

포스트텐션(POST-TENSION) 시스템을 이용한 플랫 슬래브 바닥 구조 시스템



정 광 광 홍보위원회 위원장
(주)동양구조안전기술 대표이사

1. 머리말

20세기 초반 경제 및 사회규모가 커짐에 따라 초고층 건축물에 대한 관심이 증대되었고 이를 현실화하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 그 결과 산업혁명을 통해 양적·질적인 면에서 많은 발전을 이룬 강재가 유일한 대안으로 선택되었고 당시의 초고층 건축물 증흥기를 이루는 원동력이 되었다. 그러나 건물이 점차 고층화되어감에 따라

부재에 작용하는 수직·수평하중이 점차 증가하게 되었고 순수 철골 구조만으로는 그 높이를 지탱하기 위한 시스템을 구현하기 어렵게 되었다. 이러한 원인으로 20세기 중반이후 고강도 콘크리트에 대한 필요성이 증대되어 이에 대한 연구 및 개발이 활성화되었다. 현재에는 50MPa 이상의 콘크리트는 기본적으로 사용되어지며, 100MPa 이상의 콘크리트가 적용된 사례도 있다. 또한, 고유동화 콘크리트의 적용으로 균질한 고품질의 콘크리트를 빠른 시간 내에 시공할 수 있게

〈표 1〉 세계 초고층 포스트텐션 건축물

전경				
명칭	Millennium Tower	340 on the Park	Eureka Tower	23 Marina
위치	San Francisco, USA	Chicago, USA	Melbourne, Australia	Dubai, United Arab Emirates
높이	196m (58층)	205m (64층)	300m (91층)	395m (89층)
비고	• 샌프란시스코 최고층 주거 건물	• 시카고 최고층 주거 건물 • 미국내 두 번째 최고층 주거 건물	• 현존 세계 최고층 주거 건물	• 완공시 세계 최고 주거 건물

되어 품질향상과 동시에 공기단축의 효과도 누릴 수 있게 되었다. 그리고, ACS form, Table form 등의 시스템 거푸집이 발달하면서 콘크리트 공사비에서 많은 비중을 차지하는 거푸집 공사의 물량과 기간을 대폭 축소시켜, 공기단축 및 시공성 향상의 효과를 가져왔다. 그 결과 최근의 초고층 건축물들은 대부분 합성구조 혹은 순수 콘크리트 구조로 건설되고 있으며 그 높이는 현재 1,000m를 육박하고 있다.

재료의 발달은 계속되고 있지만 한계점은 여전히 존재한다. 재료의 강도가 증가하더라도 초고층 건물의 중량 증대는 여전히 설계자들의 주요관심사이다. 건물의 중량이 커질수록 저층부 기둥크기가 커지고 건물에 작용하는 지진력이 커지기 때문에 구조물의 중량을 줄이는 방향으로 구조설계가 진행되는 것이 일반적이다. 그리고, 최근 들어 건축적 공간의 다양성 및 유동성을 추구하는 방향으로 사용자의 요구가 다양해지면서 8m 이상의 장스팬 평면이 초고층 건축물에서도 선호되고 있다. 이러한 경향과 더불어, 층고절감과 차음기준에 따른 슬래브 두께 절감 등의 이유로 플랫 슬래브 구조가 새로운 바닥구조시스템으로 주목을 받고 있다. 그러나, 철근콘크리트 플랫 슬래브 장스팬 구조물의 경우, 장스팬을 형성하기 어렵고 지나치게 슬래브두께가 증대되어 층고와 건물 중량을 증가시키는 일차적인 요인으로 작용한다. 또한, 재료특성상 장기 사용시 균열 및 처짐이 발생하는 것이 불가결

하다.

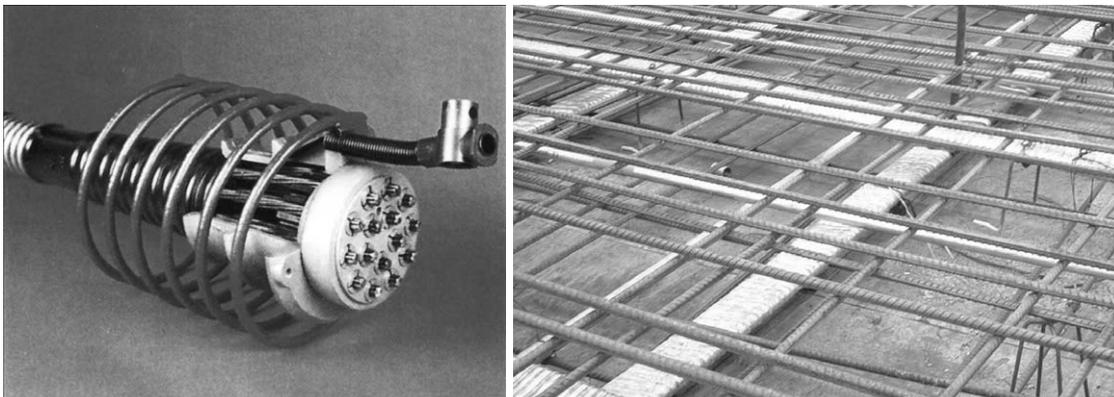
이러한 상황에서 건물 자중과 층고를 줄이면서도 장스팬을 구현할 수 있는 구조적 대안으로 주목받는 것이 포스트텐션 시스템(Post-tension System)이다.

