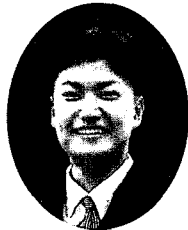


# 특 집

|| 국내 초고층 RC 건축물에 사용된 최신 콘크리트 기술 ||

## 초고층 RC 건축물의 구조 시스템

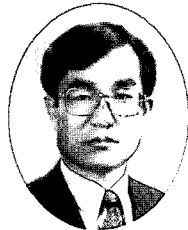
- The Structural System of Super Tall RC Building in Korea -



김영학\*  
Kim, Young Hak



이주호\*\*  
Lee, Joo Ho



고주환\*\*\*  
Gho, Ju Hwan



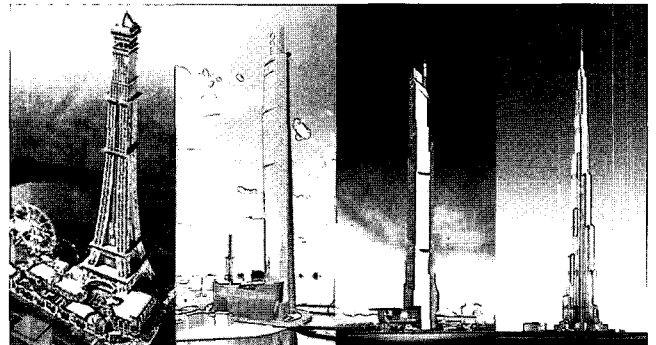
최명신\*\*\*\*  
Choi, Myung Shin



신성우\*\*\*\*\*  
Shin, Sung Woo

### 1. 머리말

대한생명 63빌딩(60층, 249 m)과 한국종합무역센터(54층, 228 m)로 인지되고 있던 한국의 초고층 건축물이 도곡동과 송도 등에 계획되었던 100층 이상의 초고층 건축물들이 이쉽게 무산된 이후 최근 들어 도곡동 타워펠리스Ⅲ(69층, 264 m), 목동 하이페리온(69층, 256 m) 등의 주상복합 건물에 의해 그 부동의 1, 2위의 자리를 내어 주게 되었으며, 서울과 부산을 중심으로



C2 프로젝트 (555 m)    부산 제2롯데월드 (494 m)    IBC130 (570 m)    UAE Burj 프로젝트 (600 m 추정)

그림 2. 국내의 초고층 건축물 계획안

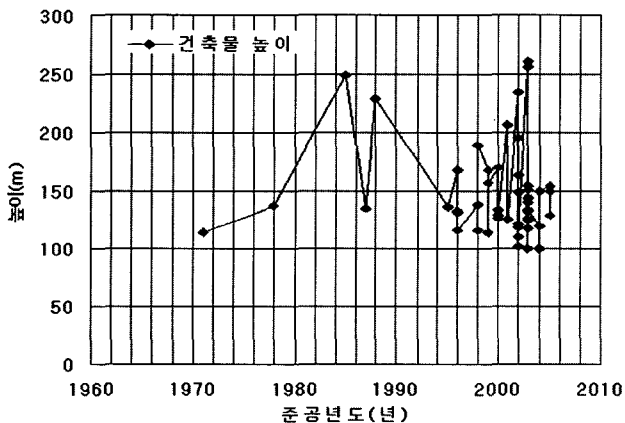


그림 1. 국내 초고층 건축물의 높이 분포

100층 이상의 초고층 건축물들이 다시 추진되고 있어서 국내에도 진정한 초고층 건축의 시대가 곧 실현될 것으로 전망된다.

국제적으로는 타이페이 101(101층, 508 m)이 KLCC Tower(88층, 452 m)보다 56 m 높게 지어지면서 세계 최고층 높이로 등극한데 이어, 올해 착공될 예정인 아랍에미레이트(UAE) 두바이의 초고층 프로젝트의 경우 극비리에 추진되고 있어서 아직 최종 높이는 얼마로 결정될지 알려지지 않았으나 완공 이후에도 당분간 세계 최고층의 자리를 지키기 위해 기존의 세계 최고층이인 타이페이 101 보다 적어도 100여 m를 상회하는 높이가 될 것으로 전망되고 있고, 그 구조시스템도 최상부의 일부분을 제외하고는 대부분 철근콘크리트 구조로 지어질 계획이다.

\* 롯데건설기술연구소 선임연구원  
 \*\* 정희원, 롯데건설기술연구소 수석연구원  
 \*\*\* 정희원, 롯데건설 건축사업 본부장  
 \*\*\*\* 정희원, 한양대학교 건축학부 박사과정  
 \*\*\*\*\* 정희원, 한양대학교 건축학부 교수

국내에도 이제 높이 순으로 정리되어 발표되는 자료에서 세계 200위 안에 드는 건축물을 6개 가지고 있으며, 부산 제2롯데월드가 494m(107층) 규모로 시공중이고 롯데건설에서 계획 중인 잠실의 C2 프로젝트는 555m(112층)의 높이로, 서울 상암동 디지털미디어시티의 IBC 130은 570m(130층)의 높이로 각각 추진되고 있어서, 완공될 경우 타이페이 101을 능가하는 세계 최고층의 건축물이 국내에 지어질 전망이다.

이에 본고에서는 초고층 RC 건축물의 구조시스템과 국내 기술현황 및 최근에 지어졌거나 추진되고 있는 국내외 초고층 건축물의 사례를 중심으로 알아본다.

## 2. 국내 현황

### 2.1 국내 초고층건축물 현황

최근의 국내 초고층 건축물의 가장 큰 특징은 주거가 주목적인 복합용도의 건축물이 주류를 이루고 있으며, 거주자의 사용성에 대한 인식이 높아지고 있다. 초창기 업무용 중심의 단일용도의 초고층 건축물에서 주거에 초점이 맞추어지면서 횡 하중에 의한 건축물의 구조적 안정성 뿐만 아니라 진동(흔들림)을 느끼지 않도록 이를 제어해주는 것에도 관심을 갖게 되었다. 또한, 초고층 건축물의 수요가 늘어나고 기술력이 축적되면서 보다 경제적인 구조 시스템과 구조 재료를 찾고 있는 추세인데, <표 1>에서 보는바와 같이 순수 철골조 보다는 SRC와 RC조가 주종을 이루고 있으며 압축강도 50 N/mm<sup>2</sup> 내외의 고강도 콘크리트의 적용이 활발히 진행되고 있다. 초고층 건축물의 구조분야의 최근 동향을 간단히 정리한다면, ① 고강도 재료의 복합적 사용, ② 공학적 시공기술 발달(거푸집 등 시스템화, 콘크리트 펌핑기술 발달), ③ 풍공학 및 진동제어기술 발전, ④ 다양한 건축형태의 구현 등이라 할 수 있다.

