

화성 동탄 메타폴리스 구조설계

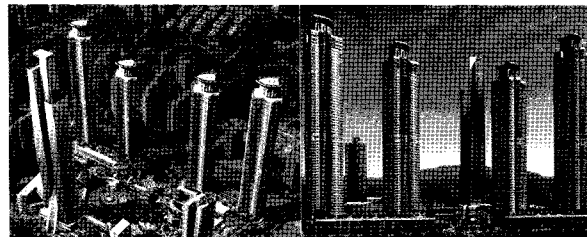
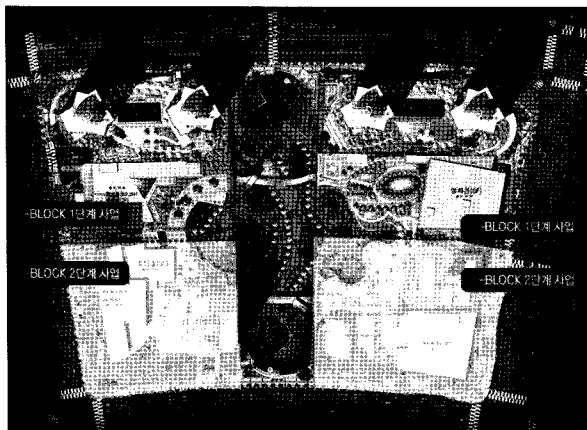
Structural Design of Hwasung Dongtan METAPOLIS COMPLEX



김 선 규*
Kim, Seon-Gyu

1. 건물 개요

화성동탄 METAPOLIS는 경기도 화성 동탄신도시 중심 상업지구내에 공공·민간 합동 프로젝트 파이낸싱(PF)을 통해 건설되는 초대형 복합단지로 <그



<그림 1> METAPOLIS 배치도 및 조감도

* 정회원 · (주)마이다스아이티 이사

림 1)과 같이 전체 단지 중 1단계 사업은 완료되었으며, 현재 2단계사업이 추진 중에 있다.

본 건물은 전체 단지 중 1단계 사업으로 지하3~4층/지상55~66층 높이의 4개동으로 구성된 초고층 주거 시설과 대형 할인점·쇼핑몰 등 상업시설, 문화·집회시설(멀티플렉스), 운동시설(스포츠센터), 의료시설(클리닉), 복지시설 등으로 구성된다.

- * 공사명 : 화성동탄 복합단지 1단계 건설공사
- * 대지위치 : 화성동탄택지개발지구 10-1,11-0블럭
- * 대지면적 : 50,948,000 m²
- * 연 면 적 : 462,812.736 m²
- * 건물용도 : 공동주택, 판매영업시설, 교육연구시설, 복지시설 및 문화집회시설
- * 시 공 사 : 포스코건설, 신동아건설
- * 건축설계 : (주)종합건축사사무소 건원
- * 구조설계 : (주)마이다스아이티, (주)창·민우 컨설턴트, (주)도화구조, Thornton·Tomasetti Group(해외)
- * 풍동실험 : (주)티이솔루션 & 캐나다 BLWTL

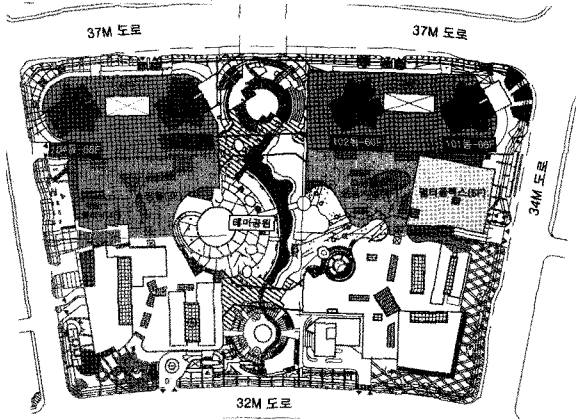
건축설계는 (주)건원건축에서 수행하였으며, 구조설계는 해외구조설계사인 Thornton·Tomasetti

Group과 국내사인 (주)마이다스아이티, (주)창·민우 컨설턴트, (주)도화구조에서 공동으로 수행하였다.

시공사는 (주)포스코건설과 (주)신동아건설이며 2006년 시공을 시작하여 2009년 현재 골조공사를 마쳤으며, 2010년 준공 예정이다.

2. 구조 개요

1단계 사업은 <그림 2>와 같이 지상55~66층의 공동주택 4개동과 지하3~4층/지상4층의 주거 저층부 및 지하5층/지상4~5층 비주거시설로 구성되어 있으며, 각각의 구조형식 및 재료강도는 다음과 같다.



