

길이 240m-편측개방지중구조물의 횡력저항시스템 및 신축이음 없는 바닥판의 설계 및 시공

Design and Construction of Lateral System and 240m-Long-Floor without Expansion Joint for One Side Open Underground Structures



전봉수*
Bong-Soo Jeon



아흐마드 압델라작**
Ahmad Abdelrazaq

1. 서언

이화여자대학교 캠퍼스 컴플렉스(Ewha Campus Complex, ECC)건물은 21세기 이화여자대학교 발전계획의 일환으로 공간 수요의 증가 및 가용지 부족에 대처하고, 지하 캠퍼스를 이용한 환경친화성의 증대, 그린캠퍼스의 구현 등이 그 추진 배경과 목적이었다. 캠퍼스의 대운동장을 전면 굴착하여 이 구조물을 건설하고 되메운 후 옥상조경을 한 지중건축물로 길이 240m, 폭 70m, 지하 깊이 26m로 지하 6개층의 연 68,700m²의 장대 철근 콘크리트조 건축물이다. 지하 4층 이상에서 폭 24m 중앙 벨리로 건물이 양분되어 2개의 편측 개방 지중건축물로 되어 있다. 지하 5, 6층은 주차장 및 기계실, 지하 1~4층은 교육시설, 강당 등의 용도이다. 이 건물은 2003년 이화여자대학교 주관 국제지명현상설계공모전에 3개의 작품이 제출되었다. 2004년 1월 엄정한 심사를 거쳐 프랑스 건축가 도미니크 페로(Dominique Perrault)의 안을 당선작으로 선정하고 기본설계를 진행하였으며, 국내의 법건축과 함께 상세 설계를 마무리 하였다. 2005년 5월 삼성물산(주) 건설부문이 착공, 2008년 2월에 완공한 후 학교시설로 사용하고 있다. 이 건물의 설계와 시공에 있어 편측 노출된 지중 콘크리트건물 토압에 대한 횡력저항시스템의 구상과 거동과약, 길이 240m에 이르는 6개층의 바닥판을 신축이음(E.J.)없이 처리한 과정을 본 고에 정리하였다.

2. 건물개요

- (1) 전경 : <사진 1>, <사진 2>
(2) 건축 평면도 및 단면도 : <그림 1>, <그림 2>

* 정회원, (주)전우구조 대표이사
bsjeon@jnp21.com

** 삼성물산(주) 건설부문 전문

- (3) 구조평면도 및 단면도 : <그림 3>, <그림 4>
(4) 공사 전경 : <사진 3>, <사진 4>

3. 지중구조물의 토압 및 지진하중

3.1 토압의 평가

3.1.1 방침

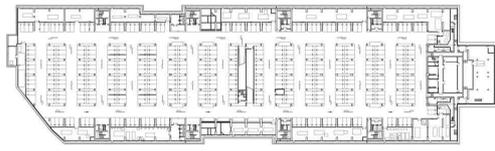
지하 6개층에서 상부 4개층이 수직적인 캔틸레버형 구조이므로



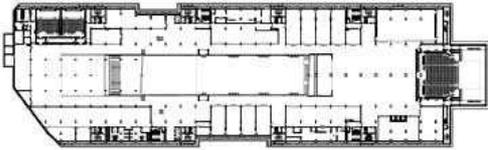
사진 1. 건물의 조감 전경



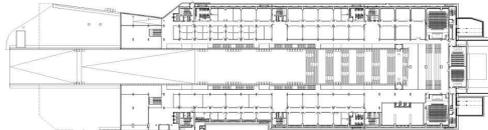
사진 2. 건물복측 중앙벨리 계단 및 커튼월



(a) 지하 6층



(b) 지하 4층

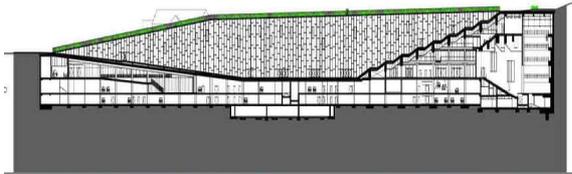


(c) 지하 1층 바닥 평면도

그림 1. 건축 평면도



(a) 횡 단면도



(b) 종 단면도

그림 2. 중형 단면도

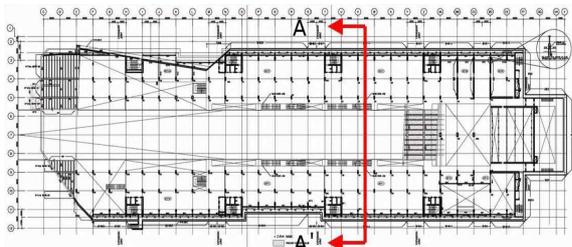


그림 3. 구조 평면도-지하 4층

로 지하외벽에 작용하는 횡 토압과 중력방향의 하중과 동시에 고려하고, 지진시 지진하중과 지진토압에 대한 안정성이 중요하다. 토압의 산정에 있어 이 건물이 캔틸레버형 횡력저항구조로 지하 5층 및 지하 6층 바닥에 의해 횡 방향 이동이 구속되어 있

