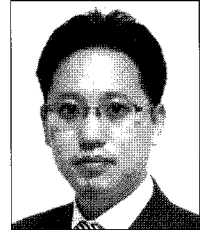


비정형 초고층 건물의 구조적 고려사항 및 시공 중 안정성

Structural Considerations and Stability during Construction of Complex-Shaped High-Rise Buildings



김재요*

* 광운대학교 건축공학과 교수

1. 서론

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 오일 달러를 앞세운 중동지역의 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.

2. 초고층 경향 분석

초고층 건물은 경제력과 기술력을 상징하는 의미를 가지면서, 높이가 초고층 건물의 정체성이었으며 높이 경쟁을 통하여 초고층 건물을 건설하여 왔다. 그림 1은 19세기 후

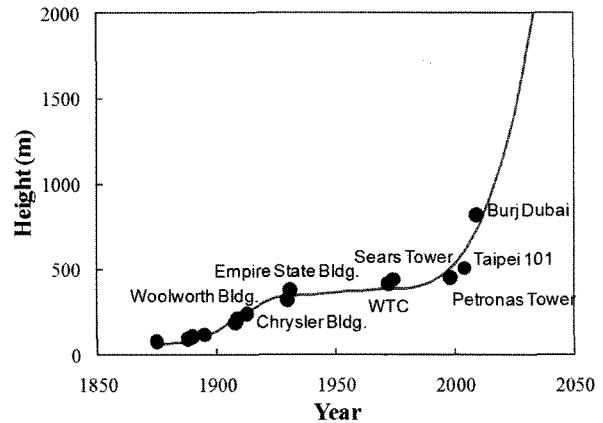


그림 1 세계 초고층 최고 높이 변화 추세

반부터 현재까지의 초고층 최고 높이의 변화를 통하여 앞으로의 최고 높이 변화 추세를 예측하고 있다. 20세기에 초반, 미국 내에서 초고층 높이 경쟁이 치열하게 진행되었으며, 반세기 이상의 소강상태를 거친 후 세계 각지에서의 초고층 건설 열기를 바탕으로 다시 한번 초고층 높이 경쟁이 치열해지고 있음을 알 수 있다. 이러한 흐름대로라면 앞으로 20년 내에 현재보다 두 배 이상 높이의 극(極)초고층 혹은 초(超)초고층 건물들이 등장할 것이며, 20세기 초반과는 비교가 되지 않을 정도의 초고층 최고 높이의 변화의 가속화가 예상될 수 있다. 물론 사회적 수요의 감소나 높이에

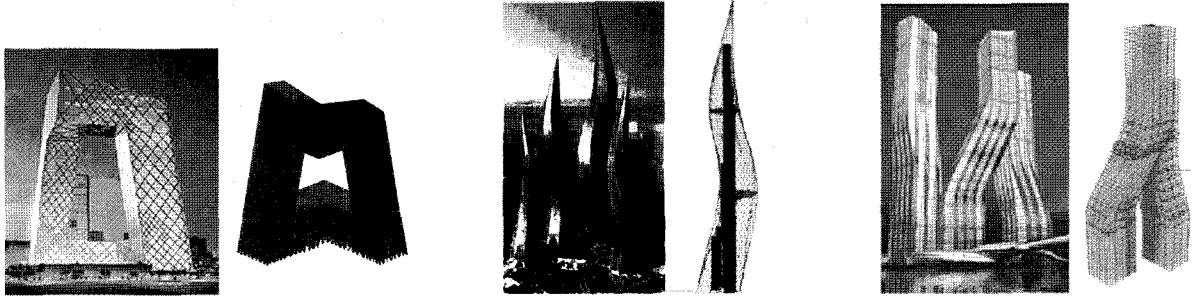


그림 2 주요 비정형 초고층 건물

대한 기술 발전의 한계에 부딪히면서 과거와 같은 소강상태가 다시 찾아올 수 있으나, 현재와 같은 치열한 높이 경쟁이 당분간 계속될 것은 자명하다.

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 2). 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.

최근 국내외적으로 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). 통상의 골조공기는 지하층 골조공사, 비기준층 골조공사, 기준층 골조공사로 나누어 관리되는데, 지하층 및 비기준층의 골조공기는 공기가 많이 소요되나 공기단축이 용이하지 않다. 이에 반하여 평면이 유사하게 반복되는 기준층 골조공사의 층당 사이클을 얼마나 단축하느냐에 따라 전체 골조공기의 단축방안이 결정된다. 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 증가시켜 구조시스템의 안정성을 저하할 가능성이 있다.

3. 비정형 초고층의 구조요소 분석

비정형 초고층 건물은 형상에 의한 기하학적인 특성 뿐만 아니라 힘의 흐름에 의한 구조적인 특성에서도 정형적인 건물과 상이하다. 특히, 구조시스템 및 구조요소의 설계를 위하여 일반 정형 초고층 구조에 비하여 더 많은 사항들이 고려되어야 한다.