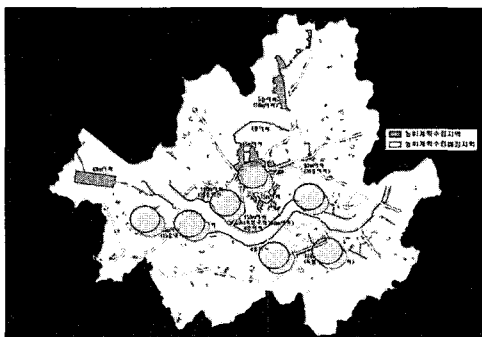


그림 3. 국내 초고층 건축물의 분포 현황

#### 2.1.1 지역분포 및 높이

2004년 현재 국내에서 준공되었거나 시공진행중인 건축물 중 그 높이가 100m가 넘는 건축물들을 대상으로 정리해 보면(표 1),

표 1. 국내 초고층 건축물 높이별 분포 현황

순위	건물명	층수	높이(m)	구조재료
1	타워펠리스III	69	261	SRC
2	목동 하이페리온(A동)	69	256	SRC
3	대한생명 63빌딩	60	249	SRC
4	타워펠리스 I	66	234	SRC
5	한국종합무역센터	54	228	SRC
6	Star Tower	45	202.7	SRC
7	타워펠리스II	55	195	SRC
8	강변 테크노마트	39	189	SRC
9	아셈타워	41	174.29	SRC
10	센티럴시티 (메리어트 호텔)	33	170	SRC
11	아카데미 스위트	51	169.7	SRC
12	목동 현대41타워	41	168	SRC
13	부산 롯데월드 I	41	167	SRC
14	LG 강남타워	38	166.85	SRC
15	보라매 웨르빌	49	162.99	SRC
16	아크로빌	46	162.8	SRC
17	국민은행 본점	41	159.35	SRC
18	두산타워	34	156.15	SRC
19	I-Park(삼성동)	47	154.3	RC
20	서초동 현대 슈퍼빌	46	150.6	SRC
21	롯데여의도캐슬아이비	35	149.32	SRC
	잠실 캐슬골드	37	149.32	SRC
23	갤러리아 팰리스	46	149	RC
24	동부금융센터	35	148	SRC
25	금호 리첸시아	40	144.0	SRC
26	쌍용투자빌딩	36	140	SRC
27	군인공제회관	32	139.7	SRC
28	환타지아타워	42	139.2	SRC
29	롯데호텔 (잠실)	34	138	SRC
30	대치동 포스코 센터	31	136	SRC
31	향군연금빌딩	34	136	SRC
32	LG 트윈타워	34	135	SRC
33	종로타워	24	134	SRC
34	목동 웨르빌	39	133.45	SRC
35	트럼프월드 I	41	133	RC
36	나산스위트	37	132.90	SRC
37	대치동 글라스타워	32	132	SRC
38	분당 미켈란체르빌	38	130	SRC
39	현대 파크빌	36	128.8	SRC
	해운대 중동 오피스텔	43	128.8	RC
41	트럼프월드 II	36	127.2	RC
42	분당 코오롱 트리폴리스 I	37	126.87	SRC
43	여의도 리버타워	37	125.15	SRC
44	롯데 캐슬엠포아어	39	124.5	SRC
45	트리폴리스 하늘채	30	120.7	SRC
46	서초동 아크로비스타	37	120	RC
	강변 아크로리버	37	120	RC
48	롯데 관악타워	32	118.44	SRC
49	우성캐릭터199 (오피스텔동)	31	116.50	SRC
50	한라 시그마타워	30	116.15	SRC
51	분당 파빌리온	33	114.75	SRC
52	분당 I-Space	34	114.65	RC
53	31빌딩	31	114	SRC
54	우성 캐릭터199(주거동)		113.25	SRC
55	인터컨티넨탈호텔	33	111	SRC
56	동방중로빌딩	32	110	SRC
57	분당 파크뷰	35	109.50	RC
58	마포 오벨리스크	37	109.30	SRC
59	한국 컴퓨터 빌딩	25	101	SRC
60	트럼프 월드 III	31	100.6	RC
61	분당 로얄펠리스 I	33	100	RC

①지역적으로는 서울특별시 강남구 일대와 경기도 성남시 분당구, 부산광역시 해운대구에 집중되며, ②높이는 100m에서 200m 사이가 대부분이며, ③용도는 흔히 주상복합이라 불리는 주거와 상업·사무시설의 복합용도가 주를 이루고 있으며, ④100층 이상의 초고층 건축물 프로젝트가 추진 중에 있다는 특징이 있다.

### 2.1.2 구조시스템

국내의 경우 40~70층 규모의 주거용도 초고층 건축물이 주종을 이루고 있으며, <표 2>와 같이 모멘트저항골조(MRF)와 코어 전단벽으로 이루어진 이중골조시스템과 여기에 아웃리거 및 벨트트러스(또는 벨트월)를 1~2개소 도입하여 횡력에 저항하는 구조시스템이 가장 많이 사용되고 있다. 최근에는 무량판 RC 구조에 시스템 거푸집과 고강도 콘크리트의 사용 및 코어월 선행공법 등의 도입으로 철골 또는 SRC 구조보다 경제적이면서도 공기를 획기적으로 단축시키는 형태로 설계·시공되는 사례가 증가하고 있다.

국내 초고층 건축물의 거주자들의 선호도 조사에서 '전망'이 좋다는 점을 높게 평가하고 있음을 통해 보듯, 주거용도의 국내 초고층 건축물의 구조시스템에서 코어는 중앙 또는 편심으로 위치하여 계획되는 평면형태가 많이 나타나고 있으며(표 3), 이는 조망 확보 측면만이 아닌 횡력저항 구조시스템으로서 코어의 전단벽을 효율적으로 활용하는 데에도 유리한 것이다.

## 2.2 초고층 기술현황

### 2.2.1 고강도 콘크리트 적용

국내 초고층 건축물에서의 고강도 콘크리트 적용실례는 <표 4>에 보이는 것과 같이 주로 코어월과 기둥에 압축강도 40 N/mm<sup>2</sup> ~ 80 N/mm<sup>2</sup>까지 적용되고 있으며, 50 N/mm<sup>2</sup> 정도가 상용화된 것으로 보여진다.

초고층 건축에서 고강도 콘크리트의 사용은 코어벽체 및 기둥의 단면축소를 위한 목적 외에도 횡력에 대한 저항능력, 즉 강성 증대를 위해서도 필수적이며, 조기강도 발현으로 거푸집 존치기간 단축이 가능하므로 ACS 거푸집을 이용한 코어월 선행공법의 적용을 통한 공기단축에도 크게 기여한다.

또한, 설계단계에서 ①최대한 구조벽체의 양을 축소하도록 협의하여 결정하고 ②벽체와 접합되는 부재에 대한 시공성을 고려한 설계 ③아웃리거의 설치나 Embedded 플레이트가 있을 경우 이에 대한 시공을 감안한 설계가 이루어진다면 더욱 효율적인 구조 설계가 될 수 있을 것이다.

롯데건설의 경우 고강도 콘크리트의 지속적인 연구 및 시험시공을 통해 고강도 콘크리트 상용화에 노력하여 현재 롯데캐슬 엠파이어(39층, 124.5m), 아이비(35층, 149m)에 콘크리트 압축강도 50 N/mm<sup>2</sup>까지 상용화시켜놓은 상태에 있다.

표 2. 국내 초고층 건축물의 횡력저항 구조시스템

Lateral Resisting System								quantity
RC Core Wall	SRC Rigid Frame	Outtrigger/Belt Truss	Flat Slab	Steel	Steel Brace	RC Shear Wall	Super Structure	
								40
								11
								5
								3
								1
								2
								1
Total								63

표 3. 국내 초고층 건축물의 평면에서 코어의 위치

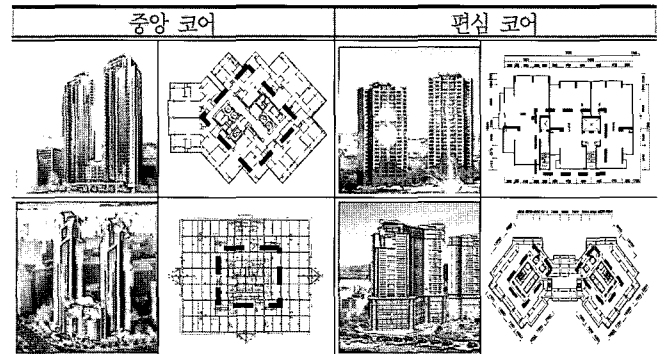


표 4. 고강도 콘크리트 적용현황

프로젝트	적용 부위	설계기준 강도(N/mm <sup>2</sup> )
롯데캐슬 엠파이어 (여의도)	RC Core Wall	50
	SRC Column	27
	Foundation	35
	Slab	24, 27
타워 펠리스Ⅲ (도곡동)	RC Core Wall	40, 50
	SRC Column	40, 50, 80
	Foundation	30, 40
	Slab	24
하이 페리온 (목동)	RC Core Wall	30, 50
	SRC Column	50
	Foundation	40
트럼프 월드 I·II (여의도)	RC Core Wall	35, 40
	SRC Column	40
	Foundation	30
I-Park (삼성동)	RC Core Wall	40, 45, 50
	SRC Column	40, 45, 50
	Slab	27, 36

### 2.2.2 공사기간 단축

초고층건축 분야의 선발주자인 미국의 경우 고강도 재료의 사용과 무량판 구조 등 시공이 단순한 구조시스템의 선정, 시스템화된 거푸집의 사용 등을 종합한 고도의 시공관리기법의 발달로 지난 20여년 동안 골조공사 총공기일수를 무려 2일까지로 단축한 2 Day Cycle공법을 보편화시켜 왔다.