현재 해외 포스트텐션 시스템 시장은 나날이 성장세에 있으며 세계 주요 도시의 스카이라인은 포스트텐션 건축물이 그 자리를 차지해나가고 있다.

2. Post-Tension System의 특징과 국내의 시장 동향

포스트텐션 시스템은 부착 방식(Bonded Type)과 비부착 방식(Unbonded Type), 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 동남아 지역과 유럽 등지에서는 부착 방식을 선호하는 반면, 최근 건축 포스트텐션 시장이 급성장하고 있는 미국에서는 대부분 비부착 방식을 적용한다.

비부착 방식은 정착부를 제외한 나머지 구간에서 강연선과 이를 감싸고 있는 콘크리트가 서로 부착되지 않는다. 가장 일반적인 형태의 비부착 강연선은 7개의 와이어로 구성되어 있는 단일 강연선(Single Strand)으로 건물, 주차건물, SOG 등의 슬래브나 보에 사용된다. 이



〈그림 1〉 Bonded System



〈그림 2〉 Unbonded System

들 강연선은 부식방지를 위해 그리스가 도포되어 있으며 사출 성형된 플라스틱관으로 싸여있다.

부착방식은 콘크리트에 묻혀있는 금속재 혹은 플라스틱 덕트에 두 가닥 이상의 강연선 이 삽입되어 있는 형태를 띠고 있다. 비부착 방식은 텐던을 긴장한 후 강연선의 부식을 방지하고 강연선을 콘크리트에 결속시키기 위해 시멘트 페이스트가 덕트 내부에 주입된다. 부착형 방식은 주로 교량, 거대구조물, 등에 사용되며, 일반적인 건물에서는 전이보(Transfer Girder)와 같이 하중을 많이 받는 보 등에 적용된다.

부착 방식은 콘크리트와 텐던의 일체성이 확보되어 구조적 효율이 증가하고 필요 철근량이 적은 장점이 있다. 그러나 비부착 방식에 비해 텐던의 곡률 구현이 어렵고 그라우팅(Grouting)을 위한 추가 공정이 필요하며 그라우팅이 확실하게 되었는지에 대한 확인이 어렵다.

비부착방식은 필요 철근량이 부착 방식에 비해 많은 단점이 있지만, 그 차이가 크지 않다. 또한, 수직곡률뿐만 아니라 수평곡률이 자유롭게 구현된다는 장점은 평면이 불규칙해지는 최근 건축물 경향에 비추어봤을 때 비부착 방식의 가장 큰 장점으로 작용할 수 있다. 그리고 그라우팅 작업이 필요없고 공정상 하자 발생 요인 및 확률이 적다는 장점도 있다.

국내에는 교량적용을 위해 포스트텐션 공법이 도입되었으며 건축시장에도 부착 방식이 도입되어 적용되다가 1990년대 후반부터 비부착 방식에 대한 관심이 증대되기 시작하였다. 그 결과, 2005년 서초 Trapalace II 에 주거용 건물로는 최초로 비부착 방식 포스트텐션 시스템이 적용되는 등 최근 들어 비부착 방식의 건축 구조 적용 사례가 증가하고 있다.

이와 같은 특징에 따라 최근 플랫 슬래브가 주목을 받고 있는 국내에서는 건축물에 비부착 방식을 적용하는 사례가 증가하고 있다.

