

초고층건물의 기둥축소량 예측, 계측 및 보정

Prediction, Field Measurement and Compensation of Column Shortening in Tall Building

○ 조 석 희** 김 한 수*** 김 도 군*
 Cho, Suk-Hee Kim, Han-Soo Kim, Do-Kyoon

Abstract

Tall Buildings have been popular in recent years. Tall buildings require special consideration to design and construction due to their structural features. Column shortening is one of the important technologies to be considered in. The long-term deformations of concrete cause vertical shortening on cores and columns, trigger deformations on cladding, partitions and finishes, and damage their serviceability. This also affects structural stability by inducing unexpected stress to the structural members such as outrigger. The main objective of this paper is to re-evaluate column shortening according to revised field information and to compare the analysis results with the actual field measurement. Mok-Dong Hyperion, a 69-story apartment building which is currently under construction, was chosen for the case study.

키워드 : 초고층 건물, 기둥축소, 축소량해석, 현장계측, 현장보정

Keywords : Tall Building, Column Shortening, Shortening Analysis, Field Measurement, Field Compensation

1. 서 론

최근 각 건설회사마다 주상복합의 용도로 40층이 넘는 초고층건물의 건설이 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 초고층건물은 대개 코어는 철근콘크리트조로 기둥과 보는 철골조 혹은 SRC조로 계획되고 있으며, 고강도 콘크리트의 사용이 활발해짐에 따라 철근콘크리트조 건물도 점차 초고층화 되는 추세이다.

초고층건물의 설계 및 시공에서 중요하게 고려되는 것 중의 하나가 기둥축소 문제이다. 콘크리트 재료는 탄성변형뿐 아니라 시간경과에 따라 건조수축(Shrinkage)과 크리프(Creep)의 비탄성 변형이 발생한다. 이러한 콘크리트의 장기 변형으로 초고층건물의 수직부재인 코어나 기둥간에 수직방향의 절대변형 및 상대변형이 발생하고 이로 인하여 사용적인 측면에서나 구조적인 측면에서 다양한 문제가 야기된다.

초고층건물의 기둥축소는 바닥레벨링, 간막이벽, 외부마감재, 설비덕트 등에 변형을 유발하여 하자를 일으킬 수 있다. 이러한 하자가 반드시 구조적인 문제를 동반하는 것은 아니지만 초고층건물의 사용자들에게 시공 및 구조적 안정성에 대한 불안감을 조성할 수 있다. 또한 수직 부재간의 부등축소량은 이들 부재를 연결하는 수평부재에 추가적인 응력을 유발하는데, 특히 초고층건물의 경우에는 횡강성 증대의 목적으로 설치된 아웃리거에 과도한 응력을 부과할 수 있으므로 기둥축소의 영향을 충분히 검토하여야 한다.

초고층건물에서 기둥축소 관련기술의 적용과정은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 계획설계 단계에서 기둥축소량을 합리적으로 예측하고 그 결과를 설계에 반영한다. 시공단계에서는 콘크리트 재료특성, 시공공정, 단면정보 등의 변수들을 실제 상황에 맞추어 재해석한 후 이를 현장에서 계측한 실제 변형량과 비교, 적절한 재보정량을 결정하고 시공에 반영하게 된다.

이 논문에서는 현재 시공중인 초고층 아파트(69층)를 대상으로 한 시공단계에 따른 기둥축소량을 예측하고현장계측을 통하여 얻는 결과와 비교 분석하였다. 또한 예측된 기둥축소량을 시공 중 보정방법에 대해서도 살펴보았다.

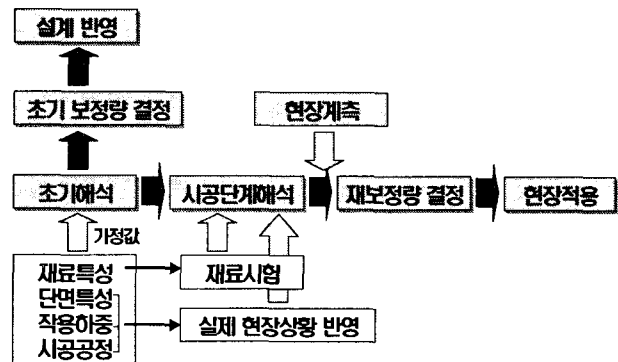


그림 1. 초고층건물에서 기둥축소 관련기술 적용과정

* 정희원, 현대건설 기술연구소 엔지니어

** 정희원, 현대건설 기술연구소 선임엔지니어

*** 정희원, 현대건설 기술연구소 선임엔지니어, 공학박사

2. 기둥축소량 해석

기둥축소량 적용 대상건물은 현재 시공중인 지하 6층, 지상 69층(최고높이 256m) 규모의 목동 하이패리온 아파트로서 주 수직부재는 철근콘크리트 코어와 SRC 기둥으로 이루어지며 9층, 32층, 50층에서 아웃리거/벨트 트러스로 연결된다.

