

초고층 건물의 시공 중 구조적 안정성 검토를 위한 시공단계해석의 적용

An Application of Construction Sequence Analysis for Checking Structural Stability of High-Rise Building under Construction

엄 태 성* 김 재 요†

Eom, Tae-Sung Kim, Jae-Yo

(논문접수일 : 2009년 1월 30일 ; 심사종료일 : 2009년 6월 16일)

요 지

극초고층성, 비정형 형상, 공기단축을 위한 구획 시공 등 최근 초고층 건물의 경향을 고려할 때, 설계 및 시공 계획의 단계에서 시공 중 건물의 구조적 안정성 문제가 핵심 사항으로 부각되고 있다. 시공 중 초고층 건물의 안정성을 확보하기 위해서는 횡력저항시스템이 완전히 형성되기 전 구조체 자중의 불균형 분포에 의해 발생하는 수직부재의 불균등 축소, 골조의 기울어짐 혹은 횡변위, 기초의 부등 침하 등이 시공단계해석에 의하여 검토되어야 하며, 시공단계해석은 구조건전성모니터링, 시공 보정 프로그램, 시공계획 수립 등과 체계적으로 결합되어 진행되어야 한다. 이 논문은 시공 중 초고층 건물의 구조 안정성 검토를 위하여 기존의 범용구조해석프로그램을 활용한 구역 기반 시공단계해석 기법을 제시하고 있으며, 이를 실제 초고층 프로젝트의 3차원 구조해석에 적용하였다. 정밀한 해석을 위하여 시간 의존적 재료 성질 및 실제 시공 일정이 적용되었으며, 시공 일정 변화나 계층 결과와의 비교에 따른 재료 물성 변화 등을 지속적으로 변경하며 해석이 진행되었다. 이러한 실제 프로젝트에 대한 시공단계해석 적용을 통하여, 시공 중 초고층 건물의 안정성 확보를 위한 주요 검토 항목 및 방법을 제시하였다.

핵심용어 : 초고층, 시공단계해석, 시공 중 안정성

Abstract

With recent trends of super-tallness, atypical plan shapes and zoning constructions in high-rise buildings, a structural stability of the building under construction is arising as a key issue for design and construction plan. To ensure the structural stability under construction, the differential column shortening of vertical members, the lateral displacement of tower frames, and differential settlement of raft foundation by unbalanced distributions of a tower self-weight before the completion of a lateral load resisting system should be checked by construction sequence analysis, which should be performed by systematic combinations with structural health monitoring, construction compensation program, and construction panning. This paper presents the scheme of zone-based construction sequence analysis by using the existing commercial analysis program, to check the stability of high-rise building under construction. This scheme is applied to 3-dimensional structural analysis for a real high-rise building under construction. The analysis includes real construction zoning plans and schedules as well as creep and shrinkage effects and time-dependent properties of concrete. The simplified construction sequence and assumed material properties were continuously updated with the change on construction schedule and correlations with in-situ measurement data.

Keywords : high-rise, construction sequence analysis, stability under construction

1. 서 론

미국의 뉴욕과 시카고 지역을 중심으로 활발하게 건설되던

초고층 건물은 국가 경제력 및 기술력 과시의 수단으로 인식되면서, 1990년대 이후 동아시아 지역을 중심으로 치열한 높이 경쟁이 진행되어 왔다. 2000년대 들어서는 오일달러를

† 책임저자, 정회원 · 광운대학교 건축공학과 조교수

Tel: 02-940-5637 ; Fax: 02-940-5190

E-mail: kimjyo@kw.ac.kr

* 대구가톨릭대학교 건축학과 전임강사

• 이 논문에 대한 토론을 2009년 8월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 10월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

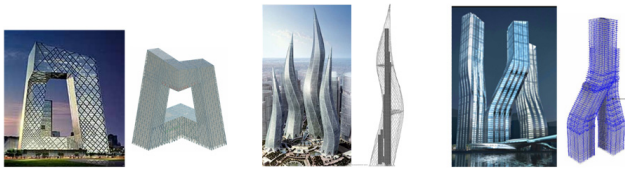


그림 1 시공 혹은 계획 중인 비정형 초고층 건물

앞세운 중동 지역의 약진과 자존심 회복을 위한 미국의 가세로 높이 경쟁은 더욱 가열되고 있다. 기존의 최고층 건물인 TAIPEI 101(높이 508m)보다 높은 여러 건물들이 시공 중에 있으며, 높이 1~2km 규모의 극초고층 건물들이 계획 중에 있다(임보람 등, 2008). 이러한 극초고층 건물들에서는 계획, 설계 엔지니어링, 시공 등의 측면에서 기존의 초고층 건물들에 사용된 기술들을 뛰어 넘는 새로운 기술들이 요구된다(신성우, 2007). 초고층 높이 경쟁에 대하여 국내 초고층 시장도 예외가 아니며, 100층 이상의 여러 초고층 건물들이 기획 또는 설계단계에 있는 상황이다.

그러나 높이만으로는 다른 건물들과의 차별성이 부족하고 랜드마크적인 역할을 할 수 없다는 인식이 자리 잡으면서, 높이가 아닌 형태적인 면에서의 경쟁력이 새롭게 부각되고 있으며, 기울어지거나 휘어진 혹은 비틀어진 형상의 많은 초고층 건물들이 시공되거나 계획되고 있다(Vollers, 2006)(그림 1). 이러한 건물들은 비정형적인 입면 형상으로 인하여, 건물의 평면 형상과 중심 위치는 높이에 따라 변화가 심하여 큰 편심이 작용한다. 따라서, 중력하중만으로도 골조에 큰 횡변위 및 전도모멘트가 작용할 수 있으며, 심화될 경우 기초에 인발이 작용함으로써 구조시스템의 안정성에 큰 손상을 줄 염려가 있다. 특히, 이러한 편심의 작용은 건물의 전체 구조시스템이 완전히 형성되지 않은 시공 중 골조 및 기초의 안정성에 더욱 큰 영향을 줄 수 있으며, 더 나아가서는 시공성 및 사용성, 내구성 등을 크게 저하시킬 수 있다.

또한, 최근 국내·외적으로 초고층 프로젝트 수주 및 성공적인 수행을 위한 치열한 경쟁에서 골조공기 단축이 중요한 요소로 자리잡고 있다. 초고층 프로젝트는 일반 프로젝트에 비하여, 초고층화에 따른 공기 및 공사금액 증가와 작업효율성 저하가 발생한다. 이러한 공기 증가라는 단점을 극복하기 위하여 절대 공기가 가장 길고 모든 공사의 선행공사인 골조공기의 단축이 절실하게 요구된다(손상현 등, 2007). 이를 위하여, 평면상 시공 구역(zone) 구획 및 순차적인 시공계획, 작업 사이클의 중첩 등을 통한 공기단축이 널리 이용되고 있다(백인희, 2007). 코어선행공법, 기둥선행공법, up-up 공법 등은 시공 구역 구획을 통한 골조공기 단축의 대표적인 공법들이며, 각 구역별 시공 순서 및 시간차에 따라 수직부재의 부등축소에 따른 골조 횡변위 및 기초의 부등침하를 증

가시켜 구조시스템의 안정성을 저하할 가능성이 있다.