3. 포스트텐션 시스템 적용 사례

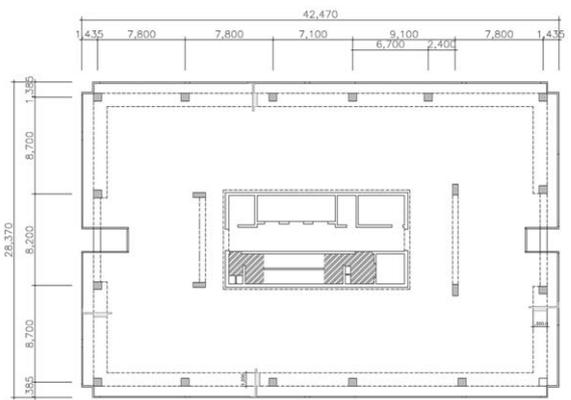
3.1 Trapalace II

1) 일반사항

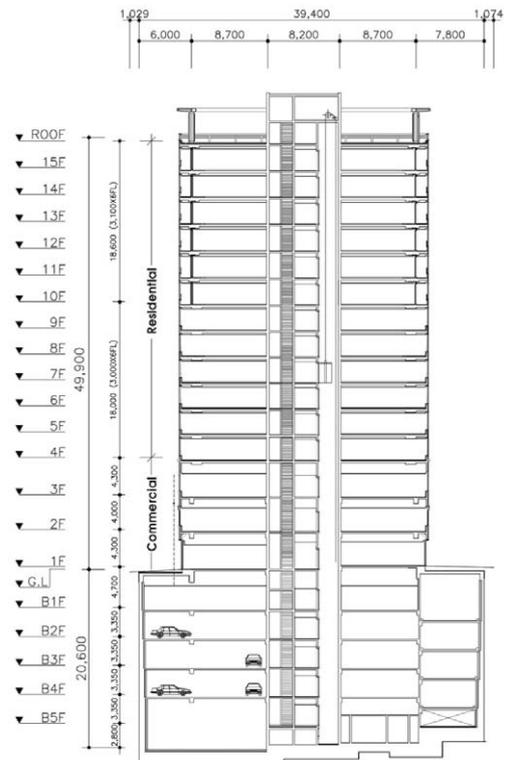
서초 Trapalace II는 서울 강남구에 건설된 것으로 비부착 방식 포스트텐션 플랫 슬래브 시스템이 적용된 주거용 건물로는 최초이다. 지상 1,2층은 상가, 3층은 사무공간, 4층 이상은 주거용으로 계획되었다.



〈그림 3〉 건물전경



〈그림 4〉 기준층 평면도



〈그림 5〉 단면도

〈표 2〉 Trapalace II 건물 개요

위치	서울 강남구 서초동
규모	지하 5층, 지상 15층
횡력저항시스템	RC 코어월+플랫 슬래브+테두리보
바닥구조시스템	플랫 슬래브+테두리보
슬래브 두께	250 mm
포스트텐션	Unbonded Type

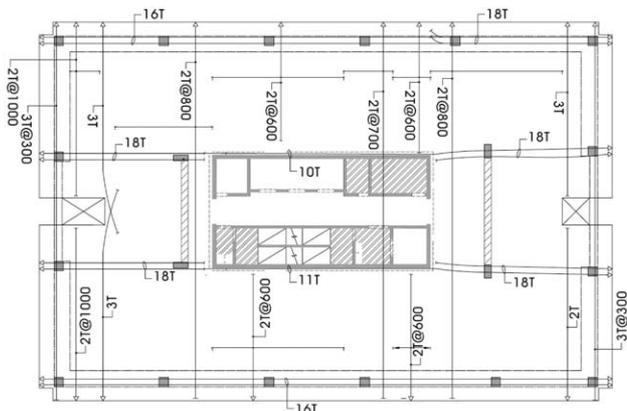
2) 포스트텐션 시스템 & 시공

초기에는 일반 RC로 설계되었으나, 포스트텐션 연구과제의 일환으로 지상 10층~지붕층까지 총 7개 층에 대한 변경설계를 수행하였다. 본 건물은 평균 스펠 약 8.5m 내외로 250mm의 RC 슬래브와 1,200mmx400mm의 테두리보로 계획되어있다. 포스트텐션 슬래브를 적용할 경우 테두리보가 없는 두께 220mm의 슬래브만으로 지지 가능하지만 건축 인허가상의 법적인 문제로 인해 구조제 형태를 바꾸지 못하고 기존 형태를 그대로 유지한 채로 설계변경되었다. 그 결과 내력상 필요한 텐던량 이외에도 최소 선압축력(Minimum Precompression ; 0.9MPa)을 만족시키기 위한 추가 텐던이 소요되었다. 텐던은 한 방향은 집중배치, 다른 한방향으로는 분산배치 형태로 배치되었다.

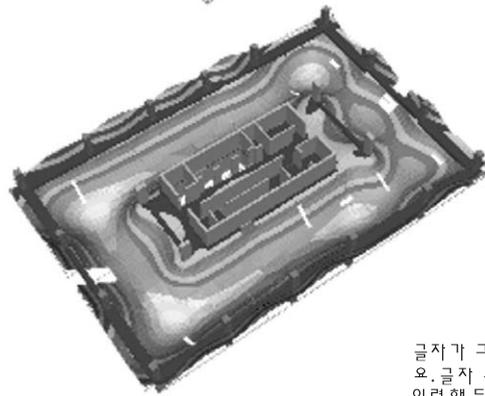
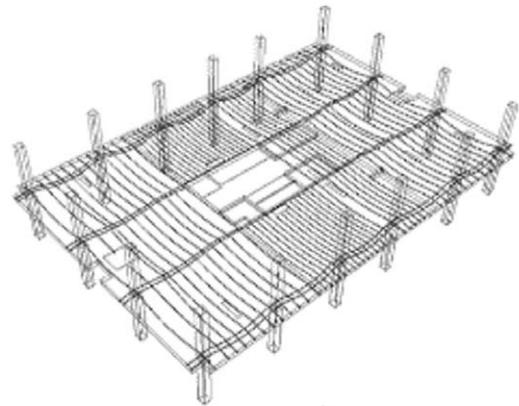
슬래브 두께가 충분했기 때문에 장기처짐은 설계제한사항이 되지 못하였다. 최대장기처짐 ($12.1\text{mm} = L/990$)은 설계기준 ($25\text{mm} = L/480$)을 만족한다.

