

수퍼 초고층 건물과 그 구조적 개념

Superskyscraper and its Structure

金昌壽 / (주)삼우종합건축사사무소
by Kim, Chang - Soo

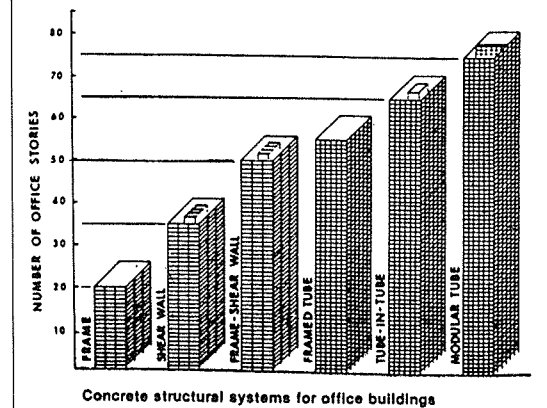
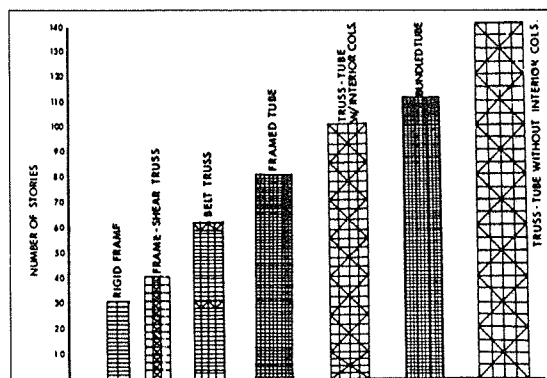
1. 역사적 배경과 초고층 건물

초고층 건물(Skyscraper)은 급속한 산업화와 도시화 그리고 대중교통 수단이 편리한 도심의 집중화에 대응하여 1880년대에 미국의 뉴욕과 시카고에서 출현되었다. 세계 최초의 초고층 건물은 100년전에 미국의 시카고에서 세워진 Home Insurance Building인데, 이 건물은 단지 10층 높이 밖에 되지 않지만, 현재의 초고층 건물을 가능하게 한 혁신적인 구조 방식이 사용되었다. 1885년 이전까지만해도 고층건물에는 건물 하중을 지지하기 위해 최고 1.8m 두께의 육중한 조적벽이 사용되었다. 그러나 시카고의 구조기술자 William L. Jenny는 철골조로 건물 하중을 지지하는 기발한 아이디어를 Home Insurance Building에 적용시켰다. Jenny의 구조 혁신은 몇년후에 등장한 전기 엘리베이터와 함께 미국 건축의 새로운 장을 열게 된다. 뉴욕과 시카고의 도심 地價가 폭등함에 따라 건물도 점차 높아지게 되었는데, 그 주요 과정을 보면, 20층의 Masonic Temple (1891년, 시카고 소재), 50층의 Metropolitan Life Insurance Tower (1909년, 뉴욕 소재), 60층의 Woodworth Building (1913년, 뉴욕 소재), 77층의 Chrysler Building (1929년, 뉴욕 소재), 102층의 Empire State Building (1931년, 뉴욕 소재) 등으로 이어진다.

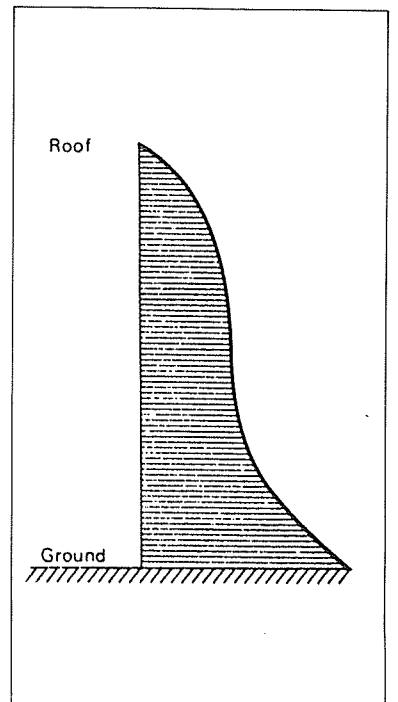
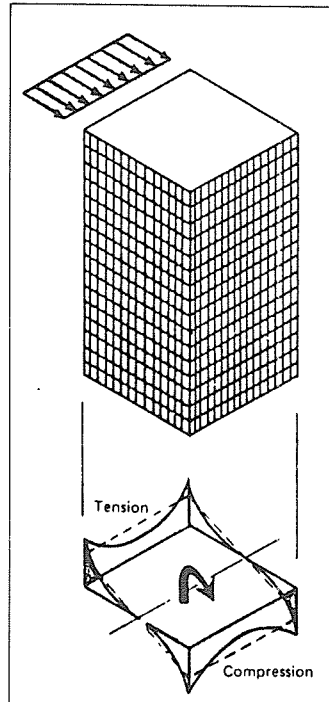
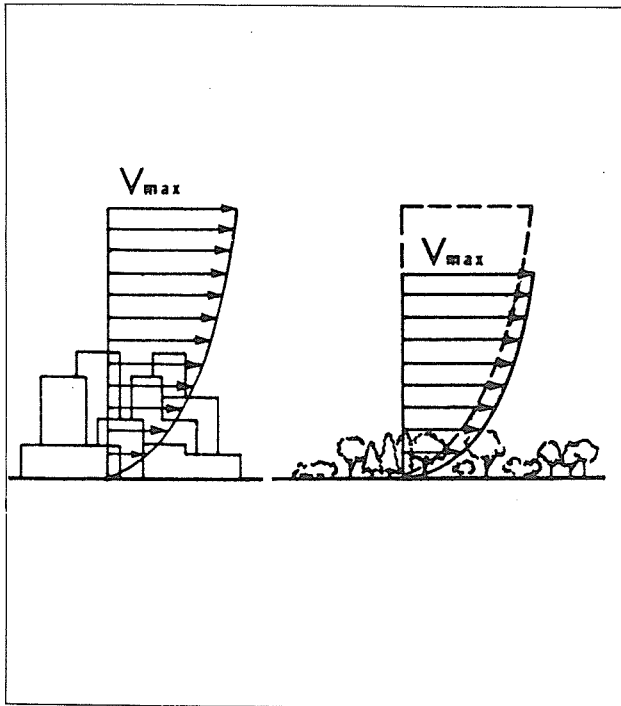
과거 20년 동안 초고층 건물의 높이에는 큰 변화가 없어서 아직도 110층의 Sears Tower (1973년, 시카고 소재)가 세계 最高의 건물로 남아 있다. 그렇지만 최근의 초고층 건물은 구조설계의 발전으로 여러가지 형태의 보다 우아하고 정제된 모습을 보이고 있으며, 특히 건축공사시 구조자재의 使用량이 놀랍게 감소되었다. 고속 엘리베이터, 고강도의 경량자재, 구조 시스템의 개발에 힘입어 현재 건축가들은 500층 규모의 수퍼 초고층 건물(Superskyscraper)을 계획하고 있다.