이러한 최근 초고층 설계 및 시공 경향을 고려할 때, 완공 후 뿐만 아니라 시공 중의 안정성을 확보하는 것이 핵심사항으로 부각되고 있다. 특히, 구조시스템이 완전히 형성되지 않은 시공 중의 구조적 안정성이 보다 취약할 수 있으며, 시공 중 발생하는 구조적인 문제들은 구조시스템의 치명적 손상을 발생시키고 시공성 저하에 의한 시공품질 저하, 공사비 및 공기 증가 등의 문제들을 유발할 수 있다. 시공 중 안정성을 평가/분석하기 위해서는 시공 단계별 구조체의 거동을 정확히 예측할 수 있어야 하므로, 실제 시공을 정밀하게 반영하고 예측할 수 있는 시공단계해석 기법이 요구된다. 초고층 시공단계해석 기법의 개발을 위하여 다양한 연구들이 진행되어 왔으나(김한수, 2008; 양주경 등, 2008; 오향욱 등, 2008), 주로 시공단계해석 알고리즘의 개발 위주로 진행되었으며, 시공단계 및 순서를 단순화하여 기둥의 축력이나 축소량 검토에 한정적으로 적용되었다. 특히, 극초고층 건물이나 비정형 초고층 건물 및 최근의 시공 경향 등에 대한 적용성이 확인되지 않았으며, 시공 중 안정성 검토를 위하여 적용된 사례가 보고되지 않았다.

이 연구에서는 초고층 건물의 시공 중 안정성 확보를 위한 구조적인 고려사항들을 분석하고, 시공단계해석과 이를 이용한 초고층 골조 거동 확인을 위한 합리적인 기법을 모색하고자 한다. 이를 위하여, 실제 초고층 사례에 범용구조해석프로그램에 의한 시공단계해석을 적용하고, 시공 중 안정성 검토를 위한 주요 항목 및 방법들을 제시한다. 100층 이상의 초고층 프로젝트에 대하여 기개발된 시공단계해석 기법을 적용하는 사례연구의 측면에서, 실제 시공 과정을 상세하게 반영하여 얻어진 다양한 해석결과들을 이용해 시공 중 안정성 검토를 수행하는 과정을 제시함으로써, 초고층 구조 엔지니어링 및 시공 실무를 위한 시공단계해석의 적용 방향과 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 시공 중 안정성 평가

2.1 시공 중 안정성

비정형 초고층 건물의 경우, 완공된 상태에서는 안정적이라 하더라도 완공 이전 상태에서는 각 시공단계별로 불안정한 경우가 발생할 가능성이 크다. 특히, 건물의 안정성 향상을 위하여 근래 빈번히 사용되는 아웃리거(벨트) 요소나 메가 부재(기둥 혹은 브레이스)의 경우, 큰 하중을 부담하게 되고 하중 흐름의 전이에 의하여 전체 골조의 안정성에 기여하는 바가 크며, 골조 전체에서 사용되는 개소가 적기 때문

표 1 시공 중 안정성에 대한 주요 영향 요소

주요 영향 요소	시공 중 골조에 대한 구조적 영향
비정형 형상에 따른 중력하중의 편심	<ul style="list-style-type: none"> 골조 횡변위 및 전도모멘트 발생 시공 중 골조 및 기초 안정성 저하
구획(zoning) 시공 계획	<ul style="list-style-type: none"> 구역별 독립적인 시공에 따른 편심 증가 시공 중 골조 및 기초 안정성 저하 발생 가능
시공 스케줄 혹은 공법 변경	<ul style="list-style-type: none"> 구조설계 미반영 요소 발생 시공 중 골조 안정성 저하 발생 가능
아웃리저 혹은 메가 부재	<ul style="list-style-type: none"> 대규모 하중 부담 및 하중흐름 전이 역할 사용 개소가 적으며 골조 안정성 기여도가 큼 시공 시점에 따른 시공 중 구조 거동 영향이 큼

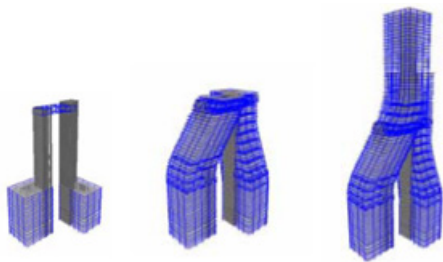


그림 2 시공 중 안정성 확보를 위한 시공 계획

에 해당 부재나 모듈의 시공 혹은 집합 완료 시점에 따라 시공 중 건물 전체의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다(박효선 등, 2005). 또한 공기 단축을 위한 새로운 공법들이 적용되고 평면상 시공 구역(zone) 구획 및 순차적인 시공계획이 일반화됨에 따라, 시공 중 구조적 안정성에 대한 문제는 더욱 중요시 되고 있으므로, 계획단계에서부터 고려되는 것이 경제적이고 효율적이다. 그러나 시공 과정에서 공법이나 시공 스케줄이 변경되는 경우, 구조설계 시 반영되지 않은 요소들에 의한 영향에 의하여 골조의 안정성이 저하될 우려가 크다. 따라서, 여러 영향 요소들에 따른 골조의 구조적 안정성에 대한 검토 및 평가가 시공 중 지속적으로 이루어져야 한다. 이러한 시공 중 골조의 안정성과 관련된 주요 요소 및 영향은 표 1과 같이 요약될 수 있다.

현재 해외에서 계획 중인 Signature Tower는 1축 방향과 2축 방향으로 기울어진 두 개의 타워가 고층부에서 서로 기대면서 안정성을 가지는 구조 형태이다(그림 2). 그러나 시공 중, 두 타워가 서로 기대면서 편심이 없어지기 전까지는 각각의 타워가 스스로 안정성을 유지해야 하므로, 각 타워의 코어 전단벽은 완공 이후에 발생하는 횡력 뿐만 아니라 시공 중 편심에 의한 휨에도 저항할 수 있도록 계획되어야 한다. 두 개의 코어가 먼저 시공되어 서로 연결된 후, 코어 주변의 경사기둥 및 바닥하중에 의하여 작용하는 편심을 지지하는 방식으로 시공 중 안정성을 확보하는 시공계획의 적용이 가능하다. 이 경우, 시공 중 안정성이 확보될 수 있는 정확한 시공단계에 따라 시공을 하여야 한다.

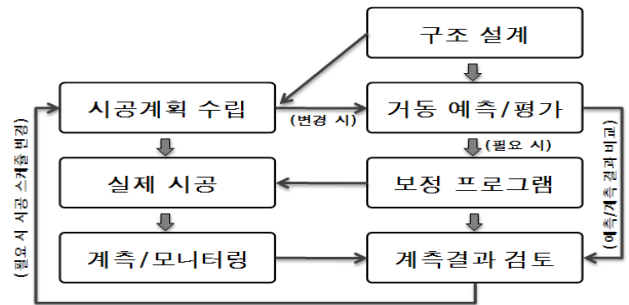


그림 3 시공계획-모니터링-보정프로그램 수립 프로세스

2.2 시공 중 모니터링 및 보정 프로그램

초고층화와 고세장비로 인하여 구조부재의 변형이 크며, 비정형적인 형상에 의해 골조 전체가 기울거나 비틀리는 현상도 발생한다. 기본적으로 설계과정에서 이러한 변형들을 최소화할 수 있는 적절한 구조시스템의 선택과 부재 설계가 우선되어야 하지만, 시공 중 변형은 시공 하중, 재료 성질, 시공 스케줄, 사용 공법 등에 따라 많은 불확실성을 갖고 있으므로 이를 적절한 시기에 감지하고 보정할 수 있는 기술이 필요하다.