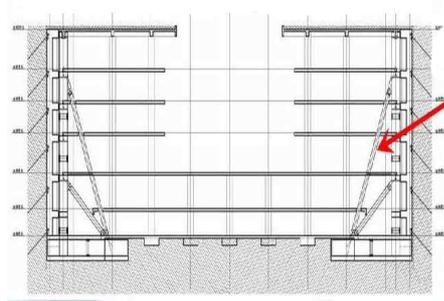


그림 4. 구조 단면도(A-A')



사진 3. 지붕층 콘크리트공사의 마무리 단계



사진 4. 외벽부분의 공사 전경

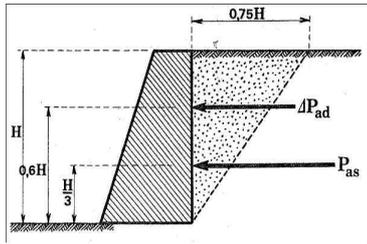
다. 건물의 안전성 측면에서 주동토압계수(K = 0.33)가 아닌 정지토압계수(K = 0.5)를 적용하고 지진에 의한 동적토압을 고려하였다.

3.1.2 정지토압

- 1) Rankine의 토압식 $P = K_a \cdot \gamma \cdot H$
- 2) $K_a = 1 - \sin \phi$
- 3) 지하외벽 배면의 토압은 무시 (영구배수시스템)

3.1.3 지진시 발생하는 동적 토압

$$\Delta P_{ad} = \frac{1}{2} \gamma \cdot h^2 \cdot \frac{3}{4} a_h$$



P_{as} = 정적토압
 P_{ad} = 지진시 발생하는 토압
 $a_h = 0.11$ = 지역계수

3.2 지진하중

KBC 2005의 0306에 따라

밀면전단력 V , $V = C_s \cdot W$

여기서, W : 건물 전체 중량

C_s : 지진응답계수

$$C_s = \frac{S_{D1}}{\left[\frac{R}{I_E} \right] T}$$

여기서, I_E : 중요도 계수

R : 반응수정계수

S_{D1} : 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도

T : 기본진동주기

4. 횡력저항시스템

4.1 철골 프레임

4.1.1 횡력저항구조의 개념

설계 당시 1차적으로 지하 외벽 공사용 앵커를 영구적으로 사용하는 안을 검토하였으나 앵커 및 앵커헤드의 수명 및 유지 관리 등의 문제로 채택하지 않고 건물 내부에 저항 기구를 별도로 두기로 하였다.

지하 외벽을 따라 8.0m의 간격으로 배치된 26개의 프레임을 세우고 이를 각 층마다 수평으로 연결하는 연 240m 길이의 콘크리트 외주보(whaling beam)를 두어 지하 6개층의 정적 및 지진토압, 지하수압 및 지진력 등에 저항하도록 구상하였다. 토압하중을 바닥판과 프레임의 수평강성으로 분배하여 지하구조물의 사용성 및 안정성을 확보하였다. 이를 콘크리트구조로 할 경우 경사 스트럿은 장기적 축방향력으로 긴 부재의 탄성축소, 건조수축 및 크리프 등에 의한 재장축소가 누적되어 외벽이 내측으로 변형이 커져 구조적인 안전성을 해하고, 내부마감의 손상

및 외부 지반의 수평이동으로 인한 주변의 문화재적 건물에 위해한 손상이 있을 것으로 보였다. 이에 프레임을 건조수축현상이 없는 강구조로 하고 수직 철골프레임과 강재외주보가 맞닿는 부위에 프리로딩 가력잭(flat jack)을 설치하여 지하 외벽을 항구적으로 밖으로 밀어내 구조물의 안정을 취하는 방안을 택하였다<그림 5>.

4.1.2 프레임의 설치

철골 프레임의 설치과정을 <그림 6>과 같이 제안하였다.

4.1.3 철골조 프레임의 선결 사안

철골조 프레임의 방안에는 다음의 선결 사안이 있었다.

