

비탄성효과를 고려한 Plaza Rakyat 오피스동의 기둥부등축소량

Differential Column Shortening of Plaza Rakyat Office Tower Including Inelastic Effect

송 화 철* 유 은 증** 정 석 창** 주 영 규** 안 재 현*** 박 칠 림****
Song, Hwa-Cheol Yu, Eun-Jong Jeong, Sug-Chang Ju, Young-Kyu Ahn, Jae-Hyen Park, Chil-Lim

ABSTRACT

Highrise concrete buildings are very sensitive to cumulative and differential shortening of their vertical element such as wall and columns. Inelastic deformation due to creep and shrinkage consist of various factors and load history of actual building is very complicated. Therefore, for the accurate prediction and compensation of axial shortening, special efforts in design and construction phase are required to ensure long-term serviceability and strength requirement.

In this paper, axial shortening estimation and compensation procedure is presented, which utilized experimentally determined concrete properties and preliminary load history and computerized approach, in case of Plaza Rakyat office tower, 79-story reinforced concrete building under construction in Malaysia.

1. 서론

최근 한국과 말레이시아, 중국을 비롯한 아시아국가에서는 경제개발에 따른 수요증대로 인해 초고층건물의 건설이 붐을 이루어 다수의 초고층건물 계획안이 발표되고 또한 시공되고 있다. 중국과 말레이시아, 필리핀 등지에서 건설되고 있는 초고층건물의 특징은 구조재료로서 철골이 아닌 콘크리트를 많이 사용한다는 점이다. 이는 철골부재가 생산되지 않는다는 지역적인 특성과 함께 구조재료로서 콘크리트에 대한 건축주의 선호도에 기인한 것으로 보인다.

이와 같은 콘크리트조의 초고층 건물은 철골조에 비해 기둥이나 전단벽과 같은 수직부재의 누적축소량에 의해 큰 영향을 받게 된다. 철골부재의 경우는 장기변형이 거의 없이 탄성축소량만 발생하므로 수직변위를 예측하고 설계에 반영하는데 어려움이 없다. 그러나 철근콘크리트기둥의 경우에는 탄성축소와 함께 크리프(Creep)와 건조수축(Shrinkage)과 같은 비탄성효과에 의한 축소가 장기간에 걸쳐 일어나게 된다. 크리프와 건조수축은 콘크리트의 시간의존적(time-dependent)인 성질에 의한 것으로 콘크리트의 강도와 종류, 부재의 크기, 철근비, 주위의 상대습도에 따라 달라지고, 특히 크리프의 경우는

- 1) *정회원, 대우건설기술연구소 선임연구원, 공학박사
- 2) **정회원, 대우건설기술연구소 주임연구원
- 3) ***정회원, 대우건설기술연구소 책임연구원
- 4) ****정회원, 대우건설기술연구소 소장, 공학박사

하중의 크기와 재하당시의 콘크리트강도, 또한 재하기간에 따라 변화하는 성질이 있으므로 기둥의 축소량은 시공공정에 따라서도 달라지게 된다. 따라서 이렇게 복잡한 요인에 의해 발생하는 비탄성 축소량을 예측하고 설계 및 시공에 반영하기 위해서는 많은 노력이 요구된다.¹⁾

초고층건물에서 기둥축소량의 부정적인 영향은 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 건물의 사용성에 관한 것으로 수직부재에 발생한 총축소량은 건물외부의 커튼월, 수직배관덕트, 엘리베이터 레일 등에 영향을 주게 되고, 또한 인접한 수직부재간의 부등축소량은 슬래브의 기울어짐, 간막이벽의 균열을 발생시킨다. 또다른 측면으로는 구조적인 문제로서 지점침하에 의한 부가용력이 발생된다. 특히 횡력에 저항하기 위해 설치되는 아웃리저 트러스나 벽의 경우 부등축소량에 의한 지점침하의 영향을 크게 받므로 축소량을 정확히 예측하고 그 영향을 없앨 수 있도록 시공할 필요가 있다.^{2),3)}

본 연구에서는 말레이시아에 건설중인 79층의 순수 철근콘크리트 건물인 Plaza Rakyat 오피스동을 대상으로 크리프와 건조수축을 고려한 기둥축소량을 예측하고 부등축소량의 보정방안과 보정치를 제시하였다.

