할 수 있고, 평면의 자유로운 가변성과 경제적 관점에서 슬립폼 공법을 적용함으로써 공사비절감 및 공기단축이라는 장점을 가지고 있다. 그러나, 이러한 이종재료 부재를 사용할 경우, 단일재료 부재를 사용했을 때보다 수직부재간 부등축소량은 증가하게 된다. 이는 철골기둥의 기둥축소는 탄성 변형에 의해 지배되는 반면, 철근 콘크리트 기둥은 탄성 변형 이외에 비탄성 변형인 크리프 및 건조수축에 의한 축소가 추가적으로 발생하기 때문이다. 또한 건물이 고층화됨에 따라 기둥축소량이 누적되는 현상으로 인해 부등축소량은 더욱 증가하게 된다. 이러한 부등축소량은 보나 슬래브 등 수평부재의 기울어짐을 유발시켜 내부 칸막이 벽체, 설비체계 및 외장재의 균열을 초래하는 사용성의 문제와 기둥간을 연결하는 수평부재의 부가응력을 유발시키는 구조적 문제의 영향을 끼친다. 따라서 이러한 부등축소량에 대한 충분한 고려가 이루어지지 않았을 경우, 사용성과 구조적인 측면에서 심각한 문제점을 유발시킬 수 있다.

\*정회원, 중앙대학교 건축학과 석사과정

\*\*정회원, 중앙대학교 건축학과 박사과정

\*\*\*정회원, 광운대학교 건축공학과 박사과정

\*\*\*\*정회원, 코오롱건설 감리 단장

\*\*\*\*\*정회원, 광운대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\*\*정회원, 중앙대학교 건축학과 교수, 공학박사

그러나 연구의 특성상 장기간에 걸친 계측의 어려움으로 아직까지 이 분야에 대한 연구자료가 미미한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 수직부재의 부등축소의 영향 및 원인을 분석하며, 합성구조 중 HWS 구조형식으로 건설 중인 코오롱 분당 트리폴리스에 관한 수직부재 부등축소량을 예측하고, 시공단계별 계측된 부등축소량과 비교 분석하여 부등축소로 인해 발생할 수 있는 문제점을 사전예방하고 앞으로의 설계 기초자료로 제시하고자 한다.

## 2. 기동축소량 계측 및 재료시험

### 2.1 개요

코오롱 분당 트리폴리스 건물은 지하 3층, 지상 39층으로 이루어진 세 개의 타워로 구성된 주상복합건물이다. 지하 3층에서 지상 4층까지의 저층부는 주차장 및 상가로 사용되고, 지상 5층부터 39층까지는 오피스텔로 사용된다.

세 개의 타워 중에 평면이 같은 B동과 C동 중, C동을 주 계측 동으로 계획했고, 다른 평면을 가진 A동에는 C동의 W2에 해당하는 위치에 게이지를 설치하였다. 게이지 위치와 콘크리트 강도변화 및 입면 변화는 그림 1의 평면도와 그림 2의 단면도에 각각 나타내었다. 계측 위치는 외부기둥과 내부기둥의 부등축소량과 기둥과 코아벽체간의 부등축소량에 있어 큰 차이를 보일 것으로 사료되는 위치로 정하였으며, 콘크리트 강도와 평면 및 입면이 변하는 4개 층(1층, 12층, 25층, 34층)에 각각 설치하였다.