- 1) 프레임당 2개소(지하 1층 및 지하 4층), 총 52개소에 설치하는 가력잭은 설치위치마다 가력 크기(상시토압력 + 지진토압력)가 매우 부정확하여 효과가 의심스러웠다.
- 2) 철골 프레임의 가력 시점 지하외벽용 가설지중앵커(tie back)의 제거 시점의 판단이 어렵다. 따라서 구조체 공사와의 공정의 조절 등 공사 관련 문제 등이 선결되어야 한다.
- 3) 철골 프레임의 공사가 주공정이 되어 전체공정관리에 문제가 있다<그림 6>.
- 4) 가력잭의 종류, 설치, 모니터링 및 운영방법에 대한 검토에 전문가의 지원이 필요하며, 현실적으로 가력잭의 구매 조달 및 시공이 어렵다.
- 5) 장래 이 건물에 인접하여 건물을 신축할 경우 가력잭에 의한 항구가력으로 외벽이 밖으로 밀리는 현상에 대한 대책을 미리 강구하여 건물관리지침에 기록하여 명시한다.
- 6) 철골 프레임은 부재의 제작, 운반 및 설치 등의 공사비 증가 및 공기 지연의 소지가 있다.

위와 같은 선결 사안들이 시공 단계에서 해결될 것으로 기대하였다.

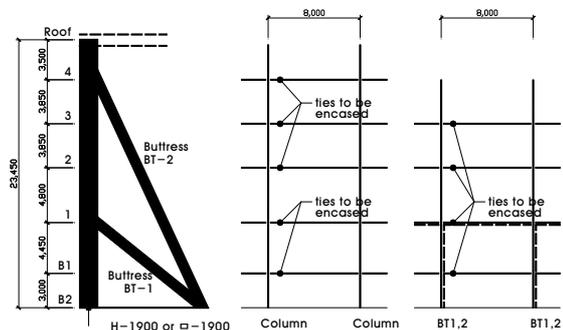


그림 5. 철골프레임의 개념도(단위: mm)

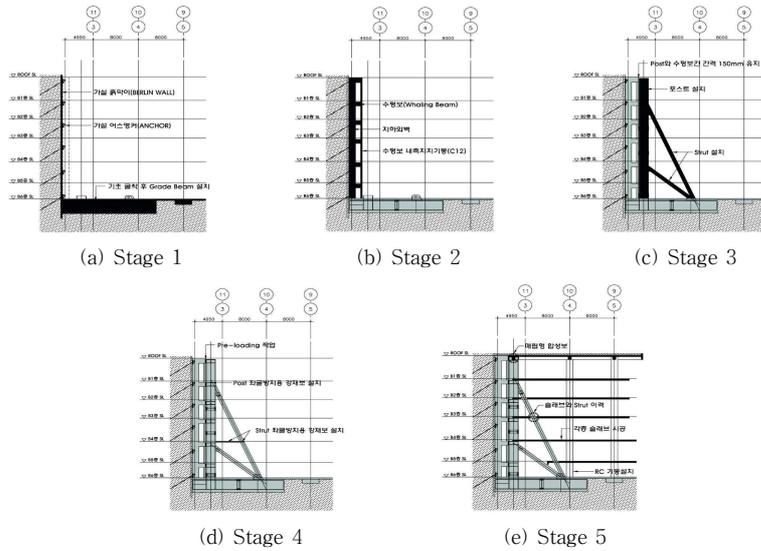


그림 6. 철골 프레임의 설치과정

4.2 콘크리트 프레임

4.2.1 기본 방향

철골 프레임은 충분치 않은 공사기간 및 공사비 예산 제한 등의 여건에서 대형 철골 프레임(26조)의 제작, 운반 및 설치 등에 소요되는 기간이 길어지고 상기 2.1 다항에서 제기한 선결 사안이 시공단계현장에서 재차 제기되었다. 이에 따라 철골조 수직 프레임을 철근콘크리트 구조로 변경할 것을 검토하게 되었다. 콘크리트 프레임은 건설 공정에 따라 점진적으로 상향으로 진행되어 완성이 된다. 횡력에 대한 건물의 거동이 수직 프레임, 각층 바닥판 및 수평보 등이 일체화 되어 거동한다. 따라서 이 프레임의 거동을 E.J가 없는 240m의 바닥판 구조와 함께 전체적인 해석을 통해 검토함이 보다 정확할 것으로 보았고 그에 따라 콘크리트 프레임의 단면을 결정하고 벽체, 기둥 및 바닥판 등의 보강 여부를 판단하였다<그림 7>.