같은 기간 동안 지구촌 곳곳에서 층당 10~20일의 재래식

표 5. 국내 초고층 건축물의 공사기간(사무용 건축물)

건물명	규모	공사기간	
대한생명 63빌딩	60F/B3	63.3 개월	30.6일/층*
한국 종합무역센터	55F/B2	39 개월	20.9일/층
ASEM Tower	41F/B4	43 개월	29.1일/층
POSCO Center(동관)	29F/B6	42 개월	36.6일/층
LG 강남타워	38F/B6	51.5 개월	35.6일/층
Star Tower	45F/B8	74.5 개월	42.9일/층

\* 총공사기간 / 층수

표 6. 국내 초고층 건축물의 공사기간(주거용 건축물)

시공사	현장	규모	공사기간(개월)
롯데건설	롯데캐슬 엠파이어	39F/B6	38
	롯데캐슬 아이비	35F/B6	36
	롯데캐슬 골드	37F/B7	39
삼성물산/중공업	타워 펠리스 I	59F/B5, 66F/B5 59F/B5, 42F/B5	36
	타워 펠리스 II	57F/B6, 57F/B6	36
	타워 펠리스 III	69F/B6	36
현대건설	서초동 슈퍼빌	46F/B3, 37F/B3, 24F/B3, 22F/B3, 14F/B3(오피스)	45
	하이 페리온	69F/B6, 59F/B6, 54F/B6, 6F/B6(백화점)	44
대림산업	아크로빌	46F/B6, 46F/B6, 32F/B6	35
	아크로리버	37F/B5, 29F/B5	36
	아크로비스타	29F/B6, 37F/B6, 37F/B6	41
현대 산업개발	분당 I-SPACE	34F/B3, 34F/B3, 34F/B3, 34F/B3	32
	삼성동 I-PARK	46F/B4, 39F/B3, 46F/B3	33
대우건설	트럼프 월드 I	41F/B5, 41F/B5	40
	트럼프 월드 II	36F/B6, 36F/B6	36
한화&삼성	갤러리아 펠리스	46F/B5, 46F/B5, 46F/B5	42
금호건설	리첸시아	40F/B5, 40F/B5	30
코오롱건설	분당 트리폴리스	37F/B3, 37F/B3, 37F/B3	38
포스코&SK	파크뷰	35F/B1, 35F/B1	37

사이클을 줄이기 위한 노력을 해 왔지만 아직까지도 4일 정도가 기록이며, 국내의 경우 3일까지 줄인 사례가 발표되어 있지만, 70층 정도 규모의 초고층건축물의 총 공사기간은 3년 남짓 걸리고 있는 실정이다. <표 5>와 <표 6>에는 국내 초고층 건축물의 공사기간을 주거용과 사무용으로 구분하여 각 사례별로 정리한 것이다.

### 3. 초고층 건축물의 구조 시스템

#### 3.1 초고층 구조시스템

횡력저항 구조시스템으로 대표되는 초고층 건축물의 구조시스템은 잘 알려진 전단벽 + 모멘트저항골조(MRF)의 이중골조시스템과 이중골조에 가새(Brace)를 두거나 아웃리거 + 벨트트러스(벨트월)시스템을 적용하여 횡변위를 조절한 것, 그리고 기둥 간격(1.5 ~ 4.5m)을 좁게 배열하고 큰 춤(0.6 ~ 1.2m)으로 강성을 키운 스펠드럴 보에 의해 기둥들을 연결한 튜브구조시스템(골조튜브, 트러스튜브, 묶음튜브 등으로 세분)이 있으며, 국내에는 잘 적용되지 않고 있는 Super Structure시스템 등이 대표적인 초고층 구조시스템이다. 전술한 바와 같이 국내에서는 코어에 전단벽을 두고 강접 골조와 별도의 아웃리거 시스템을 사용한 경우가 가장 많다.(<그림 4> 참조)

현재 국내에는 100층 이상의 초고층 건축물은 존재하지 않고 계획안들이 발표되어 있는 상태이다. 다음 4장에서 사례로 살펴볼 것지만, 이들 프로젝트에서 횡력저항시스템으로 적용되는 것은 현 횡력저항시스템으로 보편적으로 사용되고 있는 아웃리거시스템과 벨트 트러스를 사용한 시스템과 함께 TMD나 TLD와 같은 진동제어 장치를 적용하고 있는데, 이는 100층 이상의 건축물의 경우 그 강성을 증대시켜 횡 변위와 진동을 제어하는 것이 어느 정도 한계가 있고 비경제적이기 때문에 물량증가에 의한 방법 보다는 진동제어장치를 사용하는 것이 효율적인 경우가 많다.(3.3.2절 참조) 그동안 많이 알려진 구조시스템에 대하여는 전술된 사례중심으로 간략히 소개하고 여기서는 Super Structure의 일종으로 C2 프로젝트에 국내 최초로 도입예정인 거대골조시스템(Mega Frame Structure)에 대하여 소개한다.

##### 3.1.1 거대골조시스템

일반적으로 건축물의 세장비(높이/단변길이)가 5.0 이상이면 초고층 건축물로 여겨지며, 7.0을 넘어서게 되면 횡력에 대한 특별한 구조시스템을 강구해야하는 것으로 알려져 있다. 이에 초고층 건물 세장비의 한계로 여겨져 오던 7.0을 넘어선 새로운 범주의 구조시스템으로 거대 기둥(Super Column)과 전달층(Transfer Truss Floor)를 사용하며, 횡 하중과 연직하중에 모두 저항하는 3차원 트러스 형태로 모듈화된 구조체를 반복적으로 사용하는 형식을 거대골조 시스템(Mega Frame Structure)이라고 한다.

□ RC Core Wall + MRF

□ RC Core Wall + MRF + Outrigger/Belt Truss

□ Steel(SRC) MRF + Steel Brace

■ RC Core Wall + Super Structure

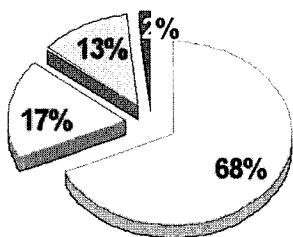


그림 4. 국내 초고층 건축물의 구조시스템 현황(100m 이상)

거대 골조 시스템은 매우 큰 강성을 가진 기둥(Super Column)과 이에 연결되는 강성이 큰 전달보로 구성되며 원칙적으로 강성 골조 시스템의 거동과 유사하다. 따라서 거대 골조 시스템은 전달보로 연결된 거대기둥의 강성으로 수평하중을 지지하며 거대 기둥은 수직 트러스 가새 등에 의한 보강이 필요하다. 전달보는 상부층의 누적된 수직하중을 거대기둥에 전달하는 역할을 하며 일반적으로 기계층에 위치하고 이 층을 전달층(Transfer Floor)이라 한다. 이 전달층의 층고 또는 거대기둥의 층은 상부에 지지하는 층의 수에 따라 다르지만 주로 1~2층의 높이가 된다. 그리고 거대기둥 사이에 위치하는 골조기둥들은 전달층 사이의 수직하중만을 부담하므로 모든 층에 걸쳐 균일한 비교적 작은 단면으로 설계가 가능하다. 일반적인 전달보 형식과 달리 강성이 큰 보에 아래 층들을 매달아 지지하는 서스펜션 방식도 있으며 홍콩의 중국은행(Bank of China)이 이 방법을 사용하였다.

### 3.2 초고층 구조물로서의 RC조의 위상

초고층 건축물이 세계 각국에서 주요 도시들의 스카이라인을 형성하며 도시의 상징으로 자리매김하게 된 배경에는 수직 동선을 가능하게 한 엘리베이터의 개발과 더불어 고강도 콘크리트의 실용화와 같은 공학적인 발전이 원동력이 된 것이다.

