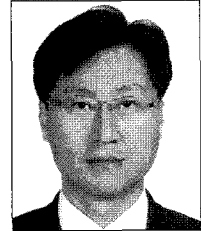


시공관정을 고려한 비정형 초고층구조물의 구현 기술

Structural Technologies Considering Construction
Sequency for Free Form Tall Building Structure



안 상 경*

* (주)삼성건설 아메드팀(초고층팀) 차장

1. 서 론

초고층 건축물은 그동안 건물의 높이경쟁을 통하여 국가의 경제력과 기술력을 대표해 왔다. 그러나 21세기 들어 초고층 구조물은 단순히 높이에 의한 상징성보다는 독창적인 조형물로서 상업적 또는 예술적 가치를 표현하기 시작하였다. 2008년 북경올림픽에 맞추어 완공된 북경의 CCTV건물(그림 1)은 지상 51층, 높이 234m로 두 개의 타워가 7자의 캔틸레버형태로 서로 만나게 되어있는 기하학적 형상을 가진다. 건물의 높이 면에서는 평범하지만 형태적인 측면에서는 이미 완공과

더불어 북경이라는 도시의 큰 상징물로 여겨지고 있다.

최근에는 뒤틀린 형태의 초고층 건물이 새로운 경향으로 나타났다. 그 예로 2005년 스웨덴에 완공된 190m 높이의 Turning Torso(그림 2)를 들 수 있다. 건물 하부에서 최상부까지 90° 회전하면서 올라가는 형상으로 대부분의 중력하중을 원형의 코어가 저항하고 외주부에는 중력하중을 거의 분담시키지 않는 방식으로 계획하여 이러한 형상을 가능하게 했다. 또한 건물 외곽에 브레이스를 두어 건축입면적 요소로 활용하면서 비틀림에 대한 강성을 높이도록 계획되었다. 이 외에도 뒤틀림형상(twist)은 최근 계획