2. 초고층 건물의 구조적 개념

초고층 건물은 두가지의 주된 힘을 받게 되는데, 그 하나는 건물 수직하중이며 또 하나는 바람이나 지진에 의한 횡력이다. 그러나 강철과 콘크리트는 압축력에 매우 강하기 때문에 200층이상의 건물에서도 건물 수직하중은 구조상 그다지 큰 문제가 되지 않는다. 그러므로 구조적 안정성의 요점은 횡력의 해결에 있다. 30~40층 규모의 건물은 기둥과 보를 서로 剛接合시키는 剛性骨組(Rigid Frame)로 충분히 안전한 구조물을 만들 수 있다. (그림 1 참조) 그러나



① 초고층 건물의 구조방식



①

②

③

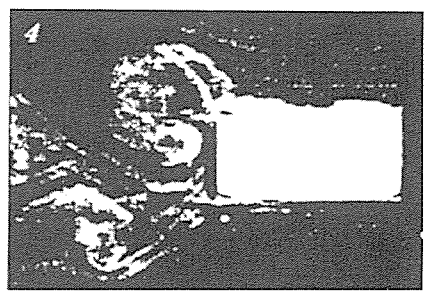
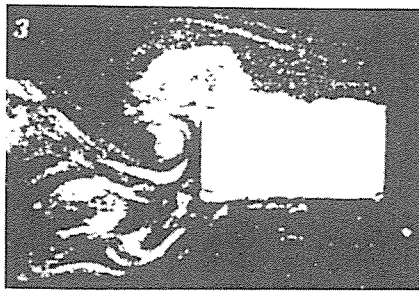
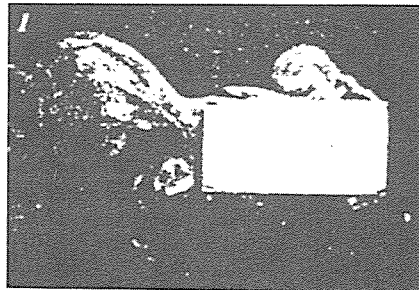
풍압은 지표면에서 높아질수록 기하학적으로 커져서 (그림 2 참조) 풍압을 받는 초고층 건물은 마치 건물 기초는 지면에 연결되고, 건물 최상부는 자유로운 하나의 캔틸레버 보 같이 작용하게 된다. 그렇게 되면 풍압을 받는 쪽의 외벽 기둥은 인장력을 받게 되고, 그 반대쪽 면의 외벽 기둥은 압축력을 받게 된다. 그리고 풍향과 평행한 두 외벽의 기둥들은 압축력과 인장력을 동시에 받게 되어 전단 (Shear) 변형을 일으키게 된다. (그림 3, 4 참조) 전단력에 대응하기 위해서는 외벽기둥들은 용벽이나 철골, 콘크리트 골조 혹은 대각선 部材 (Diagonal Braces) 와 상호 견고하게 연결되어야 한다.

초고층 건물의 설계를 위해서는 바람이 불 때 건물 주위에 발생하는 소용돌이 (Vortex Shedding) 현상에 대한 연구가 뒤따라야 한다. 이 소용돌이 현상은 건물의 幅과 풍속에 따라 달라지는데, 각각의 소용돌이는 건물을 스쳐 지나갈 때 마다 저기압을 형성하고, 이 저기압은 건물을 잡아 당기는 역할을 한다. (그림 5, 6 참조) 그러다가 어떤 풍속이 되면, 소용돌이가 규칙적으로 형성되면서 그 주기가 건물의 자연 진동주기와 일치하게 된다. 그렇게 되면 건물은 소용돌이에 휩싸이게 (Lock-in) 되어 풍향과 수직방향으로 점차 크게 진동되고, 마침내는 전복하게 된다. 구조 기술자는 바람터널 (Wind Tunnel) 속에 계획한 건물의 모형을 놓고, 여러차례의 실험을 통해서 건물을 소용돌이에 휩싸이게 (Lock-in) 하는 풍속을 결정한 다음, 그에 따라 건물의 最少 強度를 계산해 낸다.

