



# RC초고층건물의 정밀시공을 위한 시공단계해석 프로그램

## Advanced Staged Analysis Program for Precise Construction of RC Tall Buildings

**하태훈**  
Taehun Ha  
(주)대우건설 기술연구원 책임연구원

**이성호**  
Sungho Lee  
(주)대우건설 기술연구원 선임연구원

### 1. 머리말

건물의 구조해석 과정을 순수하게 절차적인 관점에서만 보았을 때, 먼저 건물을 3차원으로 모델링하고 해석에 필요한 각종 정보들(재료, 단면특성, 하중, 지점조건 등)을 입력한 후 컴퓨터 프로그램의 ‘실행’ 또는 ‘시작’ 버튼을 누르면 된다. 당연한 소리라 들리겠지만 이 절차는 일반적으로 완성된 건물의 구조 형태에 대해 수행된다. 건물이 지어지는 과정 동안의 구조물은 완성된 건물에 비해 부재력이 작을 거라는 가정 하에 해석의 대상에서 제외된다. 하지만 최근 건축의 경향 중 하나인 초고층이나 비정형 건물의 시공 중에는 완성된 건물과는 다른 구조시스템이 존재할 수 있으며(사진 1), 시공순서 및 콘크리트 장기거동에 의해 발생하는 부등변위에 의해 구조, 시공, 사용성 측면에서 부가적인 문제들이 발생할 수 있으므로<sup>1)</sup> 완성된 건물뿐만 아니라 시공 중 구조물에 대한 해석이 중요하다.

### 2. 시공단계해석

건물 시공 중 구조물 해석은 일반 구조해석에 시간이라는 차원이 더해진 것이라 할 수 있다. 주어진 시간에 따라 다른 형태의 구조물이 존재할 수 있고, 같은 형태의 구조물이라 하더라도 콘크리트의 재령 경과에 따른 크리프와 건조수축 때문에 변형이 증가할 수도 있다. 시공단계해석은 결국 시공순서와 콘크리트의 장기거동을 고려한 일련의 반복적 구조해석이라 할 수 있다.

〈그림 1〉은 시공순서가 구조해석에 미치는 영향을 보여주고 있다. 일반구조해석에서는 2층 바닥의 하중에 의해 1층 골조는 물론 실제로는 아직 시공되지도 않은 2층 골조에까지 모멘트가 발생한다. 시공단계해석과 일반구조해석의 최종 해석결과를 비교해 보면 일반구조해석을 수행한 경우 1층에 실제보다 더 작은 모멘트가 발생하고, 반대로 2층에 더



사진 1. 베이징 CCTV타워의 캔틸레버 층 시공 중 모습<sup>2)</sup>

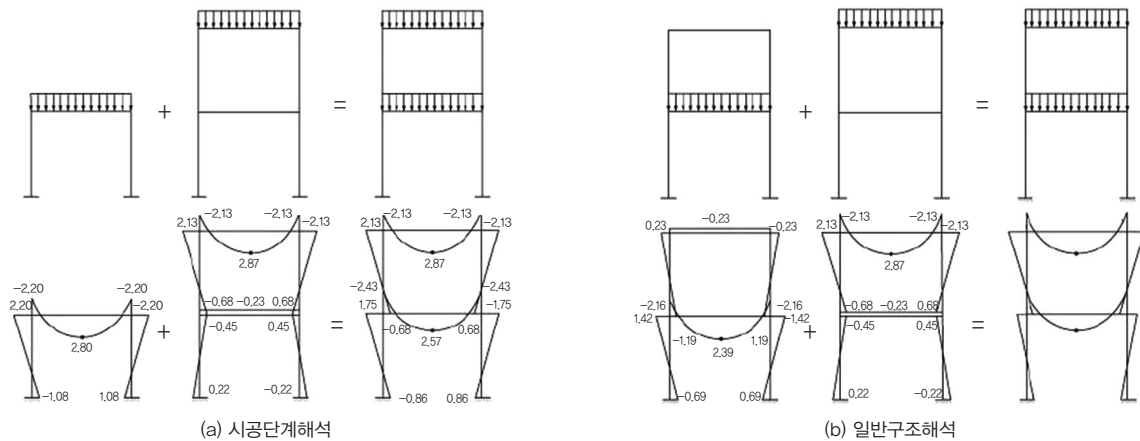


그림 1. 2층 골조의 해석방법에 따른 모멘트 분포의 차이<sup>8)</sup>

큰 모멘트가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 건물이 고층화될수록 더 크게 발생할 수 있다<sup>3)</sup>.