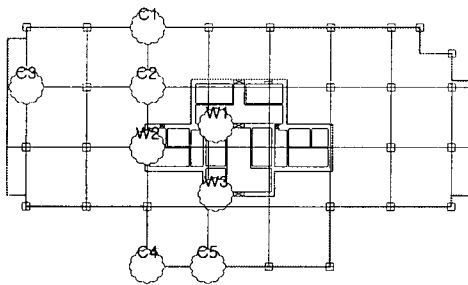


그림 1 계측동의 평면도

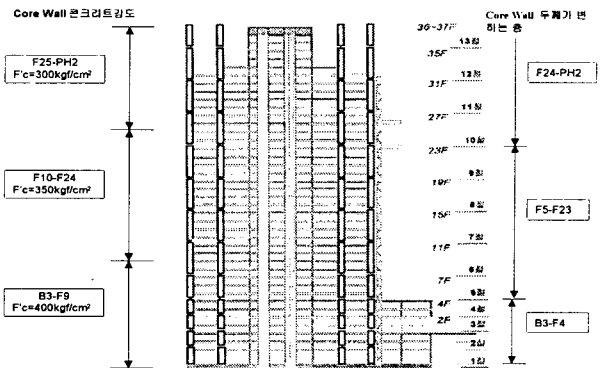


그림 2 계측타워의 단면도

기동축소는 장기간에 걸쳐 발생하기 때문에 장기간 안정적인 계측을 위한 게이지를 필요로 한다. 콘크리트 코아벽체에는 온도와 변형률을 측정할 수 있는 매립형 게이지(KM-100BT)를 콘크리트 타설 전에 설치하여 타설과 동시에 변형률과 온도를 측정하였고, 거푸집제거와 동시에 표점거리 1500 mm를 갖는 자체 제작한 다이얼 게이지를 이용한 측정기기(Demec gauge)로 변위를 측정하였다.

철골기둥에는 방수성능을 갖는 부착형 게이지(WFLA-3-11-3L)를 설치하였으며, 철골기둥의 온도 팽창률을 보정하기 위해 온도 측정 게이지를 동일한 위치에 설치하였다. 철골기둥의 게이지 설치는 공사진행과정상 코아벽체와 시간상 이격이 발생했다. 표 1에 계측 코아벽체 및 철골기둥의 재료성능을 나타내었다. 재료의 역학적 성질을 파악하기 위해 실험실 시험은 계측 코아벽체에 타설된 래디믹스트 콘크리트로 탄성계수, 압축강도, 건조수축, 기본크리프 및 건조크리프를 측정하였다.

표 1 계층부재의 재료성능

층	계층 기둥 단면크기(mm)					계층 코아벽체두께(mm)			설계강도 ( $f_{ck}$ ) (kgf/cm <sup>2</sup> )
						철근비(%)			
	C1	C2	C3	C4	C5	W1	W2	W3	
34F	50H-388× 402×15×18	50H-388× 402×15×15	50BH-400× 400×19×32	50H-388× 402×15×15	50BH-400× 400×25×40	700 0.49	400 0.26	700 0.49	300
25F	50H-394× 405×18×18	50BH-400× 400×25×40	TH-400× 400×32×50	50H-394× 405×18×18	TH-400× 400×32×50	700 0.49	400 0.26	700 0.56	300
12F	TH-400× 400×32×50	TH-400× 400×50×70	TH-500× 500×70×80	TH-400× 400×25×40	TH-500× 500×50×70	700 0.73	500 0.26	750 0.82	350
1F	TH-400× 400×70×80	TH-500× 500×70×80	TH-500× 500×70×80	TH-400× 400×50×70	TH-550× 550×80×80	800 0.80	600 0.27	800 1.00	400

2.2 콘크리트의 재료시험

실험실 실험은 계층 코아벽체 및 기둥에 사용된 콘크리트를 현장에서 채취하여 KS F 2403기준에 따라  $\phi 15 \times 30$  cm 원주형 공시체를 제작하여 KS F 2405기준에 따라 재령에 따른 콘크리트의 압축강도 측정을 하였으며, KS F 2438기준에 따라 재령별 탄성계수를 측정하였다. 건조수축 측정은 동일한 콘크리트를 사용하였으며, 몰드 중앙부에 변형률 게이지와 온도게이지를 매립 설치하였으며 7일 동안 수조에서 양생한 후 실험실로 이동시켜 측정했다.