2. Plaza Rakyat 오피스동의 개요

Plaza Rakyat 오피스동은 말레이시아의 쿠알라룸푸르에서 건설중인 지상 79층, 지하 5층의 높이 382m인 건물로서 세장비가 1:8을 초과하는 초고층건물이다. 이 건물은 기둥 뿐 아니라 보, 바닥판에도 철근콘크리트를 사용하여 완공되면 세계최고의 순수 RC조 건물이 될 예정이다. 구조형태는 내부의 코어월과 28층~29층, 51층~52층에 설치된 벨트월(Belt wall), 73층~74층에 설치된 아웃리저가 외곽기둥과 접합되어 횡력에 대해 저항하는 방식이다. 그림 1은 기준층의 평면도이다. 사용된 콘크리트는 지하 5층에서 40층까지는 28일 압축강도가 50MPa인 C50의 콘크리트, 41층부터 최상층까지는 28일 압축강도가 40 MPa인 C40의 콘크리트를 사용하였다.

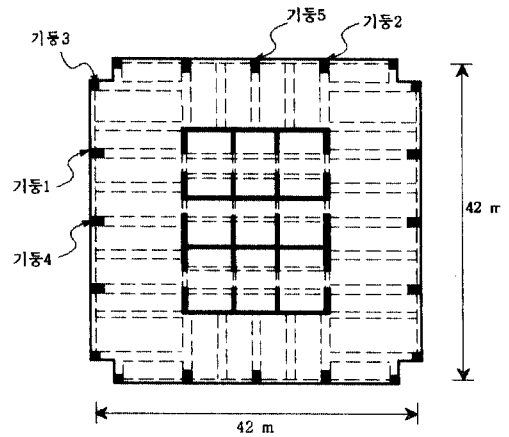


그림 1. Plaza Rakyat 오피스동의 평면

3. 기둥축소량에 영향을 미치는 요인

PCA에서는 압축력을 받고 있는 철근콘크리트부재의 축소량을 예측하기 위한 방법을 제시하고 있다.¹⁾ 이에 따르면 총축소량은 탄성축소량, 크리프 축소량, 건조수축 축소량으로 구성되는데 각각에 영향을 미치는 인자는 다음의 표 1과 같다. 여기서, 특정크리프계수는 하중에 의한 단위응력당의 크리프를 나타내는 것으로 (min/in/psi)의 단위를 가진다.

표 1. 축소량에 영향을 미치는 요인

종류	영향인자
탄성축소량	하중, 탄성계수
크리프 축소량	특정크리프계수, 하중, 가력시점, 가력시간, 체적-표면적비, 상대습도, 철근비
건조수축 축소량	극한건조수축변형도, 경과시간, 체적-표면적비, 상대습도, 철근비

4. 기둥축소량의 산정방법

탄성수축에 의한 기둥의 축소량은 비교적 정확히 산정할 수 있으나, 크리프와 건조수축과 같은 비탄성 효과에 의한 축소량은 여러 가지 요인에 의해 변화한다. 이들 비탄성축소량의 산정에서 가장 기본적인 인자는 콘크리트의 특정크리프계수와 극한건조수축변형도의 값으로서 본 연구에서는 이러한 값의 정확한 측정을 위해 콘크리트 재료시험을 실시하였다. 즉 실제로 사용될 골재와 시멘트, 배합비를 사용하여 공시체를 제작한 다음 각 설계강도별로 실제압축강도, 탄성계수값, 극한건조수축변형도, 특정크리프값을 측정하였다. 표 2는 그 결과이다.

또한 시공과정에 의한 단계별하중의 가력시점은 예상 공정표에 따라 다음의 표 3과 같이 가정하였다. 이때 고려되는 하중은 구조체의 자중, 간막이벽, 커튼월, 설비/배관 등의 무게이다. 예상공정은 지하층은 15일당 1개층씩 코어월과 기둥이 같이 타설되며, 지상층에서는 층당 5일로 코어월과 기둥타설일의 차이가 45일, 즉 코어가 기둥보다 9개층 먼저 시공되는 것으로 가정하였다. 축소량 계산에 사용한 하중은 부담면적에 의한 값이 아니라 탄성해석을 통해 계산된 기둥하중을 사용하여 골조에 의한 하중 분담현상(Frame Action)을 고려하였다.

건물의 평면은 그림 1에서 볼 수 있듯이 대칭이므로 기둥의 축소량은 기둥1~기둥5의 5곳에서 계산하였으며, 각층 기둥의 콘크리트 강도, 단면적, 철근비, 체적-표면적비는 표 4와 같다. 내부코어월의 경우도 유사하나 기둥에 비해 층에 따른 단면적, 철근비의 변화가 심하여 나타내지 않았다.

