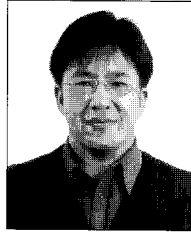


# 축소량의 영향을 고려한 초고층건물의 시공방법

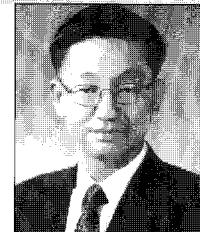
## Construction of High-rise Building Considering Axial Shortening



하 태 훈\*



이 성 호\*\*



오 보 환\*\*\*

\* 대우건설 기술연구원 선임연구원

\*\* 대우건설 기술연구원 선임연구원

\*\*\* 대우건설 기술연구원 연구위원

### 1. 서 론

축소량이란 건물의 축방향으로 발생하는 변형량을 말한다. 이 변형은 주로 중력방향의 하중에 의해 기둥이나 벽과 같은 수직부재에 발생하는 변형과 크리프, 건조수축 등의 시간의존적 변형에 기인한다. 재료성능의 향상에 힘입어 고층건물의 시공에도 강재를 대신하기 시작한 콘크리트는 하중에 의해 발생하는 축소량 못지않게 크리프 및 건조수축 축소량이 크게 발생한다. 건물은 최하층 골조시공이 시작되는 시점부터 입주시점까지 점차적으로 증가하는 연직하중의 영향을 받으며, 이로 인해 발생하는 변형량은 구조설계 단계에서의 해석을 통해 구할 수 있다. 그러나 일정한 하중 하에서 콘크리트 부재의 변형이 증가하는 크리프와 콘크리트의 건조수축에 의해 발생하는 변형량은 별도의 재료 특성 및 공정 데이터를 근거로 한 축소량계산이 병행되어야 한다.

(주)대우건설은 1997년 기술연구원 자체 기술력으로 축소량해석 전용프로그램 C-SAP(Column-Shortening Analysis Program)을 개발하고, 세계적인 초고층 설계회사인 SOM 및 ARUP과의 동시 프로젝트 수행을 통해 그들이 보유하고 있는 in-house 프로그램들과 비교·검증하였다. C-SAP은

그 후 다수의 기존 연구결과에 대한 검증을 완료하였으며, 철근콘크리트 구조(Plaza Rakyat, Trump World I & II 등), SRC 구조(H-PJ, 송도ATT 등), CFT 구조(수영만타워)의 축소량 해석에 실제 적용된 바 있다.

본 글에서는 현재 인천경제자유구역에 대우건설과 포스코건설이 공동으로 시공 중인 송도 동북아무역센터 신축공사 현장을 대상으로 C-SAP을 이용한 축소량 예측 및 보정, 재료시험 결과, 현장계측과 예측의 비교 결과 등을 설명하도록 한다.

### 2. 송도ATT 현장의 개요

- 공 사 명 : 동북아무역센터 신축공사(그림 1 참조)
- 공사기간 : 2006.8.1~2010.2.28(43개월)
- 규 모 : 지하3층, 지상68층(305m)
- 구 조 : RC + SRC + S
- 외부마감 : Al C/W + Metal Panel
- 발 주 자 : 송도신도시개발유한회사(NSIC)
- 설 계 자 : KPE, ARUP, 희림, 범건축
- 시 공 자 : 대우+포스코 JV



그림 1 송도ATT 현장의 시공 전경(2008년 11월)

### 3. 축소량 기본해석 및 보정

축소량 기본해석은 골조 시공 착수 시점에 수행되었으며, 현장 특기시방서에 기술된 대로 건물의 높이와 수평이 준공 시점(최하층 골조 시공 착수 후 959일)을 기준으로 도면 치수가 되도록 수직부재를 보정하는 것을 목표로 하였다.

송도ATT는 평면 형태가 최하층 사다리꼴에서 최상층 삼각형으로 매 층 변하므로 기둥이 30층 이상 연속성을 가지

는 경우에만 해석에 포함하였으며, 세로축을 기준으로 대칭성을 가지므로(그림 7 참조) 기둥 절반에 대해서만 해석을 수행하였다. 시간의존적 재료특성인 특정크리프계수와 극한건조수축계수는 사전에 그 값을 알 수 없으므로 ACI 209에서 제안한 범위의 값을 가정하여 입력하였다. 또한 대상 건물이 SRC 구조에 코어선행 시공방식을 채택하고 있어 자중을 철골 설치, 데크 설치, 기둥 및 슬래브 타설 단계로 나누어 입력하였으며 추가 고정하중 중에서 외곽 기둥의 하중분담률이 높은 커튼월은 별도의 하중으로 입력하였다.