3.1 코어(Core)

코어는 초고층 건물의 횡력저항성능 향상을 위한 핵심 구조요소이다. RC 전단벽 혹은 철골 기둥-대각가새로 구성된 코어는 평면 내 위치에 따라 중심 코어, 편심 코어, 분리 코어 등으로 구분된다.

비정형 초고층 건물에서 건물의 외부골조가 비정형 형상이더라도 횡력저항시스템을 구성하는 코어는 수직 형상을 유지하는 것이 일반적이다(그림 3). 그러나 비정형 건물의 경

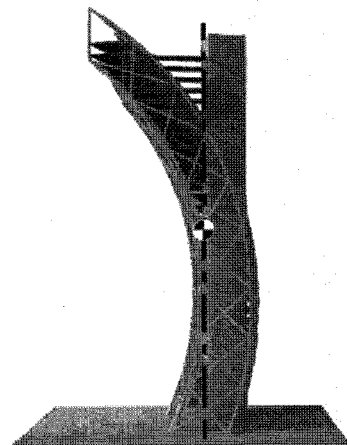


그림 3 비정형 골조 - 수직 코어의 결합

우, 층에 따라 평면형상이 불규칙하고 과도한 편심이 작용하여 중력하중에 의하여 큰 규모의 전도모멘트가 부가될 수 있으므로 정형 건물에 비하여 큰 전단력 및 전도모멘트가 코어에 작용할 수 있으며, 코어 부재들을 연결하는 연결보(coupling beam)에도 큰 전단력이 작용할 수 있다. 비정형 형상에 따른 외부 골조의 불규칙적인 하중을 내부 코어가 지지하는 역할을 하여야 하므로 중력하중 지지 및 횡력저항성능에서 코어가 차지하는 비중이 정형 건물에 비하여 크다.

일반적으로 정형 초고층 건물에서 코어는 평면 중앙부에 위치함으로써 골조의 비틀림 저항성능을 확보하며, 박스(box) 형상의 코어가 가장 빈번하게 사용된다. 그러나 비정형 초고층 건물에서는 다른 경향이 발생할 수 있다. 비정형 평면 형상으로 인해 정방형 혹은 장방형 코어가 아닌 다양한 단면 형상의 코어가 사용될 수 있다. 또한, 층마다 평면 형상이 변하거나 층 중심 위치가 변함으로써 중심 코어가 아닌 편심 코어의 형상이 되며, 이 때 코어 편심 위치는 매 층마다 변화할 수 있다(그림 4).

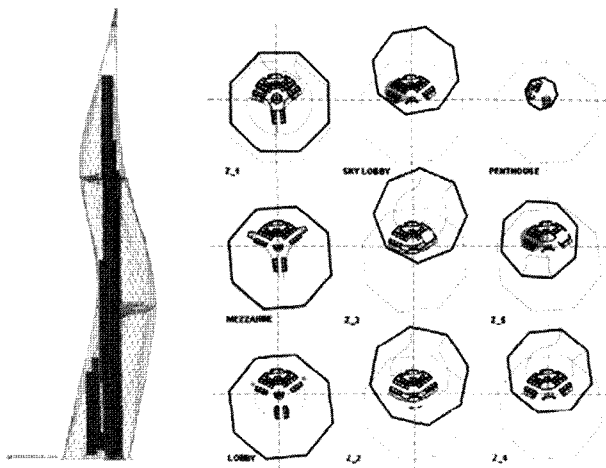


그림 4 층 별 코어 위치의 변화

최근의 비정형 초고층 건물의 경향을 보면, 단일 건물이 다수의 건물로 분리되거나 다수의 독립된 건물들이 하나의 건물로 합쳐지는 경우가 빈번하게 발생한다. 이러한 경우, 각 건물들에 존재하는 코어들이 서로 결합하면서 횡력저항성능을 크게 향상시킬 수 있다. 또한, 단일 건물 내에서도 비정형 형상에 따른 구조적 불안정성을 보완하고 전도모멘트를 분산시키기 위하여 2개 이상의 코어를 사용하는 것이 효율적일 수 있다. 따라서, 비정형 초고층 건물의 증가와 함께 분리형 코어(split core) 시스템이나 다중 코어(multi-core) 시스템의 적용이 더욱 증가할 것이다.

3.2 경사기둥(Inclined Column)

비정형 초고층에서는 다양한 입면 형태 및 평면 위치의 다양성으로 인해 수직이 아닌 경사기둥의 사용이 빈번하게 발생한다. 그림 5와 같이 경사기둥에서는 수직 부재에 비하여 상이한 내력 특성을 나타낼 수 있다. 예를 들어 기둥 부재가 경사짐으로써 각 층에 수평력을 유발하며, 이로 인하여 기둥의 전단력 및 휨모멘트가 크게 증가할 수 있고, 보-기둥 접합부는 경사기둥, 보, 슬래브가 연결된 접합부의 내력이 정형화된 보-기둥 접합부의 내력과 비교하여 감소할 수 있다.