이러한 초고층 건축물은 구조적 안정성뿐만 아니라 거주자의 사용성 문제에 대한 요구사항도 까다롭게 설정되어지는데, 이러한 기준들은 업무용 보다 주거용에서 더욱 엄격하게 적용이 되고 있다. 지진과 바람으로 대별되는 횡하중의 작용시 구조물의 동적 특성을 나타내는 감쇠율(Damping Ratio)에 있어서도 RC조(0.02 내외)가 철골조(0.01 내외) 보다 크기 때문에 큰 횡하중의 작용시에 초고층 건축물의 흔들림에 대하여 가속도가  $1/\sqrt{2}$  정도 줄어들게 되므로 결과적으로 수평진동에 대하여  $\sqrt{2}$ 배 유리한 것으로 볼 수 있겠다(표 7). 이 때문에 일본에서는 철골조의 초고층 아파트 입주자들의 불만(상부층 거주자들이 횡방향 진동에 의한 멀미호소 등)이 제기되면서 1990년대 이후 주거용도의 초고층 건축물은 RC조 또는 SRC조로 지어지고 있다.

또한 공사비에 있어서도 철골보다 RC조가 10~30% 이상 저렴한 것은 매우 큰 이점이라 할 수 있겠으며, SRC조나 콘크리트채움강관(CFT)구조에 비해서도 10% 정도 감소되는 것으로 나타난다. 이러한 경제성 이외에도 <표 7>과 같이 우수한 사용성과 내구성을 갖는 장점이 있으며, 강성이 크기 때문에 처짐에 유리하여 층고를 줄일 수 있고 주거성능 즉, 진동과 소음에 강하며 화재시 내화성능 면에도 유리한 특징을 가지고 있다.

따라서 초고층 구조물로서 RC 구조물의 사용은 구조적 안정성뿐만 아니라 공기단축과 경제성, 사용성 모두 가장 우수한 구조시스템으로 인정받고 있으며, 초창기 철골조 중심의 초고층건축물의 건립에서 벗어나 점점 RC조의 장점을 살린 복합구조 또

표 7. 초고층 건축물에 RC조 적용시 장점

항목	장점
풍하중에 대한 진동제어	철골조에 비해 통상 2배(사용성 상태)의 감쇠율(damping ratio)을 가짐으로 $\sqrt{2}$ 배 유리함
바닥 진동	고정하중과 감쇠율(damping)이 커서 바닥 진동 작음
처짐	상대적으로 강성이 크기 때문에 처짐에 유리함
내화성	콘크리트조는 일반적인 철근 피복두께로도 4시간 정도의 내화성능을 보유
단열 성능	콘크리트의 열전도율이 상대적으로 낮아 단열성능이 상대적으로 높음

표 8. 초고층 건축물의 사용성 제한 기준

항목	제한치	제정기관	비고
횡변위	H/250~H/1000	NBCC	H: 건축물의 높이
가속도	1~3%g	NBCC	g: 중력가속도, 10년 재현주기
층간변위	0.15h	건설교통부	h: 층고

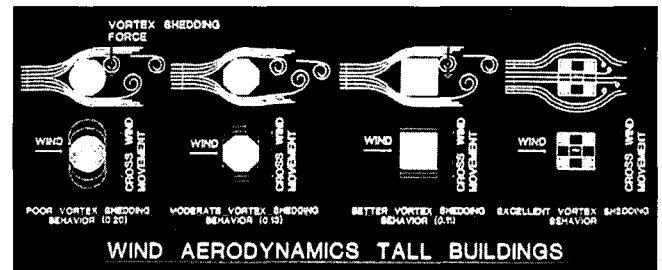


그림 5. 풍하중 작용시 난류작용에 의한 흔들림(수평진동)

표 9. 수평진동에 대한 거주성

인지정도	가속도(g)
인지하지 못함	0.005 이하
인지 가능	0.005 ~ 0.015
불쾌감 느낌	0.015 ~ 0.05
매우 불쾌함	0.05 ~ 0.15
참기 어려움	0.15 이상

는 순수 RC조로 계획된 사례가 급격히 증가하고 있다.

### 3.3 초고층 사용성

#### 3.3.1 사용성 제한기준

초고층 건축물에서는 건물의 높이와 세장비의 증가로 인해 횡하중에 대한 영향이 매우 커지게 되므로 구조적 안정성을 확보한 경우라도 거주자의 사용성에 문제를 유발하지 않도록 수평방향의 과도한 변위에 대한 제한(최상층에서의 수평변위와 층간변위)과 횡방향 진동 및 바닥판의 진동에 대한 제한 범위를 설정하고 있다(<표 8> 참조). 특히, 건물에 작용하는 풍력의 영향중 풍력의 직각방향으로의 난류작용(Vortex Shedding)에 의한 구조물의 흔들림(수평진동)이 크게 발생하게 되고 이 수평진동에 대한 가

속도가 중력가속도(g)에 대하여 0.005g ~ 0.015g일 때 거주자가 감지하기 시작하여 0.015g ~ 0.05g 범위가 되면 불쾌감을 느끼고 0.15g 이상이 되면 참기 어려운 것으로 알려져 있으며 (<그림 5>, <표 9> 참조), 캐나다 기준(National Building Code of Canada)에서는 최상층에서 유발되는 가속도의 최대값을 0.01g ~ 0.03g 범위로 제한하여 거주자가 불쾌감을 느끼지 않도록 하고 주거용 건물은 0.01g에 가까운 낮은 값을 사용하도록 권장하고 있다.

변위를 기준으로 제한을 두는 경우 층간변위는 층고(h)의 15% (0.15h) 이상 차이가 발생하지 않도록 하고, 최상층에서의 횡변위는 일반적으로 건물높이(H)에 대해 H/400 ~ H/600 범위 내에서 목표변위를 설정하여 구조설계에 적용하고 있다. 이러한 제한은 과도한 변위에 의해 유발될 수 있는 마감재나 내부 칸막이벽 등의 손상을 고려한 것이며, 캐나다 기준(NBCC)에서는 최상층 횡변위를 H/250 ~ H/1000 범위로 제한하고 상세한 해석을 하지 않는 경우 H/500을 권장값으로 제시하고 있다. 주의할 점은 최상층의 변위가 제한범위 내로 만족한 경우라도 장주기를 갖는 구조물의 경우 가속도가 크게 발생할 수 있으므로 유의해야 한다.

바닥 진동에 대하여는 <표 10>과 같이 제안자의 연구결과에 따라 약간씩 차이가 있긴 하나 대략 100 ~ 120 dB 범위의 진동

레벨에 대해 거주자가 불쾌감을 느끼는 시점으로 제시되고 있으며, 바닥구조의 특성(강성, 고유진동수, 감쇄효과)에 따른 반진폭과 진동수(Hz)의 관계를 나타낸 마이스터의 진동감각곡선(그림 6)이 많이 활용되고 있다.

3.3.2 진동제어장치

위에서 살펴본 바와 같이 거주자의 사용성 측면에서 구조물의 진동(지진동, 풍진동, 공해진동 등)에 대한 불쾌감을 느끼지 않도록 하는 기술적 접근방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 초고층 건축의 경우 풍하중에 의한 횡 방향 가진력의 진동제어는 거주성과 관련하여 더욱 강조되고 있으며, 호텔과 아파트와 같은 주거시설을 포함하고 있는 초고층 건축물의 경우 <표 11>과 같이 거주성 향상을 목적으로 각종 진동제어장치(Structural Dynamics Control Devices)들이 개발되어 적용되고 있다.

초고층 주거용 건축물은 업무용 건축물과는 달리 바람이나 지진 하중에 의한 건물의 흔들림에 대하여 거주자들에게 보다 쾌적한 공간을 제공하도록 배려되어야 하며, 이를 위해 건물의 진동 주기를 7초 이내로 유도하는 것이 바람직하다. 이러한 조절은 건물의 강성(Stiffness)을 증대시키는 방법도 가능하나 그 효율성이 떨어지므로 그 대안으로 제진장치를 적용하게 되며 <표 12>에는 그 사례를 정리해 놓았다.