프로젝트 초기에 시공 중 안정성에 대한 영향을 반영한 시공계획을 수립하고, 시공단계해석을 통한 거동 예측/평가를 수행하여 필요 시 보정 프로그램(compensation program)을 시공에 적용한다. 실제 시공 중에는 적절한 구조건전성 모니터링(structural health monitoring) 프로그램을 통한 계측 결과를 검토/평가하고 해석에 의한 예측값과 비교하여, 필요 시 해석조건을 수정한 재해석을 통하여 향후 골조의 구조적인 거동을 재확인한다. 계측 결과와 해석 결과를 종합 검토하여, 골조의 구조적 안정성을 평가하고, 필요한 경우 시공 스케줄 변경 및 보정 프로그램의 수립 등의 안정성 향상을 위한 적절한 조치를 적용한다. 이러한 시공계획-모니터링-보정프로그램 수립의 프로세스(그림 3)는 시공 중 공법 및 스케줄 등 시공 조건의 변화들을 반영하여 지속적으로 반복 수행되어야 한다. 이 과정에서 실제 시공을 반영한 정밀한 시공단계 해석 기술, 시공 중 변형을 정확히 관찰할 수 있는 모니터링 기술, 그리고 정밀한 보정 기술이 수반되어야 한다.

3. 초고층 프로젝트 적용

앞서 기술한 초고층 건물의 시공 중 안정성 확보를 위한 구조적 고려사항들을 실제 초고층 프로젝트에 적용한다. 특히, 이 논문에서는 시공 중 골조의 거동을 예측/평가하기 위한 시공단계해석에 초점을 맞추어 시공 중 구조적 안정성을 검토하기 위해 범용구조해석 프로그램을 이용한 구조해석 기법 및 주요 검토사항들을 중심으로 기술하고자 한다.

3.1 구조시스템 및 안정성

대상 프로젝트는 160층 이상 규모의 초고층 건물로서, RC골조와 철골 첨탑부로 구성되어 있다(Abdelrazaq, 2007 ; Baker 등, 2007)(그림 4). 기준층은 중앙 코어와 3개의 윙으로 구성되어 있으며(그림 5), 중앙부 코어를 중심으로 3 방향으로 길게 뻗은 전단벽으로 구성됨으로써, 160층 이상의 높이에 대해서도 구조적으로 안정성을 제공할 수 있다. 구조 외주부의 기둥을 횡력저항시스템에 활용하기 위하여 총 5개소의 아웃리저가 설치되었다.

그러나 상부층으로 갈수록 3개의 윙이 나선형으로 돌아가며 평면이 단계적으로 줄어드는 형상으로 인하여, 평면의 비정형성 및 각 윙 간의 자중 차이가 발생할 수 있다. 설계단계에서 이에 대한 고려가 충분히 이루어지므로, 완공 후의

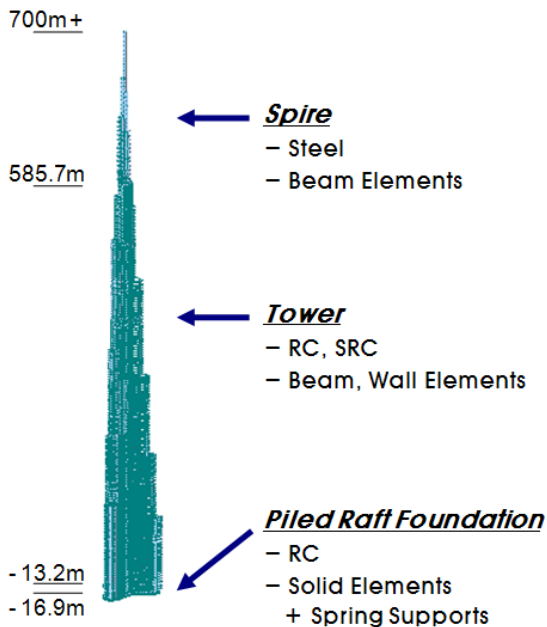


그림 4 3차원 구조해석모델

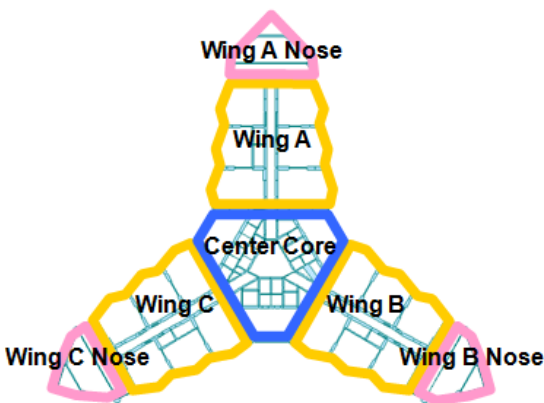


그림 5 기준층 평면형상 및 시공구역계획

구조적 안정성보다는 전체 구조시스템이 완전히 체결되기 이전인 시공 중의 안정성 문제가 발생할 가능성이 더 크다. 특히, 중앙 코어 벽체가 먼저 선행하고, 세 윙 구역들(Wing A, B, C)과 윙 단부 구역들(Wing Nose A, B, C)이 독립적으로 시공되므로, 시공 중 예기치 못한 상황으로 일부 구역의 시공이 지연된다면 자중의 불균형은 더욱 심화될 수 있다. 또한, 중앙 코어와 윙 구역 간의 중력하중 전이를 통하여 균등한 하중 분포를 유도하는 아웃리저 벽체의 설치 완료 시점이 부적절할 경우, 설계 의도와 다른 하중 분포로 인한 수직 부재의 부등 축소 및 횡변위가 발생할 수 있으며 기초의 부등침하를 증가시킬 수 있다.

3.2 3차원 시공단계해석

시공 중 안정성 검토를 위한 시공단계해석을 위하여, 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS-GEN 7.4.0을 이용한 3차원 구조해석 모델이 구성되었다(그림 4). 전단벽은 벽체 요소로서, 기둥 및 연결보(link beam)는 보 요소로 모델링되었다. 골조에 작용하는 하중이 전면기초를 통하여 파일로 전달되는 힘의 흐름을 반영하고, 전면기초와 파일로 구성된 파일지지 전면기초시스템(piled raft foundation system)의 골조 횡변위에 대한 구속효과를 정확히 반영하기 위하여 전면기초와 파일도 해석모델에 포함하였다. 전면기초는 입방체 요소로서, 파일은 축강성만을 갖는 스프링 지지요소로 모델링되었다. 파일의 스프링 강성은 초기 설계 시 가정한 값을 사용할 수 있으나, 일반적으로 이는 안전측의 값으로서 기초의 변형을 과대평가할 수 있다. 보다 정밀한 평가를 위해서는 실물 실험 결과나 계측결과를 이용할 수 있으나, 이 경우 기초와 지반의 작용은 비선형 관계로서 작용 하중이 증가할수록 활성 강성이 감소한다는 것을 고려하여 강성값을 결정하여야 한다.

가장 바람직한 시공단계해석은 시공 스케줄 및 조건 등의 입력내용을 최소화하면서 실제 시공과의 유사성을 극대화하는 것이라 할 수 있다. 완공 후의 거동을 예측하기 위한 시공단계해석과 비교할 때, 시공 중 골조 거동을 예측/평가하기 위한 시공단계해석을 위해서는 시공 조건들을 보다 정밀하게 반영할 필요가 있다. 대상 프로젝트의 기준층 시공은 크게 7개의 구역으로 나누어 시공되고 있다(그림 5). 동일층에서 구역별 시공 순서를 크게 나누면 다음과 같다.