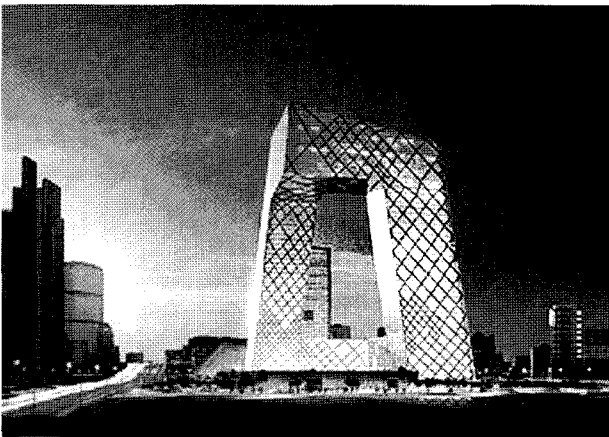


그림 1 CCTV 건물, 북경, 중국

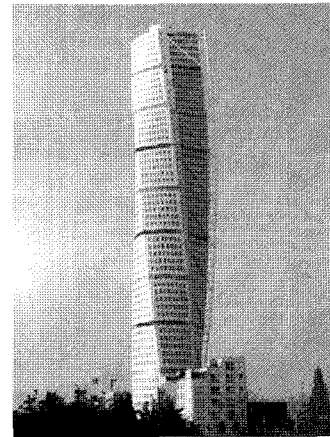


그림 2 Turning Torso, 말모, 스웨덴

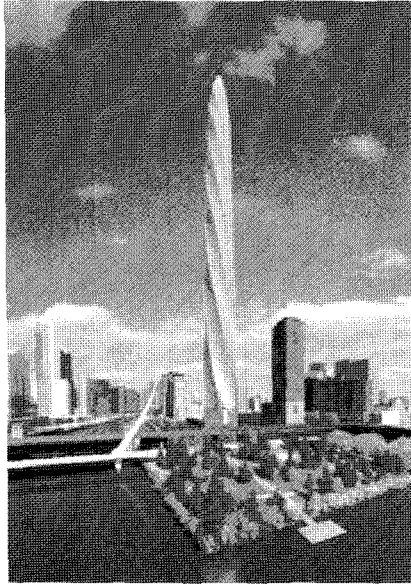


그림 3 시카고 스파이어, 시카고, 미국

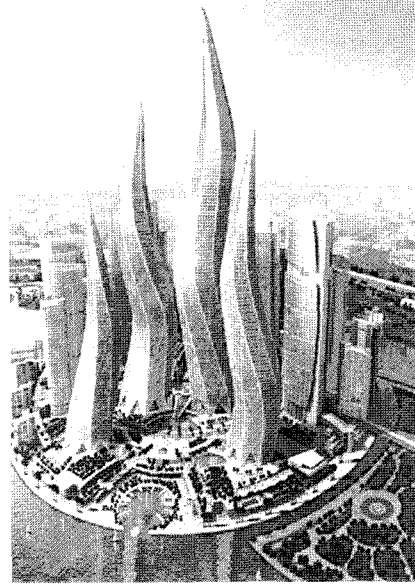


그림 4 Lancon Tower, 두바이, UAE

되는 많은 초고층 건물의 한 요소로 적용되고 있다. 이러한 형상은 초고층 건물의 경우 구조계획 시 풍하중이 가장 중요한 요소로 고려되는데, 이러한 뒤틀린 형태의 입면을 활용하여 바람의 흐름을 제어할 수 있다는 장점이 있다. 일반적인 사각평면 형태의 건물과 달리 뒤틀린 곡면으로 이루어진 건물의 입면은 풍하중을 자연스럽게 그 곡면을 따라 흐를 수 있도록 유도함으로써 후류(Vortex shedding)의 발생을 줄이고 건물이 저항해야 할 풍하중을 줄여줄 수 있다. 2007년 착공한 시카고 스파이어(Chicago Spire:그림 3)의 경우 뒤틀린 입면을 이용해 풍하중을 줄인 예이다. 610m 높이로 계획된 이 건물은 하부층에서 최상부까지 건물을 꼬아놓은 형상을 보여준다. 여기서 더 나아가 인간의 상상력은 더 새로운 형태의 건물을 추구하고 있다. 최근 아랍에미리트 두바이를 중심으로 상상 속에서만 가능했던 다양한 기하학적 형태가 실제 초고층 건축물로 계획되고 있으며 실제로 시공되고 있다. 두바이에 계획되어 있는 Lancon Tower(그림 4)는 앞으로 초고층 건물의 경향을 상징적으로 보여준다.

이러한 초고층 건물을 완공하기 위해서는 구조계획 시에 많은 시공적 요소가 고려되어야 하며, 또한 시공에 있어서도 상당한 기술력을 요구하게 된다. 이에 비정형성을 극대화한 자유로운 형태의 초고층 프로젝트를 가능하게 하기 위한 시공 과정에 필요한 구조적 고려사항에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 시공전 구조설계

초고층 건물의 구조 계획 시 가장 중요한 요소는 기본적인

로 횡력저항 시스템의 결정이다. 건물이 높아질수록 더 큰 풍하중의 환경에 노출되므로 매우 큰 풍력에 대해 안정적으로 저항할 수 있도록 하는 것이 구조계획의 가장 기본적인 개념이었다. 20세기 이후 건물의 세장비가 커짐에 따라 많은 새로운 형태의 횡력저항 시스템이 계획되어 왔다.