<그림 2> 1단계 단지배치도

2.1 구조형식

1) 주거 고층부 구조형식

- * 구조형식 : 철근콘크리트 구조
- * 중력저항 시스템 : Flat Plate + R.C Column & Core Wall
- * 횡력저항 시스템 : Flat Plate + Core Wall + 33F Belt Wall + Fin Wall(101, 104동), Flat Plate + Core Wall + 33F Belt Wall(102, 103동)
- * 기초 구조형식 : R.C.D 기초 Ø2000(허용지하력=35,000kN/m²) 및 지내력기초 (103동, 허용지내력=1,800kN/m²)

2) 주거 저층부 구조형식

- * 구조형식 : 철근콘크리트 구조
- * 중력저항 시스템 : R.C Beam & Girder System

- * 횡력저항 시스템 : 횡력(풍, 지진)은 주거 고층부 TOWER가 부담, ⇒ 모멘트골조 설계 시 TOWER 변형에 의해 발생하는 부재력 고려
- * 기초 구조형식 : 지내력기초 (허용지내력=420, 700kN/m²)

3) 비주거부 구조형식

- * 구조형식 : 철근콘크리트 구조
- * 중력저항 시스템 : R.C Beam & Girder System
- * 횡력 저항 구조형식 : 기타구조
- * 기초 구조형식 : 지내력기초 (허용지내력 = 700, 1,050kN/m²)

2.2 재료강도

1) 콘크리트 강도

시공 공정상 VH 분리타설을 감안하여 수직부재와 수평부재의 콘크리트를 분리하여 강도계획을 하였다.

수직부재의 경우 30~60MPa로 층별로 구분하였으며, 수직부재의 강도가 수평부재 강도의 1.4배 이하가 되도록 수평부재 강도를 적용하였다. 건물 별로 적용된 콘크리트 강도는 <표 1>과 같다.

<표 1> 건물 별 콘크리트 강도 (unit : MPa)

구분	층	벽체	기둥	슬래브	기초		
주거고층부	101동	B4~20F	60	60	43		
		104동	21~35F	50	50	36	
			36~40F	50	30	30	
			41~RF	40	30	30	
	102동	B3~15F	60	60	43	35	
		16~35F	50	50	36		
			36~RF	40	30		30
		103동	B4~10F	60	60		43
			11~35F	50	50		36
				36~RF	40		30
주거저층부 및 비주거부	A 블록	B4~2F	30	30	24	24	
		3~RF	24	24	24		
	B 블록	B5~2F	30	30	24		
		2~RF	24	24	24		

2) 기타 재료강도

- * 철근 : HD25이하 SD400 ($f_y=400MPa$)
HD29이상 SD500 ($f_y=500MPa$)
- * 강재 : $t \leq 40$ SM400 ($F_y=235MPa$)
SM490A ($F_y=325MPa$)
 $40 < t \leq 80$ SM490A TMC ($F_y=325MPa$)
- * 접합볼트 : KSB1010 F10T

2.3 설계기준 및 참고문헌

- * 건축법 시행령 “건축물의 구조기준등에 관한 규칙”
- * 건축구조설계기준 (KBC 2005)
- * 강구조계산규준및해설 (1983, 2003. 대한건축학회)
- * ACI 318-99, UBC1997, ASCE 7-02
- * NBCC(National Building Code of Canada)

2.4 설계하중

2.4.1 중력하중

1) 고정하중

건축도면의 바닥 마감을 기준으로 바닥마감, 천장, 칸막이벽, 외부마감 및 장비류(저장탱크, 기계설비, 전기장비) 등 일체의 하중을 고려하였다.

2) 활하중

건물의 바닥에 쌓인 물품, 사람의 하중 또는 벽,

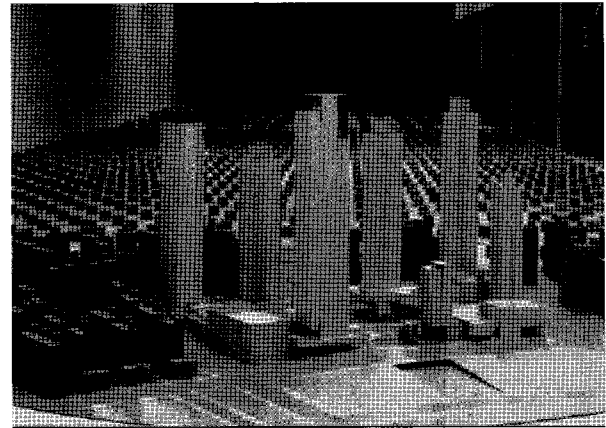
〈표 2〉 용도별 활하중 (unit : kN/m²)