- 1) Center Core Wall
- 2) Center Core Slab
- 3) Wing Wall : A / B / C
- 4) Wing Slab : A / B / C

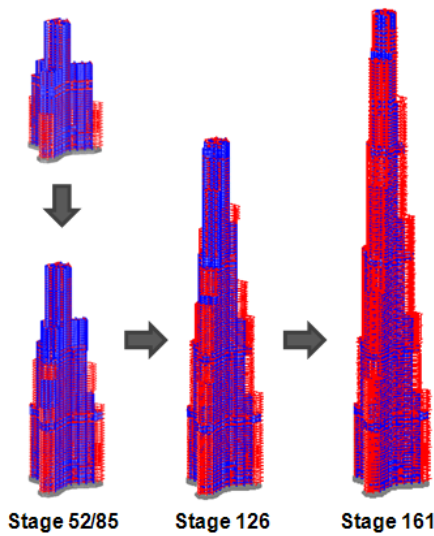


그림 6 구조해석을 위한 시공단계 가정

5) Wing Nose Slab & Column : A / B / C

이 때, 동일 층에서 각 인접구역 간 시공 시간차는 대략 2개월에서 최대 6개월 정도까지 되었으며, 시공 진행 상황에 따라서 그 값은 다소 증가되거나 감소될 수도 있다. 이는 건물 완공 후의 장기거동의 측면에서는 충분히 무시할 수 있는 값이라 할 수 있으나, 실제 2~6개월 정도의 기간은 중국 크리프 계수의 54~70% 및 건조수축의 중국 변형율의 63~84%정도가 발현되는 기간이다(ACI Committee 209, 1997). 시공 중 안정성을 고려하는 단기적인 측면에서 이 값들은 인접 구역 간 불균등 기동축소 및 횡변위 등의 거동 차이를 유발할 수 있는 충분한 기간이다.

따라서, 초고층 건물의 시공 중 안정성을 검토하기 위해서는 동일 층의 모든 구역이 동일 시점에 활성화되는 “층 기반(story-based)” 시공단계해석 보다는 동일 층이더라도 각 시공구역 별로 다른 시점에 활성화되는 “구역 기반(zone-based)” 시공단계해석이 요구된다. 구역 기반 시공단계해석에서는 요소, 경계조건, 하중 등의 그룹화 및 층 다이어그램 설정 등의 측면에서 보다 많은 정보를 해석에 포함시켜야 하지만, 시공단계해석의 목적이 시공 중 안정성에 평가일 경우 반드시 필요한 최소한의 해석 조건이라 할 수 있다.

이 논문의 연구에서는 대상 건물에 대해서 49개월 이상의 시공 기간을 총 210개의 시공단계로 단순화하였다(그림 6). 시공단계해석에 포함된 하중은 시공 중 건물에 작용하는 구조체 자중 및 마감하중, 외장재 하중만을 대상으로 하였으며, 시공 완료 시점에 건물 전체의 활하중이 일시에 작용하는 것으로 가정하였다. 시공 중 골조의 구조적 안정성을 평가하고, 안정성을 지속적으로 유지하기 위한 시공계획의 가이드라인

을 제시하기 위하여, 시공 스케줄을 지속적으로 업데이트하여 시공단계해석이 수행되었으며, 해석결과는 주요계측결과들(강선중 등, 2006)과 비교/평가되었다.

4. 시공단계해석 결과 및 분석

4.1 기동축소

기동축소 현상은 설계단계 뿐만 아니라 시공단계에서 지속적으로 고려되어야 할 중요한 문제이다. 시공단계에서 기동축소, 특히 부등축소 현상은 슬래브나 아웃리거 등의 구조부재에 부가응력을 발생시킴으로써 구조 안정성을 해칠 수 있으며, 엘리베이터, 수직배관, 내부 칸막이벽, 마감 요소 등 설치의 저해 요소가 될 수 있다. 이 연구에서는 구역 기반 시공단계해석을 수행함으로써, 시공 시점이 상이한 구역 간 시공 중의 실제 부등축소 및 인접 지점간 레벨 차이를 정확히 예측할 수 있다. 층 기반 시공단계해석의 경우 부재 강성 및 하중 영향면적에 따른 하중의 불균형에 의한 부등축소만을 고려할 수 있으나, 구역 기반 시공단계해석을 이용함으로써 실제 시공 스케줄에 따른 구조체의 불균형에 따른 부등축소값을 반영할 수 있다. 이를 통하여, 시공계획에 따른 구조적 안정성의 영향을 분석하고 시공계획 수립에 대한 가이드라인을 제시할 수 있다.

시공단계해석 결과를 바탕으로 기동축소값을 평가하기 위해서는 실제 시공과정과 해석결과에 대한 비교 및 보정이 요구된다. 일반적인 시공단계해석에서, 모든 요소와 절점의 위치는 설계 위치에 정의되고, 각 시공단계에서 새롭게 시공되어 해석모델에서 활성화(activation)되는 요소와 절점의 위치는 원래 정의된 설계위치에서 변위 발생이 시작된다(그림 7a). 그러나 동일 층의 각 구역 간 시공(콘크리트 타설 혹은 철골 설치) 시점의 차이가 발생하는 실제 시공에서 새롭게 시공되는 구역은 기시공된 인접 구역의 변위가 기발생한 레벨로 보정되어 시공된다(그림 7b). 시공 중 각 지점 간의 레벨 차이 분석을 위해서는 보정 시공에 대한 고려가 포함될 수 있어야 한다. 따라서, (1) 기활성(기시공)되어 있던 인접 부재의 변위를 고려하여 새로운 요소의 활성화 위치가 결정되는 알고리즘을 적용하거나, (2) 해석결과에 보정값(그림 7b $\Delta_{W,Compensation}$ 혹은 $\Delta_{N,Compensation}$)을 적용하여야 한다. 이 연구에서는 기존의 해석 프로그램을 그대로 적용한 후, 해석결과를 보정하는 방법 (2)를 적용하였다.

그림 8은 침탑부 공사 완료 시점(Stage 198)에서 Wing C의 주요 지점들의 기동 및 벽체 축소값에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 결과값의 보정 없이 해석결과를 그대로 비교