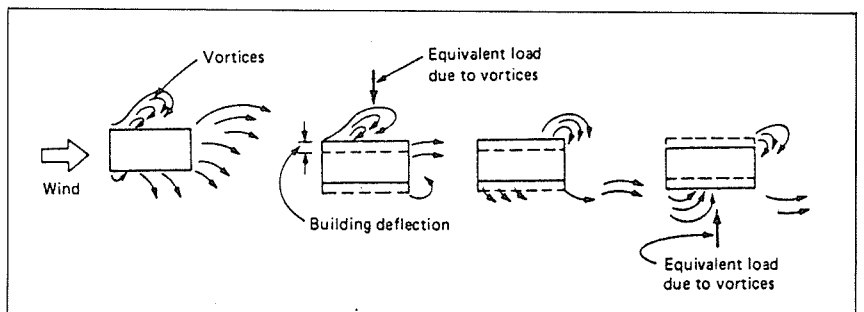
기본적으로 건물의 강도는 적용되는 구조방식에 달려있다. 그리고 구조설계의 목표는 건물이 충분히 안전하고도 또한 경제적이 될 수 있는 구조자재의 量을 산출하는데 있다. 예를들어, 뉴욕의 Empire State Building을 다시 지을 경우, 현재의 구조설계 방식을 적용하면 강철 사용량을 반으로 줄일 수 있다. 구조기술자의 입장에서 보면, 수퍼 초고층

- ② 고도에 따른 풍속의 변화
- ③ 풍압에 의한 응력 분포
- ④ 전단력의 외벽 분포
- ⑤ 소용돌이 (Vortex Shedding) 현상
- ⑥ 소용돌이 현상에 의한 건물의 진동

건물설계에서 가장 도전해야 할 특징은 건물의 높이가 아니라 건물높이와 건물 基部 (Base) 의 幅과의 비율, 즉 “縱橫比 (Aspect Ratio)” 이다. 幅이 넓은 基部는 하중을 넓게 분산시키고 안정성을 향상시키기 때문에 오늘날의 대부분의 초고층 건물은 6~8 정도의 縱橫比 (Aspect Ratio) 를 가진다. 200층 (약 720m) 의 건물의 경우, 안전상 6정도의 縱橫比를 갖는다고 보면, 약 120m의 基部가 필요함을 쉽게 알 수 있다. 그러나,



④



⑤

어느 누구도 창문에서 60m나 떨어진 곳에서 일하기를 원하지는 않을 것이다. 그래서 수퍼 초고층 건물을 설계하는 구조기술자의 목표는 10이상의 縱橫比를 가지고도 충분히 강풍에 견디어 낼 수 있는 안전한 건물을 설계하는데 있다.

3. 초고층 건물의 구조방식

과거 40년 동안, 초고층 건물 기술자들은 횡력을 지지하기 위한 구조방식으로 部材를 건물의 코어가 아닌 외주부에 보강시키는 방법을 고안하였다. 이 혁신적인 아이디어는 1960년대 초기 Fazlur Kahn에 의해 정립되었는데, 이 외벽이 보강된 구조물은 마치 캔틸레버 보처럼 거대한 속이 빈 튜브와 같이 작용한다. 그래서 횡력에 의한 휨을 지지하는 부분은 좁은 코어가 아닌 건물의 모든 외주부가 되는 구조방식이다.

다음은 초고층 건물에 적용되는 여러가지의 구조방식인데, 자세한 구조적 해석은 차후로 미루기로 하고, 여기에서는 각 구조방식의 기본 개념과 그 효율성에 대해서 중점을 두기로 한다.

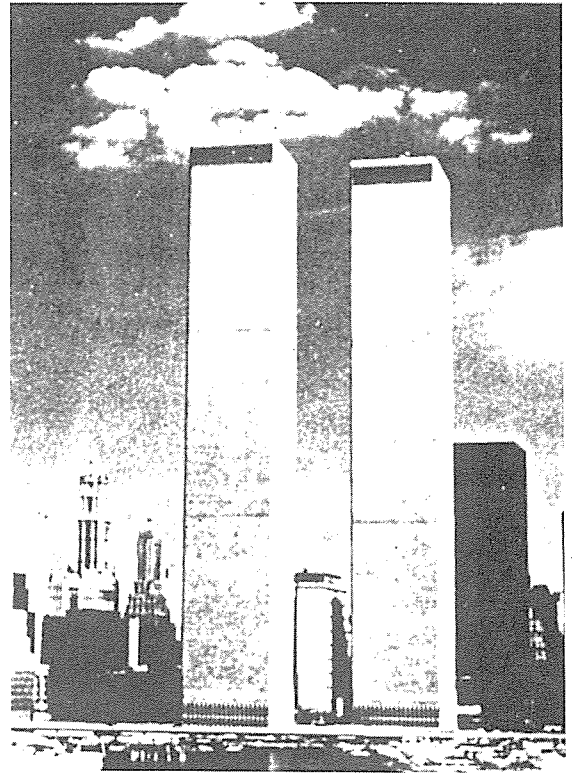
1. 骨組 튜브(Framed Tubes)

이 구조방식은 외벽에 기둥을 밀접하게 배치하고, 각 기둥을 스펀드럴 보와 剛接合시켜 횡력을 지지하는 방법인데, 가장 널리 알려진 골조 튜브 구조물은 뉴욕에 있는 110층의 World Trade Center이다. (그림 7 참조) 골조 튜브의 주된 결점은 건물의 강도가 밀접하게 놓여진 기둥과 스펀드럴 보(Spandrel Beam)와의 접합 정도에 달려 있다는 점이다. (그림 8 참조) 각각의 접합부는 전문가를 들여서 하나하나 剛接合하여야 하는데 초고층 건물 전체를 하기에는 너무나 많은 경비가 소요된다.