구분	용도	적재하중
주거	공동주택	2.0
	지붕층	2.0
	33층 기계실	7.5
	엘리베이터 로비	4.0
비주거	지하 할인점	10.0
	할인점 창고	15.0
	주차장(차로/주차)	6.0/4.0
	A블럭 극장	4.0
	지상 판매시설	4.0
	1층 옥외부	16.0
	주차장(8톤트럭출입)	16.0
식당용 근생	5.0	

천정에 매달은 하중 등 건축물 내에 얹혀있는 하중으로 건축구조설계기준(KBC2005)에서 제시한 하중으로 산정하였다. 구조설계 시 적용된 용도별 활하중은 〈표 1〉과 같다.

2.4.2 풍하중

풍하중은 건축구조설계기준(KBC2005)을 기준으로 〈그림 3〉과 같이 풍동실험을 수행하였고, 풍동실험 결과를 설계에 적용하였다.



〈그림 3〉 풍동실험 모형

1) KBC2005 풍하중 기준

- * 지역 : 경기도 화성시
- * 설계기본 풍속 : $V_o = 30m/s$
- * 노풍도 : B
- * 중요도계수 : $I_w = 1.1$ (비주거부 1.0)
- * 풍속할증계수 : $K_{zt} = 1.0$

2) 풍동실험

풍동실험은 국내사인 (주)티이솔루션에서 풍력실험, 풍압실험 및 풍환경실험을 수행하였으며, 풍력실험 결과를 캐나다 온타리오대학(BLWTL)에서 REVIEW를 수행하였다. 풍동실험에 의한 풍하중 및 풍가속도는 〈표 3〉 및 〈표 4〉와 같다.

〈표 3〉 전도모멘트(300년 재현주기, unit : kN.m)

구분	101동	102동	103동	104동
X 방향	3.11E+6	2.62E+6	1.91E+6	2.90E+6
Y 방향	3.43E+6	2.58E+6	2.03E+6	3.30E+6
비틀림	6.37E+6	6.75E+6	6.43E+6	6.09E+6

〈표 4〉 풍 가속도 (10년 재현주기, unit : milli-g)

구분	101동	102동	103동	104동
중심가속도	12.3	12.4	9.1	11.1
모서리가속도	12.4	12.5	9.2	11.1
판별	모든 풍가속도는 15milli-g 이하이므로 풍하중에 대한 사용성을 만족한다.			

2.4.3 지진하중

지진하중은 건축구조설계기준(KBC2005)에 따라 산정하였으며, 지반종류는 〈표 5〉와 같이 지반의 평균 전단파 속도를 기준으로 결정하였다.

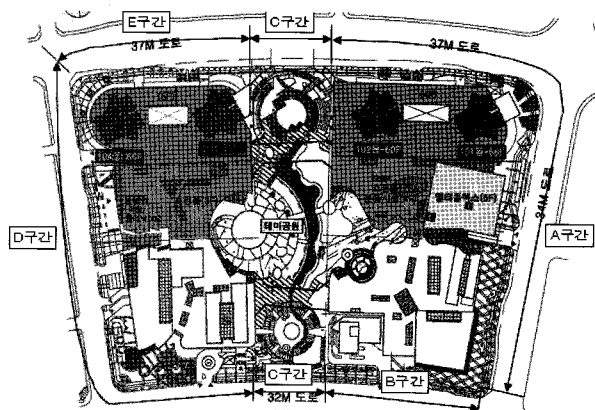
- * 지역계수 : A = 0.11 (지진구역 I)
- * 지반종류 : SB
- * 반응수정계수 :
주거부 - 기타구조 R=3.0(기둥, 슬래브 내진상세)
비주거부 - 기타구조 R=3.0
- * 내진설계범주 : 주거부 D, 비주거부 C
- * 중요도계수 : 주거부 IE=1.5, 비주거부 IE=1.2

〈표 5〉 전단파 속도에 의한 지반종류 결정

구분	101동	102동	103동	104동
평균전단파속도	1,400	2,400	2,500	2,000
적용 지반분류	760%이상 ⇒ SB			

2.4.4 설계 지하수위

2005년 8~11월 3개월간 지하수위 관측자료 및 강우 시 지하수위 상승과 건축 계획고 등을 고려하여 〈그림 4〉 및 〈표 6〉와 같이 구간별 지하수위(G.L± 0.0~-6.5m)를 결정하였다.