그림 3에 크리프 시험 및 건조수축 시험결과를 나타내었다. 콘크리트 압축강도는  $300 \text{ kgf/cm}^2$ 이며 KS F 2453 기준에 따라 크리프를 측정하였으며 응력/강도비는 40 %로 하여 실험하였다. 크리프는 기본 크리프 (basic creep)와 건조크리프 (drying creep)로 나뉘며, 기본크리프 측정은 수분의 이동을 차단하기 위해 7일 동안  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1.7$ 에서 수조양생한  $\phi 15 \times 30$  cm 원주형 공시체를 아스팔트 시트로 방수하여 측정하였으며, 건조크리프는 아무런 처리를 하지 않은 공시체로 크리프를 측정하였다. 그림 3을 보면 초기재령의 콘크리트의 비탄성 변형에 있어 기본크리프, 건조크리프 및 건조수축이 차지하고 있는 부분이 각각 비탄성 변형의 약 1/3정도임을 알 수 있다. 그러나 실제 구조체의 적용을 위해서는 시간에 관련된 계수나 부재형상 및 성능과 환경조건에 관한 여러 계수<sup>1)</sup>로 보정해야 한다.

그림 4에 C동 코아벽체에 타설된 콘크리트의 건조수축 변형률을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 현재까지 세 개의 시험체가 건조수축 변형률에 있어서 큰 차이를 보이고 있지 않다. 이는 콘크리트 설계 배합상  $f_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$ 와  $f_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$ 와 큰 차이가 없기 때문으로 판단되며,  $f_{ck}=300 \text{ kgf/cm}^2$  시험체는 측정기간이 짧으나 앞의 두 시험체에 비해 앞으로 건조수축 변형률 진행이 커질 것으로 판단된다.

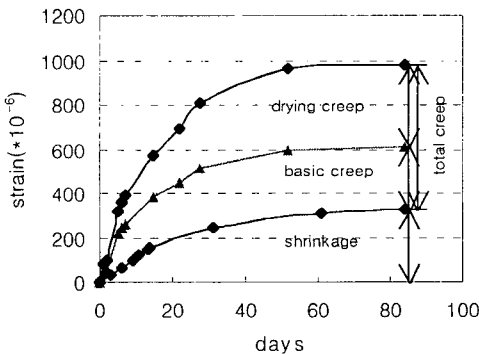


그림 3 콘크리트의 비탄성 변형

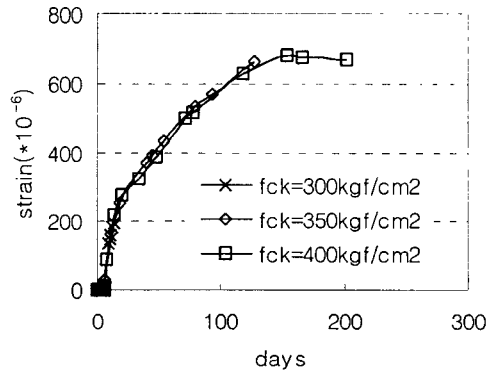


그림 4 건조수축 실험결과

### 2.3 코아벽체의 계측결과

그림 5는 A동 Tower의 1층 코아벽체 W11의 재령에 따른 변형률을 KM-100BT 게이지의 영점이동 보정과 열팽창을 보정<sup>2)</sup>하여 나타내었으며, 1500mm 표점거리를 갖는 데백 게이지와  $\phi 15 \times 30$  cm 원주형 공시체의 건조수축 변형률을 실제 구조체와 동일한 v/s비 계수 ( $SH_{v,s}$ )<sup>3)</sup>를 곱한 값과 비교를 나타내고 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 초기 재령에 있어서 기둥의 변형률과 건조수축이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 건조수축이 초기 코아벽체의 축소량에 영향을 미치는 지배적인 요소임을 알 수 있다. 건조수축에 의한 변형률 증가는 기존 연구자<sup>1),4)</sup>에 의해 밝혀진 대로 약 28일이 지나면 건조수축의 40%가 진행되고, 90~180일이면 70~80%가 진행되므로 건조수축 변형률은 급격한 기울기를 갖는다. 그러나 약 15일 정도가 지난 이후부터는 코아벽체의 수축량은 완만한 기울기를 가지고 증가하고 건조수축 변형률과 점차적으로 격차가 발생함을 알 수 있다. 이는 기둥의 축소량에 영향을 미치는 건조수축은 시간이 지남에 따라 점차적으로 줄어들며 추가적인 하중재하로 인해 나머지 요소인 탄성수축과 크리프의 영향이 점차 늘어나는 것으로 판단된다. 콘크리트 타설 초기에 KM-100BT 게이지의 변위가 데백 게이지보다 크게 나타나고 있다. 이는 KM-100BT 게이지는 콘크리트 타설과 함께 계측을 시작하였지만, 데백 게이지는 거푸집 탈형 후 계측을 시작하였기 때문에 측정개시 시간 차로 인한 이격이 발생한 것으로 사료된다. 그러나, 콘크리트 타설 후 30일이 지나면서 데백 게이지와 KM-100BT 게이지의 격차는 거의 없어진다.