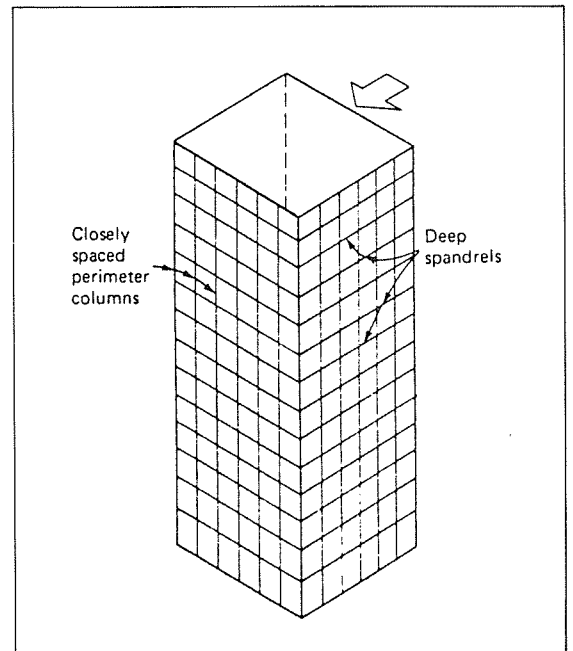
이상적으로 보면, 골조 튜브는 풍압에 대해 순수한 캔틸레버 보처럼 작용하여 휨에 의한 인장력과 압축력이 외벽 전체에 고르게 퍼져야 한다. 그러나, 보와 기둥으로 구성된 장방형 튜브는 단일체가 아니기 때문에 전단력은 각 모서리 부분에서 가장 크게 된다. (그림 3 참조) 이로 인해 기둥과 보에는 휨이 생겨 구조물은 변형된다. “전단 변형(Shear Lag)”이라고 알려진 이 현상은 골조 튜브의 효율을 감소시키는데 특히 최대 전단력이 생기는 구조물의 基部(Base)에서 가장 크다.

2. 트러스 튜브(Trussed Tubes)

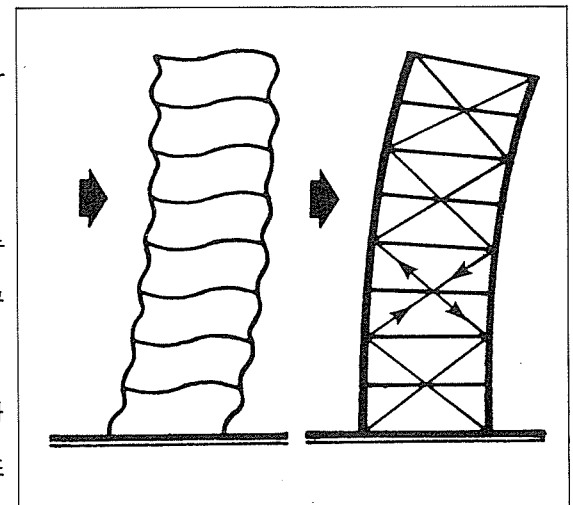
이 구조 방식은 Kahn에 의해 개발되었는데, 전단 변형을 최소화하기 위해 거대한 대각선 部材(Diagonal Braces)를 건물의 외벽 기둥과 상호 연결시키는 방식이다. 삼각형 형태는 본래 사각형 형태보다 강하기 때문에, 삼각형 부재를 가진 건물은 사각형 부재를 가진 건물보다 단단하여 부재의 사용량을 보다 감소시킬 수 있다. 건물의 대각선 部材는 어느 정도의 건물 수직 하중을 지지하고, 대부분의 풍압을 흡수하며, 튜브의 剛性を 증대시키는 등 여러가지의 기능을 하게 되는데, 그 결과 트러스 튜브 구조물은 거의 순수한 캔틸레버 보처럼 작용하게 된다. (그림 9 참조)



7



8



9

- 7 World Trade Center (뉴욕)
- 8 골조 튜브 개념도
- 9 트러스 튜브 개념도
- 10 John Hancock Center (시카고)
- 11 Citicorp Center (뉴욕)
- 12 Citicorp Center의 구조 개념도
- 13 Bank of China Tower의 구조 개념도
- 14 Sears Tower (시카고)
- 15 Sears Tower의 구조 모듈

트러스 튜브 구조물로 잘 알려진 건물로는 시카고에 있는 100층의 John Hancock Center와 뉴욕에 있는 59층의 Citicorp Center와 최근에 I. M. Pei에 의해 설계된 76층의 Bank of China Tower (홍콩 소재)이다. (그림 10, 11, 12, 13 참조)

3. 묶음 튜브(Bundled Tubes)

가장 잘 알려진 묶음 튜브 구조물은 시카고에 있는 세계에서 가장 높은 (1454ft) Sears Tower이다. (그림 14 참조) 튜브건물의 외주부가 너무 크게 되면 외부 트러스로는 전단변형을 除去하는데 충분하지 못하게 된다. Sears Tower를 설계하는데 있어 Kahn은 휨과 전단력에 대한 지지력을 보강하기 위해 각각의 사각 모듈 안에 내부 기둥을 밀접하게 배치하는 구조방식을 창안하였다.

이 구조방식은 구조 본래 형태의 손실없이 어떤 형태로든 조립 가능하고, 어느 높이에서나 개개의 모듈 높이를 조정할 수 있는 長點을 가지고 있다. 예를 들면, Sears Tower는 50층, 66층, 90층에서 모듈의 높이를 조정하여 건물의 형태를 변화시키고 있다. 이 구조방식의 단점은 모듈 외곽의 밀접한 기둥 때문에 각 층은 모듈 단위로 구획되어, 공간 활용 계획에 어느 정도 제약을 준다는 점이다. Sears Tower는 9개의 22.5m의 정사각형 모듈로 되어 있어, 각 층은 22.5 × 22.5m의 크기로 구획된다. (그림 15 참조)

