

## 고층 건물의 구조 형식

신 영 수\*

### 1. 서 언

세계적으로 도시 인구의 증가와 산업 사회의 발달로 도시민을 위한 주거용, 산업용, 업무용 시설에 대한 요구가 증가되고 또한, 도시 집중화에 따른 지가 상승으로 인하여 토지 효율의 극대화를 위해 고층 건물이 등장하게 되었다. 우리나라에서도 70년대 이후 산업 사회화 되면서 주거용 아파트 건물뿐만 아니라 사무실 건물도 고층화 되고 있다. 고층 건물에 대한 정의는 명확하지 않으나 대개 20-30층 정도의 건물을 중층, 그 이상을 고층 건물 이라고 하고 있다.

건축 구조는 구조의 기본 부재 즉 기둥, 보 등의 선형부재와 바닥, 골조등의 그리드, 슬래브나 벽체 등의 표면 부재, 셸이나 튜브와 같은 공간 부재 등의 조합으로 이루어 지며 건물의 용도, 하중, 높이, 스펙 등에 따라 사용되는 부재가 달라진다.

따라서 이러한 여러 구조 부재를 합리적으로 조합하여 건축적, 구조적 목적에 맞는 구조체를 만드는 것이 구조 설계이다.

구조 설계의 목적은 구조물의 안전성, 경제성, 사용성을 확보하는 것으로 건물의 용도, 높이, 스펙 등에 적절한 구조 형식을 갖추어야 하며 이중 안전성의 확보를 위해서는 구조체가 부담하는 여러 하중을 충분히 지지할 수 있어야 한다. 하중에는 중력에 의한 하중과 환경적 요인에 의한 하중으로 분류되는데 고정하중, 적재하중은 전자에,

풍하중, 지진하중, 적설하중 등은 후자에 속한다고 할 수 있다.

따라서 구조 설계는 구조물에 영향을 주는 하중에 대한 구조물의 반응을 정확히 해석하여 설계에 반영해야 하는데, 건물이 고층화되어 높이가 높아짐에 따라 수직 방향의 하중 보다는 수평 방향의 하중이 심각한 영향을 미친다.

즉, 건물의 높이가 높아짐에 따라 고정하중, 적재하중에 의한 축력이 증가하여 기둥, 벽체 등의 수직 부재의 크기가 커지게 되지만 이러한 축력의 증가에 비하여 지진하중, 풍하중등의 횡력에 의한 변형 효과는 건물의 높이가 증가함에 따라 급격히 변화 하므로 횡력을 저항하는 요소와 변형에 대하여 고려해야 한다.

따라서 고층건물의 구조설계는 수직력 및 횡력에 최대 강도 및 강성을 가지면서 최소의 구조체 물량을 가진 구조 형식을 선택하는 것이 필수적이다. 구조 형식의 선택을 위해서는, 어느 하나의 구조방식이 모든 구조체에 경제적으로 적용될 수 있는 시스템은 없으므로, 여러가지 구조형식을 두고 기본 설계 단계에서 경제성, 시공성, 에너지 관리, 보수 유지 관리 등에 관한 것도 경제성 검토에 포함하여 함께 고려하여야 한다.

즉, 구조계획 단계에서 공업화된 공법을 사용하여, 신뢰성이 크고 공정이 빠른 시공법을 선택해야 한다. 또한, 기둥의 부동 변위나 온도에 의한 수직 변형등에대한 보완 방법을 시공 단계에서 반영하여 사용성을 향상시키고, 건물이 완공된 후에도 에너지 비용, 유지관리비의 최소화를 기할 수

\* 연구이사, 단구조연구소 연구실장, 공박

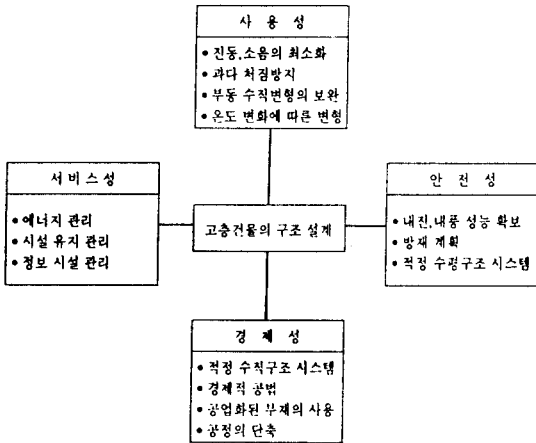
있어야 경제성이있는 구조물이라고 할 수 있다.