각 경우 축소량은 슬래브 타설전 축소량(Up to slab installation shortening)과 슬래브 타설이후의 축소량(Subsequent to slab installation shortening)으로 구분하였다. 타설전 축소량은 어떤 층이 타설

표 2. 재료의 특성

재료의 특성	C50	C40
28일 압축강도	8600 psi	7000 psi
탄성계수	5343 ksi	4821 ksi
특정크리프치	0.340 $\mu\text{in}/\text{in}/\text{psi}$	0.440 $\mu\text{in}/\text{in}/\text{psi}$
극한건조수축 변형도	550 $\mu\text{in}/\text{in}$	720 $\mu\text{in}/\text{in}$

표 3. 하중의 작용시점

코어월	외부기둥 / 슬래브	바닥마감	경량간막이 (코어부)	외장재	설비/배관	파티션
+0일	+45일	+75일	+100일	+157일	+355일	+505일

표 4. 외곽기둥

층	콘크리트	단면적 (in^2)	철근비 (%)	체적-단면적비 (in)
54층 - 79층	C40	992	4.02	7.9
52층 - 53층	C40	4898	0.89	12.8
41층 - 51층	C40	2790	0.49	13.1
31층 - 40층	C50	3348	0.74	14.2
22층 - 30층	C50	3906	0.70	15.0
1층 - 21층	C50	4464	1.28	15.7
지하1층-지하5층	C50	5022	2.04	16.4

되기 이전 아래층 기둥에서 발생한 축소량의 합으로 철근콘크리트 구조물의 경우 슬래브타설시 레벨을 맞추는 과정에서 자동적으로 보정이 이루어지므로 사용성에 전혀 문제가 없으며 부가응력도 유발되지 않는다. 그러나 슬래브 타설이후의 축소량은 타설후 계속되는 하중의 증가와 크리프, 건조수축의 진행에 따라 발생하는 축소량으로서 이후 슬래브 기울어짐의 원인이 되므로 보정할 필요가 있다. 즉, 수평부재타설시 이 크기를 미리 예측하여 역경사를 줌으로서 목표시점에 슬래브를 수평으로 맞출 수 있다.

5. 해석치와 보정방법

본 연구에서는 복잡한 하중이력에 의한 기둥의 축소량을 정확히 계산하기 위한 해석프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 입력과 출력을 담당하는 스프레드시트(spread sheet)와 실제 계산루틴인 포트란(Fortran) 코드로 이루어져 있다. 스프레드시트에 입력된 데이터를 비주얼 베이직을 사용하여 입력과일로 만든 다음 포트란에 의해 각층의 탄성, 크리프, 건조수축에 의한 축소량을 반복계산하였다.

본 건물의 경우 코어월이 외곽기둥에 비해 9개층정도 먼저 시공되므로, 코어월과 외곽기둥사이의 부등축소량을 계산하기 위해서 코어월의 축소량은 그 층의 슬래브 타설시점(코어타설후 약 45일 후)을 기준시각으로 하여 타설전후 축소량을 계산하였다. 또한 크리프와 건조수축에 의한 총변위는 착공 후 10,000일(약 27년)을 목표시점으로 하여 그때까지의 축소량을 산정하였다.