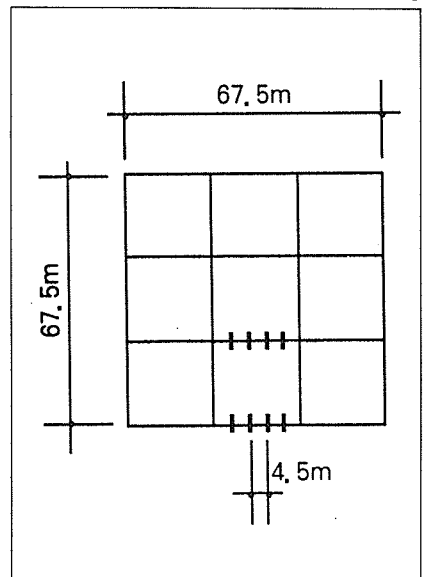
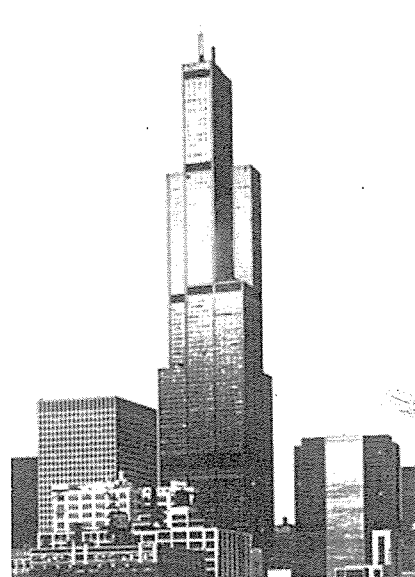
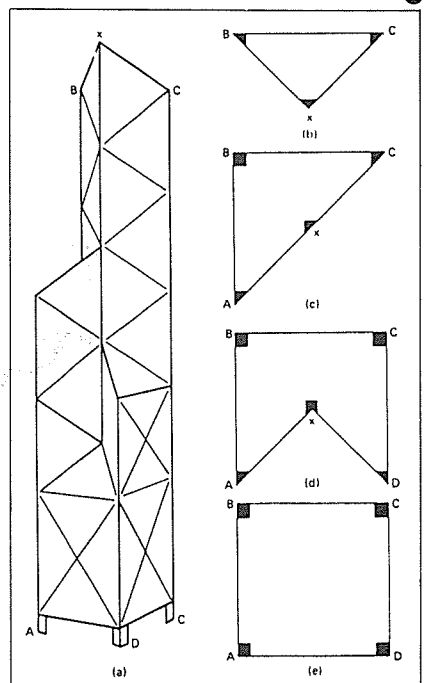
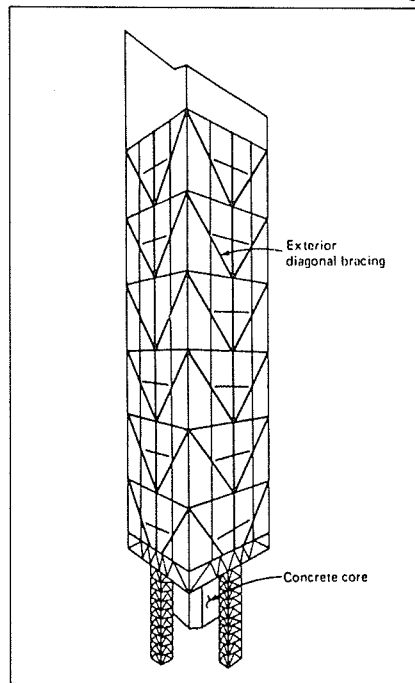
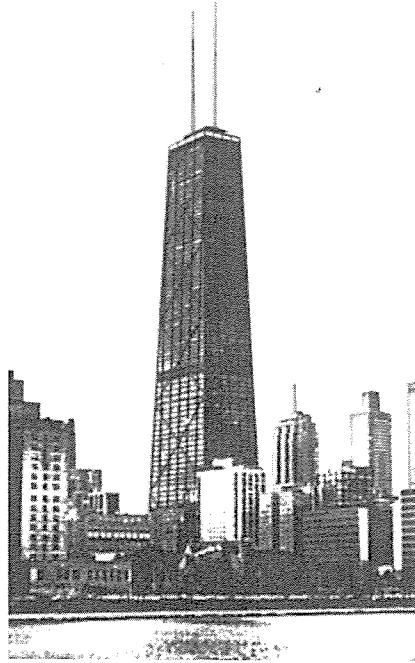
4. 내부적으로 연결된 외벽기둥 구조 (External Columns Internally Connected)