표1은 고층 건물의 구조 설계시 고려해야 할 요소를 정리한 것으로 구조시스템을 선택할 경우 표1의 여러 요소를 가능한 만족시킬 수 있어야 한다.

본 고에서는 고층 구조에서 적용될 수 있는 수평 구조 시스템과 그동안 사용되어온 여러 고층 구조 형식을 소개하고, 각 구조형식의 구조적 기동에 대해 기술하고자 한다.

또한, 구조 설계자가 다양한 구조 재료와 구조 시스템중에서 최적의 재료와 구조 시스템을 선택할 경우 고층 건물의 구조 설계에 영향을 미치는 요소와 경제성을 연관지어 기술한다.

표 1. 고층구조를 설계시 고려해야 할 요소



## 2. 고층 건물의 구조 형식 및 구조재료의 선택

고층건물의 구조형식은 횡력 지지 시스템의 경제성에 의해 좌우됨으로 현재까지 개발된 여러 시스템을 응용하고 효과적인 방법을 개발할 필요가 있다.

표2에서 구조 시스템에 따른 기존 구조체의 물량을 나타낸 것으로 구조시스템의 선택이 구조체의 경제성에 미치는 영향이 크다는 것을 보여준다.

그림1은 구조 시스템 별 적정 높이를 나타낸 것으로 우리나라에 적용하기 위해서는 시공성, 재료비, 인건비, 경제적 상황, 주변 환경 등의 요소에

대해 재 검토가 필요하나 우리나라 고층구조의 자료가 부족하여 실정에 맞는 도표가 없으므로 그림1을 참고적으로 사용하여 경제적 구조시스템을 선택하도록 한다.

현재 우리나라에서 건설되고 있는 대부분의 고층 건물은 주거용, 사무실용 건축으로 주거용의 경우 1자형 벽식 구조체가 대중을 이루고 사무실 건축의 경우 전단벽 시스템이 가장 널리 사용되고 있다. 우리나라에서는 20층 규모의 사무실 건물에도 철골조나 철골 철근 콘크리트 합성구조가 많이 이용되고있다. 그러나 동남 아시아 나 미국의 경우 고강도 콘크리트를 사용한 70층이상의 철근 콘크리트조 건물이 건설되고 있는 실정으로 우리나라에서도 콘크리트 고강도화로 철근 콘크리트 고층 구조물의 등장이 시급하다고 할 수있다. 현재까지 경제성 측면에서는 철근 콘크리트 고층 구조물이 철골이나 합성구조에 비해 양호한것으로 인정되고 있다.

고층 건물의 최적 설계는 건축적, 기술적인 요구사항을 만족하면서 우리나라 설계규준 및 법규에 적합하고 가장 경제적인 것을 선택하는 것이다.

즉, 횡력에 효율적이고 경제적인 구조 시스템의 선택은 고층 건물의 구조에 심각한 영향을 주는 인자들을 파악하고 이러한 요소를 최적화 시킴으로서 가능해진다.

따라서 고층건물 구조설계시 경제성 및 구조시스템의 효율성을 위해서 고려해야 할 요소를 기술하면 다음과 같다.

- (1) 설계 횡력(지진력, 풍력)
- (2) 건물의 높이-폭 비(Aspect ratio)
- (3) 횡강성에 대한 기준(Drift ratio)
- (4) 건물의 용도(사무실, 주거용 기타)
- (5) 기초 시스템
- (6) 내화 시간
- (7) 주 구조 재료의 경제성

특히 횡력 중 지진은 작용 시간에 비하여 구조적, 재료적 피해가 심각하므로 설계단계에서 피해를 최소화 하도록 노력해야 한다. 즉 지진에 의한 구조물의 피해가 주로 기둥의 취성 파괴, 건물의 비대칭성, 인접층 강성의 급격한 변화, Soft Stor-

표 2. 고층 철골구조물의 구조체 물량

Building Cases	Year	Stories	Height /Width	psf	Structure System
Empire State Building, New York	1931	102	9.3	42.2	Braced rigid frame
John Hancock Center, Chicago	1968	100	7.9	29.7	Trussed tube
World Trade Center, New York	1972	110	6.9	37.0	Framed tube
Sears Tower, Chicago	1974	109	6.4	33.0	Bundled tubes
Chase Manhattan, New York	1963	60	7.3	55.2	Braced rigid frame
U.S. Steel Building, Pittsburgh	1971	64	6.3	30.0	Shear walls + out-riggers + belt trusses
Boston Co. Building, Boston	1970	41	4.1	21.0	K-braced tube
Alcoa Building, San Francisco	1969	26	4.0	26.0	Latticed tube
Low Income Housing, Brockton, Mass.	1971	10	5.1	6.3	

y, 부등침하 등에 의해 발생하므로 이러한 여러 원인을 가능한 배제할 수 있도록 구조시스템을 선택해야 한다.