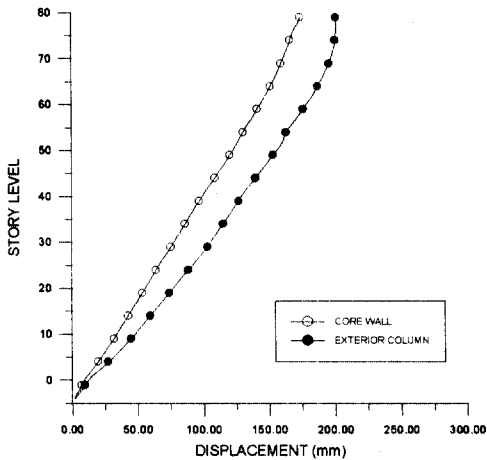


그림 2 코어월과 외곽기둥(평균)의 전체 축소량

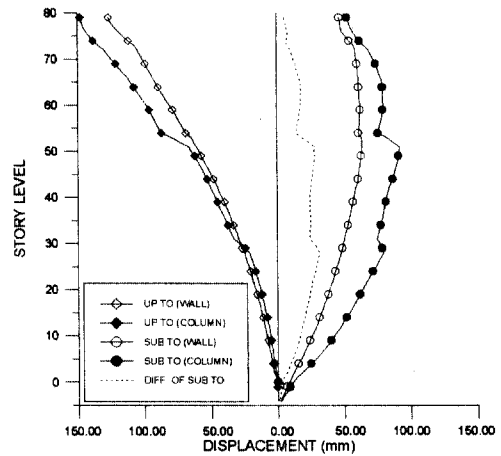


그림 3. 코어월, 외곽기둥(평균)의 슬래브타설전후 축소량

그림 2는 해석에 의한 코어월과 외곽기둥의 총축소량으로 최상층에서 코어월의 총축소량은 174mm, 외곽기둥의 총축소량은 201mm로 외곽기둥의 축소량이 크다. 외곽기둥의 축소량은 그림 1에 표시한 기둥1~기둥5에서 각 기둥축소량을 구한 다음 그 평균값을 사용하였다. 이는 각 기둥의 분담면적이 비슷하며 강성이 큰 벨트월이 외곽기둥을 서로 묶어주는 역할을 하여 기둥의 축소량을 평균화시키는 영향이 있기 때문이다. 그림 3은 각각의 경우 슬래브 타설전 축소량과 타설후 축소량을 나타낸 것이다. 슬래브타설전 축소량은 시공과정중에 자동적으로 보정되므로 외곽기둥과 코어월의 부등축소량을 없애

기 위해 보정이 필요한 부분은 그림 3의 오른쪽 그래프에서 두 축소량의 차이, 즉 기둥과 코어월의 슬래브 타설후 축소량의 차이이다. 부등축소량은 중앙부에서 크고 상부층으로 갈수록 다시 줄어드는데, 최대치는 28층의 32mm이다.

부등축소량의 일반적인 보정방법은 아래층부터 누적된 부등축소량이 일정한 허용치에 달할 경우 외곽기둥쪽 슬래브의 높이를 코어쪽보다 높게 타설하여 건물완공시점에 슬래브의 수평이 맞도록 시공한다.¹⁾ 이때 보정치의 크기는 시공성을 고려해 부등축소량의 크기와 허용치에 따라 전층을 몇 개의 구간으로 나누어 한 구간내에서는 보정치를 같도록 하여, 보정이 이루어지는 구간내에서 외곽기둥쪽 거푸집의 높이는 각층에서 코어월의 높이를 측정하여 보정치만큼 높여 시공하게 된다. 그러나 이 경우 코어월은 보정이 이루어지지 않으므로 완공후 건물의 높이는 코어월의 전체축소량만큼 작아지게 된다.

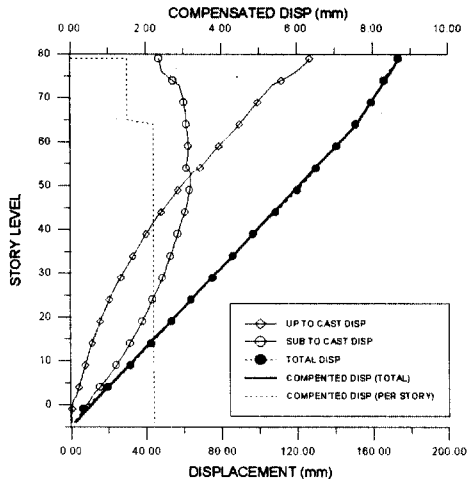


그림 4. 코어월의 축소량과 보정치

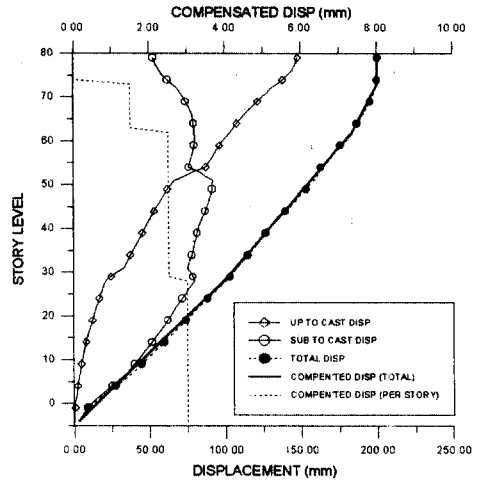


그림 5. 외곽기둥의 축소량(평균)과 보정치

표 5. 코어월과 외곽기둥의 층당보정치

코어월		외곽기둥	
65층~79층	+1.5 mm	75층~79층	+0.0 mm
		63층~74층	+1.5 mm
지하5층~64층	+2.2 mm	29층~62층	+2.5 mm
		지하5층~28층	+3.0 mm