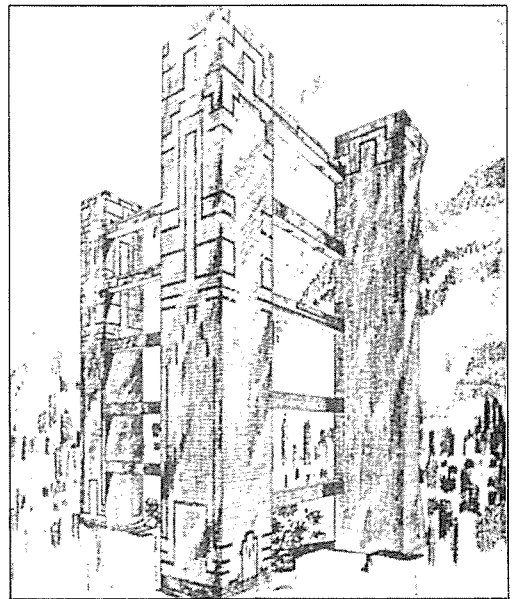
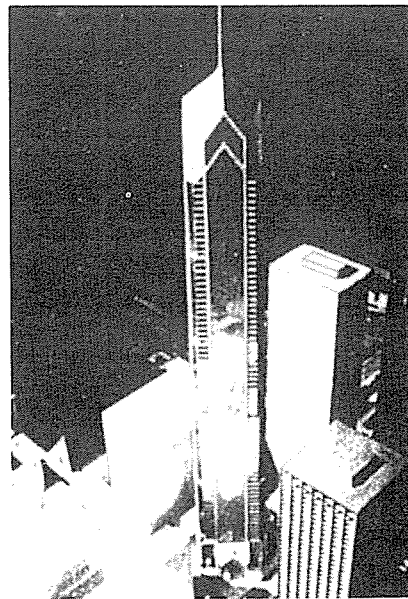
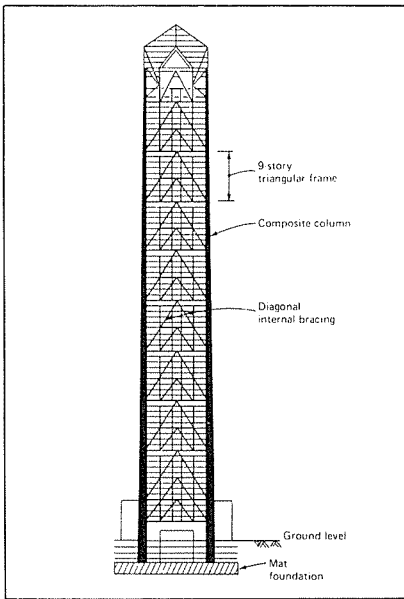
여기에는 두가지 방법이 있는데, 첫번째 방법은 내부보강 튜브(Internally Braced Tubes)로 대각선 部材로써 건물 양쪽 반대편의 기둥들을 상호 연결하는 구조방식이다. William LeMessurier는 82층의 Bank of Southwest Tower (휴스턴 소재)에 이 구조방식을 적용하였다. (그림 16, 17 참조) 7.4의 중형비를 가진 이 날씬한 건물은 휴스턴 지역의 허리케인으로 인한 극심한 진동에도 이겨낼 수 있도록 매우 강하게 설계되었다. 9층짜리 모듈을 8개 쌓아올린 이 건물에서 개개의 모듈은 두 종류의 거대한 삼각형 강철부재(Superdiagonals)를 포함하고, 이들 삼각형 강철부재는 모든 수직 하중을 8개의 거대한 콘크리트 기둥으로 전달하는 역할을 하며, 기둥은 휨을 이기기엔 충분하도록 넓은 간격으로 배치되어 있다. 또한 강철 대신에 고강도 콘크리트를 사용하여 기둥을 해결함으로써 상당한 공사비를 절약하였다.

두번째 방법은 비교적 낮은 빌딩을 위한 이중 튜브(Tube in Tube)인데, 이는 건물의 코어를 보강하여 건물 수직 하중과 횡력을 동시에 지지하는 내부 튜브로 작용하게 하는 구조이다. 코어의 네 모서리에 설치된 거대한 대각선 部材는 외부골조 튜브(Outer Braced or Framed Tube)와 연결되어 횡력에 대해 매우 效率的인 單一體로 작용하게 된다.

5. 초강도 골조 (Superframes)

Khan과 그의 동료 Hal Iyengar에 의해 고안된 이 구조방식은 8~12층 높이의 거대한 건물상자를 쌓아





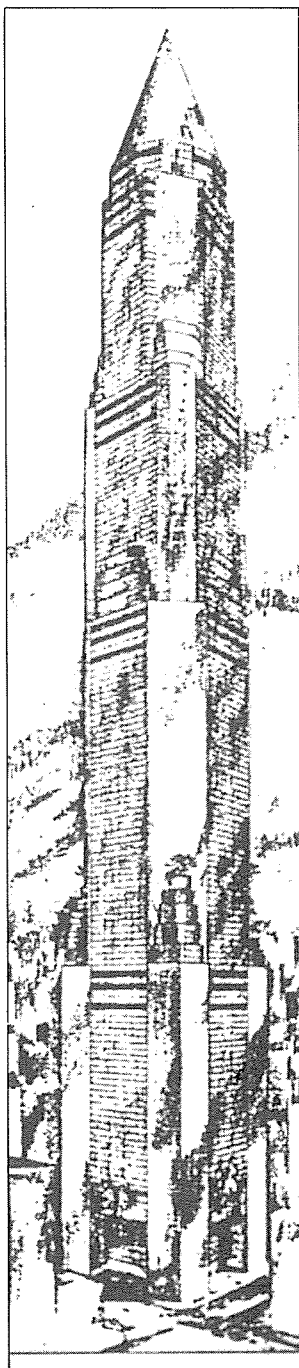
올리는 개념이다. 각각의 건물상자는 트러스 모양의 격자형 部材를 내부적으로 보강시킨 거대한 보와 기둥으로 구성되고, 또한 주된 구조 자재가 건물의 외주부에 집중되어 있어 횡력에 대해 강하게 작용한다. 튜브구조와 거의 같은 效率性을 가지지만, 건물의 모서리 부분에 構造資材를 집중시킴으로써 바람에 의한 뒤뜰림을 크게 줄였다.

초강도 골조의 주된 長點은 건물이 構造的인 면보다 美的인 면이 더욱 돋보인다는 점이다. 더구나 자연광을 직접 받아들일 수 있는 아트리움을 건물의 여러높이에 배치할 수 있어 건물내에 활기를 불어 넣을 수 있다. Vincent DeSimone은 초강도 골조를 적용하여 9의 종횡비를 가진 140층(540m) 높이의 수퍼 초고층 건물을 계획하였다. (그림 18 참조)

DeSimone은 또한 보다 혁신적인 개념을 가진 수퍼 초고층 건물을 개발하였다. 높이 600m의 수퍼 초고층 건물을 안전하게 지으려면 100m×100m 정도(종횡비 6)의 基部가 필요한데 이는 상가등을 임대하기에는 너무 넓은 면적이다. 그래서 DeSimone은 각각 16의 종횡비를 가진 4개의 가느다란 건물을 각각의 대지 위에 짓고, 여러개의 스카이웨이(Skyway)로 약 20층 높이마다 건물을 상호 연결하는 방법을 고안하였다. (그림 19 참조) 그 결과, 건물군은 6의 종횡비를 가진 내부가 비어 있는 거대한 초강도 골조로 작용하게 된다. 이 구조방식의 장점은 4개의 건물중 어느 한 건물에서 화재가 발생했거나 정전이 되어도 스카이웨이를 통해서 빠르게 대피할 수 있다는 점이다.

