

# 초고층 건물의 구조 시스템에 관한 小考

李 甲 造

(경기대학 교수)

## 1. 서론

최근 우리 주변에 적지않은 초고층건물들이 눈에 띄고 있으며 전반적인 건축이 高層化의 경향을 보이고 있다.

고층건물은 도시와 밀접한 관련성을 가지고 있으며 이는 dense population concentration, scarcity of land, high land cost의 자연적인 해답이다.

세계 각국에서 진행중인 industrialization과 관련, urbanization은 필연적인 것이다. 따라서 앞으로의 건축은 고층화가 일반적인 전제가 될 것으로 생각된다.

건축물을 高層化시켜 가는데 따르는 여러가지 문제점들이 있지만 또한 이는 오늘날까지 人類가 쌓아 올린 technological achievement의 symbol이라고 이야기 할 수도 있다.

有史 이래 더 높고 넓은 人工空間을 창조하고자 하는 努力은 에집트의 Pyramid, 중세의 Gothic cathedral 을 남겼으나 오늘날 높이가 110층 400~500여미터에 달하는 초 고층건물을 남기기에 이른 것이다.

고층거주에 따르는 과밀감, 압박감, 균질감등으로 인한 생태학적 충격, 건물내 거주자의 孤立, 환경심리학적 영향등은 거의 고려되고 있지 않는 상태이지만 構造體로서의 지상에 안전하게 솟구쳐 오르도록 하는 공학기술적인 문제는 눈부시게 발전해 나가고 있다.

이에 따라 이번 기회에는 주로 초 고층건물의 構造system을 外國의 實例에 대한 參考資料를 통해서 정리해 나가고자 하며 또한 한 건물에 人口 5만규모 이상을 수용하기에 이른 초고층 건축물에 대한 考慮는 설계, 재료, 시공, 건설, 기능, 도시계획, 조경, 위생, 하수등 다각적인 分野의 team Approach가 필요하며 特定한 한 factor가 독립적으로 취급될 수 없음을 참고하기 바란다. 이 글의 전개는 우선 고층건물의 發達과정, 관련된 여러 factor들에 관해서 살펴 보고 構造的인 面으로 범위를

좁혀 구조계획상 고려요소, 構造system에 대해서 살펴 나가도록 하겠다.

## 2. 고층건물의 발전과정

2층이상의 건축에 대한 주거혼적은 오래 전부터 있으며 로마시대에는 거의 2~3층 주거가 많이 지어졌으며 Insula라고 하는 4층 정도의 연립주택도 많이 지었고, 10층정도의 건물이 지어지기도 했다고 한다. 그러나 한 동안 뜸하다가 19c 산업혁명 이후 도시화와 더불어 고층 건축은 일반적인 특징이 되고 있다.

이러한 발전과정을 몇개의 時點을 기준으로 区分하여 생각해 볼 수 있는데 우선은 산업혁명 후 철, 시멘트, 유리에 의해 고층화의 成立기반을 갖추게 된 점도 간과할 수 없는 바이다.

로마시대에 사라졌던 조적조 (masonry bearing wall structure)가 다시 등장하게 되었고 다음에는 철골의 발달에 따라 조적조의 한계를 극복하게 되었고, 또 이러한 철골을 기본으로 새로운 노력으로 건물을 輕量化해 가면서 mechanical system이 증가하고 수직교통 方法의 발달로 도시의 수평교통에 연결이 되게 되었고 이후 구조계를 합리적으로 고안하여 초 고층화되는 상태에 이른다.

1880년대 미국 미시간호 주변의 개척촌에 전례없는 건축붐이 형성되어 William Baron Jerny에 의한 "chicago 파"가 형성되었는데 처음에는 조적조에 의해 이루어졌다. 그러나 이러한 조적조에 의한 고층건물의 한계는 1891년에 지어진 17층(65m)의 monadnock building에서인데 하층의 벽두께가 12ft(360cm)나 되어 더 이상 사용되기 어려웠다. 그러나 철강재의 개발로 이러한 어려움이 극복이 되었는데 이에 대한 배경의 일례는 1801년 영국

의 7층 cotton mill인데 iron-frame에 의해 이루어진 최초의 I-beam을 사용한 건물이다. 1851년 영국 런던에서 만국 박람회장으로 쓰인 crystal palace에서 처음으로 자립하는 iron frame을 건설하였으며 이러한 것들은 “chicago파” 확립에 대한 중대한 배경이 되었다.