2.1 해석방법

기둥축소량의 해석방법으로는 S. K. Gosh 등에 의해 PCA(Portland Cement Association)에 제안된 약산식이 가장 널리 사용되어지고 있다. 이 해석법은 수평부재의 영향을 무시하고 수직부재를 각각의 독립된 기둥으로 치환하여 탄성변형, 건조수축변형, 크리프변형을 계산하고 이를 누적하여 전체 축소량을 계산한다. PCA방법은 수평부재가 수직부재의 변형발생을 억제하는 골조효과를 반영하지 못하는 단점이 있으나, 비교적 간편하고 효율적으로 해석을 수행할 수 있는 장점이 있다.

이 논문에서는 PCA방법을 기초로 하여 기둥축소량을 해석할 수 있는 프로그램(TDCS, Time Dependent Column Shortening analysis program)을 개발, 사용하였다. 이 프로그램은 철근콘크리트, 철골, SRC부재에 모두 적용할 수 있으며 임의의 시점에 각 층에 발생하는 탄성, 크리프, 건조수축변형 및 총 변형량, 누적 축소량을 계산할 수 있다. 또한 시간에 따른 건조수축변형은 평가방법에 따라 크게 다른 점을 감안하여 ACI1), PCA2), CEB3)에서 제안하는 건조수축의 평가식 중 사용자가 선택하여 계산할 수 있도록 하였다. 이 논문에서는 주로 ACI의 건조수축 평가식을 사용하였다.

2.2 입력자료

기둥축소량의 해석을 위해 필요한 입력자료는 크게 부재단면, 재료특성, 작용하중, 시공공정으로 구분된다. 대상건물의 경우, 축소량 초기해석에 적용한 입력자료 가운데 콘크리트의 재료특성(극한건조수축계수, 특정크리프계수)과 시공공정이 재해석에서 수정, 반영되었다.

1) 콘크리트의 재료특성

사용된 콘크리트는 500, 400, 350kgf/cm²의 세 종류이다. 초기검토단계에서는 사용될 콘크리트의 재료특성을 정확히 파악할 수 없으므로 적절한 가정 값을 적용하게 된다. 극한건조수축계수와 특정크리프계수는 일반적으로 500~800 μ strain, $0.003/f_c' \sim 0.005/f_c'$ 범위 내이므로, 중간 값인 650 μ strain과 $0.004/f_c'$ 을 적용하였다.

시공단계에서 수행한 재료시험은 500, 400 kgf/cm² 두 종류에 대해서 실시하였다. 시험항목은 압축강도, 탄성계수, 건조수축변형, 크리프변형이며 재료시험의 결과로부터 재해석에 반영된 콘크리트의 재료특성은 표 1과 같다.

설계강도 500kgf/cm²의 콘크리트에 대한 시험결과는 비교적 초기 가정과 유사한 결과를 보여준다. 다만 극한건조수축계수는 초기에 가정했던 것보다 약 30% 정도 증가하였다. 그러나

설계강도 400kgf/cm²인 콘크리트의 경우, 재령 28일 강도가 예상보다 훨씬 크고 특정크리프 값은 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 재료시험용 시험공시체의 샘플링 에러로 추정되나, 현장테스트의 결과도 전반적으로 설계강도보다 큰 값을 보여주므로 이 결과를 재해석에 그대로 반영하였다.

표 1. 콘크리트의 재료특성

층	설계강도		극한건조수축		특정크리프	
	초기	재해석	초기	재해석	초기	재해석
53-69	350	350*	650	650*	804	804*
35-52	400	632	650	570	703	366
B6-34	500	545	650	850	562	576

* 초기 값 적용

2) 시공공정

시공공정은 작용하중의 세분화 정도에 따라 구분하였으며 해석에 반영된 시공공정은 다음과 같다.

- 코어벽체의 콘크리트 타설시점
- SRC 기둥의 철골 세움시점
- SRC 기둥과 슬래브 콘크리트 타설시점
- 외벽 마감하중 작용시점
- 슬래브 마감하중 작용시점
- 사용하중의 작용시점

3. 현장계측

변형량 계측을 위해 그림 2와 같이 철근콘크리트 코어 4개 소에는 매립형 스트레인게이지를, SRC 기둥에 6개소에는 부착형 스트레인게이지를 설치하였으며 수직적으로는 시공상황을 고려하여 약 10층 단위로 설치하였다. 사용된 게이지의 특성은 표 2와 같다.