20세기 초에는 외주부에 기둥을 촘촘히 배치하여 모멘트 골조를 형성해 횡력에 저항하던 튜브시스템이 많이 사용되어 왔다. 그러나 외부에 기둥이 많아 전망이 좋지 않다는 단점 때문에 최근에는 거의 사용되지 않고 있다. 현재 가장 많이 사용되는 횡력저항 시스템은 코어 전단벽 시스템으로서 건물 내부에 수평강성이 매우 큰 전단벽으로 코어를 형성하여 횡력에 저항하는 방식이다. 코어 전단벽 시스템은 건물의 세장비가 커질수록 코어가 상대적으로 커지므로 실제 사용 면적이 줄어드는 단점이 있으며, 이를 해결하기 위해 외주부 기둥을 횡력 저항시스템에 포함시킬 수 있는 아웃리거 또는 벨트트러스를 활용하기도 한다. 또한 더 효율적인 횡력저항 시스템을 가지기 위해 메가 요소(mega columns & mega brace)도 활용되고 있다. 메가 요소는 중력 및 풍하중의 흐름을 인위적으로 제어하기 위해 사용하는 매우 강성이 큰 부재로 초고층 건물의 코너기둥과 외주부 브레이스에 사용되어 풍하중을 효과적으로 지지한다.

기존의 초고층 건물들은 대부분 내부 코어를 중심으로 대칭인 평면을 가졌기 때문에 중력저항 시스템의 선택에 있어서는 특별한 계획이 필요하지 않았다. 그러나 최근 계획되는 대부분의 초고층 건물은 코어를 중심으로 비대칭 형태를 가지며, 매 층 평면이 변하는 경우도 많이 있다. 최근 두바이에 계획 중인 비정형 평면이 매 층 변하는 한 초고층 건물에서 풍하중에 의한 탄성 횡변위보다 중력하중에

의한 탄성 횡변위가 더 크게 발생할 수도 있다. 중력하중에 의한 횡변형은 풍하중에 의한 변형처럼 단계적인 효과로 끝나는 것이 아니기 때문에 건물의 안정성에 큰 문제를 야기할 수 있다. 이는 새로운 추세의 초고층 건물 계획 시 중력저항 시스템 또한 횡력저항 시스템 못지않게 중요하게 계획되어야 함을 의미한다.

3. 시공과정을 고려한 구조설계 기술

기하학적 비정형성이 큰 초고층 건축물의 구조설계시에는 각 시공단계에서 발생할 수 있는 구조적 문제인 시공중 안정성 및 변형에 대하여 설계단계에서부터 고려해야 한다. 일반적으로 모든 부재는 완공된 상태에서 해석 및 설계가 이루어진다. 그러나 시공 방법에 따라서는 시공 중 발생하는 부재력이 완공 후 사용 시점보다 더 크게 작용하는 경우가 발생할 수 있다. 완공 이전 시점에서 주요 부재의 접합이 이루어지기 이전 단계에서의 하중의 흐름에 대한 고려가 필요하며, 이를 고려하지 않고 계획이 되었을 경우에는 시공중 안정성을 위해 엄청난 물량의 불필요한 가설구조물이 사용되기도 한다. 이를 해결하기 위해서는 계획단계에서부터 건물의 공법 및 공정을 선정하고 각 시공단계별로 부재를 설계하거나 필요시 가설구조물의 계획도 수행하여야 한다.

비정형성이 큰 고층건물에서 시공중 발생하는 변형은 가장 풀기 어려운 문제 중 하나이다. 초고층 건물에서 수직부재의 부등축소 현상은 가장 대표적인 변형에 관한 문제이다. 콘크리트부재의 부등축소에 대해서는 현재 해석기법이 잘 마련되어 있다. 다만 기존의 규준에서 사용되는 고강도 콘크리트와 맞지 않으므로 오차가 발생할 수 있다. 따라서

시공 중 발생 가능한 변형에 대한 해석, 보정 및 제측이 시공과 동시에 계속해서 진행되어야 한다.

완공을 앞둔 Burj Dubai(그림 5)는 평면이 16차례에 걸쳐 순차적으로 Set Back되어 건물이 나선형으로 축소되는 형상을 띄게 되어 있다. 이러한 구조물의 경우에는 Set Back이 발생하는 순간의 시공단계에서는 평면상 중력하중에 대한 편심이 발생하게 되어 편심에 대한 횡변위가 발생하게 된다. 특히 Burj Dubai와 같은 극초고층 건물의 경우에는 부재의 부등축소와 함께 시공단계별 횡변위에 대한 고려가 필수적인 요소이다.