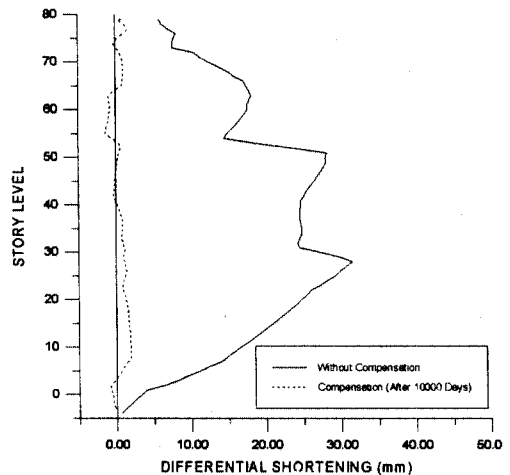


그림 6 보정전과 보정후의 부등축소량

건물의 전체 높이를 설계된 것과 동일하게 하면서 부등축소량을 보정하기 위해서는 코어월과 외곽 기둥의 슬래브타설후 부등축소량 뿐만 아니라 슬래브 타설전 축소량을 포함한 전체축소량을 보정해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 기둥의 층당축소량을 계산하여 이를 근거로 각층의 보정치를 산정하였다. 이 경우 시공시 모든 층에서 코어월과 기둥의 높이를 측정할 필요 없이, 기둥과 코어월 거푸집의 길이를 보정치만큼 길게 하여 타설하면 보정이 이루어진다. Plaza Rakyat 오피스동의 경우 전체축소량보정을 위한 층당보정량은 표 5와 같이 코어월의 경우는 층당 2.2mm 혹은 1.5mm를 길게 하고, 외곽기둥의 경우에는 3.0mm, 2.5mm, 1.5mm를 사용하였다. 그림 4와 그림 5는 이러한 방법으로 코어월과 외곽기둥을 보정할 경우 누적보정치와 전체축소량을 비교한 그래프이다. 또한 그림 6은 보정이 이루어졌을 경우와 그렇지 않을 경우 목표시점(착공후 10,000일)에서의 부등축소량의 크기이다.

6. 결론

본 연구에서는 말레이시아에 건설중인 79층의 순수 철근콘크리트 건물인 Plaza Rakyat 오피스동을 대상으로, 재료시험에 의한 콘크리트 특성치와 계획된 시공공정을 사용하여 크리프와 건조수축을 포함한 기둥축소량을 예측하고 부등축소량의 보정방안과 보정치를 제시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 착공후 10000일까지 코어월의 전체축소량은 174 mm, 외곽기둥의 전체축소량은 201 mm, 코어와 외곽기둥의 슬래브 타설후 축소량의 차이인 부등축소량은 최대 32mm로 나타나 시공시 이에 대한 보정이 필요하다.
- 2) 부등축소량 뿐만 아니라 전체축소량을 보정하면서 시공성을 좋게 하기 위해 본 연구에서는 층당 축소량에 기초한 층당보정치를 제시하였다. 층당 5일 간격으로 코어가 9개층 먼저 시공될 경우, 층당 보정치는 코어월이 2.2mm~1.5mm, 외곽기둥이 3.0mm~1.5mm 이다.
- 3) 콘크리트의 비탄성축소량은 재료의 특성 뿐만 아니라 하중의 가력시점과 크기, 부재의 크기, 철근비에 의해서도 영향을 받으므로 시공시 공정의 변화에 의한 영향을 검토할 필요가 있으며, 더 정확한 보정을 위해서는 축소량의 실제 계측을 통한 피드백과정이 필요하다.

참고문헌

1. Fintel, M., Ghosh, S. K. and Iyengar H., Column Shortening in Tall Structures - Prediction and Compensation, Engineering Bulletin No. EB108D, Portland Cement Association, 1987
2. Ghosh, S. K., Column Length Changes in Ultra-High-Rise Buildings, Proceedings of the First International Symposium for Innovative Concrete Technology, Advanced Structure Research Station, Seoul, p.p. 69~86, June 1995
3. Elimerie, M. M. and Joglekar, M. R., Influence of Column Shortening in Reinforced Concrete and Composite High-Rise Structures, ACI SP-117, p.p. 55~86, 1989
4. Colaco, J. P. and Wahidi, A., Two Prudential Plaza Formula: $AE=LSH+CBM$, Structural Design, Codes and Special Building Projects, Report No. 903.473, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, p.p. 69~80, 1997
5. Fintel, M. and Khan, F. R., Effects of Column Creep and Shrinkage in Tall Structures - Prediction of Inelastic Column Shortening, ACI Journal, Proceedings, Vol. 66, No. 12, American Concrete Institute, Detroit, Mich., p.p. 957~967, December 1969