이리하여 1889년 William Baron Jenny에 의해 전혀 내력벽이 없는 Leiter Building을 건설하였고 동년 Bunhan과 Root가 chicago에 Rand McNally Building이라고 하는 9층의 all steel framed Bldg 를 건설하였고 같은 건축가에 의해 1891년에는 20층짜리 Masonic temple을 건설하였는데 여기에서는 shear wall개념을 사용하였다.

이후 고층건축물의 발전은 미국이 주도하게 되었는데 바두번제의 계기는 1929년 경제공황에 즈음, 경기 부양을 위해 많은 초 고층건축이 이루어졌는데 예를들면 뉴욕의 록펠러 센타의 70층짜리 RCA빌딩, 320m의 cluster B-LDG, 380m(102층)의 Empire State Bldg 등이 모두 이 때 이루어진 것이다.

철근 콘크리트를 주로 한 건축도 이러한 철골 이론을 모방하여 발전하였는데 콘크리트의 이론은 August perr-et, Francois Hennebique, Robert Maillart 등에 의해 이루어져 1903년 paris에 최초의 R. C skeleton structure인 Franklin Apart가 세워지고, 이후 미국의 cincinnati에 Ingall Bldg 이라고 하는 16층건물이 이루어졌다.

이러한 추세는 세계 2차 대전후 홀연히 바뀌어 또 다른 계기를 가지게 되었는데 이후 건축재료의 개발로, 경량형강재 Curtain wall, Grid system, 경량콘크리트, 뿐만 아니라 열, 전기, 배관, 하수구 등 mechanical system이 개발되어 고층건물에서 1/3의 비용을 차지하게 되고 엘리베이터도 최초 1851년 New york Fifth Avenue Hotel에서 쓰인 것이 1866년 Suspended system으로 바뀌고 zoning에 있어서도 cell core가 커짐에 따라 conventional zoning에서 double deck, sky lobby 방식 등의 도입으로 고층화의 뒷받침을 하게 되었다. 경량화에 따른 고층건물의 부재단면을 줄일 수는 있으나 고층화될수록 “premium for height”라고 하는 풍압력 지진력 등에 의한 横力의 영향이 더욱 커지기 때문에 이러한 문제를 “core”를 활용한다든지, suspension system, stiffening wall bracing의 활용으로 lateral stiffness를 가지게 되어 더욱 발전하게 되었다.

이러한 추세는 1960년대에 더욱 발전하여 초고층화하여 100층의 존헨코크 Building이 B.J 그라함과 SOM에 의해 1968년에 이루어지고 1966년에 뉴욕에 world trade center를 예로 들어 1일 5만명을 수용하는데 인근의

인구 10만을 수용하는 sbhenectady시의 거주, 산업, 상업시설일체에 사용하는 것과 같은 전기량을 사용하여 가히 “a city within a city”로써 면모를 과시하고 있다.

이러한 과정을 (도표-1)과 같이 요약할 수 있을 것이다.

구 분	년대	주 요 작 품 (제원) (설계자)
제 1 기 (Chicago파) 1880~1910	1889	Auditorium building (10층) (Louis Sullivan)
	1889	Rand McNally building (Bunhan과 Root)
	1891	Monadnock building (17층, 65m) (william Baron Jenny)
제 2 기 (경제 공황시) 1920~1930	1929	Empires state building (110층 380m)
	1932	필라델피아 저축은행 (33층) (Howe 와 Lescase)
	1933	RCA building
제 3 기 (2차 대전후) 1940~1955	1950	U. N 본부 building (39층) (william Harrison)
	1951	뉴욕의 panamerican 생명보험회사사옥
	1952	Lever house (SOM)
제 4 기 (1960년 이후)	1966	world trade center, New York (111층, 411m) (Minoru Yamasaki 사무소)
	1971	Transamerica building (50층, 853ft) (william L. Pereica 설계사무소)
	1972	Sear building, Chicago (109층, 445m) (B. Graham)

(도표-1) 구조적인 측면에서의 초고층 건물발전과정(미국중심)

### 3. 고층건축에 따르는 문제점

고층건물은 아파트건 사무조건 간에 대부분의 도시인이 하루의 거의 반을 보내며 일생의 중요한 시기중 1/3을 보내게 되어 중요한 환경이 되고 있다.