그림 2는 외곽 기둥 가운데 하나인 MC1에 대한 축소량 해석 결과를 그래프로 나타낸 것으로서 층별 축소량 분포를 나타내고 있다. 총 축소량은 매 층 누적되어 최상층에서 최대가 되는데, 이를 해당 층의 슬래브 타설 시점을 기준으로 UPTO와 SUBTO 성분으로 나눈다. 축소량에서 주로 문제가 되는 부등축소량은 해당 층 수직부재가 타설된 이후에 비로소 시작되므로 SUBTO축소량을 기준으로 계산한다.

MC1 총 축소량의 최댓값은 최상층인 68층에서 128mm이지만, SUBTO 축소량은 53층에서 최대 49mm를 가진다. SUBTO축소량을 세분해서 살펴보면 탄성축소량이 가장 큰 부분을 차지하고 크리프, 건조수축 순으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 이는 SRC 구조의 특성 상 크리프와 건조수축에 의해 발생하는 변형이 강재의 구속력으로 제약되기 때문이다. RC로만 구성된 코어에서는 상대적으로 탄성, 크리프, 건조수축이 모두 비슷한 크기의 분포를 가지고 있었다.

건물이 목표 시점에 설계높이를 유지하려면 시공 시 보정

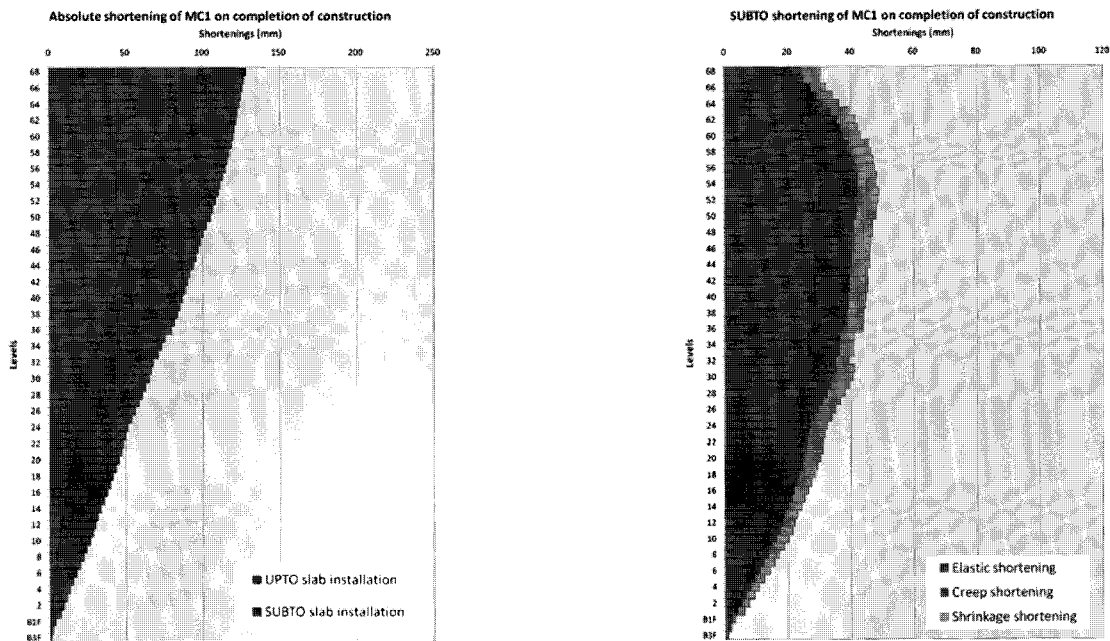


그림 2 MC1의 절대축소량 분포(왼쪽 : 총축소량, 오른쪽 : SUBTO축소량)