건물의 폭-높이의 비는 건물이 너무 세차하게 되는것을 막기위한것으로 일반적으로 10 이하가 추천되고 있으며 횡변위의 크기를 제한하는 규정은 지진의 경우 Story Drift를 0.015이하로 제한하고 있다. 풍하중의 경우 규정은 없으나 대개 1/650 - 1/350 정도가 추천되고 있으며 1/500 로 제한하기도 한다.

기초시스템의 선택은 고층건물 전체의 경제성에 영향을 주는 매우 중요한 요소로 높이와 층, 지반조건, 암반상태, 암반까지의 깊이 등을 고려하여 결정한다.

고층 건물의 구조체 물량은 점차 감소되어 왔으며 앞으로도 새로운 구조시스템과 발달된 컴퓨터와 소프트웨어에 의해 감소될 수 있을 것이다. 구조설계자는 더 효율적이고 경제적인 고층 구조시스템을 연구할 필요가 있는데 일반적으로 시스템의 효율성 향상을 위해 접근하는 기본 방식은 다음과 같다.

(1) 설계 요소 변경

- 1) 모멘트에 저항하는 부재의 유효폭을 증가시킨다.
- 2) 부재들이 상호 효율적으로 작용할 수 있는 구조 시스템을 선택한다.
- 3) 건물의 전체폭에 대해 내부, 외부에 횡력 저항 시스템을 넣는다.
- 4) 수직 하중이 직접 주 횡하중 지지 부재에

전달되도록 바닥 구조 시스템을 선택한다.

- 5) 구조 벽체와 사재(diagonal member) 를 효율적으로 배치한다.

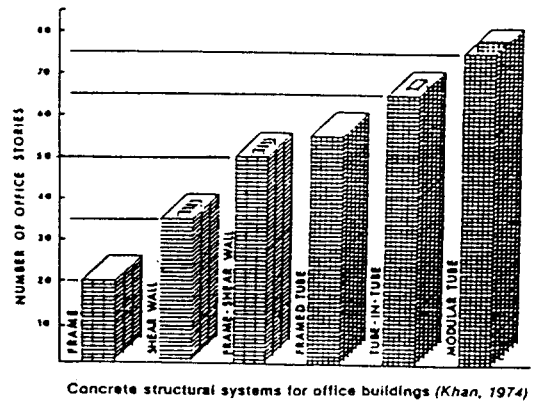
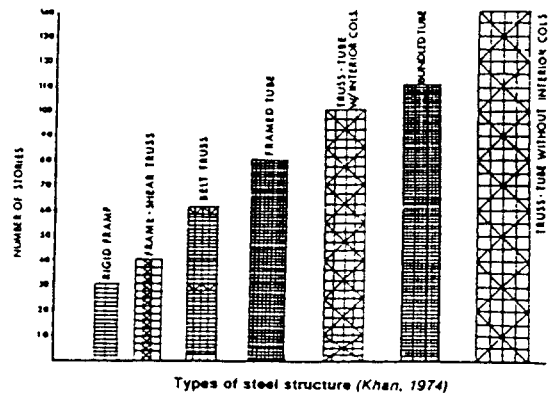


그림 1. 고층건물의 구조시스템

6) 각 층의 수평 다이아프램(Diaphragm)

작용이 충분히 발생할 수 있도록 한다.

(2) 고강도 재료를 사용한다.

고강도 재료의 사용은 부재 크기를 최소화 할수있다.

(3) 공업화된 공법을 사용한다.

철근 콘크리트의 경우 코아나 전단벽, 기둥에 Slip Form, Flying Form, Gang Form등을 사용하여 공사 기간을 최소화하고 철근의 이음은 Coupler를 사용하고 철골의 경우 용접 접합부를 많이 사용한다.

(4) 건설 자재를 경량화 한다.

간막이 및 마감재를 경량화하므로서 수직력을 감소시켜 수직부재의 경제성을 도모한다.