점차 산업화가 진행되는 동안 도심지는 20층이상이 dark narrow street를 중심으로 서로 아주 보게 되는 urban canyon을 이루게 되었다. 초기의 관심은 minimum area of land에 maximum number of people을 수용하는 데만 있었다. 고층화에 따른 organic interaction system으로서의 도시 전체에 대한, 또는 전체 거주민에 대한 충격, 혼란등은 충분히 고려 되지 못했다.

그러나 점차 빛, 공기, public activity space를 위한 open Ground level의 요구가 증가하면서 고층건물은 free standing skyscraper로 발전되었다. 한 건물내에서 필요한 모든 service, amenity를 수용하므로 거주자는 이 건물을 벗어 나지 않아도 된다. 소도시의 service 와 동일한 support facility를 가진다. 그러나 이에 따른 거주자의 고립감과 lack of contact to street life 등에 관한 대책이 필요하다. 또한 모든 층이 자연환기가 아닌

人工조명, 인공환기, 에어컨에 의해 이루어지므로 설비적으로 Building skin과 partition에 의해 区劃된 속에서 지내게 되므로 mechanical system의 비중도 커지게 된다.

災害시에 대한 대책도 충분히 이루어져야 하는데 화재시에도 모든 층이 Beyond the reach of firetruck or ladder이며, 짧은 기간중 total emergency evacuating 이 불가능하므로 적절한 exit, smoke, fire dete ctingsystem, sprinkler등이 갖추어져야 할 것이다.

또한 고층건물의 등장으로 주변은 기존의 主風向을 바꾸게 되기도 하며, 또한 더욱 강해지며 windward side의 측면에 생기는 eddy, 후면에 생기는 vortex등으로 인해 먼지, 휴지가 공중에 분산되거나, 정원을 손상시키거나 또는 풍압으로 창문이 깨지고, 빠져 달아 나는 경우도 있다. 뉴욕 일대의 40~50층 건물 여닐곱棟은 풍압에 의한 excessive lateral sway and noise로 근무가 불가능하여 강풍시 수시로 근무를 중단하는 경우도 있으며 심지어는 motion sickness라는 현대병을 유발하기도 한다고 한다.

기동자체도 높이에 따라 하층부와 각기 다른 기온에 노출이 되고 또한 내부기동은 保温이 되므로 30층 정도 이상으로 별다른 대책이 없을 시 신축작용의 차이로 건물에 균열이 생기는 경우도 있다고 한다.

또한 공사비에 비해 HVAC (heat, vent, aircon)의 비중이 커져 관리비가 증가하여 심한 경우 1년의 에너지 소비비용이 공사비의 1/6~1/10에 달하는 경우도 있으며 미국의 경우 고층건물의 유행연수를 30년 정도로 보는데 이에 대한 공사속도나, 철거시의 대비에 대한 것도 고려가 되어야 할 것이다.

스코틀랜드의 생물학자 sir D'arcy wentworth Thomson은 그의 저서 "on grwth and form"에서 각종 자연현상의 크기와 limiting form size에 관한 특징을 분석하였는데 거기에서 californi産 巨木인 sequoia가 160m까지 이상 될 수 없는 것을 증명하였는데 초 고층건축물에 있어서도 도심지의 degree of density가 zoning regulation에 의해 control 된다고 하더라도 total dynamic urban fabric으로서 organic entity로서의 충분한 배경을 갖출 수 있도록 해야 할 것이며 고층건물은 어떠한 기능이던간에 설계, 재료, 시공, 건설등 여러분야의 team approach가 필요하며 건축가로서 더 이상 freedom of design을 말할 수 없게 되었다. 구조적인 문제도 functional space에 대해 "as an unrelated addition"으로 plugged into되어서는 안되고 "as a total system"으로써 적용되어야 할 것이다.

#### 4. 초 고층건물의 구조적인 고려요소

고층건물은 기본설계요소로서 일반건물에 비해 현저히 특이한 물리환경적 영향을 받게 된다. 즉 자체 중량에 의한 하중, 지하의 지진하중, 지상의 풍압력을 받으며 Building envelope는 온도, 기압 습기의 내외부차에 대한 영향을 받는다.

각 structural element는 이러한 영향에 잘 저항하고 absorb하여 안전하게 minimum effort로 지상에 전달하여야 한다. 이러한 힘에 관한 구조적 질서를 이해해야만 초기 기획 단계에서 부터 무리없고 합리적인 계획이 가능하고 Optimum Solution이 이루어질 수 있다.