〈그림 4〉 설계지하수위 적용 구간

부력에 대한 안정성확보를 위해 영구배수공법을 적용하였으며, 지하외벽은 설계지하수위를 적용하여 설계하였으며, 최하층바닥은 30.0kN/m² 상향수압을 고려하였다.

〈표 6〉 구간별 설계지하수위 (unit : m, E.L 기준)

구간	평균지하수위	설계 지하수위
A 구간	48.9	50.5
B 구간	48.1	50.0
C 구간	48.1	지표 계획고 (G.L±0)
D 구간	45.2	47.0
E 구간	46.1	48.0

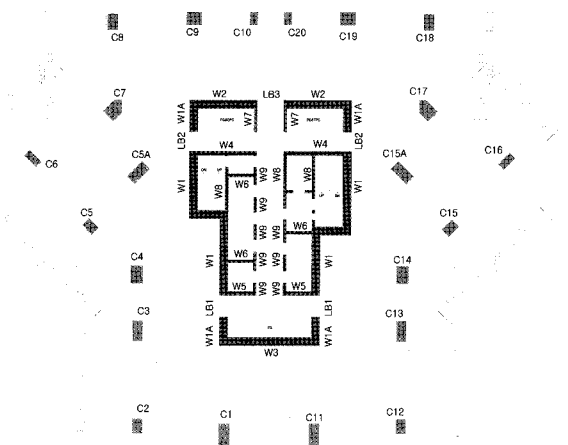
3. 구조 계획

3.1 주거 고층부 구조계획

3.1.1 주거 고층부 구조계획

주거동의 중력하중은 Flat Plate와 기둥, Core Wall에 의해 지지되며, 기준층 충고를 최소화 하기 위해 Flat Plate 형식을 적용하였다.

기준층 구조평면도 및 코아형태는 〈그림 5〉와 같다.



〈그림 5〉 주거동 기준층 구조평면도

슬래브 두께는 유해한 처짐 및 진동 등의 사용성을 검토하여 결정하였으며, 층별 슬래브 두께는 다음과 같다.

- * 지하 기준층, 포디움 연결층 : THK=300mm

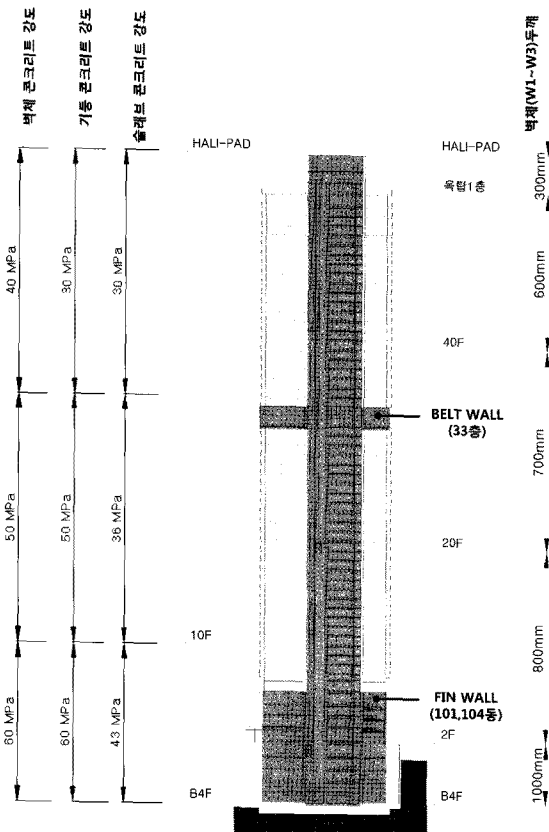
- * 지상 기준층, 지붕층 슬래브 : THK=250mm
- * 중간 기계실(33,34F) : THK=350mm
- * 지상, 지하 기준층, 지붕층 코아 : THK=150mm
- * 중간기계실(33,34F) 코아 : THK=350mm

Link Beam은 횡력에 의해 발생하는 부재력에 저항할 수 있도록 일부 구간에 철골부재로 보강하였다.

- * LB1~LB3 : R.C(벽체두께 x 750mm) + H-600x300 (SM490 TMCP) 철골보강
- * 코어 내부 보 : R.C(300 x 700mm)

코아 벽체는 중력하중 및 횡력에 저항할 수 있도록 벽체 두께를 결정하였으며 층별로 THK=1000~600 mm (W1~W3)두께를 적용하였다.