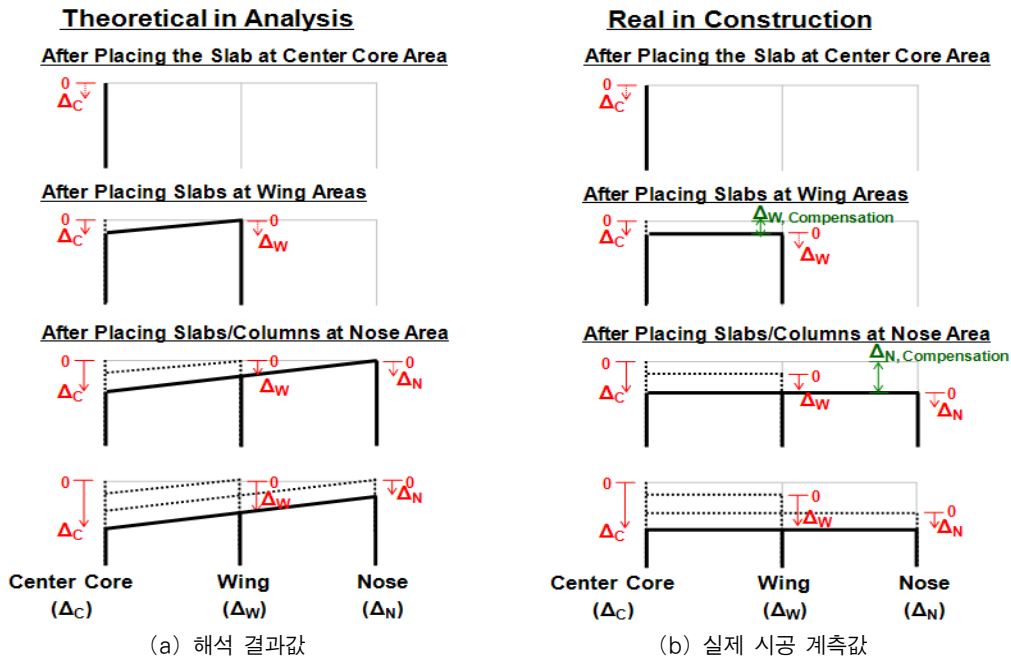


그림 7 기둥 축소 해석값의 보정 개념

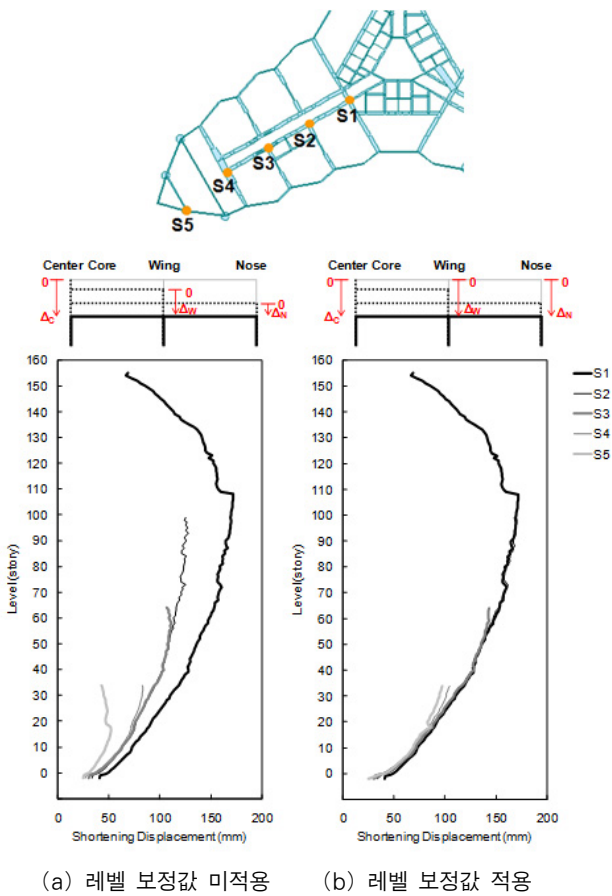


그림 8 첩탐완료시점(Stage 198)의 Wing C 축소량 비교

할 경우(그림 8a), 시공시점이 다른 Center Core구역(S1), Wing구역(S2, S3, S4), Nose구역(S5) 간에 부등축소값의

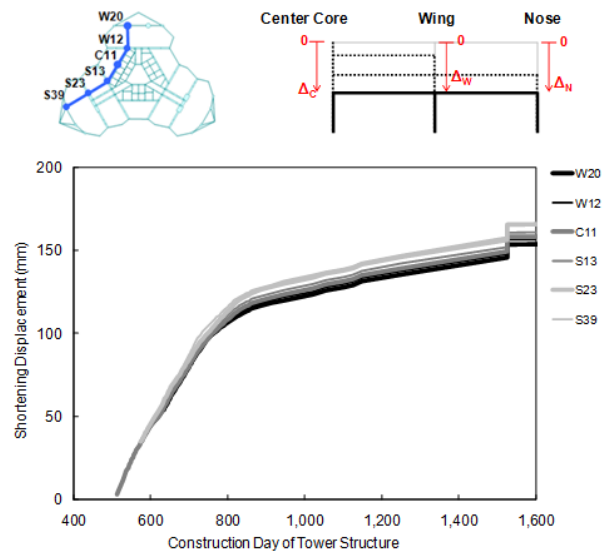


그림 9 시공 중 81층의 축소값 변화(레벨 보정 적용)

차이가 큼을 보여주고 있다. 그러나 각 수직부재의 레벨 비교의 차원에서 이는 실제 시공상황과 부합하지 않는다. 그림 7b와 같이 Wing 구역의 시공은 기시공되어 있던 Center Core구역의 변형된 위치를 기준으로 레벨을 정하여 시공이 이루어지고, Nose구역도 마찬가지로 인접한 Wing구역의 변형 레벨을 기준으로 시공이 이루어진다. 따라서, 기시공 지점과의 레벨 비교를 위해서는, Wing구역 시공시점의 Center Core구역의 기축소값을 $\Delta_{W, Compensation}$ 으로 적용하여 추가하는 방법의 보정을 통하여 정확한 예측이 가능하다. 즉, 그림 8에서, S2, S3, S4 지점들이 해석모델에서 활성화되는 단계

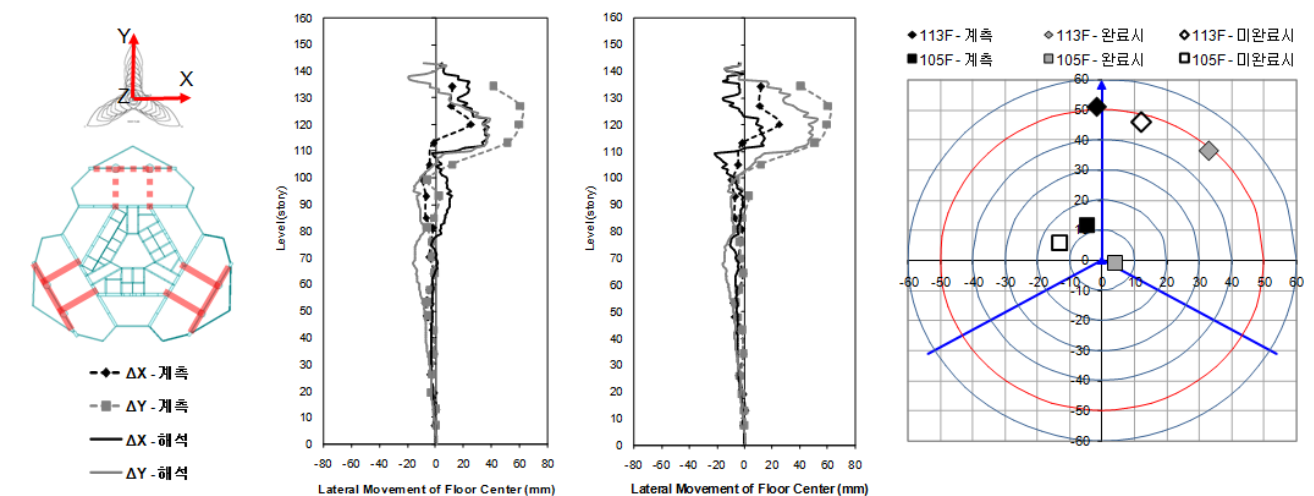
에 기활성(기시공)되어 축소값이 발생한 S1지점의 축소변위 값이 $\Delta W_{Compensation}$ 으로 정의되고, 그림 8a의 S2, S3, S4 지점에 대한 각 층의 축소변위값들은 해당 층별로 정의된 $\Delta W_{Compensation}$ 을 합산하여 그림 8b와 같이 보정된다. 이러한 실제 시공과정을 고려하여 해석 결과값에 보정값을 적용한 축소변위 비교 결과는 그림 8b과 같으며, 이를 통하여 각 시공단계별로 각 층에서의 인접 지점간 실제 레벨 차이를 확인할 수 있다. 그림 9는 Wing A와 Wing C의 시간에 따른 보정값을 적용하여 각 지점들의 시공 시점부터 건물 전체의 시공 완료 시점까지의 축소값 변화에 대한 해석결과를 보여 주고 있다. 이를 통하여 동일 층에서 시공 중의 각 지점간 레벨 차이, 즉 벽체 양 단부의 레벨 차이 및 벽체와 기둥 간의 레벨 차이 등을 검토할 수 있다. 이 때, 시공 시점이 상이한 각 지점들의 축소변위값이 "0"이 아닌, 기시공되어 있던 인접 수직부재의 축소변위값(보정값 $\Delta W_{Compensation}$ 혹은 $\Delta N_{Compensation}$)부터 시작되어 비교되고 있으며, 시공 완료 시점에 전 층의 활하중이 일시적으로 작용한 것으로 가정함으로써 축소변위값의 갑작스러운 증가 지점이 발생하였다.

