

Global Report

고층 건물의 건축양식 및 구조 시스템의 미래 전망

1. 개요
2. 소개
3. 일반적인 건축적 고려사항
4. 건축양식의 미래 전망
5. 구조적 고려사항
6. 구조시스템의 미래 전망
7. 결론

1. 개요

지난 수십 년 동안 전 세계적으로 고층건물의 놀랄만한 개발과 확장은 과거, 현재 및 미래의 도시화(urbanism) 속에서, 특히 밀도가 높은 도시지역에서 이러한 종류의 고층건물 역할의 중요성을 보여주고 있다. 고층건물의 건축적 특징 및 구조설계에 대한 과거와 현재의 트렌드를 기반으로 고층건물 건축의 미래를 예측할 수 있다. 즉, 제안된 설계방법 및 고려사항에 필요한 건축적 및 구조적 요건들이 결정될 수 있다는 것이다. 이 보고서는 2012년 말까지 건설된 높이 300M 이상의 73개의 가장 높은 건축물에 대한 건축적 및 구조적 고려사항에 대해 연구하였다. 수집된 정보를 기반으로 고층 건물에 사용된 가장 적절한 구조시스템, 구조 형태와 형상에 대한 미래 트렌드를 예측해 보고, 이들을 미래 설계를 위한 방편으로 권장코자 하는 것이다. 이 보고서에서는 다양한 설계 요건을 고려한 통합적 접근방식과 더불어 고층 건물의 건축적 특징과 구조설계의 트렌드에 대한 신중한 연구가 미래세대 고층 건물 설계의 효과적인 방법이 될 수 있음을 보여주고 있다.

2. 소개

지난 수십 년 동안 전 세계적인 고층건물의 개발과 성장은 특히 인구밀도가 높은 도시에서 토지 이용 및 건설비의 효율성이 있고 환경 피해가 적으면서 많은 임대수요가 있는 등의 여러 요인들 때문에 비롯된 것이다. 수년간 고층 건물의 수적 증가와 건물 평균 높이의 상승은 미래 도시화 및 건물에 대한 요구 조건과 구조설계 요건에 부합하는 측면에서의 고층건물의 역할에 대한 중요성을 보여주는 것이다. 총 대여가능 바닥면적은 건축 효율성을 기술하는 하나의 요소로 사용될 수 있으며, 한편으로 단위면적당 중량은 구조적 효율성을 나타내는 하나의 중요한 요소로 고려될 수 있다.

3. 일반적인 건축적 고려사항

고층 건물에 대한 정의는 상황과 기술(technology)에 따라 시간이 지나면서 변화되어 왔다. 세계 초고층 도시건축학회(Council on Tall Buildings and Urban Habitat - CTBUH)는 높이, 시공유형 및 기술 등과 같은 요소를 기반으로 하여 고층 및 초고층 건물을 정의한다. 현재 초고층 건물은 300m 이상의 높이를 가진 건물을 말한다. 이 보고서에서의 연구대상은 고층건물의 가장 중요한 건축적 요소들 중 일부이다.

3.1 초고층 건물의 위치와 높이

연구대상 73개의 초고층 건물은 17개국에 위치하고 있다. 그 국가들 중 3개국 즉 중국(홍콩 포함), UAE 및 미국이 전 세계 초고층 건물 숫자의 77%를 차지하고 있다.

고층 건물의 숫자는 중동과 동아시아 특히, UAE 및 중국에서 두드러지게 증가하고 있다. 높이 828m의 버즈 알 칼리파와 509미터 높이의 타이베이 101을 제외하고 건물의 높이를 고려하면 초고층 건물의 약 64%는 높이 300~349m 범위 내이다. 또한 이러한 초고층 건물의 증가 속도를 검토한 결과, 지난 십여 년 동안 그 증가속도가 아주 빨라진 것을 볼 수 있다.