최근 비정형 초고층 구조에 자주 사용되는 다이아그리드는 수직 기둥이 없고 기울어진 부재가 기둥과 가새의 역할을 동시에 수행하는 경사기둥이 적용되는 대표적인 횡력저항시스템이다. 다이아그리드 시스템은 부재의 단면을 효율적으로 사용할 수 있고, 수직기둥이 필요하지 않아 다양한 형상을 표현할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 다이아그리드는 다른 튜브 시스템에 비하여 접합부가 복잡하여 제작이나 시공과정에서 비용이 상승할 수 있다. 특히, 건물 층수가 40층인 경우 다이아그리드의 구조물량은 가새튜브에 비하여 20%정도 적지만(그림 6), 층수가 증가할수록 그 차

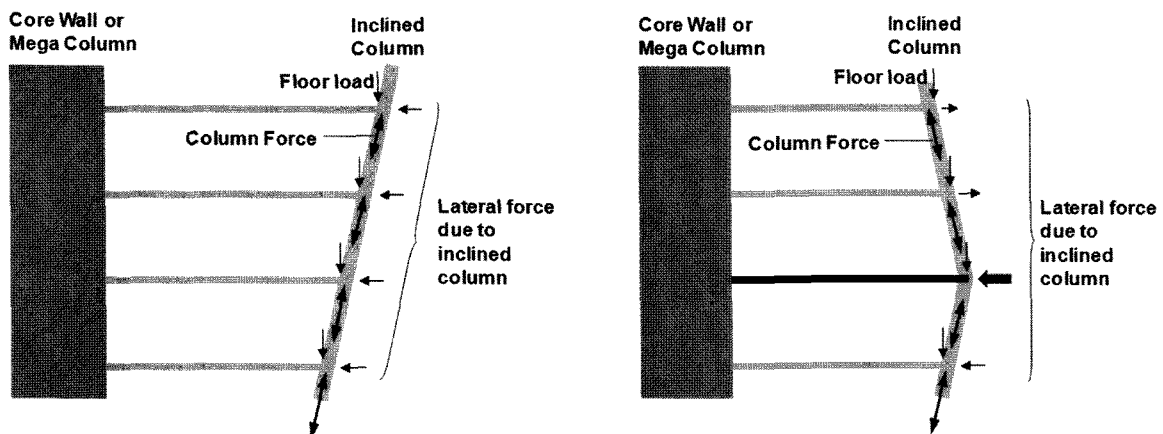


그림 5 비정형 구조시스템의 경사부재

Building Story Heights	Braced Tube Steel Mass (ton)	Diagrid Steel Mass (ton)	Material Usage Difference b/w Braced Tube and Diagrid (%)
40 stories	989	821	20.5
50 stories	2128	1855	14.7
60 stories	4113	3822	7.6
70 stories	7222	6882	5.9
80 stories	11848	11574	2.4
90 stories	18545	18412	0.7
100 stories	27287	27703	-1.5

그림 6 다이아그리드-가새튜브 구조 물량 비교

이가 감소하여 90층 이상의 건물에서는 다이아그리드보다 가새튜브 구조가 보다 경제적인 수 있다(Moon, 2008). 그림 6에서의 물량은 접합부 제작과 시공에 소요되는 비용을 고려하지 않은 것으로 이를 반영할 경우 더 낮은 층수에서도 가새튜브의 공사비가 보다 적은 것으로 평가될 수 있다. 따라서 경사기둥이 사용되는 비정형 초고층에서는 접합부 제작과 시공 성능의 확보 및 경제성을 향상시키는 것이 핵심 사항이 될 수 있다.

3.3 아웃리저(Outrigger)

중·고층 규모의 건물에서는 내부 코어만으로 횡력에 충분히 저항할 수 있으나, 초고층 건물에서는 건물 높이의 증가에 따라 보다 높은 횡력저항성능을 요구하게 되었고, 여러 횡력저항시스템들이 개발되고 적용되어 왔다. 아웃리저 시스템은 초고층 건물의 횡력저항시스템으로 가장 빈번하게 사용되는 시스템 중의 하나이다. 철골 트러스 혹은 RC 벽체로 구성된 아웃리저는 건물의 일부 구간에 설치됨으로써, 내부 코어와 외부 기둥들을 연결하는 역할을 한다. 내부 코어와 외부 기둥을 연결함으로써 외부기둥들을 횡력저항시스템에 포함시키며, 골조의 횡력저항성능을 향상시킬 수 있다. 세계에서 가장 높은 초고층 건물들인 버즈 두바이(UAE, 800m 이상), 타이페이 101(대만, 508m), 페트로나스타워(말레이시아, 452m) 등에서도 아웃리저를 사용하여 횡력저항성능을 향상시켰으며, 아웃리저에 의한 횡력저항성능 향상 및 최적화를 위한 여러 연구들이 국내외에서 진행되어 왔다(Taranath; 1988, Wu 등; 2003, Hoenderkamp 등; 2003, 이재철 등; 2005, 이유미 등; 2007).