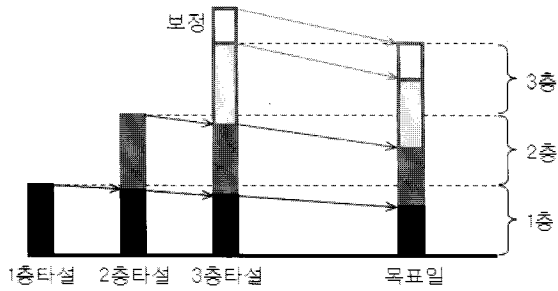


그림 3 공사 진행에 따른 축소량 발생

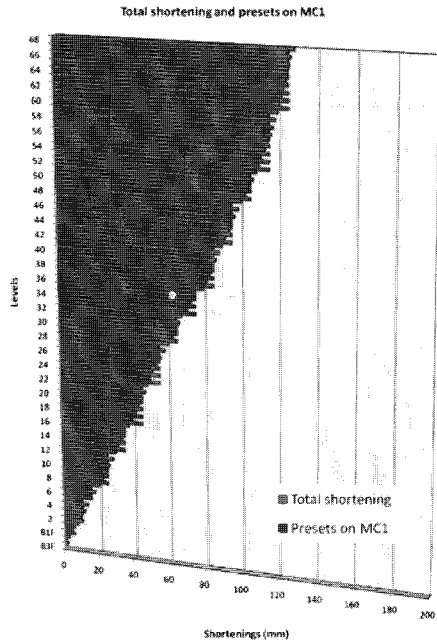


그림 4 MC1의 축소량 및 보정량 분포

이 반드시 필요하다(그림 3). 해당현장은 축소량 기본해석의 결과를 반영하여 코어와 기둥에 별도의 보정방법을 적용하였다. 코어는 매 층 설계높이로 시공되므로 각 층의 SUBTO 축소량만큼 ACS 거푸집을 높여서 타설하였다. 기둥은 총축소량과의 오차가  $\pm 5\text{mm}$ 이내에 들어올 수 있도록 스케줄을 작성하여 철골 공장제작에 반영하였다(그림 4 참조).

#### 4. 시간의존적 재료시험

축소량 계산에 사용되는 콘크리트의 재료특성은 3가지로 탄성계수, 특정크리프계수, 극한건조수축계수 등이다. 시간의존적 재료시험에서는 이중 기본해석 단계에서 가정한 재료특성인 특정크리프계수와 극한건조수축계수에 대해 시험을 통해 보완·검증한다.

송도ATT 현장에서 수직부재에 타설된 콘크리트는 설계 강도를 기준으로 50MPa의 한 종류이다. 현장에 타설된 콘

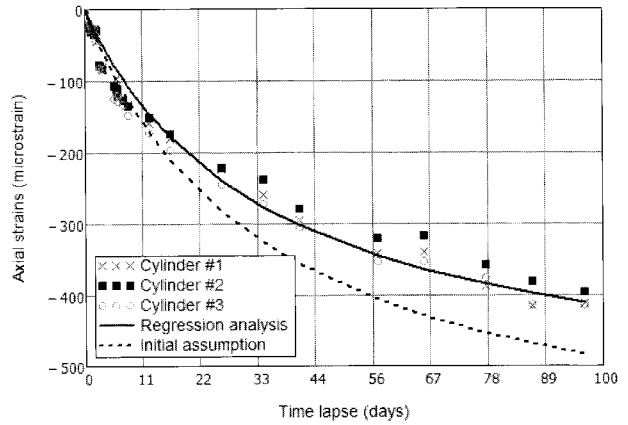


그림 5 현장타설 콘크리트 공시체에 대한 건조수축시험 결과

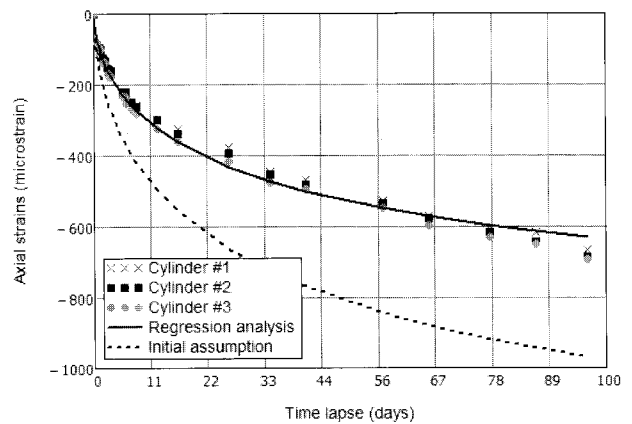


그림 6 현장타설 콘크리트 공시체에 대한 크리프시험 결과

크리트로 제작된 공시체를 대상으로 (주)대우건설 기술연구원 내의 항온항습실과 강도시험시설을 이용한 재료시험이 수행되었다. 크리프 시험 전 수행한 강도시험에서 측정된 재령 28일 강도는 63.4MPa로 설계강도보다 약 25% 이상 높은 값이다. 축소량 발생 관점에서 보면 강도의 증가가 축소량의 감소로 이어져 바람직한 현상이라고 할 수 있다.