층별 수직재 및 수평재 콘크리트 강도계획과 벽체 두께는 <그림6>과 같다.



<그림 6> 층별 강도계획 및 코아벽체 두께

3.1.2 횡력저항 구조시스템

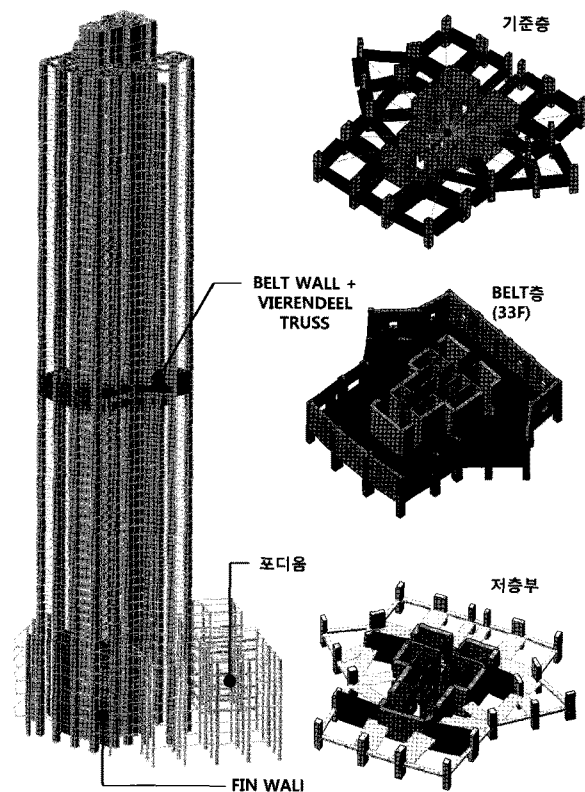
지진하중 및 풍하중에 대한 사용성을 만족하기 위해서 적용된 주거동의 횡력저항 구조시스템은 Core Wall + Flat Plate 유효 등가골조 및 Belt Wall + Vierendeel Truss(33층 기계실)가 사용되었으며, 101동과 104동(66층)은 저층부에 FIN WALL (THK= 600, 800mm)을 추가로 설치하였다.

기준층 Flat Plate는 유효등가보로 모델링하였고, 균열에 의한 슬래브 휨 강성 저하를 고려하였다.

33, 34층 슬래브는 Plate Element로 모델링 하여 Flexible Diaphragm을 적용하여 Belt Wall 변형에 의해 바닥슬래브에 발생하는 부재력을 설계 시 고려하였다.

Belt Wall은 Plate Element로 모델링 하여 3D해석을 수행하였으며, 균열에 의한 휨강성 저하를 고려하여 0.5EI를 적용하였다.

Vierendeel Truss는 Beam Element로 모델링 하여 3D해석을 수행하였고, 휨강성은 0.5EI를 적용하였다.

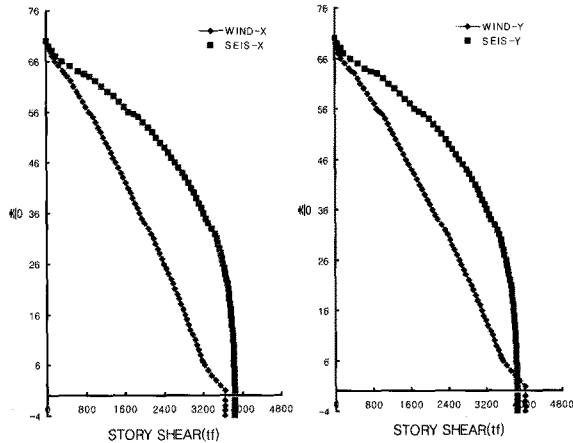


<그림 7> 주거동 횡력저항 구조시스템

3.1.3 구조해석 결과

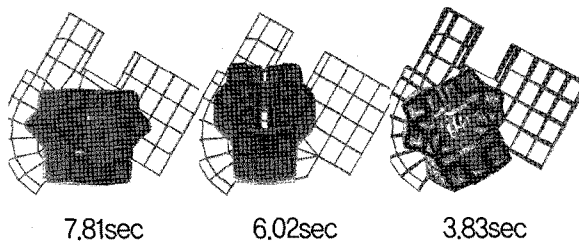
구조해석에 적용된 풍하중은 풍동실험 결과를 적용하였으며 풍변위 제한치는 H/450을 기준으로 하였다. 지진하중에 대해서는 동적해석을 수행하며, 층간변위비는 0.01h를 만족하도록 계획하였다.