<그림 7>에는 타이페이 101에서 TMD를 설치하는 모습을 사진으로 나타낸 것이다. 강풍에 의한 진동 저감목적으로 88층에 설치된 동조질량댐퍼(Tuned mass damper)로서 800 톤을 지지할 수 있고, 그 직경은 5.5 m, 중량은 650 톤이며 125 mm 강판을 42겹으로 하여 만든 것이며, 케이블은 캐나다, VDD 부재는 이탈리아와 프랑스에서 각각 제작되었고 완공 후 사용자가 관람할 수 있도록 계획한 점이 특이한 사례이다.

표 10. 바닥 진동에 대한 제한

제안자/ 제안 단체	진동레벨(dB)	
	인식 시점	불쾌감을 느끼는 시점
Reiher & Meister	90	112
DIN 4150	82	102
Bachmann & Ammann	60	100
Steffens	82	105
ANSI 53.18	73	99
Dieckmann	82	122

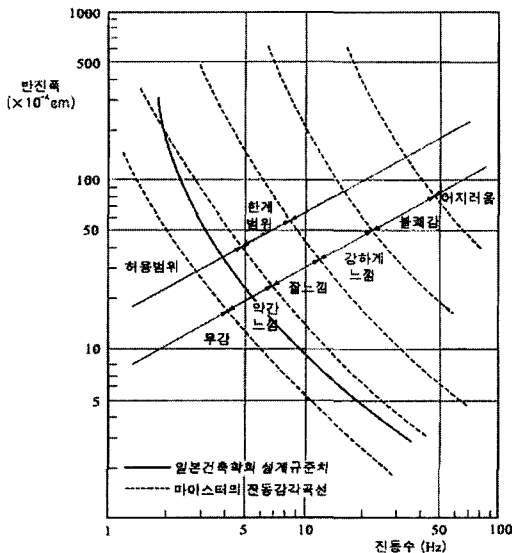


그림 6. 마이스터의 진동감각 곡선

표 11. 진동제어 시스템 종류

진동제어 시스템 종류	개요
TMD (Tuned mass Damper)	진동감쇠장치를 이용하여 횡변위 제어
HMD (Hybrid Mass Damper)	질량체를 이용하여 능동, 수동제어의 동시 사용
AMD (Active Mass Damper)	질량체를 이용한 능동제어방식
TLD (Tuned Liquid Damper)	단단한 짐수통에 일정량의 액체를 삽입후 움직임으로 진동흡수
ABS (Active Bracing System)	건(tendon)을 이용한 건물 자동제어
기타	Oil Damper, Viscous-Shear Damper

표 12 초고층 건축물에 사용된 진동제어장치

건물명	높이	구조형식	용도	제진장치	설치연도
랜드마크 타워	296 m	S(SRC)	사무실, 호텔	TAD	1993년
링케이이트 타워	255 m	S	사무실, 호텔	AMD	1996년
WTC	417 m	S	사무실	VSD	1972년
KLCC	452 m	SRC	사무실	TMD	1996년

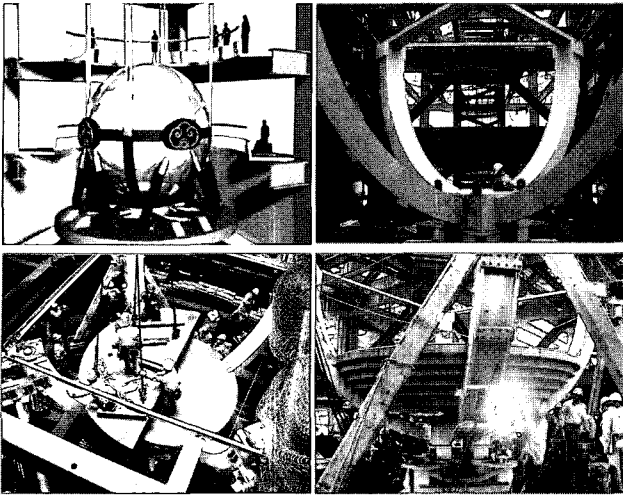
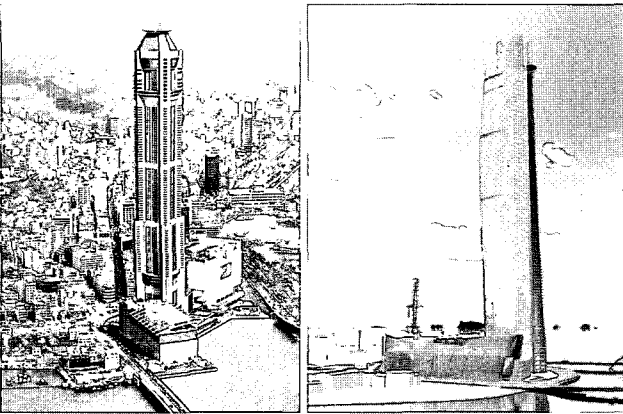


그림 7. TMD 설치공사 전경(타이페이 101)



a. 초기안                      b. 확정안

그림 8. 부산 제2롯데월드 계획안

표 13. 부산 제2롯데월드 개요

위 치 :	부산광역시 중구 중앙동 6가(舊 시청사 부지)
용 도 :	백화점, 호텔, 면세점, 할인점, 영화관, 쇼핑몰 등
부지면적 :	1만 2,347평(매립지 3,116평 포함)
연 면 적 :	16만 5,631평
층 수 :	지하 6층, 지상 107층(높이 : 494 m)

#### 4. 초고층 프로젝트 사례

##### 4.1 부산 제2롯데월드(107층, 494 m)

###### 4.1.1 개요

부산 제2롯데월드 프로젝트는 롯데쇼핑이 주체로 지난 2000년 2월 18일 옛 부산시청 터에서 기공식을 가진 후 현재는 롯데 건설이 지하 차수공사 진행 중에 있으며, 착공된 것으로는 국내 최고층의 건축물이다.

부산 제2롯데월드의 규모는 지하 6층, 지상 107층에 494m 높이의 타워동과 함께 전체 1만 5000여 평의 대지에 연면적 46만 4,556㎡로 개발이 진행되고 있다. 단지 내 주요 시설로는

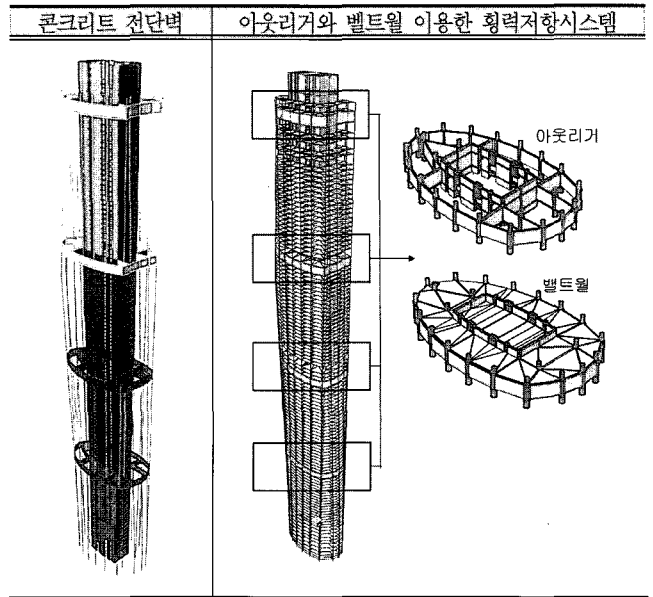
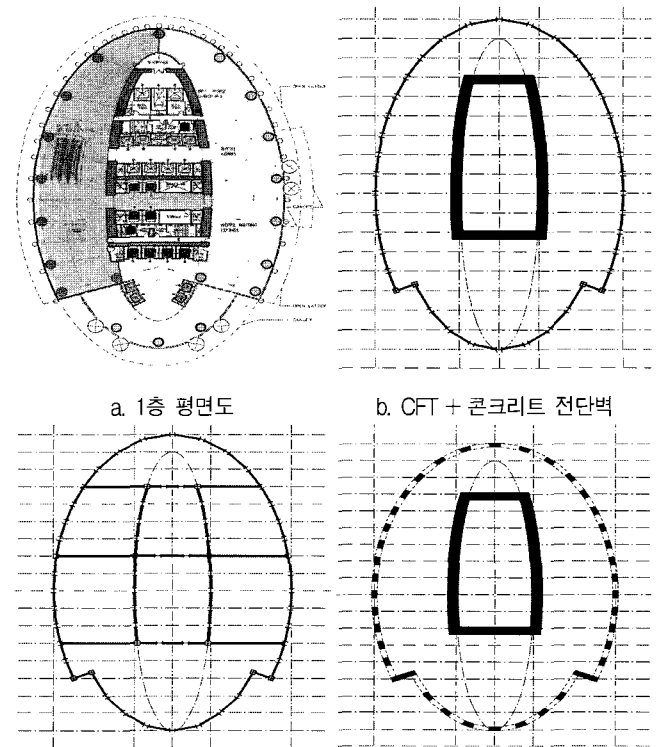