초고층건물의 시공재료로서 강재보다 철근콘크리트가 선호되면서 최근 RC초고층건물이 많이 시공되고 있다. 그러나 콘크리트는 강재와는 달리 지속하중 하에서 변형이 증가하는 크리프와 수분증발로 체적이 감소하는 건조수축이 크게 발생하며, RC초고층건물의 축소량 중 크리프와 건조수축에 의한 축소량의 합이 하중에 의한 탄성 축소량보다 더 큰 경우가 빈번히 발생한다. 크리프와 건조수축은 콘크리트의 배합 특성 외에도 부재의 단면 크기 및 형상, 철근비, 재하 시 콘크리트 재령, 재하 기간, 상대습도, 탄성계수 등에 영향을 받으므로<sup>4)</sup> 이를 반영하여 콘크리트 부재의 장기변형을 계산할 수 있도록 미국과 유럽의 설계기준<sup>5)</sup> 및 Bazant와 Gardner에 의한 모델식<sup>6,7)</sup>이 존재한다.

### 3. RC초고층건물의 시공단계해석 프로그램

국토해양부 주관으로 초고층 시공연구단에서 개발되고 있는 ASAP(가칭, Advanced Staged Analysis Program)는 초고층건물 전용 시공단계해석 프로그램이다. 상용 소프트웨어인 마이더스, SAP 2000, ETABS, LUSAS, Scia Engineer, SOFISTI-K, GSA Building 등도 시공단계해석이 가능하지만 이들 대부분이 당초 개발의 초점을 교량의 시공단계해석에 맞춰 기능을 추가하였기 때문에 초고층 건물의 축소량 및 수축도 이탈 등의 변위 문제를 실무적으로 해결하기에 기능적으로 다소 부족하거나 적합하지 않은 부분들이 존재한다.

ASAP는 이를 보완하기 위해 구조·시공 분야 프로그래머와 엔지니어들이 함께 참여하여 2007년에 최초로 개발되었다. 프로그램의 첫 번째 버전은 1997년도에 개발되었던 포트란 언어와 엑셀 기반의 축소량 해석 프로그램을 C++ 언어의 프로그램으로 변환시키고, 사용자 친화적인 그래픽 인터페이스를 추가하였다. 2008년도에 개발된 두 번째 버전의 ASAP는 단순한 축소량 해석보다는 구조물의 3차원 변위와 내력을 시공단계 별로 계산할 수 있도록 기존의 상용 구조해석 프로그램에 시공단계 및 콘크리트의 장기거동의 영향을 반영하는 알고리즘을 추가하여 새롭게 개발되었다. 이 프로그램은 2012년 현재까지 다수의 현장적용을 통해 그 적합성을 검증받았으며, 실무적인 문제들을 해결할 수 있는 기능들이 지속적으로 추가되고 있다.

ASAP의 주된 기능인 시공단계를 고려한 구조해석 알고리즘은 <그림 2>에서와 같이 먼저 해석이 수행될 시공단계를 정의한 후 각각의 시공단계 사이에 발생하는 콘크리트의 장기변형을 고려하여 사전에 정해진 '목표일'에 이를 때까지 반복적으로 구조해석을 수행한다. 목표일은 콘크리트의 장기변형 효과를 반영하기 위해 일반적으로 준공 후 수년이 경과한 시점으로 설정하나 시공 중 변위를 확인하기 위한 별도의 목표일을 설정할 수도 있다. ASAP 내부적으로는 해석이 매번 수행될 때마다 구조부재의 변형이 반영된 절점의 위치가 새롭게 정의되고, 다음 해석을 위한 구조부재는 새로운 절점 위치에 생성된다. 이때 각 시공단계별로 누적된 변위를 '시공 전(UPTO) 변위'와 '시공 후(SUBTO) 변위'로 구분하는데, 시공 전 변위란 해당 시공단계 전