슬래브와 테두리보가 횡력저항시스템으로 활용되었기 때문에 지진에 대한 에너지 소산 능력을 확보하기 위해 중간모멘트 골조 상세에 따라 추가 철근을 배근하였다. 이때 추가 철근량은 지진 하중에 의해 발생하는 추가 모멘트에 근거하여 산정하였다.

공사는 5일 공정으로 진행되었으며 긴장시 콘크리트 강도인



〈그림 6〉 텐던 배치도



글자가 그림에서도 안 보이네요. 글자 교정지에 적어주시면 입력해 드리겠습니다.

〈그림 7〉 해석 모델링 및 장기처짐



〈그림 8〉 시공전경

22MPa를 확보하기 위해 28일강도 35MPa의 조강 콘크리트가 사용되었다. 시공 결과 층당 약 5 tonf의 강연선과 약 25 tonf의 철근이 소요되었으며 기존 RC 구조에 비해 철근량은 60% 절감되었다.

3.2 Park Polis

1) 일반사항

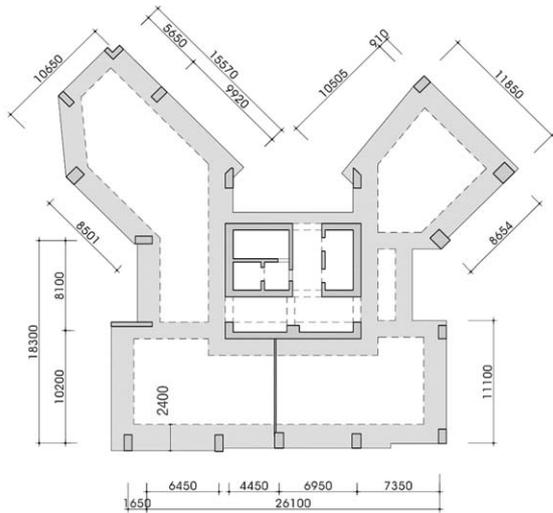
포스트텐션 시스템이 고층 건물에 적용된 최초 사례로 현재 공사가 진행중이며 완공시 국내 최고층 포스트텐션 건축물이 될 것이다. 지

〈표 3〉 Park Polis 건물 개요

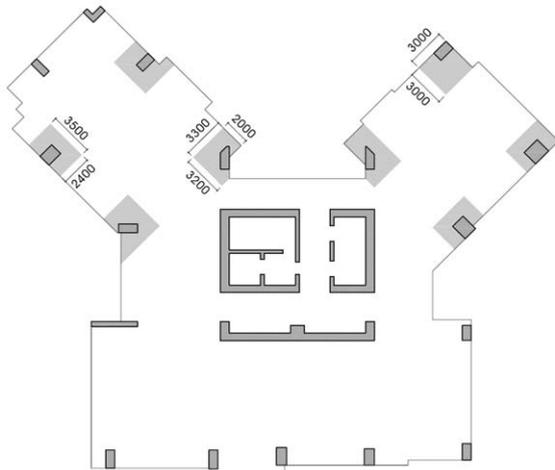
위치	울산광역시
규모	지하 6층, 지상 39층
형력저항시스템	RC 코어월+플랫 슬래브
바닥구조시스템	플랫 슬래브+지판
슬래브 두께	250 mm
포스트텐션	Unbonded Type

상 1층~6층까지 상업시설 및 주차장으로 계획되었으며 7층 이상은 주거용 공간으로 활용된다.

이 건물 또한 초기에는 테두리보가 있는 RC 플랫 슬래브 구조로 계획되었으나 슬래브 처짐 등 사용성 향상을 위해 포스트텐션 시스템의 도입을 계획하게 되었다.