약 3개월 동안의 시험 결과를 반영한 재해석값과 현장계측값을 비교해보기 위해 재료시험 결과에 대한 비선형 회귀분석을 수행하였다. 그림 5와 6의 그래프 형태에서 알 수 있듯이 크리프와 건조수축 거동 모두 현재 ACI 209에서 제안하는 시간이력거동에 유사한 분포를 보이며 변화하고 있음을 알 수 있다. 건조수축 시험으로부터 구할 수 있는 극한건조수축계수는 초기 가정치인 750의 85%인 638이었으며(그림 5 참조), 크리프 시험에서 구한 특정크리프계수는 0.36 in./in./psi.로서 초기해석에 사용된 0.55 in./in./psi.의 65%에 해당하였다(그림 6 참조). 결론적으로 현장 콘크리트의 강도 증가 및 시간의존적 재료특성값 감소로 인해 실제 발생하는 축소량은 초기해석 결과보다 다소나마 감소할 것으로 예상할 수 있다.

### 5. 축소량 현장계측

초기해석에 의한 축소량 예측결과를 보완·검증하기 위해 실제 부재에 계측센서를 매립 또는 부착시켜 건물시공에 따른 변화를 계측하는 것이 축소량 현장계측이다. 이때 모든 부재에 대한 현장계측이 불가능하므로 선택된 층에서 과도한 부등축소량이 발생한 코어벽체와 개별 수직부재의 절대축소량을 정밀 계측한다.

송도ATT 현장의 계측은 지상2층, 30층, 34층에 진동현식 변형도 게이지(vibrating wire strain gage, EM-5)를 매립하여 계측을 진행하고 있다. 그림 7은 지상2층 코어와 기둥에 대

한 센서설치 도면이다. 코어는 대칭점과 모서리를 기준으로 5개소, 기둥은 평면 내 절반 개수에 대해 모두 센서를 설치하였다. SRC 기둥에는 강제 부착형 센서와 콘크리트 매립형 센서를 함께 설치하였으며, 이중 강제 부착형 센서는 콘크리트 변형의 영향을 배제하기 위해 보호커버로 주변 콘크리트와 격리시켰다(그림 8 참조). 센서에서 계측된 데이터는 콘크리트 타설 전 골조에 매립된 케이블과 연결된 데이터로거로 보내져 매 시간마다 저장되며, 이는 다시 무선데이터전송시스템을 이용해 주기적으로 계측데이터를 전송받고 있다.

그림 9는 기본해석 설명에서 예로 든 MC1의 2층에서의

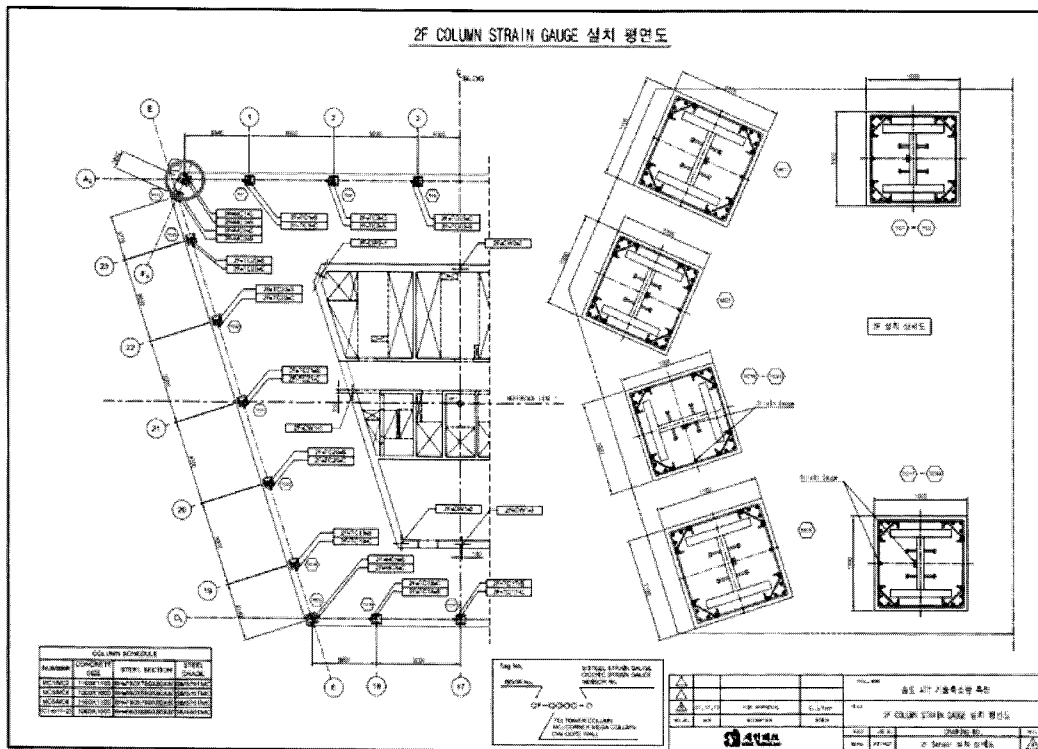


그림 7 축소량 현장계측 도면(왼쪽 도면의 원으로 표시된 부재가 MC1)