주거동에 대한 구조해석 결과, 풍하중에 의한 횡변위는 풍변위 제한치인 H/450 이내를 만족하였으며, 지진하중에 의한 층간변위도 허용치를 만족하는 것으로 평가되었다.



〈그림 8〉 방향별 풍하중 및 지진하중(101동)

Mode1 (X-dir) Mode2 (Y-dir) Mode3 (Tor)



〈그림 9〉 고유치해석 결과 Mode Shape(101동)

〈표 7〉 풍하중에 의한 변위검토(101동)

구분	최상층변위	제한치	비고
X 방향	57.00cm (H/450)	57.00cm (H/450)	풍동실험에 의한 풍하중으로 사용성 검토
Y 방향	36.40cm (H/705)	57.00cm (H/450)	

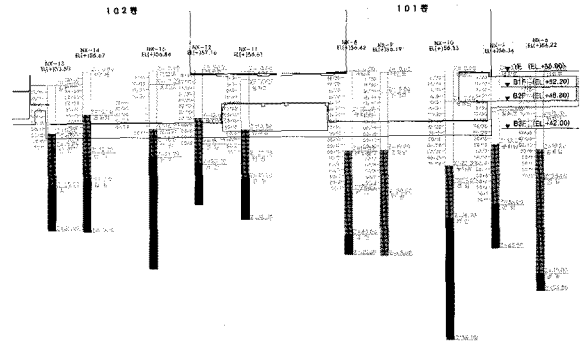
〈표 8〉 지진하중 층간변위 검토(101동)

구분	층간변위비	허용치	판정
X 방향	0.0040h	0.0100h	O.K
Y 방향	0.0023h	0.0100h	O.K

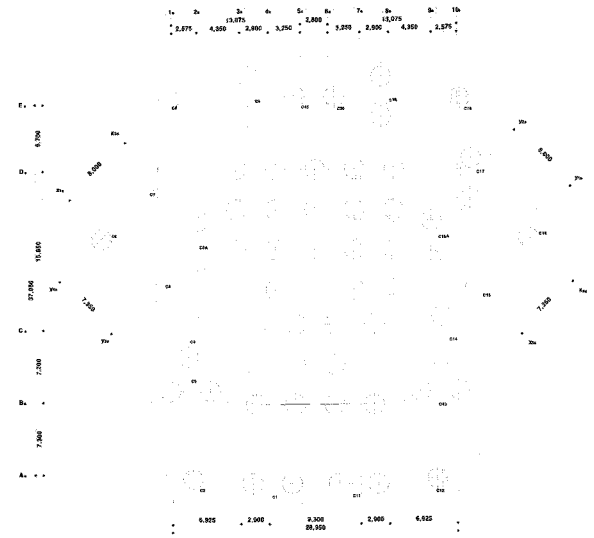
3.1.4 주거동 기초

주거동의 기초형식은 각 동별 기초 지지층을 고려하여 안정성, 경제성 및 시공성을 고려하여 계획하였다.

101, 102, 104동은 기초 저면이 풍화암층에 지지되어 요구지내력 확보가 어려워 R.C.D기초를 적용하였으며, 103동은 기초 저면이 경암층에 지지되므로 지내력기초로 계획하였다. 다만, 일부 연암층에 지지된 구간은 현장 재하시험을 거쳐 필요 시 지반치환 등 보강공법을 적용하는 것으로 계획하였다.



〈그림 10〉 101, 102동 지층단면도



〈그림 11〉 101동 RCD 파일배치도

* 101동: Ø 2000 RCD기초 (허용 지지력 = 32,000kN/ea), 기초두께 THK = 3,000mm, fck = 35 MPa

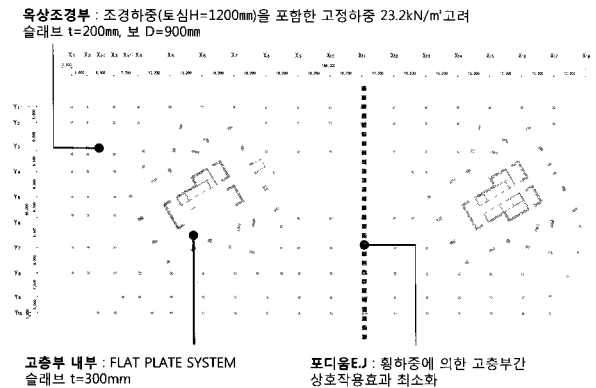
* 103동: 지내력기초(허용지내력=1,600kN/m²), 기초두께 THK = 2,800mm, fck = 35 MPa