건물에 주어진 하중은 Building body의 necessary bone이기도 한 structural element, 또 Continous change of nature 에 기인하는 metrological geological load, 즉 이러한 Geophysical load와 충격사람, 장비이동, 기온, 습기 변화를 restraint하여 생기는 Shrinkage creep, Volume change가 boundary에서 prevent할때 생기는 Lock-in Load등의 man-made load로 구분할 수 있다.

이러한 배경을 토대로 초고층건물의 적절한 구조system은 하중, 건설재료의 성질 하중의 부재를 통한 지반 전달 (structural action)에 의해 결정되는데 18c 후반까지의 조적조뿐만 아니라 rigid frame에서도 gravity는 prime determining factor가 되었다. 그러나 1950 년대의 Glass-walled skyscraper에서는 optimum interior open space, light weight steel frame, light weight concrete, curtain wall, larger span beam, movable partition 등으로 weight가 문제되지 않고 lateral stiffness, lateral sway가 strength보다 중요하고 overall rigidity of the structure가 강조되게 되었다.

즉 이러한 member size나 Building weight의 감소는 한편 횡력에 대한 aerodynamic action에 대해 불리한 역할을 하기에 이른 것이다. 일반 골조만으로 이루어진 고층건축물은 철근 콘크리트인 경우 20층, 철골조인 경우 30층정도까지가 대체로 경제적인 것으로 파악되고 있다.

Building structure에 관한 3대 Variable을 Superstructure, substructure, soil이라고 하나 이는 physical 한 면에서만 본 것이고 초 고층건물의 구조조건은 "need for the Builing at specific site" 즉 정치, 사회, 문화, 경제, 기술적인 면에서의 형태조건을 가지게 된다.

대개 40층이상에서 부터 현저히 structural continuity의 중요성이 증가하게 되는데 대체로 rigid frame의 lateral deflection은 구조체를 지상에 고정된 켄티레바로 볼 때 첫째 deflection due to cantilever bending(cho-

rd drift) 과 둘째 Deflect in due to Bending of Beam, column (Shear lag 또는 frame wrecking)으로 나눌 수 있는데 첫째는 전체 구조물 drift의 20%정도를 차지하고 둘째는 전체 구조물 Sway의 80%이며, 이중 65%는 beam-flexure에 의하고, 15%는 Column-flexure에 의 한데 고층화 할수록 P $\Delta$  effect (아랫층의 수평변위 $\Delta$ 에 의해 수직력이 KP가 되고 Secondary moment가 생기는 현상)가 커진다.

또 구조체의 base에서 최대의 전단력이 생기고 또한 Slope of defoqmatation도 가장 크다.

경제적인 structural design이 되기 위해서 우선 efficient Building shape도 중요한데 건물의 mass가 균 등히 분포되고 복잡한 torsional vibration이나 Stess concentration이 생기지 않도록 하여야 하겠지만 동일 규모라도 구형평면에 비해 원형평면은 20~40%의 풍압 력영향을 감소시킬 수 있다고 한다. 또한 100만불어치의 자동차 재료 무게가 80만lb, desk calculate가 3만lb 인데 비해 건축물은 300만 lb의 재료가 쓰인다고 하는 바 산업화 과정에서 건축물이 타 제품에 비해 비용/효용 면에서 bulky하고 원시적이라는 뜻도 되지만 지금도 좀 더 구조체의 중량을 줄일 필요가 있다. 그러나 이러한 경량화에 의해 약화되는 structural rigidity보강을 위해 structural continuity를 가질 수 있는 구조 System을 活用 개발해야 할 것이다

이는 동일규모의 건물일 경우 braced frame보다 staggered truss wall beam을 사용하여 40%의 강재절약 과, field connection이 줄어드는 利点과, 공간 이용상의 flexibility를 가질 수 있다는 점에서만 보아도 중요한 것임을 알 수 있으며 장을 바꾸어 이러한 構造 system에 관해서 기술해 나가겠다.