그림 6에 재령에 따른 C동 코아벽체의 층별 기둥축소량 계측결과를 나타내었다. 그림 6을 살펴보면 초기재령에서 1층 코아벽체는 갑작스러운 변형률의 증가를 보이고 있다. 수화열로 인한 변형률을 비롯한 콘크리트에 나타나는 초기재령에서의 여러 가지 현상들이 있으나, 이는 하중이 재하 되지 않은 상태에서 발생한 변형률이고, C동 1층에 콘크리트를 타설한 시기가 여름이라는 계절적 원인에서 A동과 마찬가지로 건조수축에 의해 크게 영향받은 것으로 판단된다. C동 12층 및 25층은 시공 공정상 약 100일정도 이격이 있었으며, 계절상 가을과 겨울에 타설되어 초기재령에 있어 건조수축의 영향으로 인한 갑작스러운 변형률은 뚜렷이 보이고 있지 않다. 코아벽체의 기둥축소는 앞으로 커튼월, 칸막이 벽 등 적재하중으로 인한 추가적인 진전을 보일 것으로 판단되며, 골조공사가 완료된 시점을 기준으로 C동 1층, 12층 및 25층은 각각 약 1.3 mm, 0.8 mm, 0.4 mm의 기둥축소량을 보이고 있다.