비정형 초고층 건물에서는 정형 초고층에 비하여 아웃리저에 대한 추가적인 고려들이 포함되어야 한다. 앞서 언급한 바와 같이, 비정형 건물의 경우 외부 골조가 비정형 형상일지라도 내부 코어는 수직으로 정형적인 형상을 유지하는 경우

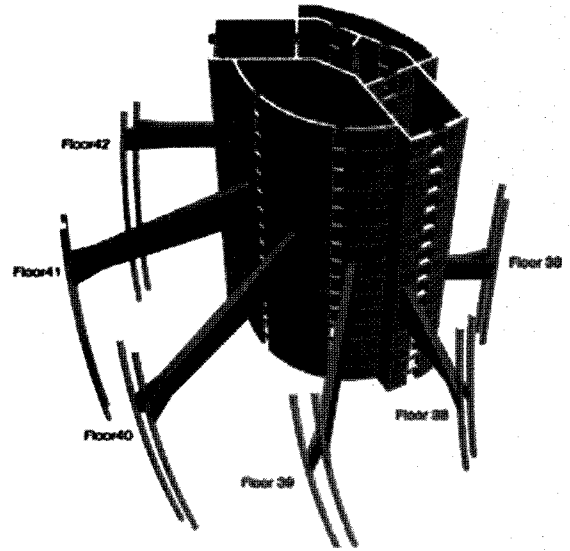


그림 7 경사기둥-내부코어 연결

가 일반적이며, 이러한 경우 외부 골조의 편심 및 전도 효과에 저항하는 내부 코어의 역할이 증가함으로써 외부 골조와 내부 코어를 연결하는 아웃리저의 결합 효과가 보다 중요하게 작용한다. 특히, 경사진 기둥과 수직 형상의 코어의 결합에 대한 구조적 성능의 확보가 필요하다(그림 7).

아웃리저의 횡력저항성능에 대한 기여는 비정형 건물의 분리형 코어 혹은 다중 코어 시스템에서 더욱 커질 수 있다. 단순히 코어와 기둥을 연결하는 경우에 비하여 코어들 간의 연결체 역할을 하는 아웃리저에 보다 큰 전단력이 작용하며, 아웃리저에 의한 결합성능이 횡력저항에 기여하는 효과가 매우 크다. 또한, 비정형 초고층에서 다수의 코어가 아웃리저에 의하여 결합됨으로써 코어와 아웃리저가 각각 메가기둥과 메가보의 역할을 하는 메가골조 시스템이 형성될 수 있다(그림 8). 따라서 기존의 아웃리저 횡력저항기여

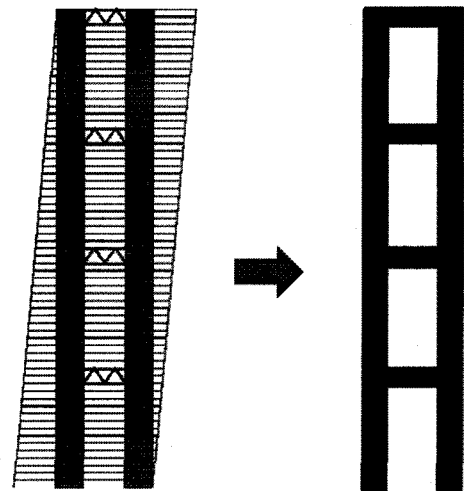


그림 8 코어-아웃리저의 메가골조 형성

도 및 최적위치 등에 대한 연구결과를 다중코어 시스템에 확대 적용하여 구조적 성능 및 최적화 방안이 검토되어야 한다.

이상과 같이 정형 초고층에 비하여 비정형 초고층의 경우 아웃리저에 작용하는 전단력 및 모멘트가 클 것으로 예상된다. 이는 RC 아웃리저 벽체에서의 철근 배근 과밀 문제, 철골 아웃리저 트러스에서의 양중 문제가 발생할 수 있으며, 필요한 경우 SRC 합성 아웃리저의 벽체의 적용 가능성도 모색되어야 한다. 또한, 비정형 건물의 시공 중 안정성을 확보하기 위하여 선시공된 코어와 외부 비정형 골조의 안정적인 결합이 중요하며, 아웃리저의 적절한 배치와 시공순서에 대한 종합적인 고려가 필요하다.

3.4 전이 구조(Transfer Structure)

비정형 초고층에서의 비정형 형상 및 골조들의 불규칙적인 배치로 인하여 전이층 혹은 전이구조가 빈번하게 사용될 수 있다(그림 9). 또한, 비정형 건물에서 전이 구조체를 통해 불균등하게 분포하는 중력하중을 하부층으로 보다 균등하게 전달할 필요가 있으며, 이는 기초 구조 시스템의 안정성과도 연관되는 문제이다. 중력하중의 균등한 분포를 위해 수직부재들간의 연결 및 중력하중 전이를 위한 깊은 보, 벽체, 가새 등이 추가적으로 사용될 수 있다. 그러나 별도의 추가적인 전이 요소를 사용하지 않고 횡력저항시스템의 구성요소인 아웃리저 혹은 벨트 요소가 전이 구조 요소로서 작용할 수 있으며, 이를 중력하중 조절을 위해 적극 활용할 수 있다. 중력하중을 지지하는 수직 부재들인 기둥 혹은 벽체들을 서로 연결하는 역할을 함으로써 아웃리저를 통하여 수직 부재들 간의 하중 전이가 이루어질 수 있다. 기둥들 간의 축력 전이를 통하여 메가 기둥을 형성하거나 평면 중심부에 집중된 하중을 가장자리로 전이시켜 수직부재들 간의 하중 분포를 균등하게 함으로써 파일축력