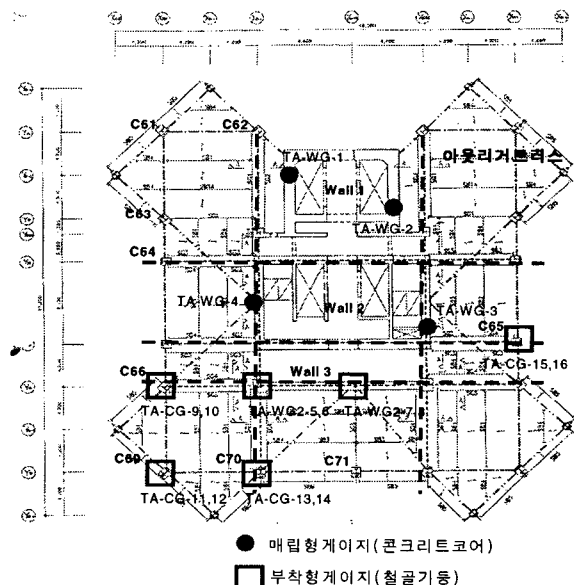


그림 2. 대상건물 평면 및 스트레인게이지 설치위치

표 2. 사용된 스트레인게이지의 특성

	매립형 스트레인게이지	부착형 스트레인게이지
종류	진동현 방식	진동현 방식
측정범위	3,000 μ strain	2,500 μ strain
오차한계	1 μ strain	1 μ strain
설치위치	콘크리트 코어	SRC의 철골기둥
설치방법	벽체 내부 중앙에 매립	철골 양쪽 웨브면에 용접

4. 해석 및 계측결과 분석

현장계측은 2001년 3월부터 4층 레벨에서 설치를 시작하여 2002년 7월까지 최대 500일 정도 진행되었다. 이시점까지 골조 및 마감공사는 계속 진행 중이며, 이미 시공된 부분의 시공공정과 앞으로의 예상 시공공정을 반영하여 시공단계해석을 수행하였다. 이 논문에서는 그 중 철근콘크리트 코어인 Wall2와 SRC 기둥인 C69의 결과를 분석하였다.

4.1 예측 및 계측결과 비교

1) 콘크리트 코어(Wall2)

재해석과 현장 계측한 변형 값을 그림 3에 나타내었다. 재해석은 건조수축의 시간함수모델에 따라 ACI, PCA, CEB의 새 가치를 모두 비교하였다. 계측결과는 전반적으로 ACI와 CEB 사이의 변형 값을 나타낸다. 또한 예측단계에서 건조수축의 시간함수의 선택에 따라 그 결과가 크게 차이 남을 알 수 있다. 그러나 아직 변형이 수렴되는 정도의 단계가 아니므로 좀 더 많은 계측결과가 축적되어야 할 것으로 생각된다.

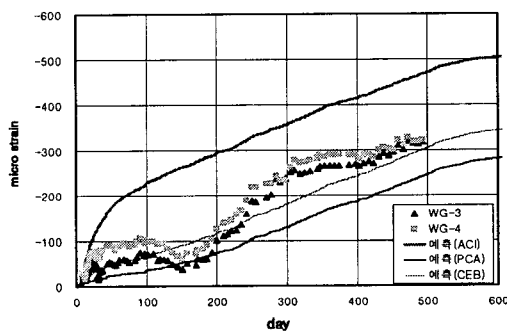


그림 3. Wall2의 기동축소량 비교

2) SRC 기둥(C69)

SRC 기둥에 대한 재해석과 현장계측은 그림 4와 같다. 그림의 범례 중 Com_EI은 SRC 합성기둥의 변형 중에서 탄성변형을 나타낸다.