그림 9. 부산 제2롯데월드 구조시스템



c. 철골조 시스템                      d. 튜브시스템 + 콘크리트 전단벽

그림 10. 부산 제2롯데월드 구조 시스템 검토안

지하에 아이스링크가 들어서고, 지상 104 ~ 107층에는 테마파크가 배치될 예정이며, 이 외에 객실 수 약 1,500실의 호텔과 공연장, 게임룸, 헬스클럽, 해저 레스토랑 등이 건설된다. 관광객은 1년에 1,000만 명 정도를 예상하고 있다. 설계는 범 건축사 사무소를 주관사로 하고 미국의 설계업체와 컨소시엄을 통해 공동수행하는 것으로 되어 있다. 공사 기간은 당초 2000년 12월부터 2005년 12월까지였으며, 부산의 강한 바람의 영향을 고려하며

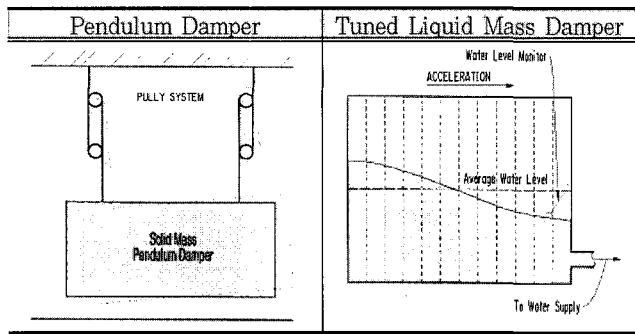


그림 11. 부산 제2롯데월드 진동제어장치

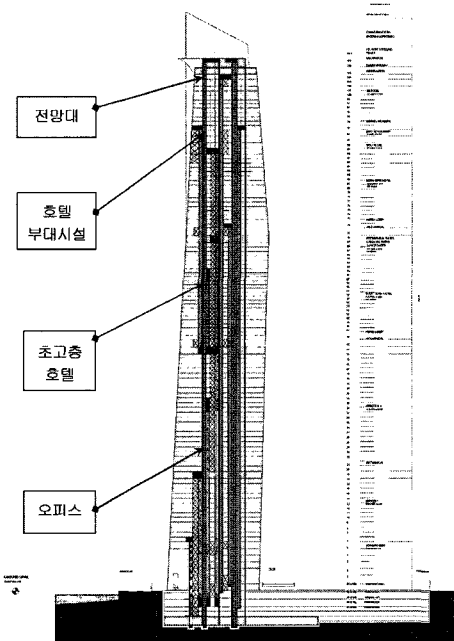


그림 12. 부산 제2롯데월드 타워등 단면

유선형의 건물모양과 상부 2개층에 TLD를 설치하여 횡 변위를 제어하게 된다. 494m로 계획되어 완공이 되면 높이 면에서도 타이페이 101(101층, 508m) 다음이 되는 초고층 건축물이고, KLCC Tower(452m) 보다 42m 높게 지어지고 있다.

4.1.2 구조 시스템

구조 시스템은 <그림 9>와 <그림 10>에 나타난 것과 같이 중앙부 코어에 콘크리트 전단벽을 설치하고 4개소의 아웃리거와 벨트월을 설치하여 횡력에 대하여 저항하는 시스템을 가지고 있다. <그림 10>에서와 같이 3가지 형태의 구조 시스템이 검토되어졌으며, <그림 10(b)>가 채택된 계획안이다. 각각은 공사비용과 공사기간, 작업난이도에서 장단점을 가지고 있으며, 콘크리트 전단벽과 CFT 기둥으로 횡력에 저항하는 구조시스템은 공사비용은 다소 비싸지만, 공사기간이 상대적으로 짧고 외곽기둥이 상대적으로 작아지는 장점을 가지고 있다.

난류작용(Vortex Shedding)에 의한 비틀림 모멘트를 고려하

여 유선형의 평면을 택하였으며 기둥에는 콘크리트 기둥과 CFT 기둥을 직경 0.7m에서 2m까지 사용하며 아웃리거(Concrete Wall Outriggers)와 Concrete Floor Framing을 사용하여 횡 변위를 제어하며 <그림 11>과 같은 TLD를 최상부 2개층에 설치하여 횡 변위를 제어하게 된다.

4.2 C2 프로젝트(112층, 555 m)

4.2.1 개요

잠실에 추진 중인 본 프로젝트는 일대를 상제리제 거리로 개발하는 프로젝트이며 555m 높이로 계획되어 있는 세계 최고층 건축물과 위락시설로 이루어져 있다. 초고층 건축물은 쇼핑몰, 사무실, 호텔의 복합용도를 가진 건축물이며 거대골조시스템과 콘크리트 전단벽, 모멘트 강접골조, 댐핑 시스템에 의하여 하중에 저항하는 구조물이다. 당장 세계 최고 높이가 될 수 있는 높이를 가진 본 구조물은 거대골조를 사용했다는 점에서 현재 기본적인 컨셉 디자인 단계에 있지만, 국내 초고층 건축물의 구조시스템에서 새로운 시도가 될 것이다.

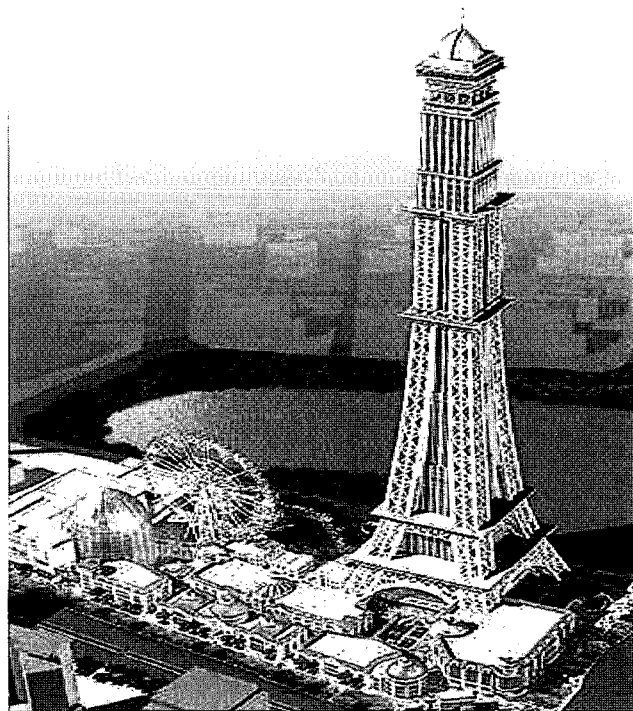


그림 13. C2 프로젝트 조감도

표 14. C2 프로젝트 개요

규 모 :	지상 112층, 지하 5층
높 이 :	555 m
대지면적 :	87.182 m <sup>2</sup>
연 면 적 :	561.444 m <sup>2</sup>
기 능 :	타워 : 호텔, 사무실, 상점 포디용 : 상점, 카지노, 부대시설
구 조 :	Superstructure : S3 Substructure : RC / SRC



### 4.2.2 C2의 구조시스템

적용된 구조 시스템은 4개의 코너에 SRC 기둥들을 철골 가새로 묶어 하나의 거대 기둥(Super Column)처럼 구성된 거대 골조 시스템(Mega Frame Structure)을 적용하였다. 이와 함께 39층까지는 콘크리트 코어 전단벽이 설치되고 내부의 강성골조(Moment Frame)들이 몇 개층 단위로 Stepped Back되어 설치되며, 각 요소별 역할은 다음과 같다.