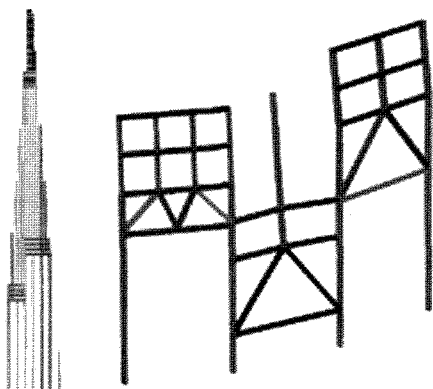


그림 9 기둥 축력 전이를 위한 가새구조

의 불균등 분포 및 기초의 부등침하를 최소화하는 등의 설계 의도에 따라 중력하중의 조절을 위하여 아웃리저를 적절하게 활용할 수 있다. 또한, 평면형상이 비정형적이거나 중력하중이 불균등하게 분포할 경우, 아웃리저에 의하여 중력하중 흐름을 변경함으로써 골조의 안정성을 향상시킬 수 있다.

이 때, 골조가 완전히 형성되지 않은 시공 중에는 수직부재들과 아웃리저 혹은 전이 구조체의 시공 순서에 따라 설계에서 예상하지 못한 하중 흐름이 발생하여 건물의 구조적인 안정성이 저해될 수 있으므로 시공 단계에서의 주요 구조 부재의 역할에 대한 분석이 요구된다.

3.5 바닥 가새(Floor Brace)

비정형 초고층에서는 빈번한 경사기둥의 설치로 인해 중력하중에 의하여 발생하는 수평력으로 인하여 수평부재(보, 슬래브)에 부가응력이 작용할 수 있다. 이러한 수평요소는 바닥하중에 의한 휨모멘트 뿐만 아니라 수평력을 받을 수 있도록 계획해야 한다. 특히 기둥의 각도가 크게 변화하는 층에서는 매우 큰 수평력이 작용하므로 이 힘이 코어 등의 횡력저항 시스템으로 전달될 수 있도록 수평부재에 대한 특별한 보강이 필요하다. 보의 단면적을 크게 하고 콘크리트 슬래브의 철근 보강 등을 통해 수평력에 저항할 수 있도록 설계하는 것이 일반적인 보강방법이다. 그러나 기둥의 각도가 크게 달라지는 층에서 발생하는 큰 수평력에 저항하기 위해서는 건물 테두리를 연결하는 철골 연결 요소와 바닥의 전단 보강을 위한 철골 바닥 가새 등과 같은 추가적인 보강이 필요하다(그림 10).

또한, 외주부 경사기둥이 사용되는 경우 내부코어와의

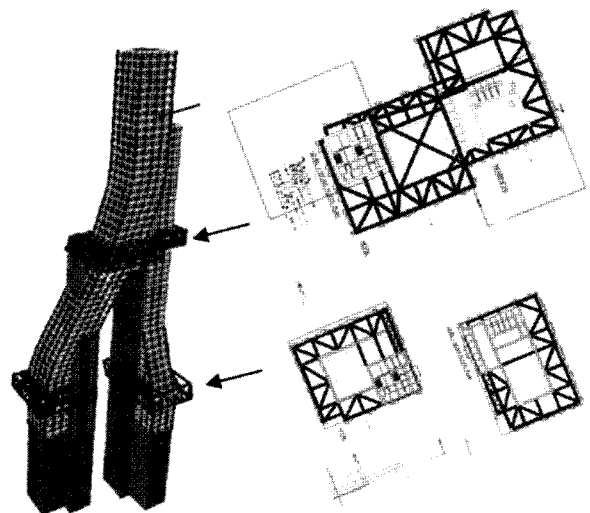


그림 10 바닥 가새의 적용

연결을 위하여 사용되는 아웃리저의 효율이 떨어질 수 있으므로, 바닥 가새를 이용하여 내부 코어와 외부경사골조를 결합하는 것이 기존 아웃리저의 대안이 될 수 있다. 바닥 가새의 경우, 슬래브 철근과의 간섭이 발생할 수 있으므로 구조적인 성능 뿐만 아니라 시공성 및 상세에 대한 검토가 필요할 것이다.

4. 시공 중 안정성 평가

4.1 시공 중 안정성

비정형 초고층의 증가 및 구역 계획에 의한 시공법이 보편화됨에 따라 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 하며, 실제 시공을 정밀하게 반영하고 예측할 수 있는 시공단계 해석 기법이 요구된다.

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 아웃리저(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 때문에 해당 부재나 모듈의 시공 혹은 접합 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.