현재 대부분의 경우에서는 부등축소현상에 관해서는 단순히 수직부재 간 상대적인 변형만을 해석하여 이를 보정하고 있다. 그러나 비대칭의 평면을 가진 경우나 대칭의 평면을 가졌더라도 면적이 넓어 시공 시 구간을 나누어 시공 시점이 다르게 계획되는 경우 수직부재의 부등축소는 건물 전체의 횡변위를 발생시키기도 한다.

두바이에 계획되었던 도너츠형상의 Icon Hotel(그림 6)은 시공단계에서는 매우 불완전한 비정형 구조물에 속하게 된다. 건물의 형상에서 알 수 있듯이 하부층을 시공중일 경우에는 그림 7(a)와 같이 입면의 외측으로 벌어지는 형태로 변위가 발생하게 되면 외측에 위치한 부재는 압축력을 받게 되고 외측에 위치한 부재에서는 인장력이 발생하게 된다. 시공단계가 계속되어 그림 7(b)와 같이 계속해서 상부층을 시공하게 되며 하부층에서는 전단계 보다 다소 작은 인장력과 압축력이 발생하게 된다. 그리고 전체적으로는 내부 부재들은 압축력을 외부 부재들은 인장력이 받게 된다. 이 경우 두 캔틸레버가 접합되기 이전 부재에 발생하는 부재력은 완공시점보다 과도하게 될 것이며, 또한 두 타워는 편심에 의하여 과도한 변형이 발생하게 될 것이다. 이런 상태에서 완공하게 되면 초기 계획되었던 원형의 형상을 갖는 것이 아니라 타워의 형상을 갖게 되므로 시공단계에