3.2 주거 저층부 및 비주거부 구조계획

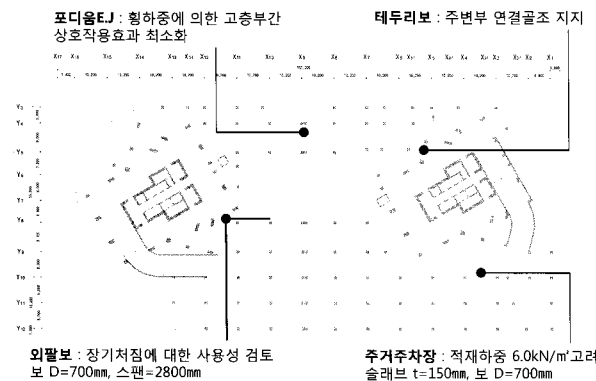
주거 저층부 및 비주거부는 주차장 및 상업시설 용도로 계획되었으며, 상업시설의 중앙부 OPEN부 처리 및 장스팬 구간 등 건축 계획의 다양성을 고려하여 R.C Beam & Girder 시스템으로 계획하였다.

주거동은 FLAT PLATE 형식에 주변부 골조 지지를 위해 테두리 보를 설치하였다.

주거 저층부의 OPEN부 캔틸레버 보는 장기처짐 및 보 춤(D=700mm)을 고려하여 기둥중심에서 3m 이내로 제한하였으며, 비주거부 OPEN부 및 외곽부위의 캔틸레버 보는 장기처짐 및 보 춤(D=900mm)을 고려하여 기둥중심에서 4m 이내로 제한하였다.



〈그림 12〉 A블럭 포디움(지상층) 구조평면도

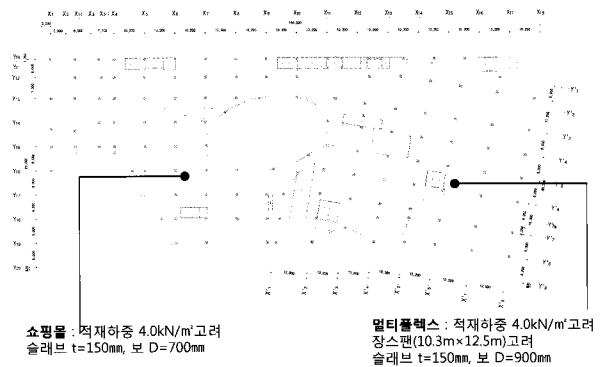


〈그림 13〉 B블럭 포디움(지상3층) 구조평면도

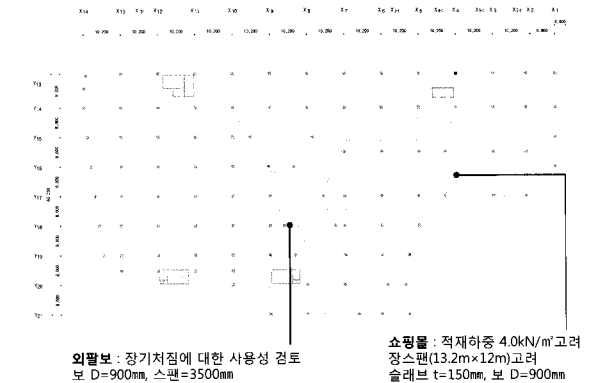
비주거부 멀티플렉스 지붕은 장스팬 (SPAN=20.2m)을 고려하여 철골 보(H-1,000×300)를 적용하였으며, 일부 기둥(H=12m)은 장주 효과를 고려하여 설계하였다.

횡 하중은 주거 고층부 Core Wall에 의해 지지되

며, 주거 고층부 변형에 의한 발생 부재력을 반영하여 설계하였다. (변형적합성 고려)



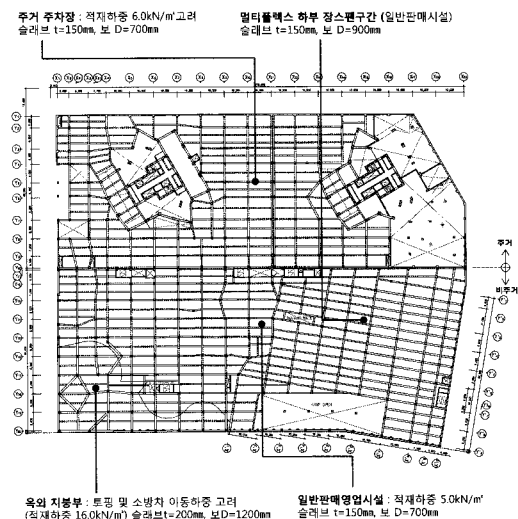
〈그림 14〉 A블럭 비주거부(지상2층) 구조평면도



〈그림 15〉 B블럭 비주거부(지상3층) 구조평면도

3.3 지하층 구조계획

주거 저층부 및 비주거부 지하층 구조는 저층부와 동일한 R.C Beam & Girder 시스템을 적용하였다.