6. 버팀줄 타워(Guyed Towers)

버팀줄로 당겨진 송신탑은 인간이 만든 構造物中 가장 큰 종횡비를 갖는데, 시카고에 있는 Harry Weese 설계사무소와 뉴욕에 있는 Lev Zetlin 구조회사는 그 송신탑에서 아이디어를 얻어, 210층의 Chicago World Trade Center를 위해 합동으로 이 구조방식을 개발하였다. (그림 20 참조) 복잡한 도심에서 초고층 건물을 송신탑처럼 인장 케이블로 지지한다는 것은 대지 여건상 불가능한 일이므로 건물 자체에서 이를 해결해야 한다.



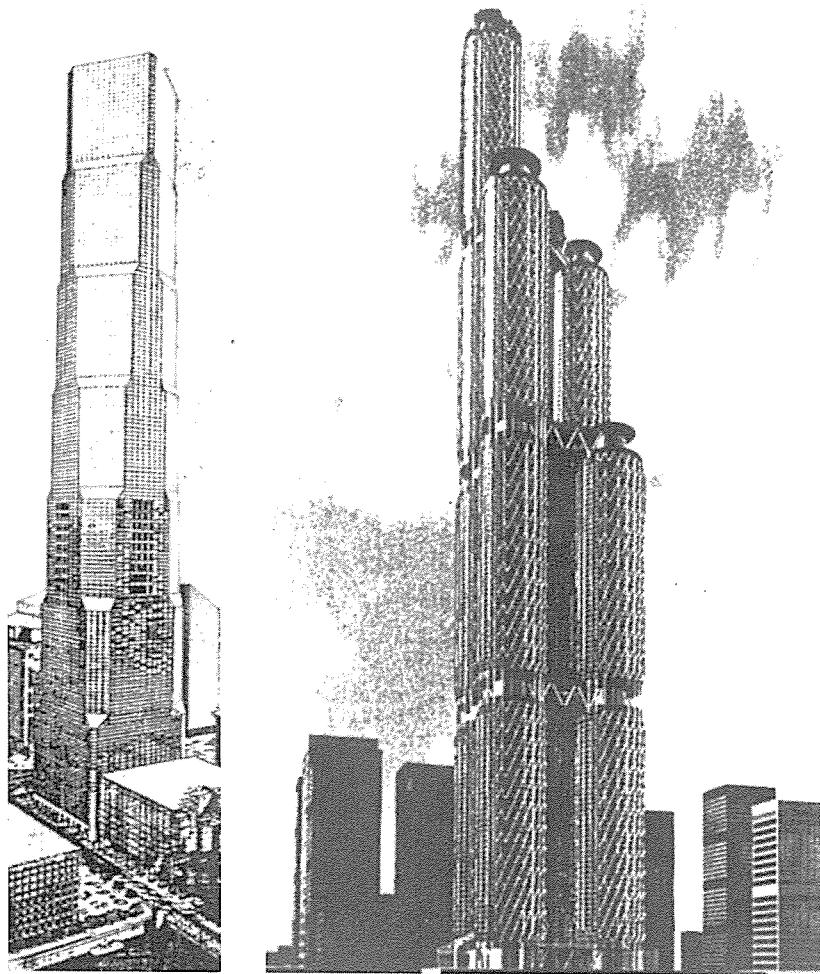
그래서 그들은 건물전체에 뻗어있는 4개의 두꺼운 (1.5m×1.5m) 기둥으로 하여금 송신탑의 버팀줄 역할을 하도록 설계했다. 이들 기둥은 건물이 흔들릴때마다 건물을 수직으로 잡아 당기는 역할을 하는데, 그 결과 건물의 휨과 뒤뜰림 현상이 크게 감소된다. 또 하나의 특징은 30층마다 형태가 바뀌는 부분이 3층 높이의 경사진 變形構造(Transition Structure)로 되어 있다는 점이다. 이 부분의 바닥판은 격자형의 삼각형 部材를 가진 건물 외주부와 상호 연결되어 일종의 벨트 트러스(Belt Truss)를 형성하는데, 이렇게 형성된 6개의 벨트 트러스는 건물의 전단력을 크게 감소시킨다.

7. 댐핑 시스템(Damping Systems)

수퍼 초고층 건물의 설계에 있어 강풍을 견딜 수 있는 또 다른 방법은 진동을 흡수하는 댐핑 시스템이다. 댐핑 시스템에는 두가지의 방법이 있는데, 하나는 構造的 방법이고 또 하나는 機械的 방법이다.

건물을 점차 가늘게(Tapering) 하는 것은 바람으로 인한 소용돌이 현상을 줄이는 효과적인 構造的 방법이다. LeMessurier는 바람터널(Wind Tunnel) 실험을 통해서 완전한 정형의 건물보다 테이퍼링한 건물이 2배 가까이 강하다는 것을 입증하였다. 바람의 소용돌이 현상을 줄이는 또 다른 構造的 방법으로는 건물 외주부에 소용돌이를 교란하는 장식물을 설치하는 방법과 건물 상부에 2~3개의 큰 바람구멍을 뚫어 놓는 방법이다. 바람구멍을 만드는 방법은 진동을 30~40% 정도 줄일 수는 있지만, 엘리베이터 코어를 건물 외주부에 설치해야 하는 단점이 있다.

가장 창의적인 機械的 방법으로는 LeMessurier가 뉴욕에 있는 Citicorp Center를 위해서 창안한 同調 메스 댐퍼(Tuned Mass Damper)방식이다. 건물 최상부의 특별실에 설치된 400톤의 메스 댐퍼는 매우 매끄러운 콘크리트 표면 위에 놓여져 있고, 전기 유압 펌프를 통해서 나오는 오일은 콘크리트 표면 위에 얇게 깔려서 메스 댐퍼와의 마찰력을 최소화시킨다. 건물이 흔들릴 때마다 메스 댐퍼는 건물의 움직임과 반대 방향으로 움직여 그 진동을 흡수하게 된다. 그러나 이



시스템의 최대 단점은 전기 유압 펌프장치가 고장나면, 그 효과를 보장할 수 없다는 점이다. 그래서 이 댐핑 시스템은 단지 건물 사용자의 안락감을 향상시키는 정도로 만족해야 한다.