4.2 골조 횡변위

평면 상 각 구역 간 수직 요소들의 축소량 차이는 골조의 횡변위 및 기울어짐을 유발할 수 있으며, 이는 2차 효과에 의하여 각 부재들의 부가 모멘트 작용을 발생시킬 수 있다. 이러한 현상은 구조시스템이 완료되지 않은 시공 중에 영향이 더욱 크며 골조 전체의 안정성에 미치는 효과가 크므로, 시공 초기 및 시공 중 예측 및 검토, 관리가 절실히 필요하다. 시공 구역 간 하중 불균형의 발생에 의한 골조의 기울어

짐을 검토하기 위해서, 각 시공 구역들의 스케줄을 적절히 반영하여 분석하여야 한다. 특히, 각 시공 구획 및 주요 구조 부재들(아웃리거 혹은메가 부재)의 시공 스케줄의 변화에 따라 횡변위 및 기울어짐의 변화가 클 수 있으므로, 시공 중 지속적인 시공단계해석 예측/분석이 이루어져야 한다. 이 연구의 대상 프로젝트에서는 부등축소에 의한 골조의 기울어짐 검토를 위하여 각 층 중심의 횡변위값을 핵심 변수로 설정하고, 시공단계해석을 통한 횡변위값 예측 및 실제 시공 중 예측/비교를 통하여 골조의 안정성을 검토하였다.

ACI 117-06에서는 수직부재의 횡방향 시공오차에 대한 가이드라인으로서, 25m이상 높이에 대하여(기초 상부로부터의 높이)/1000 및 150mm이내로 제시하고 있다(ACI Committee 117, 2006). 만약 정해진 기준 이상의 횡변위 발생 시, 2차 효과에 따른 추가 모멘트를 고려하여 구조부재들의 설계를 재검토하거나, 시공구획 혹은 시공스케줄을 조정하여 수직요소의 부등축소 및 횡변위(기울어짐)를 감소시켜야 한다. 그러나 시공 과정 중에 발생하는 구조설계 혹은 시공계획에 대한 검토/변경은 많은 비용과 시간이 소요되고, 시공 도중의 변경에 대해서 현실적으로 많은 제약조건들이 존재한다. 따라서, 시공 중 횡변위(기울어짐)에 따른 안정성 문제가 발생할 경우, 적절한 시공 보정프로그램을 계획하여 적용하는 것이 보다 경제적이고 효율적일 수 있다. 이 경우, 정밀한 시공단계해석을 기반으로 골조의 횡변위를 예측하고, 각 층의 중심을 예측된 횡변위의 반대 방향으로 적절하게 조정하여 시공함으로써, 중력하중의 2차 효과에 따른 부가모멘트를 크게 감소시킬 수 있다. 연구 대상 프로젝트에서는 매 층의 중앙코어 전단벽의 시공 시, 층 중심을 설계상의 원래 위치로 재조정하는 보정프로그램(recentering compensation



(a) 109층 아웃리거 위치 (b) 109층 아웃리거 완료 시 (c) 109층 아웃리거 미완료 시 (d) 층 중심 위치 비교(105층/113층)
 그림 10 시공 중 횡변위 해석결과 및 계속결과와의 비교

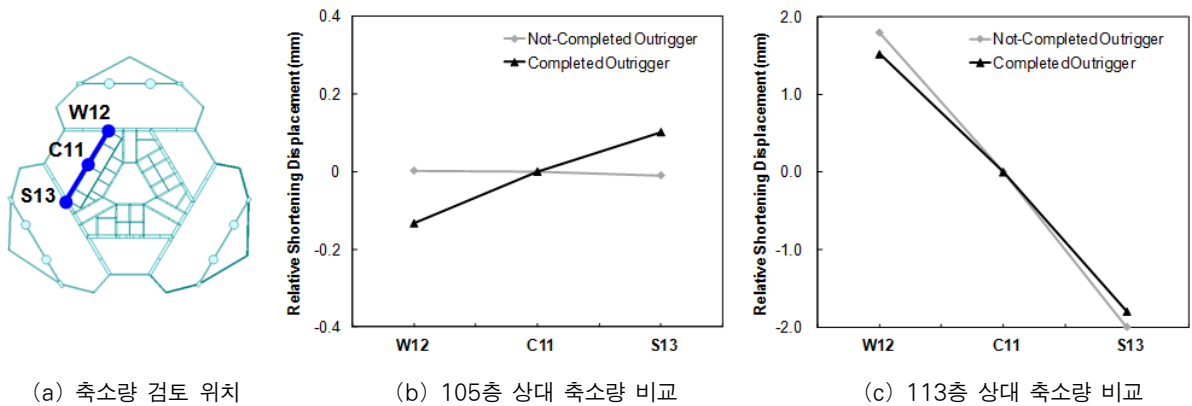


그림 11 109층 아웃리거 미완료에 따른 105층 벽체의 상대 축소량 변화

program)만을 적용하였다(Baker 등, 2007).

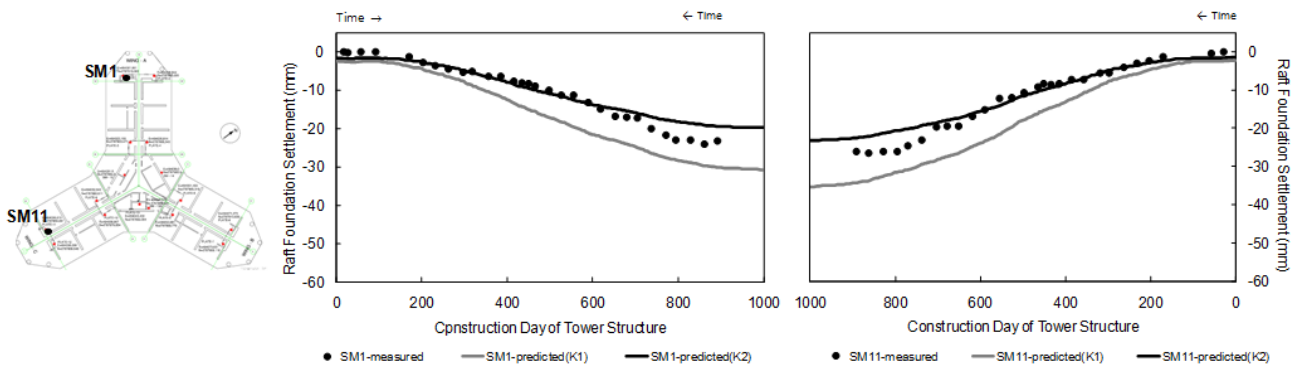
그림 10은 시공 중 골조의 안정성에 큰 영향을 줄 수 있는 주요 부재인 아웃리거의 완료 여부에 따른 골조 횡변위의 영향을 보여주고 있다. 109층에 설치 계획된 아웃리거 벽체의 시공 시점에 따른 시공단계해석의 횡변위값 예측값들을 실제 계측값과 비교하였다. 이 때, 비교 시점이 외장재의 시공이 진행되지 않은 시점으로 풍하중의 영향이 적으며, 바람의 영향이 최소화되도록 계측이 이루어졌으므로, 시공 중 중력하중만을 해석에 포함하여 결과를 비교하였다. 해석 및 계측결과와의 비교를 위하여, 109층 평면형상 및 아웃리거 위치, X/Y축 방향 등에 대한 정보는 그림 10a에 제시되어 있다. 해석결과, 109층 아웃리거 벽체 전체의 시공이 완료되었다고 가정하여 해석이 수행된 경우(그림 10b)에 비하여 아웃리거 벽체의 일부가 체결되지 않은 상태로 해석된 경우(그림 10c)의 횡변위가 크게 증가하였다. Wing B와 Wing C 구역의 아웃리거 벽체는 완료되었으나 Wing A의 아웃리거 벽체가 완료되지 않음으로써(그림 10a), +Y 방향으로의 골조 강성의 약화와 중앙코어 하중을 세 링으로 분산시키는 역할을 하는 아웃리거 벽체의 미완료로 인하여 Wing A에 인접한 중앙코어 벽체의 축소가 상대적으로 크게 발생함으로써 골조의 +Y방향으로의 횡변위가 증가하였다. 그림 10d는 아웃리거 인접 층들(105층/113층)의 층 중심 변위값들에 대해서 계측값과 해석값들을 비교하고 있다. 계측값은 실제 시공에서 아웃리거가 완전히 체결되지 않은 상태의 계측 결과로서, 아웃리거 완료를 가정한 해석결과보다 미완료를 가정한 해석결과와 매우 근사함을 알 수 있다. 특히, 아웃리거 벽체의 체결 여부에 따라 횡변위값 뿐만 아니라 횡변위 방향에 대한 예측의 정밀도가 크게 달라짐을 확인할 수 있다. 그림 11은 109층 아웃리거 벽체 전체의 시공이 완료된 경우(그림 10b)와 아웃리거 벽체의 일부가 체결되지 않은 경우(그림 10c)에 대하여 Center Core 구역 벽체들의 상대 축소변위