(a) Original

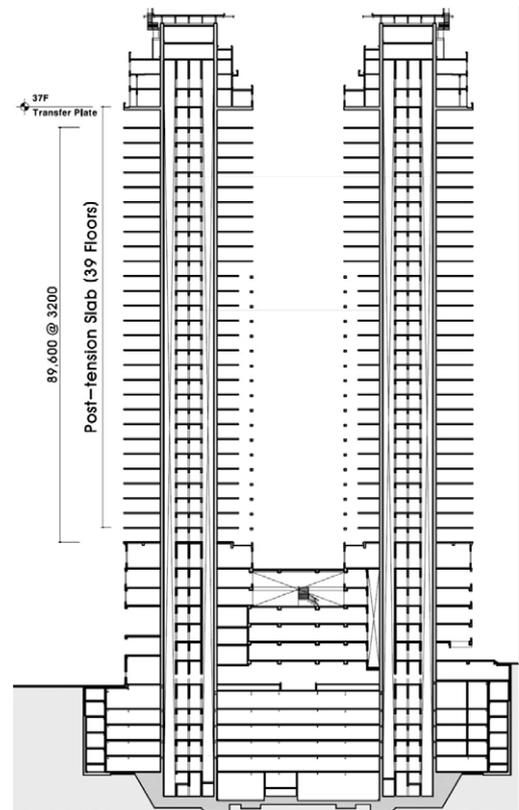


(b) Revision

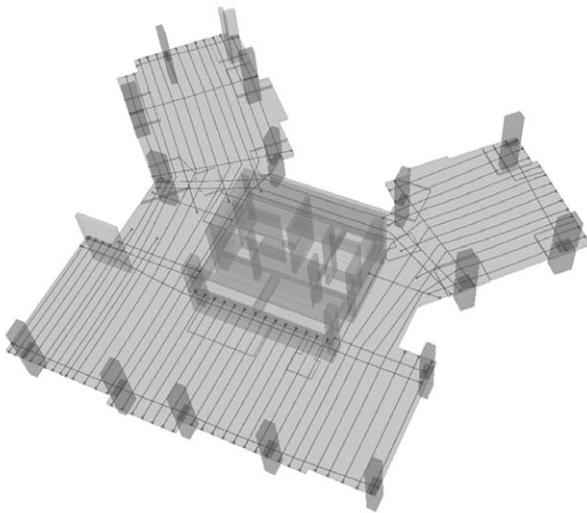
〈그림 10〉 기준층 평면



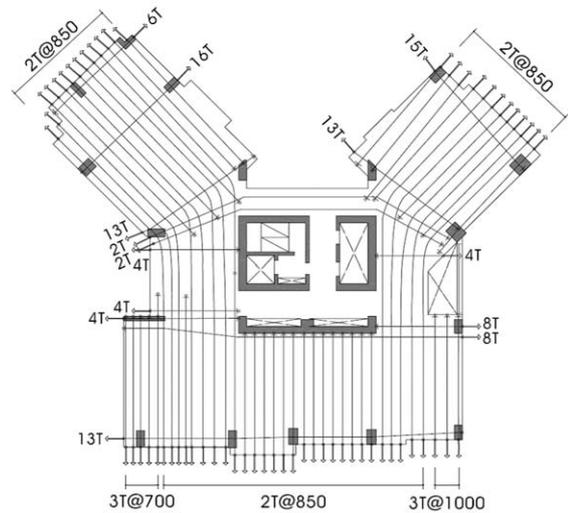
〈그림 9〉 조감도



〈그림 11〉 단면도



〈그림 12〉 구조해석 모델링



〈그림 13〉 텐던 배치도

〈표 4〉 테두리보 유무의 영향

		Original	Revision
		w/ Perimeter Beams	w/o Perimeter Beams
Frequency	1 st Period	3.98 sec	4.21 sec
	2 nd Period	3.88 sec	4.09 sec
	3 rd Period	3.88 sec	3.98 sec
Story Displacement (Wind Load)		16.13 cm	19.52 cm

2) 포스트텐션 시스템 & 시공

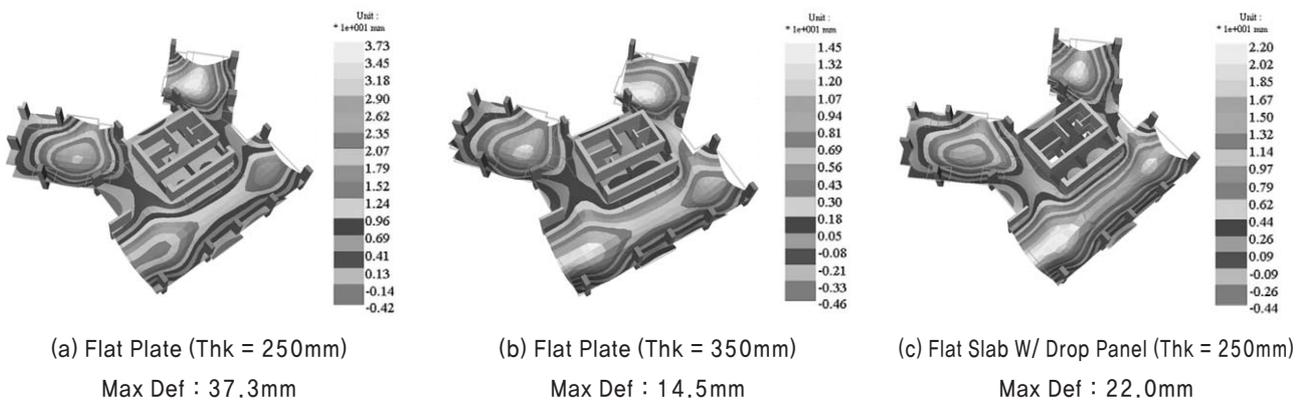
기존 RC 구조는 두께 250mm의 RC 슬래브와 2,000mm×400mm 크기의 테두리보로 설계되었다. 테두리보는 슬래브 처짐 제어 및 횡력 저항 기여를 하기 위해 계획되었다. 그러나, 평면 크기에 비해 보 폭이 크고 불규칙한 구간이 존재하여 시공성 저하가 예상

되었고 보 철근에 의해 전체적인 공사비 증가가 예상되는 상황이었다. 포스트텐션 시스템이 도입된 가장 큰 이유는 이 테두리보를 제거하기 위해서였다.