(5) 해석에 의한 오류를 최소화 하기위해 적절한 소프트웨어를 사용하고 적정 설계가 되도록 유의한다.

(6) 최신의 설계법을 사용한다.

강도 설계법, 한계상태 설계법을 사용한다.

### 3. 고층 건물의 수평 구조체

고층 건물에서 바닥 구조체는 수평력을 전달하는 다이아프램 역할을 할뿐만 아니라 수평력에 저항하므로 강성이 충분히 확보되어야 하며 한 층의 바닥 구조체의 높이가 건물 전체의 높이, 건물의 층수에 직접 영향을 미치게 되므로 바닥 형식의 선택이 매우 중요하다. 철근 콘크리트 고층건물의 경우 철근 콘크리트 혹은 프리 스트레스트 플랫 플레이트나 플랫 슬래브의 사용으로 층고를 최소화 할 수 있다. 또한, 수평 구조체는 구조물의 가장 넓은 면적을 차지하며 거꾸집 공사는 대부분 수평 부재와 관련이 있다.

이런 관점에서 이 수평 구조 시스템은 바닥 하중과 경간, 보의 간격, 조이스트 간격, 재료비용, 공사기간, 인력여건 등 여러가지 요소를 고려하여 경제성을 검토한 후 선정되어야 한다. 즉, 하중 조건을 만족하면서 경제적인 수평 구조체의 선택이 경제적 고층건물의 구조 설계를 위한 첫번째 과제라고 할 수 있다.

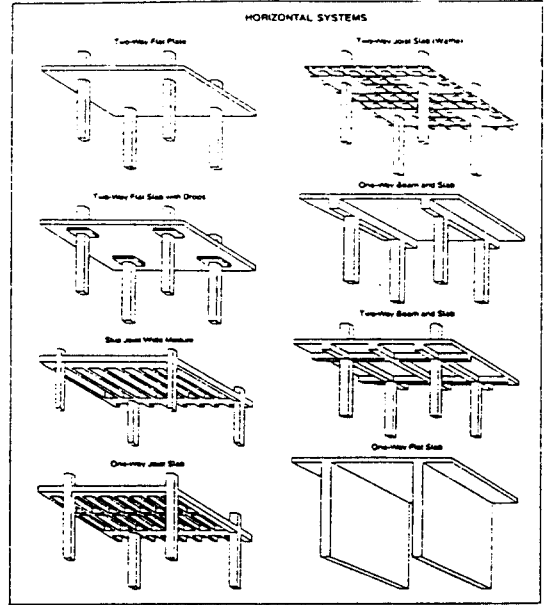


그림 2. 수평구조시스템

철근 콘크리트 구조물에서 주로 사용되는 바닥 시스템은 다음 그림 2와 같다.

### 4. 고층 건물의 구조 형식

#### 4.1 내력벽 구조

가장 오래된 방식으로 주로 주거용 건물에 사용되어 왔으며 조적조 석조등에서 발전되어 왔다. 우리나라의 일반적인 아파트의 구조방식도 여기 포함된다고 할수있다. 최근 프리 캐스트 대형판 구조, 철근 콘크리트구조 등으로 20~30층 정도까지 이 구조방식을 사용하고 있다. 벽체의 배치에 따라 대린벽 구조(Cross Wall System), 장벽 구조(Long Wall System) 와 이의 조합으로 이루어진다.

현재 우리나라에서 사용하고 있는 아파트의 경우 초고층화를 위해서는 1차형 구조 시스템에 대해서 건축적, 구조적, 시공적으로으로 다시 연구 될 필요가있다.

#### 4.2 강성 골조

강성 골조 방식의 구조체는 부재간에 접합부에

서의 연속성을 부여하여 보와 기둥의 휨 응력으로 횡력을 부담하게 하는 방식이다. 이 구조 방식은 전단에 의한 변형이 전체 변형의 80% 정도이며 20% 정도가 휨에 의한 변형을 발생시킨다.

일반적인 경우 강성 골조 방식은 보의 휨이 총 횡변위의 50-60% 정도, 기둥 회전에 의해 총 변형의 15-20% 정도가 발생한다.

대부분의 비가새 골조에서 보에 대한 기둥의 강성비가 매우 크기 때문에 강성이 작은 보에 의해 큰 접합부 회전을 야기하게 된다.

보통 강성 골조에서 골조의 변형을 줄이기 위해서는 보의 강성을 키우는 것이 바람직하다. 강성 골조는 변형 형태로 인하여 대개 20층 이내에서 경제성이 있는 것으로 검토된다.