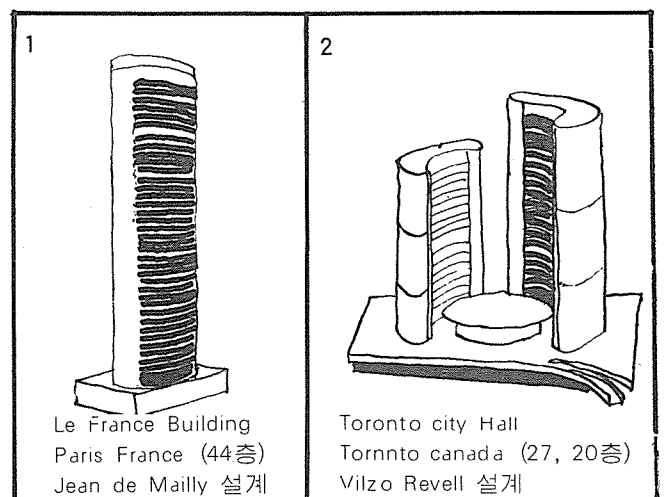
### 5. 초 고층건물의 구조System

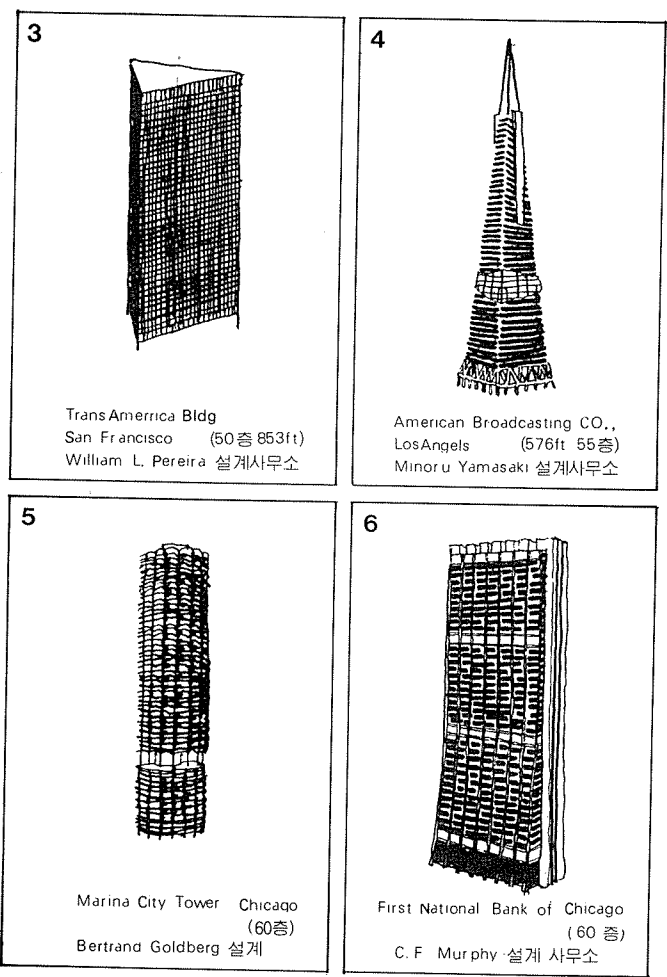
고층화 및 경량화에 수반되는 횡력의 증가와 자체 강성의 약화로 일반 골조이외에 별도의 건물강성을 위한 대책이 이루어져야 하는데 30층(철골조일 경우, 철근콘크리트조일 경우는 20층)이 넘어 가면 rigid frame의 라멘의 경제적인 해결이 어렵고 특별한 structural system이 쓰여야 하는데 이는 Bearing wall. (stiffening wall)을 설치하거나 K-bracing을 일정한 라멘열에 설치한다거나 건물형태 자체를 횡력에 잘 저항할 수 있는 형태로 한다든가, 또는 core, system (Cantilevered core, Cap and belt trussed frame with core, rigid frame with core suspension core)을 이용하거나 Staggered truss,

Interspatial system tube in tube, Bundle tube, framed tube, trussed tube) 등이 쓰이며 또한 불란더의 Eugene Freyssinet와 미국의 Lev zetlin은 구조 system에 많은 비용을 들이지 말고 100년에 한번정도 재현기간을 가지는 한 순간에 대비하여 골조에 stressed tendon을 사용하자고 주장한다. 또한 World trade center에서는 open web zoist의 bottom chord end에 Viscoelastic damper를 부착하여 해결토록 하고져 하였고 SOM의 Fazulur khan과 portland coment Associd cement Association의 Mark Fiutel은 최하층의 Piloti 부분에 Stability wall을 설치하여 Shock absorbing soft story Conopt를 제안하였다. 또한 실증적인 자료는 없으나 풍압에 대해서 風下側의 공기를 discharge하는 장치를 설치하여 stabilizing하자는 견해도 있다. 또한 San Luis에 있는 california polytechnic state university의 Jens. G. Pohl교수는 pneumatic high-rise building을 제안하였다. 이들을 좀 더 자세히 살펴보면 우선 형태적인 고려에 있어서 외주기둥을 8%정도 경사지게 되는 형태를 만들 때 경비가 50%나 감소함을 컴퓨터 계산에서 보여 주고 있다.