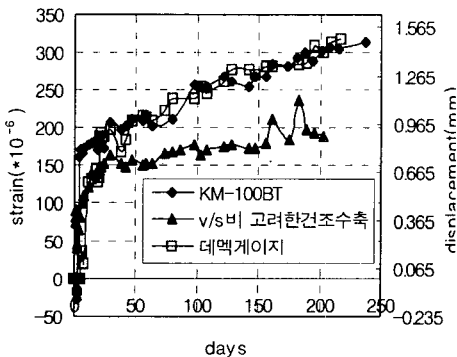


그림 5 A동 W2의 기둥축소량

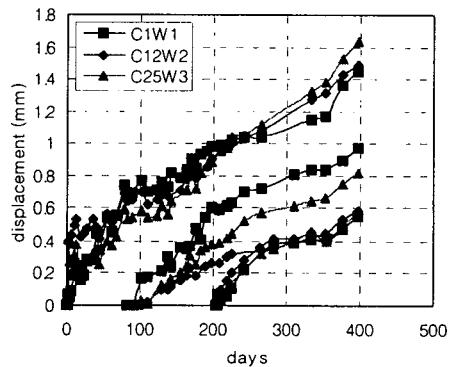


그림 6 재령에 따른 C동 코어벽체의 기둥축소량

## 3. 기둥축소량 예측

### 3.1 개요

본 연구의 기둥축소량 예측은 Fintel 등<sup>3)</sup>이 발표한 해설모델을 기초로 하여, 탄성축소 및 비탄성축소 해석을 수행하였다. 프로그램 해석 과정에서 시공 단계별 하중재하 및 시간에 따른 탄성계수의 변화에 따른 축소량에 미치는 모든 변수들을 고려하였고, 슬래브 타설 전·후를 구분하여 해석하였다. 본 예측에 있어서 시간중속 탄성계수 산출식은 사용 콘크리트의 강도가 420 kgf/cm<sup>2</sup> 이하이기 때문에 ACI 318-95에서 제안한 값을 적용하였고, 극한 건조수축 값은  $800 \times 10^{-6}$  값을 선택 적용하였으며, 특정 크리프계수 값의 경우 ACI기준에 따라  $3/f_{ck} \sim 5/f_{ck}$  범위의 값을 적용하였다. 상대습도는 우리 나라 평균값인 68%를 적용하였다.

### 3.2 현장계측결과와 예측결과와의 비교

C동 1층과 C동 12층의 W3 부재를 선택하여 시공과정 및 시간누적에 따른 층별 축소량에 대한 실제 계측값과 해석값의 비교를 하여 그림 7과 그림 8에 각각 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 계측값의 경우 초기에 환경조건에 따른 어느 정도의 변이가 발생하였지만, 시간의 진행에 따라 일정한 경향을 나타내고 있다. 공사진행에 따른 해석값과 계측값은 전반적으로 비슷한 경향을 나타냈지만 1층의 경우 200일을 전후로 약 0.2mm의 차이가, 12층의 경우 120일을 전후로 약 0.15mm의 차이가 발생하였다. 이러한 차이는 비탄성 축소량에 영향을 미치는 특정 크리프 계수값 및 극한 건조수축값과 시공하중에 의해 발생한 것으로 판단되며, 이러한 특정 크리프 계수값 및 극한 건조수축값 등의 비탄성축소에 미치는 영향에 대하여 재료실험 및 현장계측의 비교를 통하여 프로그램에 적용하여야 한다.

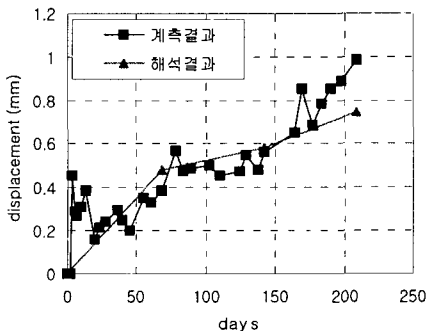


그림 7 C동1층 W3의 계측결과와 예측결과와의 비교

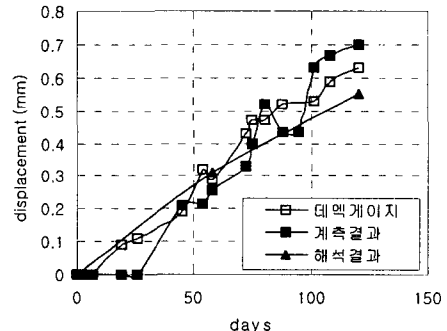


그림 8 C동 12층 W3의 계측결과와 예측결과와의 비교

내부 철근콘크리트 코아벽체 (W3)과 외부 철골기둥 (C4)의 부등축소량을 그림 9에 나타내었다. 탄성축소와 비탄성축소를 비교하였고, 레벨 보정이 가능한 슬래브 타설 전 (up to casting)과 슬래브 타설 후 (subsequent to casting)로 구분하여 해석하였다. 두 부재를 탄성변형에 의한 축소만으로 해석했을 때, 부등축소량이 최대 50mm 가량 나타났다. 그러나, 철근콘크리트 부재의 경우 탄성축소와 더불어 건조수축과 크리프 축소 등의 철골부재와는 다른 추가적인 축소가 발생하게 된다. 탄성 축소 외에 비탄성축소를 함께 고려했을 경우, 총 축소량에 대한 부등축소량은 해석 결과 약 10mm 가량으로 나타났다. 그림 10에 슬래브 타설 전후의 코아벽체 (W3)의 축소량을 예측하여 나타내었다. 부등축소량의 예측에 있어서 코아벽체의 경우 중간층 근처인 19~20층에서 축소량이 8.6mm로 최대치를 나타냈다. 이러한 부등축소 발생요인으로는 중간층 (22층)부터 코아벽체의 변화, 21층 이후 22층부터 모서리부분이 셋백 되는 형태변화, 이종재료의 사용, 층고의 변화 및 부재의 등가 단면적의 차이 등에 의해 발생하는 것으로 사료된다.