3.2 기능

고층건물의 중요한 건축적 요건 중 하나는 기능이다. 고층건물에 있어서 두 개의 주요 기능을 대변하는 건물은 복합용과 사무실용 건물이 대표적이다. 이 두 종류의 건물이 전체 고층건물 수의 약 77%를 차지하고 있다. 통계 자료를 통해서 지난 10여 년 동안 복합용과 주거용 고층건물의 숫자가 급속한 증

가를 명확히 나타내고 있다. 한편 사무실용 고층 건물 숫자의 증가는 다소 완만했다. 이러한 사실들은 미래 고층건물의 필요한 건축적 특징과 건물 설계 및 시공 요구조건의 결정에 있어서 중요한 영향을 미칠 수도 있다.

3.3 기본 평면(Base Plan)

고층건물의 형상과 모양을 나타내는 중요한 건축 요소 중 하나는 기본 평면의 형상이다. 이 보고서에서는 그 요소를 다음 여섯 가지 기본적인 형태로 분류코자 한다. 즉 직사각형(사각형), 타원형 및 원형, 곡선형, 삼각형, 다각형 및 평행사변형으로 분류한다. 이러한 분류에서 기본 평면에 약간의 변형은 별도의 그룹으로 고려하지 않았다. 또한 버즈 알 칼리파(Burj Al Khalifa), 롱시 국제호텔(Longxi International Hotel) 및 메나라 텔레콤(Menara Telecom) 등은 이 보고서에 표시된 여섯 가지 종류의 어떤 것에도 해당되지 않는 평면형상을 갖는 것으로 구분하였다. 자료에 따르면 타원형과 원형의 고층 건물은 지난 10년 동안 완만한 성장세를 나타내었다. 그러나 사각형의 고층건물은 여전히 가장 일반적인 평면 형태 중 하나이다. 원형 고층건물 숫자가 증가한 주요 이유 중 하나는 이러한 기본 평면의 형태가 고층건물의 풍하중을 감소시킬 수 있는 공기역학적 특성에서 비롯된 것일 수 있다.

3.4 형태(공기역학적 및 기하학적 관점)

형태의 분류에 있어서 고층건물에 적용된 다양한 종류의 공기역학적(기하학적) 변형형태도 고려코자 한다. 기후 변화로 풍속의 증가와 전례가 없는 건물의 높이와 그에 따른 풍압의 증가로 인한 외력과 관련하여 설계자들은 건물의 설계 프로세스와 건물자체의 효율성을 향상시킬 수 있는 고층건물의 건축적 및 구조적 전략들을 고려할 필요가 있다. 바람의 영향을 제어하기 위한 건축적, 구조적 전략들 모두 고려되어야 하며 가능한 동시에 고려하는 것이 바람직하다. 테이퍼형이나 셋백형(tapering and setback) 처럼 고층 건물의 형태나 모양을 공기역학적 형태로 설계하거나 수정하는 것도 건축적 개념으로 고려된다. 이러한 건축적 개념은 공기역학적(기하학적) 수정작업이라 부를 수 있다.

일반적으로 공기역학적(기하학적) 수정작업의 전략은 기본적으로 바람의 영향을 줄이기 위한 사전 예방적 그리고 수동적 건축개념으로 고려된다. 공기역학적 수정작업은 매크로와 마이크로(macro and micro)로 크게 두 부문으로 나눌 수 있다. 테이퍼형이나 셋백형 및 트위스트형(tapering, setback and twisting)과 같은 매크로 수정작업은 건물의 주요형상에 기본적인 영향을 미친다. 반면에 모서리 수정(corner modifications)과 같은 마이크로 수정 작업은 건물의 기본 형태와 모양에 영향을 주지 않는다.

바람의 영향과 건물의 응력을 감소시키는 이러한 건축적 전략의 영향들을 입증한 많은 논문들은 본문 참고자료 12, 11, 9, 6, 10의 문서에서 참조할 수 있다. 그러나 본문 참고자료 13번과 같은 몇몇 연구 문서에서는 일부 수정작업들이 비효과적이고 심지어 풍하중 거동에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 모든 고층 건물의 케이스와 상황에 따라 모든 공기역학적 수정작업의 개념이 장점을 가지고 있다는 분명한 공감대는 없는 것으로 보는 것이 적절하다.