계측결과, SRC 기둥의 경우에도 전반적으로 실제 변형은 예측보다 적게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 원인은 아직까지 명확히 규명하지 못하였으나, 현재의 해석방법으로는 합성구조의 특성을 정확하게 반영하지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

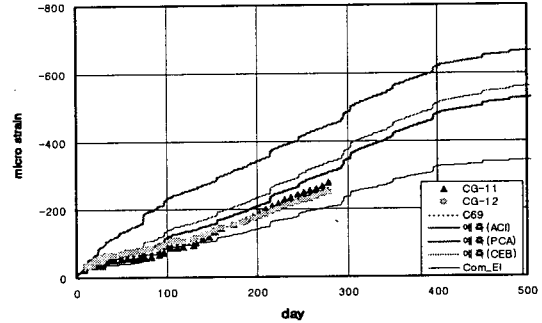


그림 4. C69의 기동축소량 비교

5. 축소량 현장보정

5.1 SRC기둥의 보정량

SRC기둥의 보정량 결정은 철골기둥 제작 시 각 층 기둥의 레벨에 입주시점을 목표시점으로 하는 전체 축소량을 적용하는 것을 원칙으로 하고 있다. 철골보로 연결되는 SRC조 구조물의 경우 설치 공정상 최초 철골기둥을 설치한(Erection) 후 철골기둥에 용접된 브라켓(또는 가셋 플레이트)에 철골 보를 접합한 후 해당 층 슬래브와 기둥에 콘크리트를 동시에 타설하게 되므로 기둥의 층 레벨은 기둥 주위의 슬래브, 슬래브 하부의 철골 보, 궁극적으로는 철골기둥에 접합되어 있는 브라켓의 설치 레벨로 결정된다. 그러므로 기둥의 축소량 보정은 하부 층에서 슬래브 타설이 진행되고 상부에서 철골 설치 및 용접작업이 진행되는 현장작업에서 적용되는 것이 아니라 철골 SHOP에서 철골기둥 제작 및 브라켓 접합공정에서 적용된다. 따라서 기둥축소량 보정시의 보정량은 철골기둥 제작시의 기둥 길이는 슬래브 타설과는 관계가 없으므로 SRC기둥의 슬래브 타설 전 축소량(Up to slab Shortening)과 슬래브 타설 후 축소량(Subsequent Shortening)을 합한 전체 축소량으로 결정된다.

5.2 코어월의 보정량

코어월의 보정량 결정은 코어월 타설시 각 층 월의 레벨에 입주시점을 목표시점으로 하는 슬래브 타설 후 축소량을 적용하는 것을 원칙으로 하고 있다. 통상적으로 초고층 구조물의 코어월 타설은 ACS(Auto Climbing System) Form을 적용하는 경우가 많으며, 따라서 코어월의 층 레벨을 결정하는 요소는 Embed Plate 와 Dowel Box의 설치 위치라고 할 수 있다. 코어월 타설시 적용되는 보정량은 SRC기둥의 보정량 적용조건과는 달리 해당 층 타설 시 이미 해당 층까지 슬래브 타설 및 자중에 의한 축소량이 발생한 상태이므로 슬래브 타설 후 축소량으로 결정된다.

5.3 각 부재별 보정방법

목표시점에서 건물의 수평 레벨을 확보하기 위해서는 예상되는 축소량에 대한 보정량만큼 수직 부재의 설치 레벨을 올

러서 설치해야 하며, 레벨을 보정하는 방법은 콘크리트 부재와 철골 부재(또는 SRC 부재)에 따라 달라진다.

1) 철골기둥의 레벨 보정

철골 기둥은 현장 설치 이전에 공장에서 사전 제작이 이루어지기 때문에 제작 시 전체 축소량을 고려하여 보정량을 반영해야 한다. 즉 슬래브 타설 전에 발생하는 축소량과 슬래브 타설 후에 발생하는 축소량을 합산하여 제작 길이에 반영하도록 한다. 제작 길이 보정과 더불어 현장 레벨 계측을 통해 일정 단위로 시공 오차 및 제작 오차, 기둥 축소 재보정량 등을 보정하는 것이 필요하다.