량의 차이를 보여주고 있다. Wing A인접 지점(W12)과 Wing C인접 지점(S13)에 대하여 C11 지점을 기준으로 상대축소량을 비교한 결과(그림 11a 참조), Wing A 구역의 109층 아웃리거의 설치가 완료되지 않았을 때 105층과 113층의 W12 지점 축소량이 증가하였으며(그림 11b, c), 이는 횡변위 발생 결과(그림 10d)와 동일함을 알 수 있다.

시공 계획 및 시공 스케줄을 정확히 반영하였을 경우에만 실제 거동과 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다. 해석에 스케줄 반영 여부에 따라 횡변위 값 뿐만 아니라 변위가 발생하는 방향도 달라지게 되므로, 적절한 시공계획 및 시공 보정프로그램 마련을 위해서는 시공계획과 시공스케줄을 반영한 정밀한 시공단계해석을 통한 검토가 수행되어야 한다.

4.3 기초시스템

앞서 언급한 바와 같이, 이 연구의 시공단계해석에서는 파일지지 전면기초를 상부 골조와 함께 3차원 모델로 구성하였으며, 전면기초와 파일은 각각 입방체 요소와 탄성 스프링 지지요소로 모델링되었다. 파일의 축력에 대한 탄성계수는 시공단계해석 동안 상수로 정의되었으며, 대상 프로젝트의 경우 $K_1(=600\text{kN/mm})$ 과 $K_2(=900\text{kN/mm})$ 의 두 스프링 상수값을 적용하여 각각 해석하였다. 이는 파일에 대한 재하 실험 및 시공 초기 기초침하 계측결과를 바탕으로(그림 12), 파일 축력과 변형의 비선형 관계에서 대상 프로젝트의 파일 축력 분포에 따른 파일강성의 상한값과 하한값으로서 선택한 값이다. 그림 12는 전면기초의 두 지점에 대한 시공 중 침하 계측 결과를 K_1 과 K_2 를 적용한 시공단계해석 결과들을 비교하고 있다. 건물 자중이 작은 시공 초기에는 K_2 를 적용한 해석결과와 유사하나, 시공이 진행되어 골조 높이가 증가함에 따라 K_1 을 적용한 해석결과에 가까워지고 있다. 이는 파일 축력-변형 관계의 비선형성을 명백하게 보여주는 결과이며,



(a) 계측 위치

(b) 침하 비교 - SM1

(c) 침하 비교 - SM11

그림 12 시공 중 기초 침하에 대한 해석결과와 계측결과와의 비교

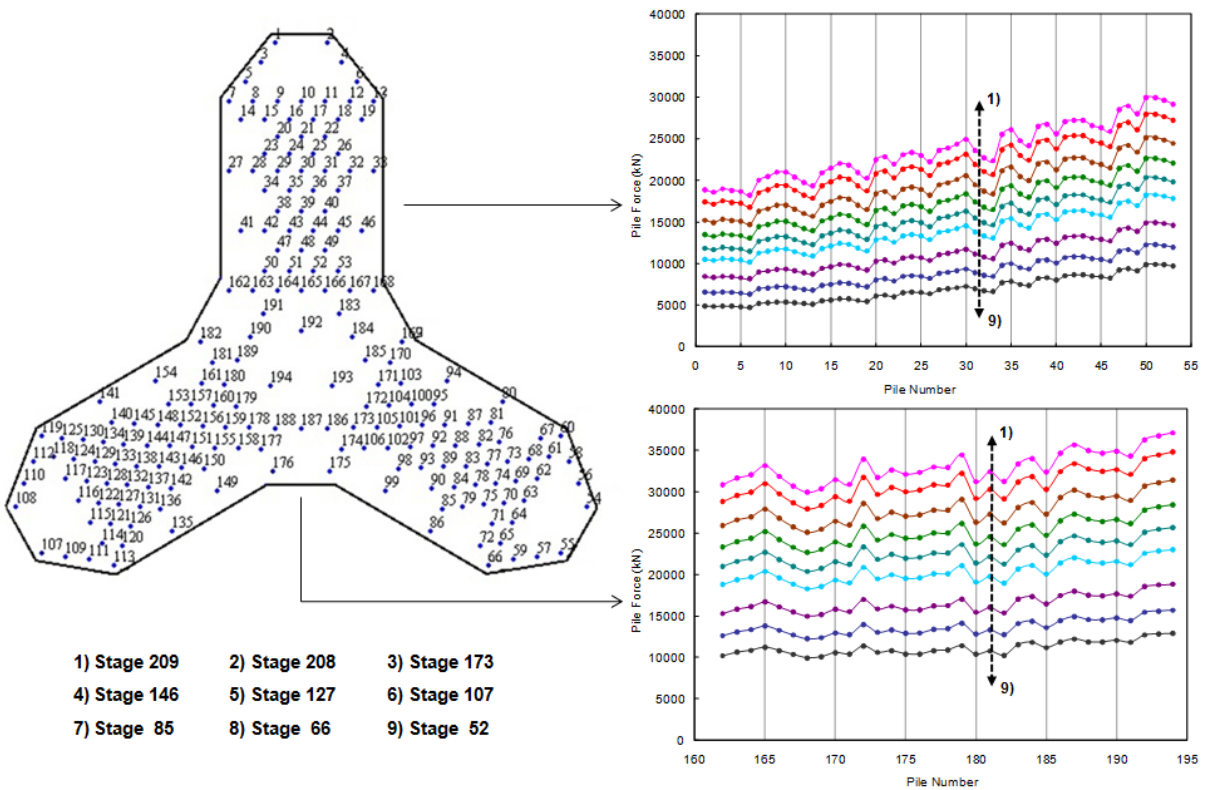


그림 13 시공 중 파일 축력의 변화

파일의 비선형 강성은 파일 선단 지지와 측면 마찰의 영향을 함께 고려하여 결정할 수 있다(Xiao 등, 2002).

기초시스템의 안정성을 결정하고 건물 골조의 구조적 성능 및 거동에 가장 큰 영향을 주는 것은 기초의 부등침하이다. 특히, 일반적인 초고층 형상(set-back 혹은 tapered 입면 형상)을 고려할 때, 평면 중심부의 자중이 크며 단부로 갈수록 작아지므로 부등침하의 발생이 더욱 커질 수 있으며, 이에 대한 더욱 정밀한 고려가 요구된다. 기초의 부등침하를 최소화하기 위하여, 건물의 설계 시 하중을 단부 쪽으로 유도하기 위한 기법을 적용할 수 있다. 아우리거를 통하여 상

부중에서 전달되어 오는 중력하중을 외주부 기둥으로 분산시키거나, 중앙부보다 단부에 파일을 더욱 조밀하게 배치하여 중앙부보다 단부의 지지강성을 증가시킴으로써 하중을 단부로 유도하여 부등침하를 감소시킬 수 있다.