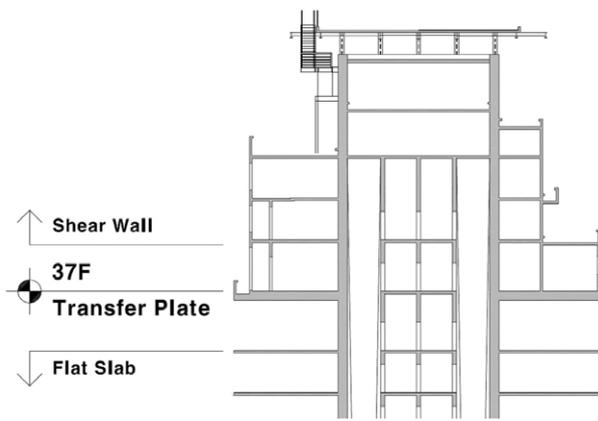
기본풍속은 35m/s이고 고층인 관계로 지진력보다 풍하중에 지배를 받는다. 표 4에서와 같이 테두리보는 주요 횡력저항요소로 작용한다. 테두리보가 삭제될 경우 횡변위는 19.52cm로 증가하지만 설계제한값인 (27cm=H/500)을 만족한다. 그러나 코어월이 견뎌야 하는 풍하중이 더 커지기 때문에 저층부 코어월의 배근이 증가하였다.

슬래브는 유효폭보로 모델링되었고 Trapalace II와 마찬가지로 횡력에 대한 추가철근이 배근되었다.

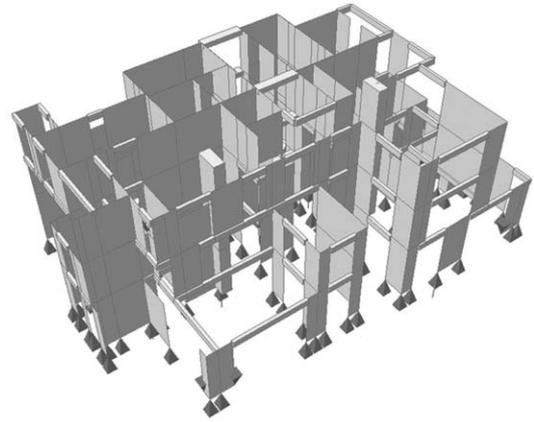
포스트텐션 시스템은 각 타워의 지상 9층부터 37층까지 29개층, 총 58개층에 적용되었다. 기준층 스패ンは 약 8~10m 내외로 두께 250mm의 슬래브와 약 3,000mm×3,000mm×400mm의 지판(drop panel)이 적용되었다. 지판은 단스팬인 곳의 장기처짐 제어를



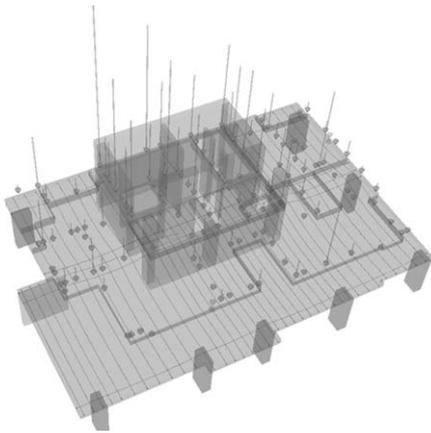
〈그림 14〉 기준층 장기처짐



(a) 전이층 위치



(b) 구조해석 모델링 - 상부층 하중



(c) 구조해석 모델링 - 집중하중 작용점



(d) 텐던 배치도

〈그림 15〉 Transfer Plate

위해 계획되었다.

그림 14 (a)과 같이 지판이 없는 경우 장기처짐($37.3\text{mm}=L/322$)은 설계기준값 ($25\text{mm}=L/480$)을 초과하였다. 그리고 비록 슬래브 두께를 350mm까지 증가시킬 경우 이 제한값을 만족한다고 해도 이는 수직부재에 큰 영향을 끼치게되어 처짐 제어를 위해 지판을 계획하였다.