표 1 시공 중 안정성에 대한 주요 영향 요소

주요 영향 요소	시공 중 구조적 영향
비정형 형상에 따른 중력하중의 편심	• 골조 횡변위 및 전도모멘트 발생 • 시공 중 골조 및 기초 안정성 저하
구역(zoning) 시공 계획	• 구역별 독립적인 시공에 따른 편심 증가 • 시공 중 골조 및 기초 안정성 저하 발생 가능
시공 스케줄 혹은 공법 변경	• 구조설계 미반영 요소 발생 • 시공 중 골조 안정성 저하 발생 가능
아웃리저 혹은 메가 부재	• 대규모 하중 부담 및 하중흐름 전이 역할 • 사용 개소가 적으며 골조 안정성 기여도가 큼 • 시공 시점에 따른 시공 중 구조 거동 영향이 큼

4.2 계측 및 보정 프로그램

극초고층화로 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 거동은 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 프로그램을 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 프로그램 수립 등의 안정성 향상을 위한 적절한 조치를 적용한다. 이러한 시공계획-모니터링-보정프로그램 수립의 프로세스(그림 11)는 시공 중 공법 및 스케줄 등 시공 조건의 변화들을 반영

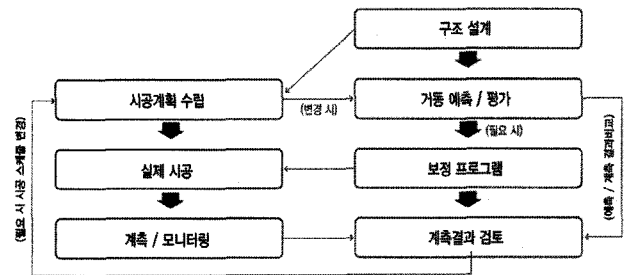


그림 11 시공계획-시공단계해석-모니터링-보정프로그램 수립 프로세스

하여 지속적으로 반복 수행되어야 한다. 이 과정에서 실제 시공을 반영한 정밀한 시공단계해석 기술, 시공 중 거동을 정확히 관찰할 수 있는 모니터링 기술, 그리고 정밀한 보정 기술이 수반되어야 한다.

4.3 시공단계해석

4.3.1 시공단계해석

시공 중 안정성을 평가/분석하고 시공계획을 위한 적절한 가이드라인을 제시하기 위해서는 시공단계해석을 통하여 시공 단계별 구조체의 거동을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 최근 구조해석 소프트웨어 및 하드웨어 등의 진산기술 발전을 기반으로 보다 정밀한 시공단계해석이 적용되어 가고 있다(그림 12). 실제 시공 방법 및 과정을 상세하게 해석에 반영할 수 있어야 하나, 해석 시간 및 용량 등의 문제로 인하여 입력 데이터의 가정 및 단순화의 과정을 거쳐야 하며, 출력 데이터를 보정하여 적용해야 하는 경우가 많다.

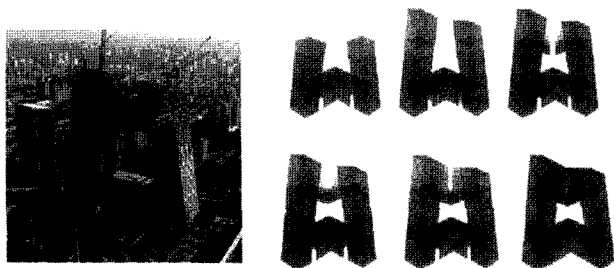


그림 12 시공단계해석의 적용

비정형 초고층의 경우 평면 내에서 하중이 불규칙하게 분포하며, 구역 계획에 의하여 구역별로 독립적으로 시공될 경우 각 인접구역 간의 시공 시간차로 인하여 중력하중 분포의 불균등이 심화될 수 있다. 이러한 인접 구역 간의 시공 시간차는 장기거동의 측면에서는 영향변수가 될 수 없지만, 시공 중의 단기 거동을 평가하기 위해서는 반드시 해석에 포함되어야 하는 변수이다. 따라서, 비정형 초고층의 시공 중 안정성평가를 위해서는 1개 층 전체를 동일한 시공 단계에 활성화하도록 단순화한 시공단계해석 보다는 실제 시공 구역을 그룹화하여 각 구역별로 독립적으로 활성화되는 구역기반(zone-based) 시공단계해석의 적용이 반드시 필요하다(엄태성 등, 2009).

또한, 시공 중 불안정성이 큰 비정형 초고층에서 횡력저항시스템이 완전히 형성되기 전까지 횡변위나 전도모멘트에 저항하기 위해 설치되는 가설 구조물이 골조 거동에 미치는 영향이 클 경우에는 이를 시공단계해석에 포함하여 안정성을 평가할 필요가 있다(그림 13).