통계자료에 따르면 과거 10년 동안 곡선형태의 고층건물 숫자의 급속한 증가를 볼 수 있으며 이는 차세대 고층건물에 대한 예측이 가능하게 하고 있다. 또한 1975년부터 1999년까지 셋백 형태를 가진 고층건물의 숫자가 수정작업을 하지 않은 건물보다 더 많았다.

테이퍼형도 일반적으로 횡방향 하중과 관련된 형태를 만드는 중요한 개념 중 하나이지만 최악의 시나리오는 매크로 수준의 아무런 수정작업도 없는 고층 건물의 숫자를 보는 것이다.

고층건물도 마이크로 수준의 공기역학적(기하학적) 수정작업을 기반으로 코너 후퇴형(corner recession), 코너 라운드니스(roundness) 및 코너 컷(cut) 등 세 개의 주요부분으로 나눌 수 있다. 이러한 수정작업은 가장 일반적인 것들이다.

많은 연구를 통해 풍력의 영향을 감소시키는데 미치는 영향과 그로 인한 고층건물의 기저부분 전단력과 모멘트가 감소하는 것으로 밝혀졌지만 고층건물의 약 60% 정도는 어떠한 종류의 마이크로 수정작업도 하지 않았다는 것은 중요한 고려사항이다.

4. 건축양식의 미래 전망

미래 고층건물을 위해 제안된 새로운 개념적 설계는 추세 연구를 기반으로 하여 차세대 고층건물을 예측을 통해 확인할 수 있다. 밀라노 타워(Daniel Libeskind's Fiera Milano Tower)와 파 타워(Morphosis' Phare Tower in La Defense)는 실제로 이러한 사실을 확인하고 있다.

본 연구에서 수집된 정보를 기반으로 미래 고층건물을 위한 개념적 설계를 살펴보면, 차세대 고층건물의 미래 건축동향이 공기역학적이고 곡선지향적인 형태와 형상이 될 것이라는 것은 의심할 여지가 없다.

고층건물에 대한 바람의 영향과 관련 향후 동향과 관련된 사유를 확인하기 위해 언급할 만한 두 가지 중요한 사실이 있다. 첫째 고층건물에 있어서 건축적으로 바람을 회피할 수 있다면 바람의 영향을 줄일 수 있다. 이러한 사실은 건축가에 의해 설계된 건물의 형태와 기하학적 형상 효과의 중요성을 보여주는 것이다. 가장 유명한 고층건물의 대부분의 경우에서 이러한 공기역학적으로 유리한 형태가 선호되며 그 효과성은 대단히 중요하다. 예를 들어, 타이베이 101 건물의 코너 수정으로 원래 사각형 단면과 비교하여 건물 하단부 모멘트 값이 25% 감소되었다.

둘째, 바람을 “흐트러트리는 것(confusing)”은 바람의 영향을 감소시킬 수 있는 아주 효과적인 해결책이다. 공기역학적인 형태는 바람에 대한 반응이 예측할 수 없는 편이며, 일반적으로 특히 와류발생 부분에서 바람 방향 및 직각 방향의 영향 모두를 감소시킨다. 이러한 예기치 않은 거동을 더 잘 이해하려면 불규칙한 공기역학적 형태가 고층건물의 구조체에 집중적인 영향을 미칠 수 있는 바람의 집중을 회피하고 분산시킬 수 있다는 것을 설명할 필요가 있다. 따라서 이러한 형태는 풍하중 영향을 감소시키고 건물의 영향을 제어하는데 유리할 수 있다.

차세대 고층건물을 예측하기 위해서 구조설계의 고려사항도 고층건물의 형태 추이와 관련하여 연구되어야 하고 미래 추이도 살펴보아야 한다. 특히 이 보고서에서는 횡력 저항성능(lateral load resisting capabilities)에 대한 구조용 재료와 시스템을 살펴 볼 것이다.