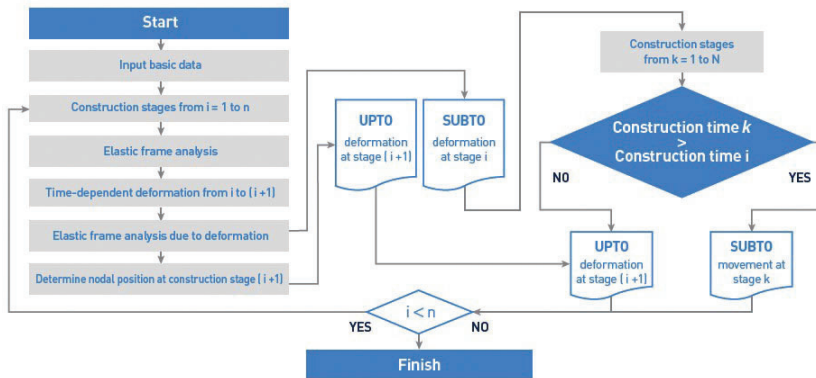


그림 2. ASAP의 해석 알고리즘

까지 누적되어 발생한 변위이며, 시공 후 변위는 해당 시공단계 이후부터 목표일까지 누적되어 발생한 변위이다. 그러므로 특정 단계에서 생성되는 건물요소의 시공은 건물의 시공 전 변위에 의해 영향을 받고, 해당 건물요소의 변형은 시공 후 변위에 의해서만 결정된다고 할 수 있다.

ASAP는 콘크리트의 장기변형 효과를 고려하기 위해 널리 참조되고 있는 기준과 저명한 연구자들이 제안한 모델들을 해석에 반영할 수 있으며(그림 3), 추후 콘크리트 배합설계가 완료된 시점에 재료시험을 수행하여 얻어진 특성값을 직접 입력하여 해석의 정확도를 향상시킬 수도 있다.

(그림 4)는 ASAP의 구동화면으로, 해석이 종료된 후 그래픽 사용자 인터페이스를 통해 특정 시공단계에서 발생한 변위를 손쉽게 확인 가능하다. 3차원 좌표 상에서 전체 변위뿐 아니라 시공 전/후의 변위를 구분할 수 있으며, 모든 구조부재의 목표일까지의 변형이력을 저장할 수 있다. 사전에 선택된 특정 구조부재에 대해서는 목표일까지의 내력변화를 별도로 확인할 수 있다.

#### 4. 적용사례

ASAP는 10여개 국내의 초고층건물의 시공단계해석에 사용되었다. 대부분 실시설계가 완료된 후 시공 전에 해석결과를 확인하고 시공 중 보정 등의 조치를 취해 성공적인 시공에 일조하였으며, 일부 프로젝트는 실시설계 단계에서 시공단계해석을 수행하고 그 결과를 설계에 반영한 사례도 있다.

KLCC 타워는 2009년 초에 착공된 58층 초고층 건

물로 30층에서 건물 평면 형태가 바뀌고 입면이 후퇴하여 연직하중의 차이에 의한 편심이 유발되었다(그림 5, 6). 시공단계 해석을 수행한 결과, 수직부재에 발생한 부등축소량이 건물의 남-북 방향에서 점진적으로 증가하여 준공 후 7년이 경과한 시점에 일종의 바이메탈 효과로 인해 건물 전체가 남쪽 방향으로 120 mm 이상 기울어질 것으로 예상되었다(그림 6-(a)). 건물의 기울어짐은 엘리베이터의 시공과 운영에 가장 큰 영향을 미친다. 엘리베이터 시공 시점까지 발생한 건물의 기울어짐은 엘리베이터의 시공성을 저해하며, 엘리베이터 시공 후에 발생한 건물의 기울어짐은 엘리베이터의 성능 저하를 가져오고 부속 기계장치의 내구성을 단축시킬 수 있다.