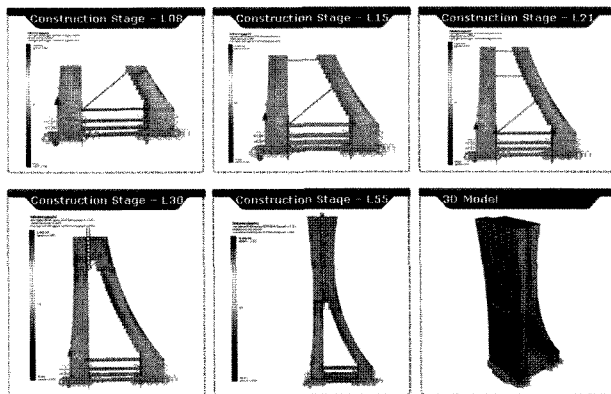


그림 13 가설 구조체를 포함한 구조 해석

4.3.2 기동축소 평가

기동축소 현상은 설계단계 뿐만 아니라 시공단계에서 지속적으로 고려되어야 할 중요한 문제이다. 시공단계에서 기동축소, 특히 부동축소 현상은 슬래브나 아웃리저 등의 구조부재에 부가응력을 발생시킴으로써 구조 안정성을 해칠 수 있으며, 엘리베이터, 수직배관, 내부 칸막이벽, 마감요소 등 설치의 저해 요소가 될 수 있다. 비정형 형상으로 인한 중력하중의 불균등 분포 및 구역 간의 시공 시간차가 발생하는 경우, 수직 요소들 간의 부동축소는 더욱 증가할 수 있으므로 시공 일정 계획과 함께 주의깊게 검토되어야 한다.

앞서 언급한 구역 기반 시공단계해석을 수행함으로써, 시공 시점이 상이한 구역 간 시공 중의 실제 부동축소 및 인접 지점간 레벨 차이를 정확히 예측할 수 있다. 층 기반 시공단계해석의 경우 부재 강성 및 하중 영향면적에 따른 하중의 불균형에 의한 부동축소만을 고려할 수 있으나, 구역 기반 시공단계해석을 이용함으로써 실제 시공 스케줄에 따른 구조체의 불균형에 따른 부동축소값을 추가적으로 반영할 수 있다. 이를 통하여 공계획에 따른 구조적 안정성의 영향을 분석하고 시공계획 수립 대한 가이드라인을 제시할 수 있다.

4.3.3 골조 안정성 평가

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 비정형 건물에서 빈번하게 발생할 수 있고, 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. 평면 내 각 구역 간 하중 불균형의 발생에 의한 골조의 기울어짐을 검토하기 위해서 각 시공 구역들의 스케줄을 적절히 반영하여 분석하여야 한다.

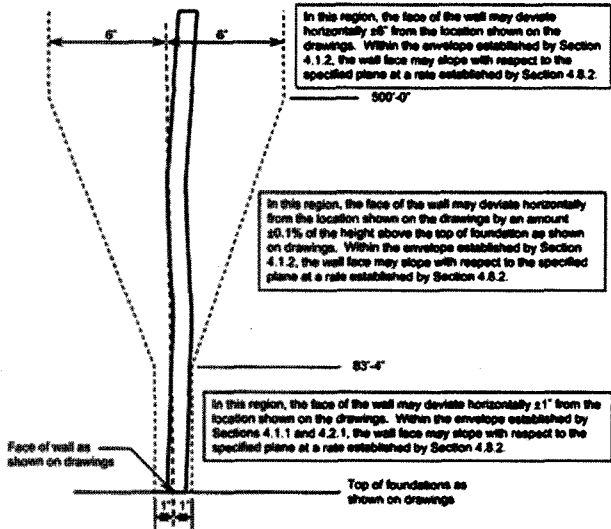


그림 14 수직부재의 수직도 허용 오차

특히, 각 시공 구획 및 주요 구조부재들(아웃리저 혹은 메가 부재, 전이 구조체)의 시공 스케줄의 변화에 따라 횡변위 및 기울어짐의 변화가 클 수 있으므로 시공 중 지속적인 시공 단계해석 예측/분석이 이루어져야 한다.

부등축소에 의한 골조의 기울어짐 검토를 위하여 각 층 중심의 횡변위값을 핵심 변수로 설정하고, 시공단계해석을 통한 횡변위값 예측 및 실제 시공 중 계측/비교를 통하여 골조의 안정성을 검토할 수 있다. ACI 117-06에서는 수직 부재의 횡방향 시공오차에 대한 가이드라인으로서, 25m 이상 높이에 대하여(기초 상부로부터의 높이)/1000 및 150mm 이내로 제시하고 있다(ACI Committee 117, 2006)(그림 14). 만약 허용 범위 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 보정 프로그램을 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.

4.3.4 기초 안정성 평가

비정형 형상에 의한 중력하중의 불균등 분포는 골조의 안정성 뿐만 아니라 기초시스템의 안정성을 크게 저하시킬

수 있다. 기초의 부등침하가 심화될 수 있으며, 심화될 경우 기초에 인발이 작용할 수 있다. 이러한 내용들은 구조설계단계에서 기본적으로 반영되어, 기초의 안정성이 저하되지 않도록 구조시스템 및 부재 설계가 이루어진다. 그러나 시공 중 전도모멘트에 저항하는 횡력저항시스템 혹은 중력하중 균등 분포 조절에 기여하는 전이구조체의 시공 완료 시점에 따라 설계에서 의도하지 않은 하중 흐름이 발생할 수 있다. 따라서 완공단계에서는 기초의 부등침하가 허용 범위 내에 있다고 할지라도, 시공단계에서는 과도한 부등침하가 발생할 수 있으므로 시공단계별로 기초의 침하 및 파일의 축력 분포를 지속적으로 검토하여야 한다.