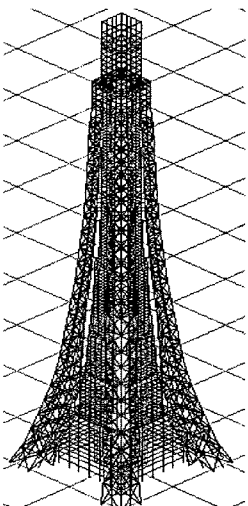

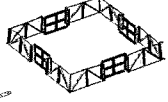

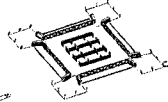

	100층 이상 MRF	
	Leg(super column) 100층까지	
	콘크리트 전단벽 39층까지	
	Transfer Truss	
	하부골조	

그림 14. C2 프로젝트 구조 시스템

#### (1) Braced Frame - "Legs"

Leg(통상 Super Column으로 볼 수 있음)는 SRC 기둥 여러 개를 가새로 묶어 하나의 큰 기둥처럼 묶은 것을 말한다. Leg가 구조물에 작용하는 하중의 대부분을 기초에 전달하는 역할을 하며, 횡하중에 대한 전도를 막기 위해 고정하중의 상당부분이 Transfer Truss를 통해 Legs로 전달된다. 강성골조(Moment Frame)는 Leg가 횡하중에 의한 전도모멘트에 효과적으로 저항하도록 Leg사이의 수직방향 전단력을 전달하는 역할을 한다. 이에 대해 기초에서 39층 구간에서 전도모멘트에 대한 저항은 Leg가 주로 담당하고 전단력은 콘크리트 코어 전단벽이 담당하게 되며, 40층 이상의 콘크리트 코어 전단벽이 없는 구간에서는 Leg가 전도모멘트와 전단력 모두에 대해 저항을 한다. Leg Column이 경사진 관계로 수직하중에 의해 Leg base에서 수평방향항력(Horizontal Thrust Force)이 발생하고 그 크기가 상당하기 때문에 기둥들 사이를 Post-Tensioned Concrete Tie Beam을 걸어서 잡아주도록 계획되어 있는 구조이다.

#### (2) Moment Frame

기초부터 100층까지는 Leg사이의 구조물 테두리에 위치하고, 100층 위부터는 Legs가 없기 때문에 구조물 전체의 외곽에 위치한다. 따라서, Moment Frame이 100층 위부분에서는 수직하중과 횡하중에 대해 저항하고 100층 이하에서는 주로 수직하중

에 대해서만 저항하며 Leg사이의 수직방향 전단력을 전달하는 역할도 수행한다. Moment Frame은 상부층으로 올라가면서 몇 개 층 단위로 stepped back하며 이 지점에서는 상부하중을 Leg로 전달하기 위해 Transfer Truss가 사용된다.

#### (3) Concrete Shear Walls

건물 중앙부 엘리베이터 이동로 주변에 기초부터 39층까지 설치된다. 주된 기능은 풍하중과 지진하중에 의한 수평전단력에 저항하는 것이며 바닥하중 일부를 기초로 전달하는 역할도 한다.

### 4.2.3 C2의 구조해석

#### (1) 최상층 횡변위

범용 구조해석 프로그램 MIDAS Genw.를 사용하여 고유주기와 풍하중에 대한 변위를 해석하였다. 횡변위에 대한 해석결과 약 77 cm ~ 79 cm의 최대 횡변위 발생으로 한계 변위량을 H/500으로 보았을 때, H/647 ~ H/630 사이의 값으로 허용치를 만족시키고 있다.

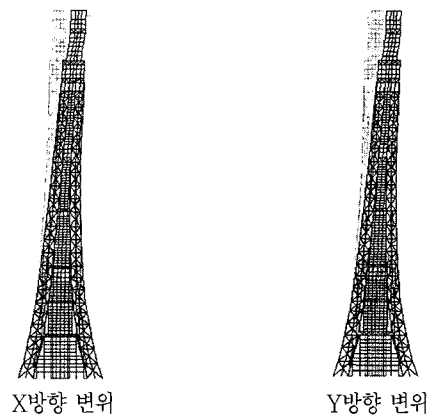


그림 15. 횡 변위 해석 결과

#### (2) 고유주기

고유주기 해석결과 <그림 16>과 같이 1차 모드는 강성이 상대적으로 약한 Y방향으로 발생하였고 2차 모드는 X방향, 3차 모드는 비틀림 형상으로 나타나 구조적 이론에 합치된다.

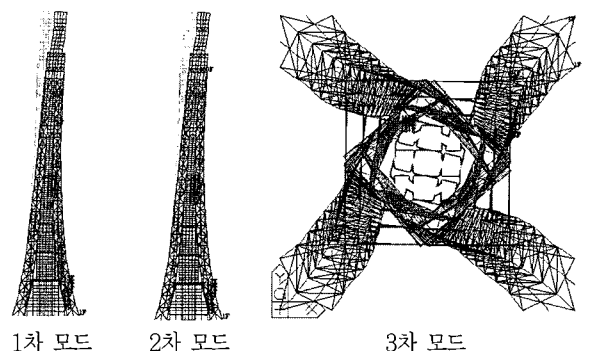


그림 16. 고유주기 해석 결과

### 4.3 KLCC Tower(88층, 452 m)

#### 4.3.1 개요

1996년 완공되어 타이페이 101 건립 이전까지 높이 452m로서 세계 최고층 건축물이었던 KLCC Tower는 2동의 타워 중 한 동(Tower 2)과 Sky Bridge가 한국 기업에 의해 시공된 것으로 잘 알려져 있다.

#### 4.3.2 구조 시스템

구조형식은 골조튜브(Framed Tube)와 코어의 전단벽에 아웃리거를 도입한 것으로 순수 RC조로 건립된 세계 최고층의 건축물이며, 여기에 사용된 고강도 콘크리트는 기초에 60 N/mm<sup>2</sup>, 기둥과 코어월에는 저층부의 80 N/mm<sup>2</sup>으로 시작하여 고층부로 가면서 60 N/mm<sup>2</sup>과 40 N/mm<sup>2</sup>의 콘크리트가 사용되었다.

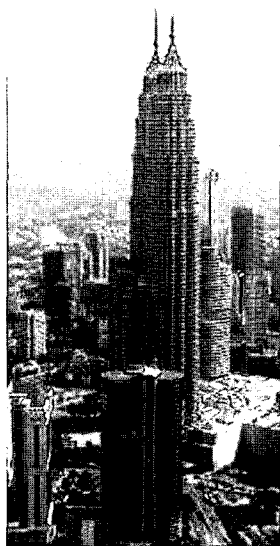


그림 17. KLCC Tower 전경

표 15. 프로젝트 개요

규모	지상 88층, 지하 6층
높이	452 m
대지면적	162,000 m <sup>2</sup>
연면적	66,000 m <sup>2</sup> (기준층 : 790 m <sup>2</sup> )
구조	RC조(슬래브 : 합성구조)

표 16. 고강도 콘크리트 적용

적용부위	콘크리트 강도(N/mm <sup>2</sup> )
기초	60(매트), 45(파일)
기둥	80, 60, 40
코어월	80, 60, 40

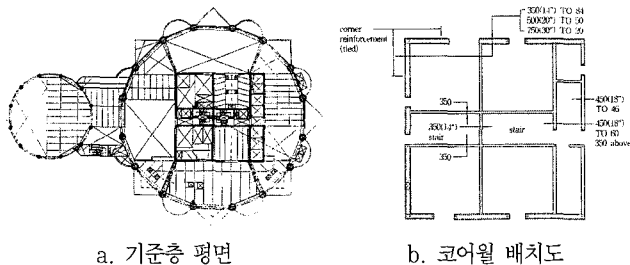


그림 18. 코어월 평면도

### 4.4 타이페이 101(101층, 505 m)

#### 4.4.1 개요

현재 세계 최고층 높이의 건축물로 CFT 기둥에 70 N/mm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트를 사용한 초고층 건축물이다.

#### 4.4.2 구조 시스템

Super Column과 CFT 기둥으로 골조를 이루고 코어에는 RC 전단벽이 설치된 구조이며, 8개층 단위로 경사졌다가 다시 셋백(Set Back)이 되는 부분에 각각 아웃리거가 설치되고 그 위에 피난 발코니의 개념을 적용한 구조시스템으로 되어있다.