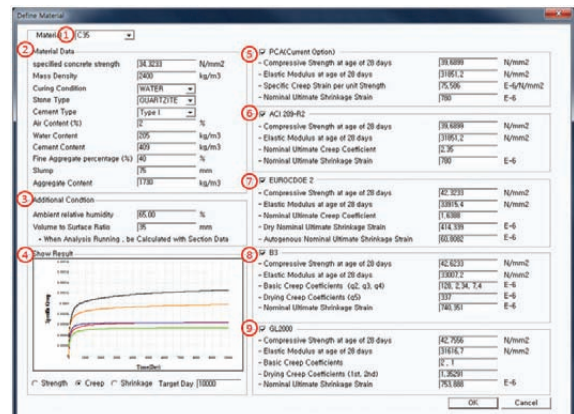


그림 3. ASAP의 콘크리트 장기거동 특성 입력 창<sup>19)</sup>

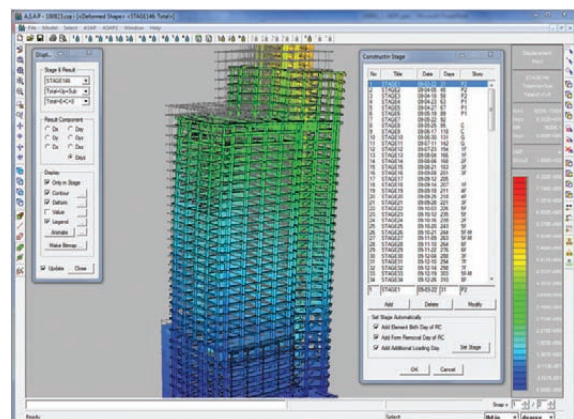


그림 4. ASAP의 그래픽 사용자 인터페이스 및 해석결과

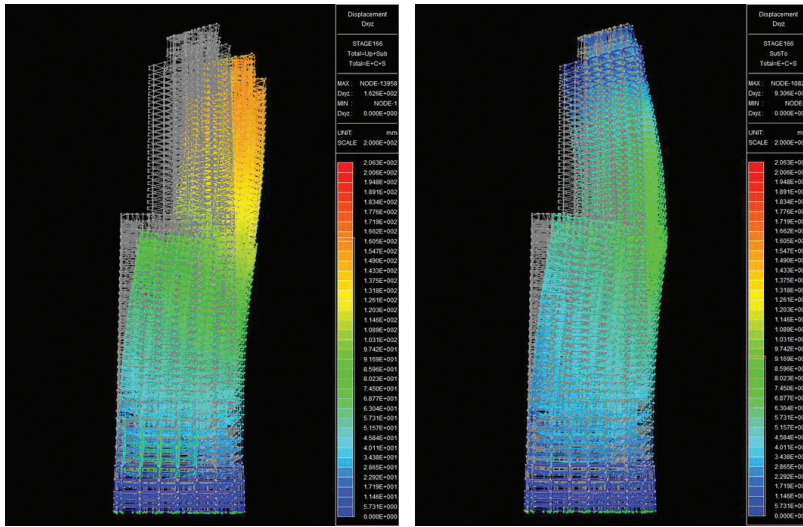


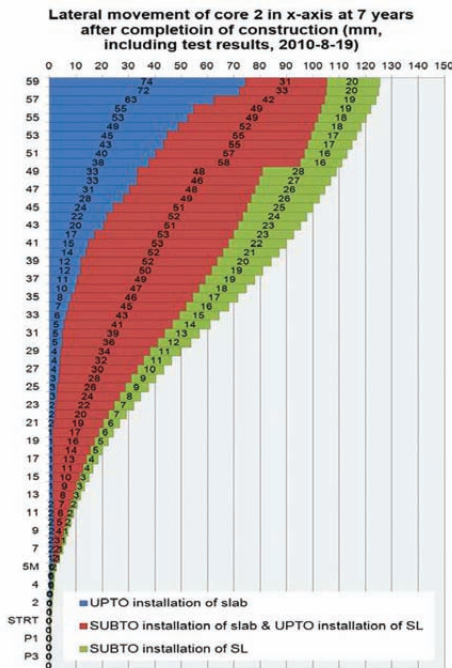
그림 5. KLCC타워의 시공단계해석 결과 - 보정 전(좌)과 보정 후(우)

이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 수직부재의 부등축소량을 최소화할 수 있도록 설계를 변경하는 것이 바람직하다. 그러나 시공이 임박한 시기적 상황 때문에 시공 중 보정을 통해 문제를 해결할 수밖에 없었다.

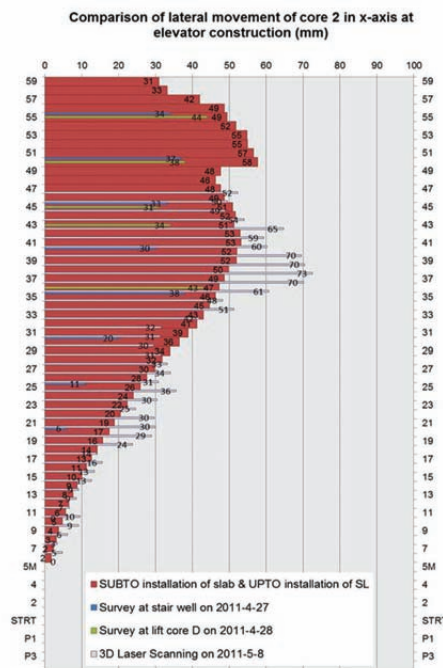
보정을 하지 않은 건물의 전체 기울어짐은 <그림 6-(a)>의 그래프와 같은 분포를 가지게 되는데 파란색

가능할 정도인 것으로 확인되었다<그림 6-(b)>. 결국 골조 시공 전 축소량만을 보정하여 보정량을 최소화하였다. 실제 시공 중에는 전문 측량업체의 육안측량과 3차원 레이저스캔을 활용한 보조측량을 동원하여 엘리베이터의 정밀시공을 도왔으며, 2011년 말 건물은 성공적으로 완공되었다.