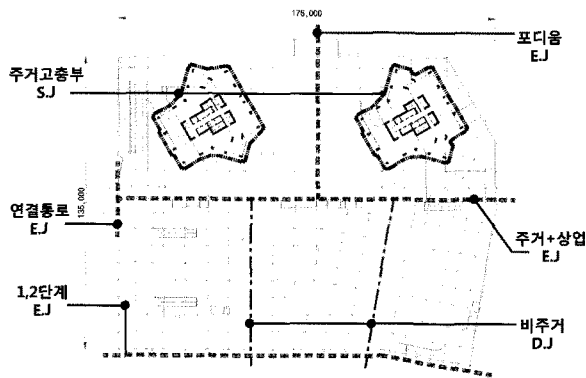
〈그림 16〉 A블럭 지하2층 구조평면도

3.4 조인트 계획

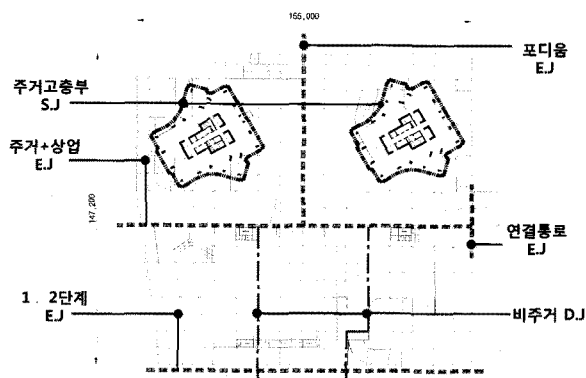
본 건물은 가로 세로 176×135m (A블럭), 155×147m (B블럭)의 장대한 면적의 복합시설물로 주거동 및 비주거동이 통합 되어 있다. 따라서 평면특성과 온도변화의 영향을 최소화 하기 위해 주거동과 비주거동의 연결부에 Double Column 형식의 E.J.(Expansion Joint)를 설치하였다.

또한 각각 2개의 타워동이 1개의 포디움으로 연결되어 타워동에 작용하는 횡력으로 인하여 포디움에 발생하는 부가응력을 최소화 하기 위해 주동 사이에 Double Column 형식의 E.J.(Expansion Joint)를 설치하였다.

콘크리트 타설시 건조수축 및 온도변화로 인해 발생하는 콘크리트 균열을 최소화하기 위해서 비주거부 구간엔 D.J.(Delay Joint)를 설치하였으며, 타워동과 포디움의 부등축소량에 따른 부가응력을 최소화 하기 위해 주동부에 S.J.(Settlement Joint)를 설치하였다.



<그림 16> A블럭 조인트 계획



<그림 16> A블럭 조인트 계획

4. 맺음말

초고층 건물의 특성상 초기계획이 구조안전성, 경제성, 시공성 등에 많은 영향을 미치는 것을 감안하여, METAPOLIS는 초기 계획단계에서부터 설계완료 단계까지 구조엔지니어가 같이 참여하여 경제성과 시공성이 고려된 설계가 되도록 하였다.

설계완료 후에도 현장 구조기술 지원을 통하여 건물의 품질이 확보되도록 하였으며, 기동축소량해석 및 계측 용역을 통해 향후 거주 중에 발생할 수 있는 문제점을 사전에 해결하였다.

화성동탄 METAPOLIS는 동탄신도시의 중심상업지구에 들어서는 초대형 주거복합건물로, 지하4층, 지상55~66층 4개동과 복합시설물로 구성되어있다.

주거동 건물은 최고높이가 248.73m이고 세장비 (Aspect ratio)가 5.52~6.15인 초고층 건물로, 현재 추진중인 2단계 사업에 포함된 미디어센터(55층, 281.80m)와 더불어 향후 동탄신도시의 랜드마크 성격의 건물로 자리매김 할 수 있을 것으로 보인다.