이러한 예는 San brancisco의 50층 (853bt) transamerican building, 이나 chicago의 first nation bank (60층)의 tapered form으로 1/3의 경비를 줄였고, marina city tower에서도 이러한 실례를 보여 주며 또 파리의 Le France Buiding에서는 27%의 wind load reduction이 이루어졌고 미국의 U. S steel Building에서도 이러한 예를 볼 수 있고 기타 로스안젤스의 Broadcasting campany Building (576ft의 triangular prism shape), toronto city Hall등이 있다

건물의 실례에 대한 sketch는 (그림-1)과 같다.



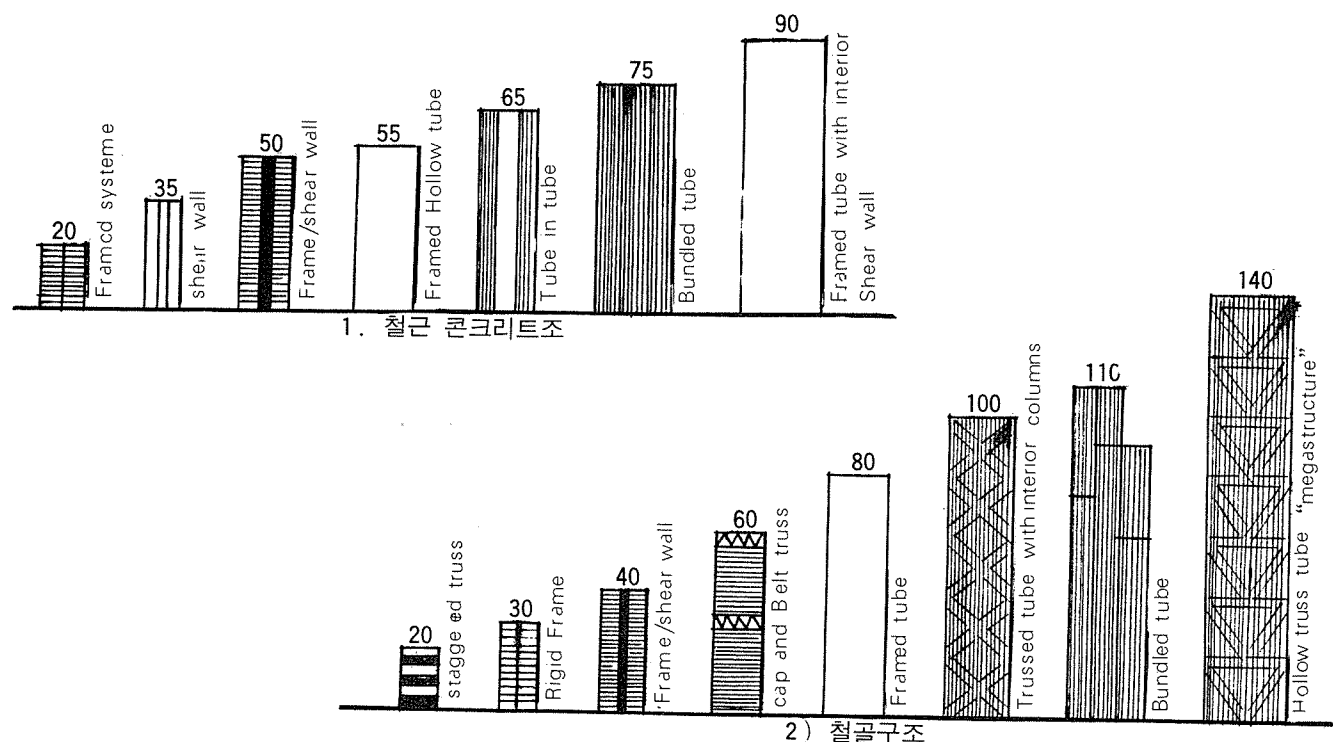


다음으로 shear wall은 concrete벽체에 의하거나 tr-  
 ussed steel bracing을 사용하는데 rigid frame과 함께  
 쓰이며 500ft까지 실용적으로 활용될 수 있다. 이 경우에  
 는 상층부에서는 frame이 하층부에서는 주로 shear wall  
 이 횡력을 부담하게 된다.