그림 13과 14는 각각 시공 중 파일 축력의 변화와 기초 침하의 변화에 대하여 파일강성 K_1 을 적용한 해석결과들을 보여주고 있다. 중앙부에 위치한 파일의 축력 및 침하값이 Wing구역에 비하여 전반적으로 크며, 단부에서 중앙부로 갈수록 파일 축력 및 기초 침하가 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이 해석결과들은 파일의 강성을 상수로 가정하여 해석

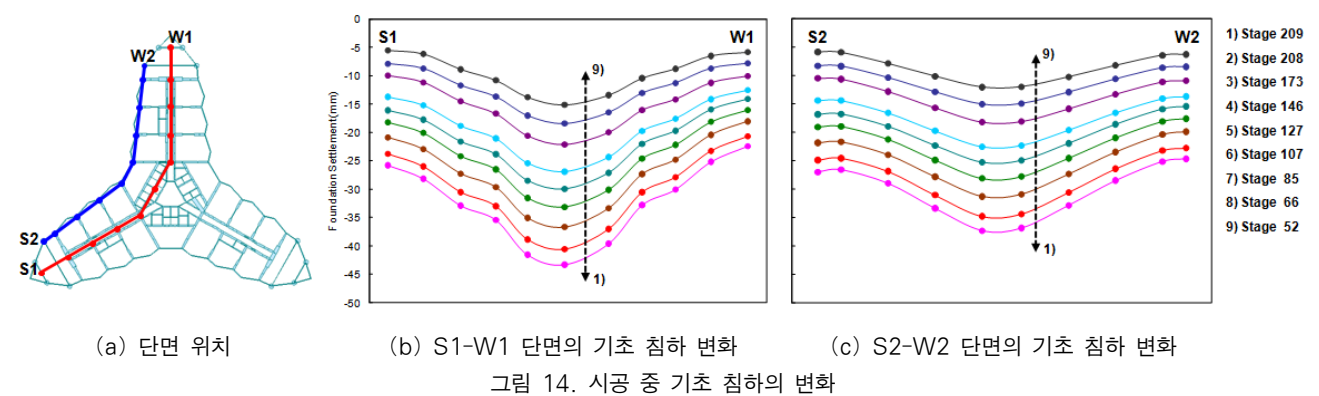


그림 14. 시공 중 기초 침하의 변화

한 결과로서, 파일 축력 및 기초 침하의 불균등 분포를 과평 가할 수 있다. 실제 파일 강성은 비선형 거동 특성을 보이므로, 하중의 작용이 큰 중앙부의 파일강성이 더 작아지고 상부 골조하중의 재분포가 발생함으로써 기초의 부등침하를 줄어 들게 된다. 만일 파일거동이 선형이라 가정한 해석을 적용할 경우, 이러한 상부 골조하중의 재분포를 반영할 수 없으며, 기초의 부등침하를 정확히 예측할 수 없다. 그러나 파일 강성을 상수값으로 가정한 해석은 부등침하를 과평가하여 고려하게 되므로, 이를 이용하여 골조의 안정성을 보수적으로 검토할 수 있으며, 이 경우 부적절한 시공계획에 의하여 파일의 강성 및 기초 침하의 불균등 분포가 심화되지 않도록 각 시공단계별로 정밀하게 검토하여야 한다.

5. 결 론

초고층 건물의 시공 중 안정성 검토를 위하여, 구역 기반 시공단계해석을 적용하였다. 시공 구획의 개념을 기존의 범용구조해석프로그램에 의한 3차원 모델링에 포함하여, 각 구획별 시공 스케줄을 독립적으로 적용함으로써 실제 시공 중 발생할 수 있는 인접 구역간 시공 시간차에 따른 기둥과 벽체 축소의 불균형, 골조 횡변위/기울어짐, 기초시스템의 구조적 거동 등을 예측할 수 있다. 이 때, 인접 구역간 수직요소의 부등 축소 및 레벨 차이를 검토하기 위하여, 실제 시공과정을 고려하여 결과값을 보정하는 등의 적절한 조치를 취해야 한다. 시공 구획들 간의 시공 스케줄의 변경, 특히 주요 구조 부재들의 시공 시점에 따라 기둥/벽체의 부등축소 및 횡변위/기울어짐 등의 구조적 안정성이 크게 달라질 수 있으므로, 시공 스케줄의 변경을 반영한 시공단계해석을 시공 중에 지속적으로 수행하며, 각 시공단계 및 시공조건에 따른 결과를 예측/평가함으로써 시공 중 안정성 확보를 위한 시공계획의 가이드라인을 제시할 수 있다. 특히, 시공단계해석, 구조건전성 모니터링, 보정 프로그램, 시공계획 수립 등의 체계적인 수행 및 연계를 통하여 극초고층 혹은 비정형적

인 초고층 건물의 시공 중 구조적 안정성을 확보할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

강선중, 강경태 (2006) GPS를 이용한 초고층 시공 측량 기술, 한국건설관리학회 학술발표대회 논문집, pp.187~193.

김한수 (2008) 수평부재와 철근의 구속효과를 고려한 고층건물 기둥축소해석, 대한건축학회 논문집(구조계), 24(6), pp.35~42.

박효선, 손홍규, 김일수, 박재환 (2005) GPS를 이용한 고층 건물의 수평변위 모니터링시스템, 대한건축학회 논문집(구조계), 21(5), pp.11~18.

백인희 (2007) 철골공사 N공법과 미국식 설치공법 적용으로 골조공사 층당 3일 사이클을 달성한 사례연구, 대한건축학회 논문집(구조계), 23(9), pp.231~238.

손상현, 박기용 (2007) 초고층 골조공기 단축방안 - 3 Day Cycle, 한국건설관리학회지, 8(3), pp.3~5.

신성우 (2007) 미래는 극초고층 수직 도시화 불가피, 한국건설산업연구원 건설저널, 71, pp.37~39.

양주경, 설현철, 김진근 (2008) 시공단계 및 비탄성거동을 고려한 초고층 건축물의 3차원 해석기법 개발, 한국콘크리트학회 논문집, 20(2), pp.249~256.

오향욱, 박학길 (2008) 시공단계와 기하 비선형을 고려한 초고층 구조물 해석, 대한건축학회 논문집(구조계), 24(7), pp.3~10.

임보람, 김현수, 이성령, 김진욱 (2008) 현대 초고층 건축물의 형태적 경향에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(계획계), 24(12), pp.279~286.

Abdelrazaq, A.K. (2007) Brief Description of the Design and Construction of the Burj Dubai Project, Dubai, UAE, 대한건축학회지, 51(4), pp.62~67.

ACI Committee 209 (1997) Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete

- Structures (ACI 209R-92), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p.47.
- ACI Committee 117** (2006) Specifications for Tolerances for Concrete Construction and Material and Commentary (ACI 117-06), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p.70.
- Baker, W.F., Korista, D.S., Novak, L.C.** (2007) Burj Dubai: Engineering the World's Tallest Building, *The Structural Design of Tall And Special Buildings*, 16(4), pp.361~375.
- Vollers, K.** (2008) Morphological Scheme of Second-Generation Non-Orthogonal High-Rise, *CTBUH 8th World Congress*.
- Xiao, H.B., Luo, Q.Z., Tang, J., Li, Q.S.** (2002) Prediction of Load-Settlement Relationship for Large-Diameter Piles, *The Structural Design of Tall Buildings*, 11(4), pp.285~293.