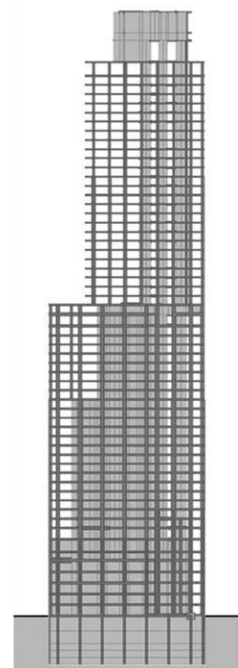
으로 표현된 골조 시공 전 축소량만 보정하더라도 건물의 기울어짐을 절반 이하로 줄일 수 있다. 여기에 ASAP에 새롭게 추가된 기능을 활용하여 골조 시공 후 변위를 엘리베이터 시공 시점 전과 후로 구분한 후 각각의 변위가 엘리베이터의 시공과 운영에 미치는 영향을 엘리베이터 전문업체와 논의하였다. 그 결과 초록색으로 표현된 엘리베이터 시공 후 변위는 엘리베이터의 운영에 문제가 없었으며, 붉은색으로 표현된 엘리베이터 시공 전 변위는 시공오차를 감안했을 때 겨우 시공이



(a) 엘리베이터 코어의 수직도이탈 예측값



(b) 수직도이탈 예측값과 측량값 비교




(c) KLCC타워 단면도

그림 6. KLCC타워 엘리베이터 코어의 수직도이탈 예측값과 측량값 비교

## 5. 맺음말

최근의 초고층건물은 단순한 높이 경쟁 외에도 시공 중 건물의 수직도 이탈을 유발하는 비정형 구조가 주류로 등장하였다. 이러한 환경 하에서 ASAP를 비롯한 시공단계해석 프로그램은 완성된 구조물의 안전성뿐 아니라 시공 중 구조안정성 및 시공성, 사용성 등을 개선할 수 있는 도구로 자리잡아가고 있다. ASAP의 개

발이 최종적으로 완료되는 2015년에는 시공단계해석 프로그램을 넘어 재료시험, 모니터링 및 현장보정 결과와 자동 데이터호환이 가능한 3차원 시공 중 변위관리 시스템으로 발전될 수 있도록 저자 일동은 최선의 노력을 다할 계획이다. 

담당 편집위원 : 김재요(광운대학교) kimjyo@kw.ac.kr

### 참고문헌

1. Taehun Ha, Sungho Lee and Bohwan Oh, Prediction and Control of Movement of High-rise Buildings during Construction, *fib Symposium PRAGUE*, 2011.
2. C. Carroll et al., CCTV Headquarters, Beijing, China: Building the Structure, *ARUP Journal*, 2008.
3. Li, T., Ward, T. and Kaethner, C., Analysis Stages in GSA and Construction Stage Analysis Using GSA, 3, [www.oasys-software.com](http://www.oasys-software.com), 2010.
4. Fintel, M., Ghosh, S. K., and Iyengar, H., "Column Shortening in Tall Structures—Prediction and Compensation(EB108.01D)", Portland Cement Association, 1986.
5. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures(ACI 209R-92, Reapproved 2008)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 47 pp.
6. Bazant, Z. P. and Murphy, W. P., "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures—model B3", *Materials and Structures*, Vol. 28, 1995, pp. 357 ~ 365.
7. Gardner, N. J., "Comparison of Prediction Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concretes", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, 2004, pp. 767 ~ 775.
8. Construction Stage Analysis, Analysis Reference-15, Midas IT, 2009.
9. ASAP(Advanced Staged Analysis Program) 사용자 매뉴얼, 대우건설, Vol. 1, 2011.



**하태훈 책임연구원**은 서울대학교 건축학과에서 스트럿-타이 모델을 이용한 RC보의 전단강도에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후, 2004년 대우건설 기술연구원에 입사한 이래 지금까지 축소량을 비롯한 초고층건물의 변위 관련 연구와 실무를 전담해 왔다. 우리 학회 전단-비틀림위원회와 장기거동위원회에서 활동 중이다.

taehun.ha@gmail.com



**이성호 선임연구원**은 고려대학교 건축공학과에서 석사학위 취득 후 대우건설 기술연구원에 입사하여 10년간 건축구조 분야 연구에 전념하였고, 철근 정착 공법 및 철선트러스데크 공법 개발하여 실용화하였다. 현재는 초고층 건축물의 시공 중 변위 예측 및 제어에 관한 연구를 진행 중에 있다.

sungho.lee@daewooenc.com