초고층 건물에서 자주 사용되는 파일지지 전면기초(piled raft foundation)에서 파일은 중력하중이 집중되는 구역에 보다 조밀하게 배치되며, 각 파일의 구조성능이 충분히 발휘될 수 있도록 적절한 간격을 확보할 수 있어야 한다. 설계 의도에 따라서는 하중 흐름을 특정 위치로 유도하기 위하여 구역에 따라 파일 배치의 조밀도를 조절할 수 있으며, 이 경우 중력하중 전이 구조체를 통하여 하중 흐름이 원활하도록 계획되어야 한다.


파일은 작용 하중의 증가에 따라 할선강성(secant stiffness)이 감소하는 비선형적인 특성을 갖고 있다. 파일의 선단 지지와 측면 마찰의 영향을 함께 고려하여 비선형 강성을 결정할 수 있으나, 시공단계해석에 직접 적용하기에는 효율성이 떨어질 수 있다. 이러한 경우 파일을 별도의 요소로 모델링하지 않고, 상수값의 강성을 갖는 탄성 스프링 지지로 단순화하여 적용할 수 있으며, 파일 강성은 시공 중 처짐을 적절히 나타낼 수 있도록 사용하중에 해당하는 할선강성값을 적용하는 것이 바람직하다. 이러한 파일거동이 선형이라 가정한 해석은 부등침하를 과평가하여 고려하게 되므로, 이를 이용하여 골조의 안정성을 보수적으로 검토할 수 있으며, 이 경우 부적절한 시공계획에 의하여 파일의 축력 및 기초 침하의 불균등 분포가 심화되지 않도록 각 시공단계별로 정밀하게 검토하여야 한다.

5. 결 언

비정형 초고층 건물은 형상에 따른 편심의 작용 등으로 인하여 구조시스템 및 구조부재들에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 횡력저항시스템은 횡하중뿐만 아니라 중력하중에 대해서도 횡지지 성능을 제공할 수 있어야 하며, 경사기둥 및 다중코어, 전이구조 등이 자주 사용된다. 특히, 비정형 형상으로 인하여 구조시스템이 완전히 형성되지 않은 시공 중의 구조적 성능이 취약할 수 있다. 따라서 시공 특

성을 정밀하게 반영할 수 있는 시공단계해석을 통하여 시공 중 거동이 예측되어야 하며, 모니터링 프로그램 및 보정 프로그램과의 유기적인 연계를 통하여 구조적 안정성을 확보하여야 한다.

참 고 문 헌

1. 박효선, 손홍규, 김일수, 박재환, GPS를 이용한 고층건물의 수평변위 모니터링시스템, 대한건축학회 논문집(구조계), 21(5), pp.11-18, 2005
2. 백인희, 철골공사 N공법과 미국식 설치공법 적용으로 골조공사 층당 3일 사이클을 달성한 사례연구, 대한건축학회 논문집(구조계), 23(9), pp.231-238, 2007
3. 손상현, 박기용, 초고층 골조공기 단축방안 - 3 Day Cycle, 한국건설관리학회지, 8(3), pp.3-5, 2007
4. 신성우, 미래는 극초고층 수직 도시화 불가피, 한국건설산업연구원 건설저널, 71, pp.37-39, 2007
5. 엄태성, 김재요, 초고층 건물의 시공 중 구조적 안정성 검토를 위한 시공단계해석의 적용, 한국전산구조공학회 논문집, 22(3), pp.211-221, 2009, 2009
6. 이유미, 정철규, 유석형, 신성우, 벽식구조물의 구조요소별 횡변위 제어 능력 평가, 대한건축학회 논문집(구조계), 23(10), pp.11-18, 2007
7. 이재철, 정종현 초고층건물의 횡력저항요인에 따른 횡변위 저감 효과, 대한건축학회 논문집(구조계), 21(10), pp.11-18, 2005
8. 임보람, 김현수, 이성령, 김진욱, 현대 초고층 건축물의 형태적 경향에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(계획계), 24(12), pp.279-286, 2008
9. ACI Committee 117, Specifications for Tolerances for Concrete Construction and Material and Commentary(ACI 117-06), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p.70, 2006
10. Hoenderkamp, J.C.D., Bakker, M.C.M., Analysis of High-Rise Braced Frames with Outriggers, *The Structural Design of Tall Buildings*, 12(4), pp.335-350, 2003
11. Moon, K.S., Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings, *Architectural Science Review*, 51(3), pp.239-251, 2008
12. Taranath, B.S., Structural Analysis and Design of Tall Buildings, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1988
13. Vollers, K., Morphological Scheme of Second-Generation Non-Orthogonal High-Rise, CTBUH 8th World Congress., 2008
14. Wu, J.R., Li, Q.S., Structural Performance of Multi-Outrigger-Braced Tall Buildings, *The Structural Design of Tall Buildings*, 12(2), pp.155-176, 2003 

[담당 : 김현수, 편집위원]