5. 구조적 고려사항

중력하중 이외에도 고층건물은 효율적인 방법으로 풍력, 지진 등으로 일어나는 횡력에 견디어내야 한다. 대부분의 경우 고층 건물은 1단 고정(역주, 프리스탠딩(free standing)) 캔틸레버처럼 거동 한다; 고층건물은 바닥에서부터의 높이 비율이 증가함에 따라 횡적 하중에 더 민감하게 된다. 고층건물의 구조

설계 및 분석에서 바람과 지진의 중요성과 관련하여 다음과 같이 나타낼 수 있다: 풍압에 의한 고층건물 기저부의 전단력이 지진에 의한 것 보다 더 크게 고려되어야 한다. 따라서 주횡력 저항시스템(main lateral force resisting system)은 세부적인 연성이 지진요건에 맞게 고려되어야 하지만 풍압의 크기를 고려해야 한다.

따라서 고층건물의 설계에 있어서 바람이 중요한 역할을 한다는 것은 명확하다. 고층건물에 바람의 영향과 그에 따른 응력을 감소시키기 위하여 고려되어야 할 두 가지 주요 이슈사항이 있다. 이 두 가지 이슈는 건축적인 이슈와 구조적인 이슈이다. 건축가들이 고층건물의 형태와 형상을 적절히 고려함으로써 그리고 구조전문가들이 구조시스템을 적절히 고려함으로써 바람의 정적 및 동적 영향을 완화할 수 있다. 계획 초기단계에서부터 구조적 및 건축계획 측면을 고려하는 것은 설계 프로세스의 필수 요소이다.

5.1 구조재료(Structural Material)

일반적으로 구조재료를 선택하는 것은 기능, 구조시스템, 재료의 가용성 및 건설가능성과 같은 요건에 달려있다. 복합재료를 사용하면 강철이나 콘크리트와 같은 재료의 장점을 모두 누릴 수 있다. 이에 따라 이 복합재료로 건설된 고층건물은 전체의 약 44%를 차지하고 있으며 강철만을 사용한 건물은 전체의 15%에 불과하다는 것은 그리 놀랄 일이 아니다.

5.2 횡력 저항 구조 시스템(Lateral Load Resisting Structural Systems)

구조물을 보강하는 것은 횡력에 견딜 수 있도록 고층건물을 제어하는데 사용되는 초기방법들 중 하나이다. 단면이 작고 높은 고층건물 구조체를 보강하는 것은 만약 그 건물이 적은 재료로 궁극적으로는 저렴한 비용으로 횡력 저항 구조 시스템으로 건설될 수 있다면 효율적일 수 있다. 일반적으로 횡력 저항 구조 시스템(lateral loads resisting structural systems)은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 즉 기본적으로 사용되는 횡력 저항 구조 시스템이 건물 내부에 있는지 외부에 있는지에 따라 구분되는데, 이는 구조 시스템의 주요 부재의 위치가 구조 내부에 있는지 또는 구조 외부에 있는지를 기반으로 나눌 수 있다. 내부 구조 시스템(interior structural system)은 건물 외곽의 횡력 저항구조에 작은 구성부재들(minor components)을 가지고 있는 반면에 외부 구조시스템(exterior structural system)은 건물 외곽의 횡력 저항구조에 큰 구성부재들을 가지고 있다. 이 보고서에서는 코어지원 아웃리거 시스템(outrigger system)과 다이아그리드 시스템(diagrid system) 만을 간략하게 설명코자 한다.

5.2.1 코어지원 아웃리거 시스템(Core-supported outrigger system)

내부 시스템 중 코어지원 아웃리거 시스템은 양 그룹의 어떤 쪽으로도 고려될 수 있으므로 내부구조 시스템과 외부구조 시스템의 경계로 고려될 수 있다.