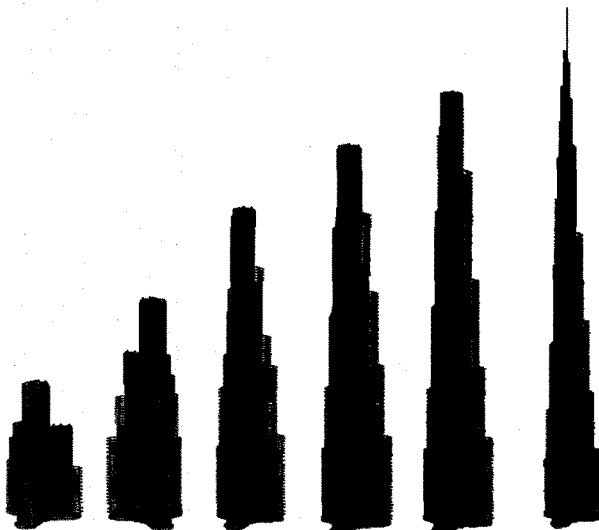


그림 5 Burj Dubai의 시공단계해석



그림 6 Icon Hotel, 두바이, UAE

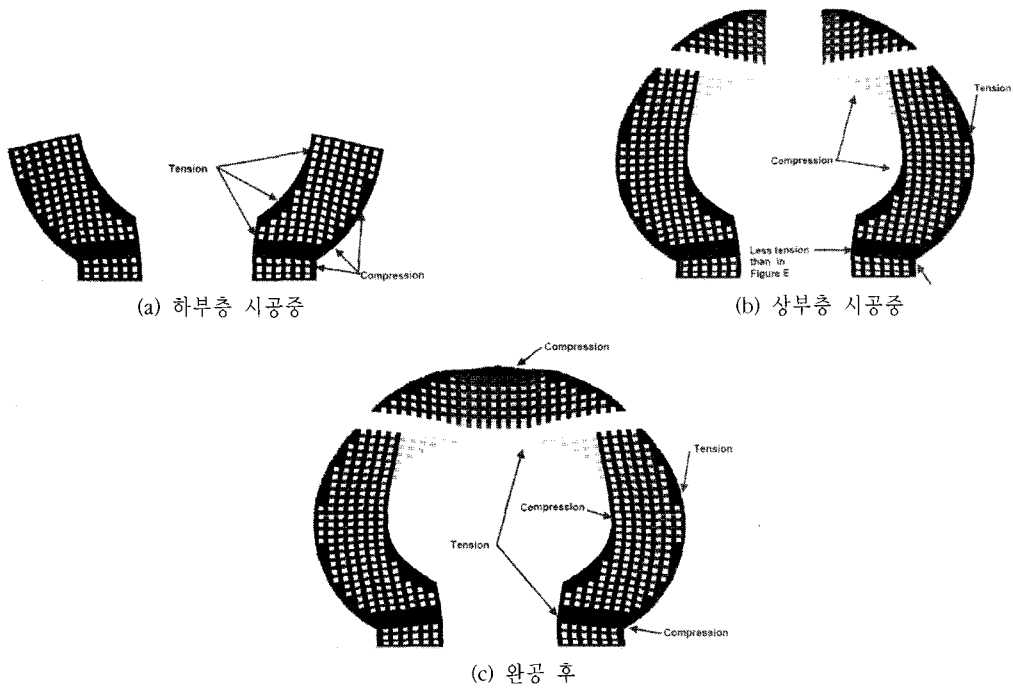


그림 7 시공단계별 발생하는 부재응력 및 변위의 변화

따른 변위에 대한 적절한 보정이 이루어져야만 한다. 또한 이러한 형상으로 인하여 시공단계에 불필요한 응력이 부재에 발생하게 되면 본 구조물 보다 가설구조물이 더 많이 사용되는 경우도 발생하게 되어 비경제적인 구조물이 되기 쉽다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 시공단계를 고려한 적절한 구조설계 및 가설구조에 대한 고려가 필요하다. 그림 8의 경우에는 하부층 시공단계에서 타워 양측을 연결하는 가설보를 설치하여 편심에 의하여 발생하는 변위를 억제하는 방법이다. 계속해서 상부층에 상부의 변형을 억제하기 위한 트러스를 설치하고 이후에 상부구조물을 완성하는 방법을 사용하는 것이다. 이러한 것도 앞으로 구조기술자들이 풀어야 할 문제들이다. 이러한 문제에 대한 접근방법에는 한 가지만 있는 것은 아니다. 그림 9와 같이 타워의 코어부분을 먼저 선행하여 타워부의 시공단계에서 발생할 수 있는 변형을 감소시키게 할 수 있다. 또한 구조시스템도 개선하여 별도의 가설구조물이 필요없게 하였다. 이러한 시공방법의 변경은 현장의 여러 가지 여건을 고려하여 결정하여야 할 것이다.

또한 시공 시 그 변형을 고려하여 부재를 제작하고 조립해야 한다. 시공 중 발생하는 변형을 보정하기 위해서는 정확한 시공단계해석과 정밀한 모니터링을 통한 계측, 그리고 시공시 해석 및 계측결과를 반영한 보정작업이 체계적으로 이루어져야만 한다. 시공단계해석 시 실제 시공시점,