37층~39층은 하부층과 달리 전단벽 시스템(Shear Wall System)으로 설계되어있고 기존 RC 설계안에서 37층 바닥은 전이보(Transfer Girder)로 계획되어있었다. 그러나 기존 전이보의 크기가 $1,500\text{mm}\times 1,300\text{mm}$ 으로 지나치게 큰 측면이 있어서 PT Transfer Plate로 변경하였다. 그 결과, 슬래브 두께 500~700mm의 PT Flat Plate로 변경되었으며 철근량 및 거푸집 작업량을 절감하여 경제성 및 시공성이 향상되었다.

모든 상부층의 하중은 전이층의 벽체위치에 하중으로 작용시켜 설계에 반영하였다.

일반적인 PT Transfer Plate의 경우 상부층 공사가 진행됨에 따라 재하되는 하중이 증가하기 때문에 단계별 긴장(Stage Jacking)이 고려되어야 한다. 그러나 이 건물의 경우에는 Transfer Plate가 지지하는 층수가 3개층 뿐이어서 한번에 전체 긴장력(Stressing Force)을 도입하여도 슬래브 자중만으로 지지가 되기 때문에 별도의 Stage Jacking은 계획되지 않았다.

층당 공기는 4~5일이며 코어 선행으로 시공될 예정이다. 이에 대해 코어월과 슬래브간의 일체성 확보 및 긴장력 전달을 위한 추가 철근을 코어월과 슬래브가 만나는 곳에 배치하였다.

3.3 두바이 상떼빌

1) 일반사항

현재 건설분이 일고 있는 두바이에 계획되고 있는 주거용 건물로 다양한 평면형상을 가지고 있는 것이 특징이다. 지상 1층~deck

floor(4층)는 Retail, 주차장으로 구성되어있으며 5층 이상은 주거 공간으로 계획되어 있다. 자유롭고 다양한 평면 구성에 의해 넓은 기본 경간과 긴 캔틸레버로 인해 일반 RC 구조로는 구현하기 어려운 형상을 지니고 있다.

〈표 5〉 두바이 상떼빌 건물개요

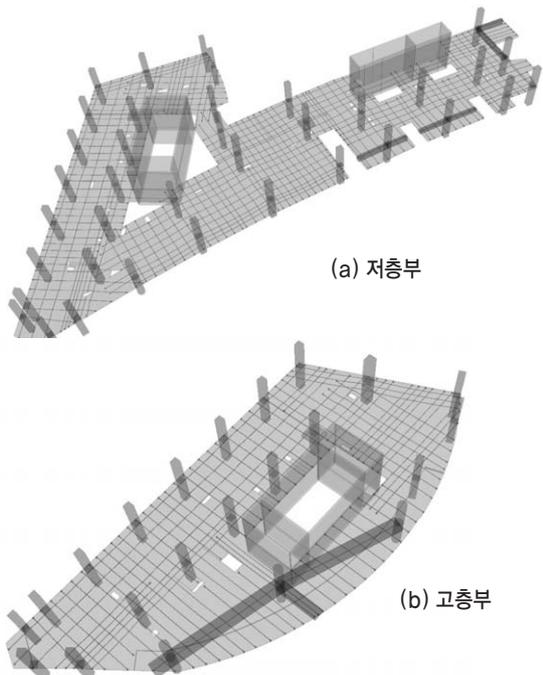
위치	Dubai, Arab Emirate
규모	지하 2층, 지상 24층
횡력저항시스템	RC 코어월
바닥구조시스템	플랫 슬래브
슬래브 두께	230 mm~350 mm
포스트텐션	Bonded Type



〈그림 16〉 조감도

2) 포스트텐션 시스템

경간이 일반적으로 10~12m 내외로 장경간이며, 내부의 모든 칸막이벽을 경량 콘크리트 블럭(Light Weight Block)으로 처리하였다. 이로 인해 부가고정하중(Super Imposed Dead Load)이 일반적인 경



〈그림 17〉 구조해석 모델링

우보다 높은 7.75kN/m²이 적용되어 일반 RC로는 경제성 및 시공성을 확보하기 어렵게 되었다. 이 때문에 일반 RC구조에 대한 대안으로 포스트텐션 시스템이 선정되었다. 일반 PT 플랫 슬래브의 경우 span/depth ratio가 40~50 정도이지만 이 건물의 경우 높은 SDL로 인해 일반적인 경우보다 더 두꺼운 슬래브 두께가 적용되었다.

Lower typical floor의 경우 두께 230mm와 350mm의 슬래브가 계획되었고 전단을 만족시키기 위해 부분적으로 주두가 배치되었다. 고층부 기준층에서는 약 15m에 달하는 경간 및 5m 가량의 캔틸레버로 인해 슬래브만으로는 장기치짐 제한을 만족할 수 없어서 내부에 포스트텐션 보를 계획하였다.

앞선 건물들과 달리 이 건물은 코어월과 포디움 주차장의 램프 벽체가 횡력에 대해 저항하며 슬래브는 이들 요소간을 연결하는 다이어프램으로 가정하였다. 이로 인해 횡력에 의한 배근 증가량을 최소화할 수 있었다.