### 4.3 전단벽 구조

전단벽 구조 방식은 수평 하중을 전적으로 전단벽이 부담하는 구조 방식으로 벽체는 계단실벽, 코아벽 등을 이용하여 콘크리트 전단벽 혹은 철골 브레이싱을 배치하는 방법이다. 즉, 전단벽과 보, 기둥과 보의 접합부를 힌지화 하여 횡력을 전단벽이 전적으로 부담하게 하는 방법으로 철골조 혹은 철골 철근콘크리트에 많이 응용되며 접합부가 간단하여 널리 사용된다.

이 구조 방식은 수직력에 대해서는 기둥과 전단벽이 저항하고 수평력은 전단벽이 받게 되므로 휨 변형을 하게 되어 기둥의 횡변위(SWAY)가 많이 발생하게 되므로 기둥의 설계시 P- $\Delta$  효과에 대해 주의하여 설계해야 한다.

이 구조 방식은 35층 정도까지는 경제성이 있는 것으로 검토된다.

### 4.4 전단벽-골조 구조

횡력을 전단벽과 골조가 동시에 저항하는 것으로 철골 구조의 경우 가새된 골조와 함께 있는 경우에 해당된다.

이 구조 방식은 40 층에서 50 층 정도까지 경제성이 있는 것으로 판단되고 있다. 경제성 여부에 따라 70-80 층까지도 이용되고 있다.

전단벽 골조 시스템의 장점은 코아벽체 와 보, 기둥과 보를 강점으로 연결시켜 각각 기둥이 다른

2개의 시스템이 횡력에 대해 상호 작용하도록 하게 방식으로 벽체와 골조의 상대 강성과 건물의 높이에 따라 상호 작용의 정도가 달라지게 된다.

일반적으로 건물이 높아질수록 골조의 강성이 더 크게 되어 더 큰 상호 작용이 발생하게 된다.

벽체-골조 구조체의 변형 모우드는 벽체의 변형이 휨 변형을 일으키고 골조의 변형이 전단 변형을 일으키는 성질이 복합되어 상호 작용을 함으로써 상부에서는 전단 변형이 하부에서는 휨 변형이 발생하여 전체적인 횡변위를 줄일 수 있다.

따라서 상, 하부의 거동이 다르고 골조와 전단벽의 횡변위 분담 정도가 높이에 따라 달라지게 된다.

이 경우 횡변위로 골조-전단벽의 효율성을 검토하고 허용 범위 내에서 강성을 조절한다. 즉, 벽체의 두께 및 길이와 기둥의 크기를 조절하는 방식으로 구조부재를 적정화 시킨다.

### 4.5 튜브 구조

튜브 구조는 최근 Fazlur Khan 에 제안된 것으로 기본 개념은 건물의 외곽에 벽체를 뚫어 놓은 정도의 개구부를 둬으로써, 횡하중에 대하여 튜브와 같은 거동을 하도록 하여 휨강성을 최대화함으로써 건물의 높이를 최대화 할 수 있도록 하는 방식이다.

이 경우 개구부의 크기 즉 외곽 기둥의 크기 및 간격에 의해 그림3에서와 같이 Shear lag 현상이 심각하게 발생하는데 이러한 현상을 최소화 할 수

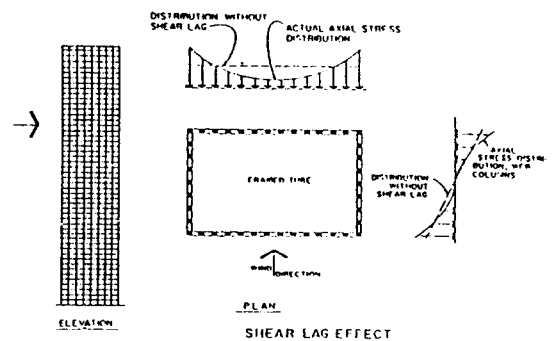


그림 3. Shear Lag 현상

있어야 경제성이 확보된다. 현재 세계에서 가장 높은 건물 5개 중 4개 즉 John Hancock Center, Sears Tower, Standard Oil Building, World Trade Center 가 이 구조방식으로 되어 있다.

### (1) 골조 튜브(Framed Tube)

골조 튜브 형식은 외부에 기둥을 촘촘히 배치하고 기둥과 기둥 사이를 큰 보로 연결하는 형태로 전체적으로 횡하중의 방향에 따라 기둥의 주방향을 결정한다.