이 시스템은 종종 아웃리거 레벨에서 외곽의 대형 기둥나 또는 벨트트러스(belt trusses)를 필요로 한다. 아웃리거 시스템의 이러한 요소들은 건물 형태(예 : First Wisconsin Center)에 포함되는 경우가 있다. 코어는 중앙에 위치할 수 있으며 양쪽에서 연장된 아웃리거와 연결될 수 있다. 경우에 따라서는 코어는 다른 쪽 건물 기둥에서 연장되는 아웃리거로 건물의 한쪽 면으로 만 연결될 수 있다.

코어지원 아웃리거 구조 시스템(core-supported outrigger structural system)에서 횡력저항 경로는 기존의 코어에서 그들을 연결하는 아웃리거를 통해 건물 외곽 기둥으로 연장된다. 코어 시스템과 아웃리거 시스템 조합의 다른 장점에는 외부 컬럼 간격이 심미적이고 기능적인 요건들을 쉽게 충족할 수 있으

며 건물의 외곽 프레임 시스템(building's perimeter framing system)이 고정식 연결을 필요로 하지 않는 간단한 격자구조로 구성될 수 있다는 것이다. 아웃리거 시스템은 150층 그 이상으로 까지 건물을 높일 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

아웃리거 시스템은 강철, 콘크리트 및 복합 건축 자재로 이루어질 수 있다. 아웃리거 시스템의 많은 기능적 이점과 장점들 때문에 이 시스템은 최근 전 세계적으로 고층건물에서 아주 큰 인기를 끌고 있다.

5.2.2 다이아그리드 시스템(Diagrid system)

다이아그리드 시스템은 수직 및 수평 구조부재가 없는 가새 튜브 시스템(braced tube system)으로 간주될 수 있다. 이 시스템은 고층 건물의 초기에 횡력에 저항하는 대각선 방향의 가새(diagonal bracing members)의 효과성을 알기 때문에 아주 빠르게 전 세계적으로 확산되었다. 그러나 대각선 방향 부재의 심미적 잠재력은 옥외 전망을 방해하도록 설계 및 시공되기 때문에 받아들여지지 않았다. 따라서 대각선 방향의 부재들은 일반적으로 건물 코어 내에 은폐시공 되었으며 외부에서 볼 때 건물 내에 감추어지도록 배치되었다. 이 시스템은 최근에 고층건물의 새로운 심미적, 건축적, 구조적 개념으로 사용되고 있다.

기존의 외부 가새골조 시스템(exterior braced frame system)과 현재의 다이아그리드 구조 사이의 가시적인 차이점 중 하나는 다이아그리드 시스템의 대각선 방향 부재들이 삼각형으로 균일한 구조형태를 이루고 있기 때문에 횡력 뿐만 아니라 중력을 연속적으로 전달 할 수 있어서 다이아그리드 구조물의 경우 거의 모든 기존의 수직 기둥들을 없앨 수 있다는 것이다. 기존의 골조튜브 시스템(framed tube system)과 비교하여 이 시스템은 다이아그리드 시스템이 대각선 방향의 부재들의 축방향 저항력으로 전단력을 저항할 수 있기 때문에 전단 변형(shear deformation)을 최소화하는데 훨씬 더 효과적이다. 반면에 기존의 튜브 구조는 수직 기둥의 휨과 수평 스패드럴에 의해 전단력을 전달하는데 이것은 다이아그리드 시스템에 비하여 덜 효과적이게 하는 것이다.

Swiss Re Building으로 알려진 런던의 St. Mary Axe는 2003년에 41층(180m)으로 건설되었는데 Norman Foster경에 의해 설계되었으며 이러한 구조 시스템을 사용하는 하나의 사례이다. 일반적으로 이 시스템은 곡선형 코너를 가진 건물의 경우 하중을 지속적으로 전달하는데 더 유리하다.