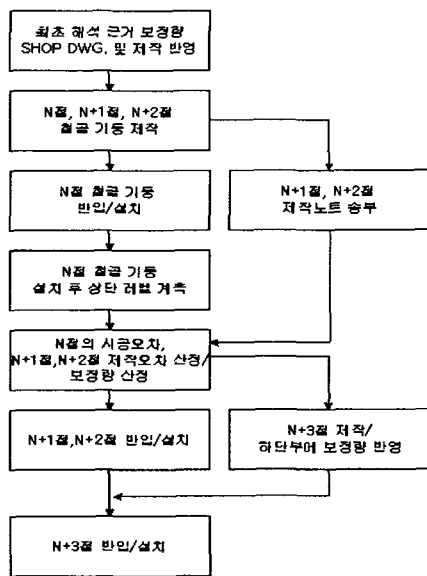


그림 5. 철골 오차 보정 프로세스

대상 현장에서는 기둥의 절대 레벨을 조절하는 방식과 코어월과의 상대 레벨을 조절하는 방식 두 가지를 모두 취하고 있으며, 특히 기둥 Splice 부분에 25% 메탈 터치 및 완전용접을 적용하고 있기 때문에 Shim Plate를 이용한 보정을 할 경우 접합부에서 용접 불량이나 우려되어 공장 제작 시 보정하는 방법을 적용하였다. 또한 기둥의 레벨이 목표하는 레벨이 아닐 경우 그 원인에 따라 구분하여 보정하는데, 즉 제작 및 설치 오차가 원인일 경우에는 철골기둥 쪽에서 보정을 하고 재보정으로 인한 경우에는 코어월 쪽 브라켓 레벨에서 보정을 한다. 철골기둥 쪽의 오차 보정은 그림 3과 같은 절차로 산정된 보정량을 제작 시 철골 기둥의 절주 하단에서 보정하는 것을 원칙으로 하며 시공 여건 및 제작 공정, 설치 공정 관계로 인하여 N절주 계측 값 및 N+1절, N+2절의 제작 노트를 근거로 산정한 보정량을 N+2절 또는 N+3절주 하단에서 보정하였다. 이러한 방식으로 보정할 경우 N+1절, N+2절의 시공오차가 반영되지 않는 문제점이 있으나, 제작 공정과 설치 공정이 보정으로 인해 간섭되는 문제는 없으므로 공정상 유리한 보정 방법이 된다. 그러나 이 보정방법을 시행하기 위해서는 철저한 제작 오차 및 시공 오차 관리가 수반되어야 한다.

2) 철근콘크리트 코어월의 레벨 보정

철근콘크리트 부재의 경우 보정량 산정 시 전체 축소량을 고려하지 않고 슬래브 타설 후 축소량만을 고려한다. 거푸집 설치 시 기준 레벨로써 설계 계획 레벨을 사용하는 것 자체가 슬래브 타설 전 축소량을 보정하는 의미를 갖고 있기 때문이다.

대상 현장의 철근콘크리트 수직 부재는 코어월이며, 이 중 바닥 레벨을 결정하는 요소는 코어월의 철골 보 접합부 브라켓 레벨과 코어 선행 공법으로 인해 사용되는 Halfen Box 레벨이다. 특히 철골 보의 경우 코어 선행 공법으로 인해 브라켓을 코어 타설시 바로 낼 수 없으므로, 코어 타설 시 Embedded Plate를 매입하고, 여기에 철골 보 설치용 앵글을 설치하고 철골 보를 접합한다. 따라서 실제 보정량은 Embedded Plate 설치 레벨 및 설치용 앵글에 적용하게 된다. 초기 이 레벨은 최초 보정량을 근거로 하여 보정하고, 재보정량이 산정될 경우 기둥과의 상대 레벨을 고려하여 추가 보정이 이루어지게 된다.

6. 결 론

- 1) 초고층건물은 설계단계에서 기둥축소의 검토와 시공단계에서 계측 및 보정작업이 요구된다. 특히 아웃리거와 같은 큰 강성의 수평부재가 연결될 경우나 서로 다른 재료의 수직부재가 함께 사용될 경우에는 기둥축소의 영향이 더욱 커지게 된다.
- 2) 대상건물에 대해 축소량의 초기해석과 재해석 결과를 비교하였다. 입력자료 중 재료특성과 시공공정이 일부 변경되었으나 그에 따른 축소량 해석 값에는 큰 차이가 없었다.
- 3) 코어와 SRC 기둥에 대해 해석과 계측결과를 비교하였다. 전반적으로 두 부재 모두 예측보다는 변형이 적게 발생한 것으로 계측되었다. 또한 해석 값의 경우, 평가 식에 따라 그 결과에 상당한 차이가 있음을 알 수 있다.
- 4) 초고층 건물의 코어월과 기둥, 외부마감 패널, 아웃리거에 대한 축소량 보정은 각 부재의 특성과 목적에 부합하는 보정방법을 채택하여야 한다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effect in Concrete Structure", ACI209-R92, American Concrete Institute, 1997.
2. Mark Fintel, S.K. Ghosh, "Column Shortening in Tall Structure-Prediction and Compensation", Engineering Bulletin NO. EB108D, PCA, 1987.
3. Comite Euro-International Du Beton, CEB-FIP Model Code, Thomas Telford Services Ltd., 1993
4. 이정환 외, "SRC 기둥의 축소량 예측에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 학술발표회논문집, 제22권 1호, 2002, pp131~134.
5. 한국콘크리트학회, 건설교통부제정 콘크리트구조설계기준, 기문당, 1999.