또 frame과 core를 horizontal belt truss에 의해 연  
 결하여 )truss는 core에 fix로 외부기둥에 pin접합) 30%  
 의 비용을 경감시킬 수 있다. shear core가 될때 belt  
 trues는 지렛대 역할을 한다. 또한 cap and belt truss  
 를 사용하여 60층정도까지 경제적으로 해결할 수 있다.

다음으로 SOM의 Fazlur khan이 개발하여 최근에 세  
 워진 세계에서 가장 높은 건물중 4개가 이 방식에 의한  
 즉 tuilar system이다. 이 방식은 facade구조가 lateral  
 load에 대해 지상에서 고정된 hollow box cantileren 역  
 할을 하는데 framed building으로 계획했을 때에 비해 구  
 조재료의 단위면적당 사용량이 1/2로 감소된다. Facade의  
 외주를 좁은 간격으로 배치하고 지둥상호를 넓은spanriol  
 로 연결 마치 perforated wall처럼 보이고, 20층 단위의  
 diagonal bracing으로 보강하기도 하며 켄티레바와 별 차  
 이없는 강성을 보이며 exterior tube가 거의 대부  
 분의 lotaler load를 부담한다. 여기서 발전된 framed tube는  
 SOM이 1961년에 설계한 43층의 Dewitt chestnut Apa-  
 rtment, 83층의 standard oil Building, 110층의 world  
 trade center등에서 쓰였는데 이 방식은 철골조일 경우  
 80층, 철근콘크리트조일 경우 60층까지 경제적으로 쓰일

형태적인 고려에 의한 초고층 건물의 확보실례 (그림 1)



(그림 - 2) 각 구조 System의 경제적인 층높이 비교표

수 있다.

또한 shear building과 같은 bundled tube, 38층의 Brunswick Building(chicago) 57층의 one shell plaza BLDC (Houston) 도꼬의 60층 office building(triple tube) 과 같은 Tube in tube, 원형, 구형평면에서 tubular action 이 더 효과적임을 감안한 40층 6각형평면의 charlotte N. C. 나 두개의 intersecting octagon 평면인 32층의 western pennsylvania National Bank in pittsburgh와 같은 Modified Tube가 있다.

각 구조 system의 경제적인 층높이에 대한 비교도표는 (그림-2)와 같다.

## 6. 결 론

건축의 단위면적당 무게를 기준으로 몇개의 건물을 비교해 볼때 rigid frame shear well system을 사용한 empire state building은 42.2psf인데 tubular system을 쓴 John Hancock building은 29.7psf이고 long span rigid frame system을 쓴 60층의 chase manhattan Building이 55psf인데 이와 규모가 비슷하고 belt tuss with

core system을 쓴 54층의 I. D. S. Building은 17.9psf이다. 이렇듯 structural efficiency를 가지는 optimization을 결정하는 일은 중요하다.

대체로 10층이하의 저, 중층건물은 대개 gravity load에 지배를 받으나 20~30층에서는 Lateral load에 대한 고려가 약간 중요해지다가 40층에서 획기적으로 증가하며 60층 정도에서는 수직하중에 대한 철골량이 횡력에 대한 것과 거의 비슷해진다. 그러나 가장 효율적인 구조는 gravity에 33%정도가 증가되도록 되는 system이 효율적인 구조이다.

또 total drift에 대한 제한은 occupant의 Comfort, 보호 경제성을 고려 풍압에 따라 건물높이의 0.0016~0.0035h로 제한 하며 normal wind에 대해서 committee on wind Bracing of American Society of civil engineer에서는 0.002h로 제한하고 있다.

세째로 기억되어야 할 일은 초고층건축은 기획단계에서 부터 구조 시공 계획, 도시, 정치, 사회 각 분야의 total Approach에 의해서 이루어져야 하며 물리적인 고려와 더불어 환경심리적인 고려가 크게 이루어져야 하겠다.