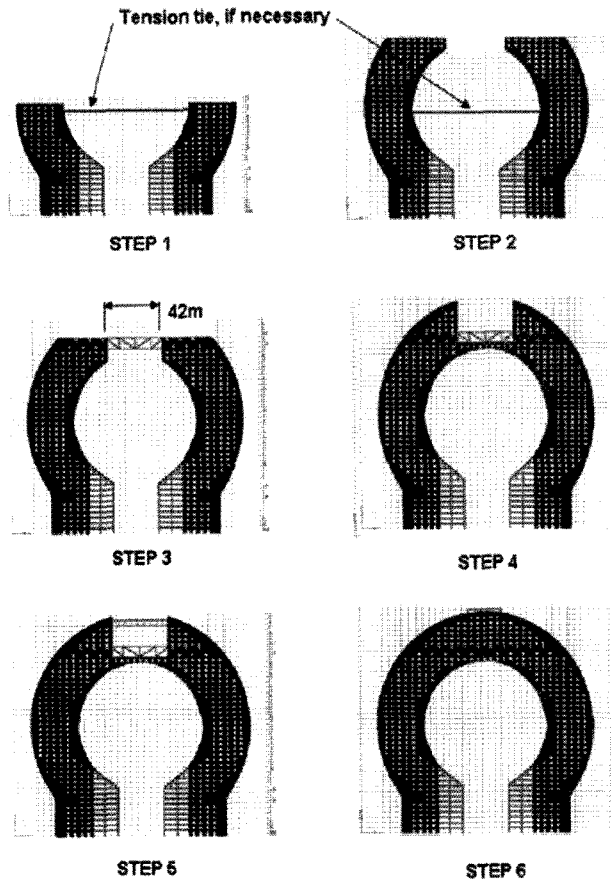


그림 8 가설구조물을 이용한 경우

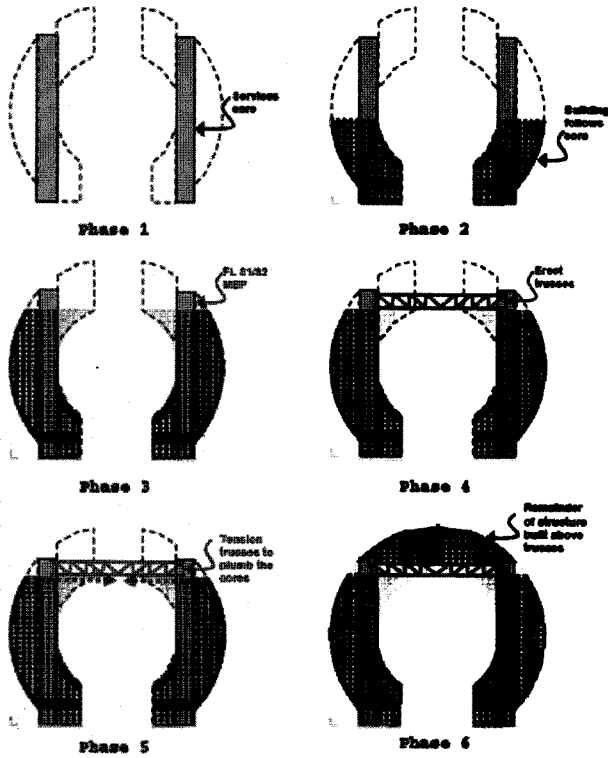



그림 9 구조시스템 및 시공순서 변경

실제 발생한 변위, 그리고 실제 시공시 보정량을 기초로 해석을 수행하여 그 해석결과를 다시 시공에 반영하여 보정이 이루어져야 한다. 이러한 과정을 계속 반복해야만 정확

한 시공이 가능하므로 계획 및 보정을 담당하는 시공현장과 해석을 담당하는 구조기술자간의 긴밀한 협조가 필수적인 것이다.

4. 결 언

새로운 경향의 다양한 기하학적 비정형 초고층 건물을 건축하기 위하여 고려해야할 시공단계에 따른 기술적 사항에 대하여 살펴보았다. 초고층 건물은 항상 새로운 도전이며, 따라서 항상 새로운 기술을 필요로 한다. 따라서 초고층 건물은 계획단계부터 구조시스템에 대한 연구, 시공성에 대한 연구가 이루어져야 하며, 그 기하학적 형태에 적합한 새로운 구조시스템과 시공방법이 개발되어야 한다. 현 기술수준을 토대로 건물의 형태를 한정하여 계획하던 시대는 이미 끝났다. 현재는 인간이 상상할 수 있는 모든 형태가 초고층 건물로 계획되고 있으며, 구조 및 시공 기술은 그 건물을 가능하게 할 만큼 발전해 가고 있다.

건물의 비정형성을 추구하면서 효율적이고 안전하게 계획하기 위해서는 구조기술자는 구조지식 이외에도 공법 및 공정에 대한 충분한 이해가 필요하며 건축가, 시공기술자와의 상호협력관계가 이루어져야 한다. 

[담당 : 김현수, 편집위원]