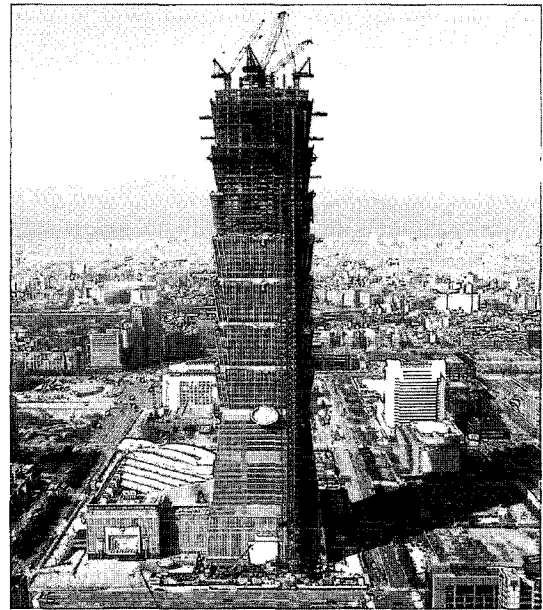


그림 19. 타이페이 101 전경

표 17. 프로젝트 개요

규모	지상 101층, 지하 5층
높이	508 m
대지면적	3만 277 m <sup>2</sup>
연면적	41만 2,500 m <sup>2</sup>
구조	Super structure : Steel Sub structure : RC(코어)/SRC(CFT 기둥)

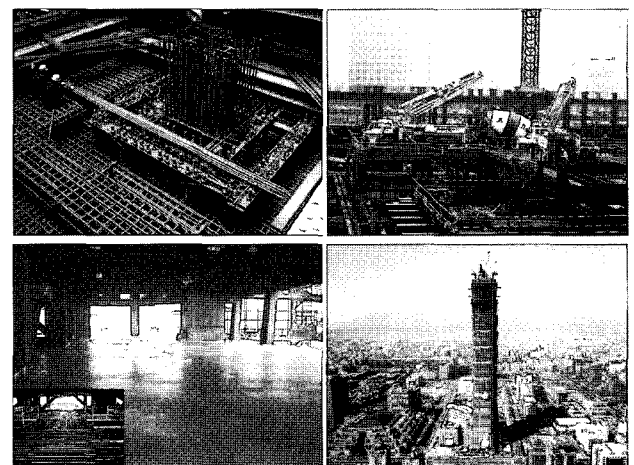


그림 20. 타이페이 101 시공모습

표 18. 고강도 콘크리트 적용

적용부위	콘크리트 강도(N/mm <sup>2</sup> )
기초(Mat. foundation)	42
기둥(CFT Column)	70

## 5. 맺음말

엘리베이터의 개발로 촉진된 초고층건축물의 경우 도시의 스카이라인 형성을 비롯한 상징적 이미지의 구축의 단계를 넘어서 이제는 과밀도시의 대안으로 초고층건축 자체를 수직의 도시로 발전시키려는 구상들이 구체화되고 있는 단계에 접어들었다. 서두에 언급된 UAE의 Burj 프로젝트와 인도의 초고층 프로젝트를 시발점으로 하여 향후 10년 이내에는 200층 내외의 초고층 건축물이 세워질 전망이고, 20~30년 후에는 수백 층 이상의 초고층 수직도시의 실현도 가능할 것으로 보인다.

한편, 최근의 콘크리트 기술은 콘크리트 압축강도가 800 N/mm<sup>2</sup>에 달하고 섬유보강에 의해 인성을 보유하며 매우 뛰어난 내구성을 갖는 초성능의 콘크리트로 발전하고 있어서 철근 배근이 필요 없고 그 수명도 수백 년 이상이 될 수 있는 콘크리트 구조물의 실현도 가능해질 전망이다. 미래의 초초고층건축물의 실현을 위해서도 이러한 초성능을 갖는 콘크리트 기술의 개발과 상용화가 반드시 뒷받침 되어야만 하는 것이다.

국내에서도 여러 차례 무산된 100여 층 규모의 초고층 건축물에 대한 아쉬움을 뒤로하고 이제 새롭게 추진되고 있는 500m 내외의 초고층 구상들이 차질 없이 진행이 되어 동남아시아와 중국 등에 뒤진 초고층 건축 분야에서 세계적 수준의 기술대열에 동참할 수 있게 되기를 기대한다. 초고층 건축의 건립이 활발히 진행되고 있는 시점에서 그 어느 때 보다 콘크리트 기술자들의 역할과 노력이 절실히 필요함을 강조하면서 부산과 잠실, 삼암동 등의 초고층건축 프로젝트의 성공적 실현에 뜻을 모아야 할 때이다. □

## 참고문헌

1. Taranath B. S., "Structural Analysis and Design of Tall Buildings," McGraw-Hill Inc., 1988.

2. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," ASCE, 1993.  
 3. CTBUH Committee 3, "Structural System for Tall Buildings," McGraw-Hill Inc., 1995.  
 4. Kowalczyk, Ryszard "M, Structure systems for tall building: systems and concepts," McGraw-Hill Inc. 1995.  
 5. Council on Tall Buildings and Urban Habitat, "Tall building systems and concepts," ASCE. 1980.  
 6. Koichi TAKANASHI, "Recent Trends in Tall Building Structural Design," 대한건축학회, 2001 대한건축학회 국제 심포지엄 논문집, 2001. 9. pp. II-19~II-46.  
 7. Canadian Structural Design Manual, Supplement No.4 to the National Building Code of Canada, Associate Committee on the National Building Code and National Research Council of Canada, Ottawa, 1995.  
 8. F. K. Chang, "Human Response to Motions in Tall Building," Journal of Structural Division, ASCE, 98, No. ST6(June 1973), pp.1259~1272.  
 9. 신성우, "초고층 주거시설에의 고강도-고성능 콘크리트의 적용", 대한건축학회지, 2001. 10.  
 10. 신성우, "세계적인 한국적 초고층 건축을 세워야 할 때다", 대한건축학회지, 2003. 1.  
 11. 오정근, "고강도 콘크리트의 역학특성 및 구조설계", 한국콘크리트학회, 2002년도 제3회 기술강좌 논문집, KCI-L-02-003, 2002, pp.73~125.  
 12. 김영학, "초고층 건축물의 효율적인 횡 변위 제어를 위한 연구", 한양대학교 석사학위 논문, 2003.  
 13. 김혜정, "초고층 건축에 관한 한국인 의식조사 연구-전문가 그룹과 일반인 그룹의 비교 연구를 중심으로", 한국초고층건축포럼 제2차 국제심포지엄논문집, 2002년 11월, pp.65~86.  
 13. 전봉수 외 5인, "건축구조설계의 이해", 기문당, 2003.  
 14. 송도현, "초고층 건축시공", 기문당, 2003.  
 15. "C2 초고층 경제성 분석", 롯데건설, 2004.

## 도서소개 - "콘크리트 표준시방서 해설"

◆ 소개 : "... 「콘크리트 표준시방서 해설」의 개정에는 1999년도 개정판을 근간으로 하였으며, 국내외 각종 시방서 및 기준 등을 참고하였습니다. 또한, 집필에는 콘크리트 관련 분야에 종사하고 있는 도목·건축 분야의 중진 기술자 및 연구자들이 참여하였으며, 수차의 토의와 여러 번의 공청회를 개최하여 특히, 현장 기술자들의 의견을 반영하였습니다. 초안에 대해서는 학회 자체의 자문회의를 거쳐 수정 보완하였으며, 콘크리트와 관련이 있는 기관 및 연구소 등에 검토를 요청하여 수용할 수 있는 부분은 최대한 반영함으로써 좋은 「콘크리트 표준시방서 해설」이 출간 될 수 있도록 정성을 다하였습니다. ..." (머리말 中)

• 제 목 : 콘크리트 표준시방서 해설

• 저 자 : 사단법인 한국콘크리트학회

• 출판사 : 기문당

• 출판일 : 2004년 2월

• 페이지 : 670쪽

• 정 가 : 35,000원