건물의 평면에 대한 단면 2차 모멘트를 최대화 할 수 있도록 계획하고 외곽의 기둥이 전체 횡력을 받을 수 있도록 설계해야 한다.

즉, 횡력 방향에 평행한 기둥이 웹 역할을 하고 수직인 방향의 기둥이 플랜지 역할을 하여 구조적 거동을 한다.

철골조의 경우 운반이 허용하는한 부재를 길게 하여 조립함으로써 접합부의 개소를 최소화하여 공기를 단축시키고, 철근 콘크리트 구조의 경우 거푸집 공사를 기계화, 공업화 함으로써 공기 단축을 꾀한다.

내부 기둥을 배치하지 않으므로 건축상 평면 배치의 자유로움을 추구할 수 있고 외부 기둥의 하부에서 로비등의 사용을 위해 Transfer Girder를 사용하여 윗 기둥을 없앨 수 있다. 이 경우 Transfer Girder가 직접 상부 횡력에 의한 응력을 받게 하면 경제성이 상실되므로 하부에 횡력을 받을수 있는 코아를 배치하여 수평구조체의 다이아프램 효과에 의해 코아에 전달되도록 하는 것이 바람직하다. 또 Transfer Girder가 부담하는 하중이 클 경우 1-2층높이를 Transfer Girder의 층으로 사용하기도 한다.

Transfer Girder의 층을 최소화 하기위해서 프리스트레스트 방법을 사용하거나 고강도 강재를 사용하기도 한다.

### (2) 이중튜브

골조 튜브의 강성을 증가시키기 위해서 내부 코아를 이용하여 내부 가새된 철골 구조와 콘크리트 전단벽을 배치하는 방법으로 외부 골조 튜브의 전단변형을 감소시켜 외부 튜브와 상호작용으로 회전저항능력을 향상시킨다. 즉 횡력에 대해 외부 튜브는 상층부에서 지지하고 내부 튜브는 건물의 저

층부에서 지지하게 되어 보다 효율적으로 거동하도록 한 방식으로 그림4에 나타나 있다.

이 이중 튜브 개념은 미국 휴스턴의 714ft(217.6 m) 높이의 One Shell Plaza에 도입되었는데, 192 x 132 ft 외부튜브와 98 x 56 ft 내부튜브로 구성되어 있는 건물로 모든 외부기둥은 폭이 18 in로 6 ft 간격으로 되어있다.

일본 동경의 60층 Sunshine 60 Office Building 도 이 방식으로 되어있다.

### (3) 묶음 튜브(Bundled Tube, Modular Tube)

건물의 높이가 매우 높은 경우 골조 튜브 방식은 Shear Lag 현상이 심각하게 되어 이를 최소화 하기 위해 평면 중간 부분 횡력과 평행한 방향으로 튜브구조체를 넣어 횡력을 지지하도록 하는데 이 경우 중간에 삽입된 튜브도 웹 골조(web frame) 역할을 하게 하여 몇개의 튜브를 형성하도록 한 방식이다.

건물이 횡하중 하에서 힘을 받을 때 바닥 슬래브의 강한 면내 강성으로 인하여 내부 웹 골조와 외부 웹 골조의 변형이 동일하게 발생하게 되므로 각각의 횡변형 강성에 따라 전단력이 분배되므로 필요한 웹 골조의 강성을 증가시켜 효율성을 증가시킬 수있다.

내부 웹 골조의 외부 기둥은 외부 웹 골조에 의해 직접적으로 영향을 받게 되므로 단독 튜브일 경우보다 더욱 심각하게 응력을 받게 된다.

결과적으로, 그림4에서와 같이 내부 웹 골조는 Shear Lag 현상에 의한 기둥 응력의 불균등을 감소시켜 골조 튜브 방식보다 튜브거동(Tube Action)에 가깝다.

평면의 비대칭에 의한 비틀림은 closed-section form 으로 인하여 크게 문제가 되지 않는다.

110층이 Sears Tower가 이 방식으로 되어있다.

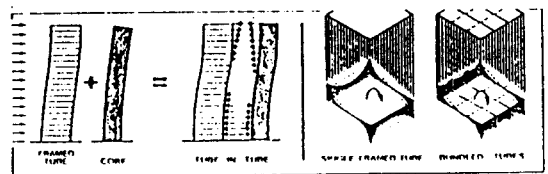


그림 4. 이중골조방식과 묶음 골조방식