또 다른 機械的 방법은 World Trade Center에 처음 사용된 일명 “비스코일레스틱 댐핑 (Viscoelastic Damping)” 시스템이다. 비스코일레스틱 댐퍼는 끈적한 중합체 (Polymer)로 코팅된 강철판과 이 강철판의 앞뒷면에 붙여진 또 다른 두개의 강철판으로 구성되어 있다. 각각의 댐퍼는 보와 기둥에 연결되어 있는데, 건물이 흔들릴때 마다 댐퍼의 강철판은 서로 미끄러지면서 전단력을 흡수하게 된다.

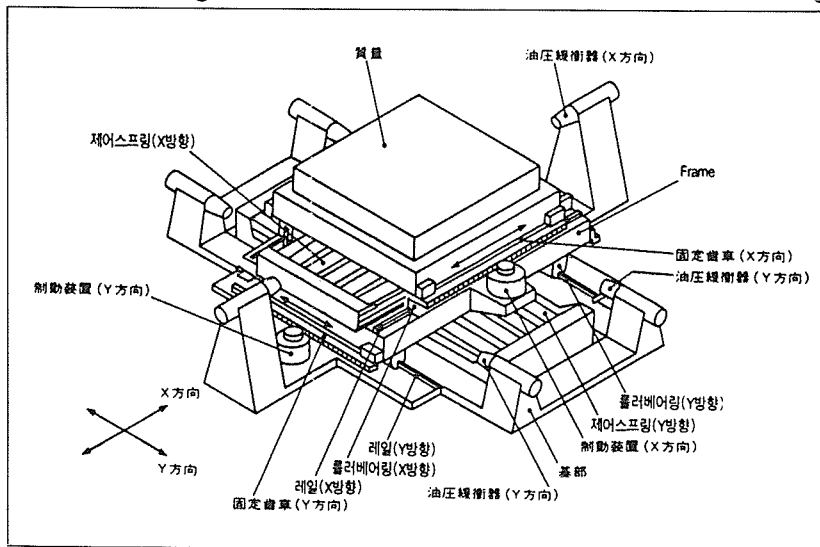
비스코일레스틱 댐핑 시스템은 同調 메스 댐핑시스템과 거의 효율이 같지만, 공사비가 보다 저렴하고 작은 공간을 차지하며, 전문적인 기술자가 요구되지 않고, 잦은 보수나 관리가 필요하지 않는 長點을 가지고 있다. 더군다나, 댐퍼가 수동적이고 중복설치 되기 때문에 이 시스템은 매우 신뢰할 만하다. 그러나 주요, 短點은 중합체 코팅 (Polymer Coating)이 20년이 지나면 수명이 다하기 때문에 댐퍼를 교환할 수 있도록 시공해야 한다는 점이다.

최근에는 위의 두가지의 機械的 방법을 응용한 댐핑시스템이 급속히 개발되고 있는데, 특히 지진이 많은 일본에서는 건물의 진동을 50% 정도까지 흡수할 수 있는 댐핑시스템이 개발되고 있다. (그림 21 참조)

4. 맺음말

수퍼 초고층 건물은 건물 주위의 도시환경에 막대한 영향을 미치게 되기 때문에, 실제로 150~200층 규모의 건물이 세워지기에는 상당한 시간이 걸릴 것으로 보인다. 왜냐하면, 이는 미국과 같이 경제가 발달하고 초고층 건물이 필요한 나라에서도 도시계획 규정, 교통체계, 市 지원설비, 임대 문제 등으로 인해 150층 정도가 최대 규모가 될 것이라고 평가하기 때문이다. 만약, 200층 규모 (약 28만평)의 오피스 건물을 도심에 짓게 되면, 개발업자는 임대문제로 인해 엄청난 경제적 어려움을 겪게 될 것이다. 그래서 근래에 지어진 대부분의 초고층 건물은 사무실, 상가, 아파트, 호텔 등을 포함하는 복합건물이거나 50~70층 규모의 건물인데, 이는 건물의 경제성을 고려한 결과라 하겠다. 그러므로 수퍼 초고층 건물을 세우려면 실질적인 경제적 이유 보다는 아마도 그로인해 얻어지는 명성과 자부심에 그 의미를 두어야 할 것이다. 그래서 DeSimone은 “수퍼 초고층 건물은 마치 달로 쏘아올린 로켓트와 같아서 사람들의 꿈과 자신감을 나타낸다”고 지적하였다.

우리나라에서는 1984년 63층의 대한생명 빌딩이 세워진 이래로 그 이상의 초고층 건물은 설계되지 않았다. 가까운 일본에서는 수퍼 초고층 건물에 대한 관심이 높아 지진으로 인한 위험에도 불구하고 200층 이상의 건물이 설계되고, 이를 뒷받침할 수 있는 기술이 발달되고 있다. (그림 22 참조) 경제강국으로 도약하고 있는 우리나라에서도 수명間 200층 이상의 수퍼 초고층 건물이 설계되어지기를 희망하면서 이 글을 마친다.



- 16 Bank of Southwest Tower의 구조 개념도
- 17 Bank of Southwest Tower의 모형 사진
- 18 초강도 골조 구조물
- 19 4개의 건물군으로 이루어진 초강도 골조 구조물
- 20 Chicago World Trade Center의 계획안
- 21 일본에서 개발된 TMD
- 22 일본에서 설계된 200층의 수퍼 초고층 건물