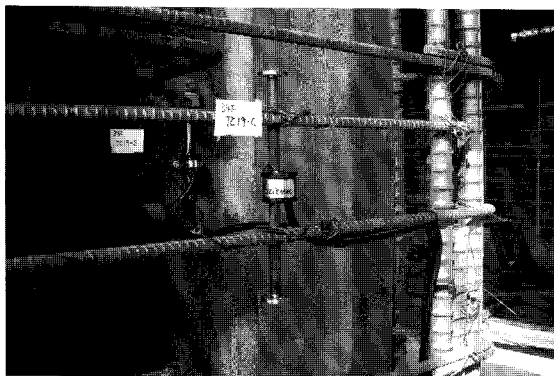


그림 8 축소량 계측 센서(강제 부착형은 타설 전 보호커버 설치 예정)

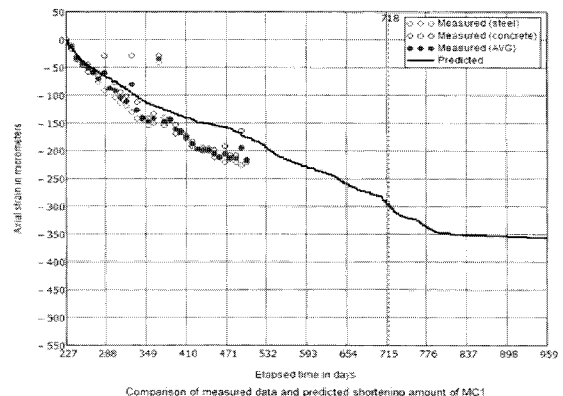



그림 9 MC1의 축소량 예측값과 현장 계측값 비교

현장계측값과 초기해석 결과를 비교한 것이다. C-SAP은 특정한 목표일에 대상 부재의 층별 축소량 분포를 결과물로 보여주므로, 특정 층에 존재하는 대상 부재의 시간 경과에 따른 축소량 변화를 계산하려면 많은 반복 작업이 필요하다. 그림 9의 그래프는 C-SAP의 축소량 계산 알고리즘을 그대로 유지한 채 특정 층의 현장계측 결과와 비교할 수 있도록 프로그래밍 된 Mathcad 워크시트이며, 2006년에 (주)대우건설에서 개발되어 여러 현장의 축소량 프로젝트에 적용되고 있다.

그림 9로부터 강재의 변형량과 콘크리트의 변형량이 거의 동일하며 예측 결과와는  $50\mu\text{e}$  이내의 차이를 가지며 전체적인 경향이 일치함을 알 수 있다. 이를 실제 축소량 크기로 환산해 보면  $50\mu\text{e}$ 은 1m 길이에 대해서 0.05mm이므로 4.3m 높이의 기둥에 대해서 축소량 예측값과 계측값에 0.215mm의 차이가 발생한다고 할 수 있다. 현장계측의 결과로 검증된 축소 경향이 지속된다면 준공 시점에서 2층의 MC1에는 약 1.5mm의 축소량이 발생할 것으로 예상된다.

현장계측을 실시한 모든 부재에 대하여 계측 결과와 예측 결과는 MC1에서처럼 잘 맞는 결과를 얻을 수 있었으며, 코어와 기둥에 대한 초기 보정값은 수정 없이 계속해서 적용되었다.

#### 4. 맺음말

송도ATT는 준공 시점부터 일정 기간 동안 국내 최고층 건물이 될 것이다. 축소량을 예측하고 이를 시공에 반영하는 것은 초고층 건물의 정밀한 시공을 위해서 반드시 고려되어야 한다. 다만 개별 현장의 시공 여건을 최대한 반영하여 무조건적인 보정이 아닌 축소량에 기인하는 문제점에 대한 근본적인 해결책을 제시할 수 있도록 고민해야 할 것이다. 

[담당 : 이재철, 편집위원]