6. 구조시스템의 미래 전망

현 상황에서 고층건물에 가장 효율적인 구조시스템을 설계하는 것은 특정 프로젝트에 따라 다르다. 일반적으로 곡선형 및 공기역학적 형태를 가진 고층 건물의 수가 증가하는 것을 고려해 볼 때 다이아그리드 시스템이 기본 구조시스템으로 적용되는 경우가 많다. 사실 다이아그리드 시스템이 미래 디자인을 위한 가장 적절한 선택 중 하나가 되고 있다. 공기역학적이고 자유로운 형태를 가진 대부분의 고층건물은 이 시스템으로 설계될 것으로 예상된다. 왜냐하면 축하중 및 횡하중을 끊임없이 전달되는데 날카로운 모서리 없이 곡선 형태와 잘 조화되고 매칭 될 수 있기 때문이다.

직사각형 평면에 직사각형 건물의 경우 이 코너 부분을 없앤다면 이 직사각형 구조 시스템의 효율성을 감소시킬 가능성이 있다는 것은 중요한 점이다.

다이아그리드 시스템으로 2012년에 건설된 높이 400m의 도하 타워(Doha Tower)는 45층짜리 원통형

구조이다. 이 건물의 다이아그리드는 구조시스템으로서 뿐만 아니라 건축 질감의 볼륨을 제공하는 등 많은 특성을 제공한다. 현재 SOM이 설계하는 또 다른 유명한 고층건물은 롯데 수퍼타워이다. 이 건물은 높이 555m, 123층으로 2014년에 완공될 예정으로 다이아그리드 다중 평면 형태(diagrid multi planar facade)를 취하고 있다. 모양과 형태에 있어서 이러한 변형 사례들은 이 다이아그리드 구조 시스템이 미래 고층건물 설계에 쓰일 잠재력을 가지고 있다는 것을 나타낸다.

재료적 관점에서 이 시스템은 다양성을 가지고 있으며 강철재로만 제한되는 것도 아니다. 사실 구조설계 요건을 충족시킬 뿐만 아니라 건축적 아름다움을 표현해 내기 위한 새로운 설계방식의 접근은 철근 콘크리트를 사용하는 것이라고 본다. 이러한 새로운 개념으로 이 시스템은 대각선과 평행선 형태에 국한되지 않으며 다양한 형태의 변형을 만들어 낼 수 있다. 차드 오픈하임 건축과 YAS 컨설팅 엔지니어가 설계한 높이 115m의 25층짜리인 미국 마이애미의 COR 빌딩과 높이 102m, 23층짜리로 RUR 건축이 설계한 두바이의 O-14 건물 모두 횡하중 지지 시스템(lateral load resisting systems)으로 철근콘크리트 다이아그리드 컨셉을 사용하였다. 이러한 가능성은 다이아그리드 구조 시스템이 차세대 고층건물에 사용될 수 있는 또 다른 긍정적인 요소이다.

7. 결론

앞서 언급한 고층 건물의 최근 형태 및 구조 시스템의 사례들에 비추어 볼 때 고층 건물의 형태는 특히 지난 10여년에 걸쳐 직사각형 형태에 머무르지 않은 것을 알 수 있다. 이 연구를 기반으로 고층 건물의 건축적 형태가 곡선 지향적이고 공기 역학적이며 기하학적 형태로 가고 있다 할 수 있으며 건축물에 횡하중(lateral load)을 기반으로 한 가장 적합한 구조적 시스템은 다이아그리드 시스템(diagrid system)이 될 것이다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

7.1 풍력의 영향을 감소시키는 기하학적 수정작업의 효과와 건물의 기하학적 형태에 기초한 적절한 횡하중을 고려한 구조시스템을 결정하고 설계하는 것이 풍하중을 감소시키는데 중요하지만 건물 전체 비용과 구조적 하중의 효율성이 고려되어야만 한다.

7.2 고층 건물의 형태와 형상을 기반으로 가장 적절한 구조 시스템을 선택하면 건물의 효율성이 향상될 수 있다. 그것은 설계팀이 건축적 형태와 형상 및 구조시스템이 풍하중에 잘 견디고 상호 매치될 수 있도록 상호 관계를 고려하기 때문이다.

<원문제목> The Future Trend of Architectural Form and Structural System in High-Rise Buildings

<원문출처> College of Architecture, Illinois Institute of Technology, Chicago, USA