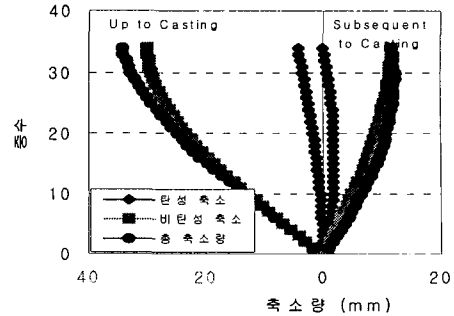
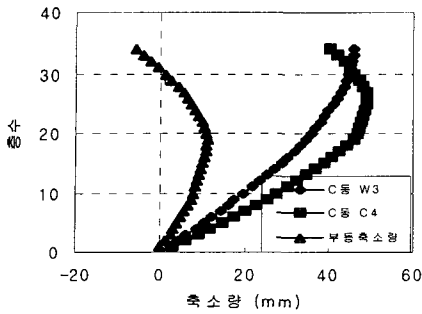


그림 9 내부 코아벽체와 외부기둥의 부등축소량 그림 10 내부 코아벽체의 슬래브 타설 전·후 축소량

#### 4. 결론

- 1) 초기 재령에 있어 코아벽체에서 갑작스러운 변형률의 증가를 보이고 있으며, 이는 건조수축에 의한 영향을 받은 것으로 판단되며, 시간의 진전에 따라 건조수축의 영향은 감소하였다.
- 2) 골조공사가 완료된 시점을 기준으로 C동 1층, 12층, 25층의 코아벽체는 각각 약 1.3 mm, 0.8 mm, 0.4 mm의 축소량을 보이고 있으며, 향후 커튼월, 칸막이 벽체 등의 적재하중으로 인한 추가적인 진전을 보일 것으로 판단된다.
- 3) 내부의 철근 콘크리트 코아벽체와 외부의 철골기둥 축소량의 해석 결과, 두 부재간의 탄성변형에 의한 해석은 부등축소량이 철골기둥이 최대 50 mm 정도 더 축소하는 것으로 나타났으며, 비탄성 변형을 포함한 해석결과 총 축소량에 대한 부등축소량은 약 10 mm로 나타났다.

#### 감사의 글

이 연구는 코오롱건설 주식회사의 연구비 지원으로 수행된 “코오롱 분당 트리폴리스의 부등축소량 예측, 계측 및 시공오차 보정에 관한 연구”라는 연구과제 결과의 일부로서 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Fintel, M. and Khan, F.R., “Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structures - Prediction of Inelastic Column Shortening,” ACI Journal, ACI, Detroit, Mich., Vol. 6 No. 12 pp. 957 -967, December. 1969
2. 박칠림 외 4명, “메스콘크리트구조물의 온도응력 평가에 관한 연구,” 콘크리트학회 논문집, 제7권 제2호, pp.126-135, 1995. 4
3. Fintel, M., Ghosh, S.K. and Iyengar, H., “Column Shortening in Tall Structure - Prediction and Compensation,” Portland Cement Association, 1986.
4. ACI Committee 209, “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures,” ACI 209R-92 ACI Manual of Concrete Practice, Part I, 1977.
5. 김원상, 조한욱, 오정근, 엄경수. “고층 콘크리트 건물의 기둥축소량 계측연구,” 콘크리트학회 논문집, 제11권 제3호, pp.161-170, 1999. 6
6. 박칠림 외 5명, “초고층 구조물에서 기둥축소량의 영향,” 대한건축학회 학술발표 논문집, 제18권 제2호, pp.57-62, 1998. 10