3.4 Millennium Park

1) 일반사항

베트남 하노이에 건설될 본 건물은 한국 건설 회사에서 계획중인 초고층 주상복합 건물로 현재 Schematic Design 단계에 있다. 초기 계획 단계부터 포스트텐션 시스템 적용이 고려된 평면형태를 지니고 있다.



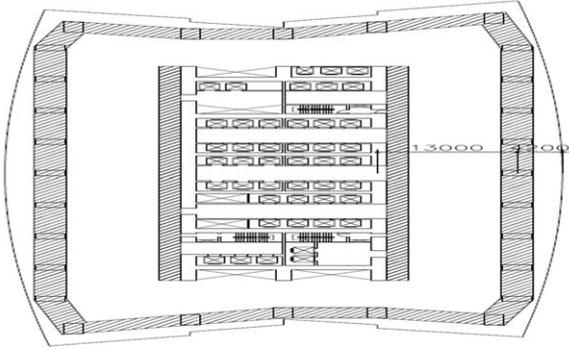
〈그림 18〉 조감도

2) 포스트텐션 시스템

타워부 기준층 모듈이 13m×9m이고 cantilever가 4m 이상 계획되어 있다. 적절한 슬래브 두께를 확보하고 횡력 저항 효율성을 향

〈표 6〉 Millennium Park 건물 개요

위치	하노이, 베트남
규모	지하 2층, 지상 70층
횡력저항시스템	RC 코어월 + 테두리보
바닥구조시스템	플랫 슬래브 + 테두리보
슬래브 두께	300 mm
포스트텐션	Bonded Type



〈그림 19〉 기준층 평면도

상시키기 위해 3,000mm×600mm의 테두리보를 두었다. 그 결과 약 280~320mm의 슬래브로 해당 모듈 및 캔틸레버를 지지하는 것이 가능하였다.

3.5 중학2구역 빌딩

1) 일반사항

한국에서는 드문 double-facade로 계획된 건물로 독특한 외관과 곡선형의 평면을 가지고 있다. 지상 1층과 2층은 상업시설, 지상 3층 이상은 오피스로 계획되고 있으며 현재 Schematic Design 단계에 있다.

2) 포스트텐션 시스템

초기에는 내부 기둥을 삭제하고 플랫 슬래브와 테두리보를 적용하

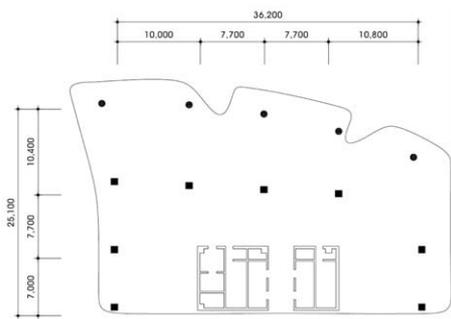


〈그림 20〉 조감도

는 안도 고려되었으나 설비 공간 확보 및 층고 계획의 문제로 현재 안과 같이 내부 기둥이 존재하는 두께 250mm의 flat plate로 계획되었다. 대부분의 구간에서 250mm의 두께로 슬래브 장기 처짐에 대해 만족하지만 부분적으로 처짐이 과다한 구역에는 지판이 추가될 것이다. 곡선형의 슬래브 형상으로 인해 모든 텐던의 길이가 달라지고 Anchorage Pocket의 형태 및 깊이도 달라지게 된다. 따라서 shop drawing 제작 및 포스트텐션 시공시 높은 수준의 정밀도가 요구될 것으로 예상된다.

〈표 7〉 중학2구역 빌딩 건물 개요

위치	서울
규모	지하 2층, 지상 17층
횡력저항시스템	RC 코어월 + 플랫 슬래브
바닥구조시스템	Flat Slab
슬래브 두께	250 mm
포스트텐션	Unbonded Type



〈그림 21〉 기준층 평면

4. 맺음말

종래에는 포스트텐션 시스템의 적용이 일반 RC 구조물로는 설계 및 시공이 어려운 장스팬 구조물을 구현한다는 일차적인 목적이 강했다. 그러나, 최근 경향은 초고층 건물에 포스트텐션 시스템을 적용하여 건물 중량 감소, 층고(구조체 높이) 절감, 거푸집의 빠른 재사용에 따른 공기단축, 처짐 및 균열제어에 의한 사용성 확보 등 여러 측면에서 장점을 얻는 것이 일반화되어지고 있다. 이와 같이 포스트텐션 시스템은 고층 건축물에서 공간 계획, 구조적 성능, 시공성, 경제성 등 모든 것들을 만족시킬 수 있는 구조 시스템으로 국내 건축시장이 한단계 성숙할 수 있는 계기로 작용할 것으로 예상된다. 이에 따라 현재로서는 미비한 건축구조 포스트텐션 시스템에 대한 건축, 구조, 시공 각 분야의 이해 및 체계적인 교육이 필요하다고 판단된다.