4.2.2 구조해석

1) 토압하중

- 지질주상도를 바탕으로 산정한 정지토압의 적용
- 토압의 수평분력의 적용(토압의 $\cos 18^\circ$)

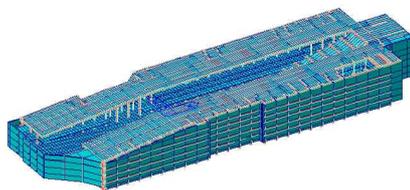


그림 7. 해석모델(3차원)

- 그레이드빔 토우상단 합벽하중 적용
- 2) 콘크리트 강도에 대한 강성의 차별적 적용
- 3) 바닥판, 외벽 및 기둥에 대한 횡력저항 모멘트프레임 적용
- E.J가 없는 바닥판으로 함.
- 바닥판의 각 프레임간 구속응력을 확인하고 위치별 변형을 확인하기 위하여 매 2m 간격으로 매쉬(mesh)를 나누어 횡력 해석 후 이에 따른 보강 유무 확인
- 벽체를 횡력저항 요소로 적용하여 벽체를 플레이트 요소로 거동하도록 모델링
- 전체 기둥단면 및 강도에 따른 강성(탄성계수)을 도면과 일치하도록 입력, 횡력에 의한 부재력을 2D 해석

과 비교 검토<그림 8>

4) 경계조건: 흙의 강성 스프링계수 지중보 저면에 적용

4.2.3 해석 및 단면 설계

1) 초기 및 장기 처짐

해석결과 각층 슬래브가 각 열의 횡력저항 프레임을 구속하며 밸리 구간을 지점으로 하는 수평보 역할을 하였으며. 상대적으로 강성이 큰 프레임과 동-서측간 지붕면이 연결되는 부분(DD ~ FF열)으로 인해 횡력이 재분배되어 처짐이 줄어드는 것이 확인되었다<그림 9>.

2) 콘크리트 프레임의 설계

26개 프레임 중 LF1 단면표 예를 도시하면 <표 1>과 같다.

4.2.4 건물의 안정

- 1) 콘크리트 횡력저항 시스템은 수직방향의 켈틸레버형 구조물로 토압하중과 토압 지진력에 대하여 전도모멘트가 발생하고, 이에 저항하는 안정모멘트는 골조의 자중 + 추가고정하중 + 기초 앞굽판 상단 합벽의 자중 + 흙의 수직마찰력 등에 의한다.

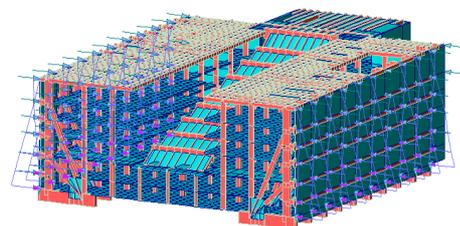
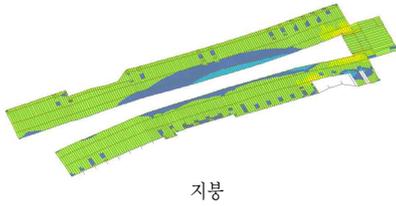


그림 8. 단위모델



지붕
그림 9. 바닥판의 수평변이

- 2) 흙의 수직마찰력은 토압력의 0.3으로 한다(흙의 재하각 18°의 수직분력 $\sin 18^\circ \approx 0.3$).
- 3) 횡 토압과 토압 지진력에 의한 기초의 외측단부에서 발생하는 인발하중을 억제하도록 하였다.
- 4) 구조물의 전도(overturning)가 우려되는 프레임은 동측 BB ~ CC열에 해당되며, 바닥판이 없는 썬큰 구간으로 예상되었으나 흙의 수직마찰력을 고려할 경우 모든 프레임의 기초에서 인발력이 발생하지 않는 것으로 검토되었다.

4.2.5 바닥판의 응력 및 보강

1) 지붕층 ~ 지하 3층 슬래브

3차원 해석시 각 프레임에 대한 바닥판의 구속효과가 고려되었으며, 바닥판의 구속으로 횡 토압 사용시 변형량이

감소되었다. 구속효과를 가진 지붕층 ~ 지하 3층의 바닥판은 C열 및 EE + 4.0을 지점으로 하는 휨 부재로 브레이스 프레임의 거동을 구속하므로 이에 따른 바닥판의 끝단에 휨 철근을 추가하였다<그림 10>.

2) 지하 4 ~ 지하 5층 바닥판

콘크리트조 포스트, 스트럿 및 바닥판의 지압력 - 수직 프레임과 일체 타설되는 바닥판은 포스트의 횡 토압의 일부를 전달받게 되므로 수직프레임과 바닥판의 교차부에서의 지압에 대한 검토가 필요하다. 지하 4층에서 가장 큰 지압력이 발생하고 있으나 지압강도 내에서 만족하는 것으로 확인되었다<그림 11>.

지하 4 ~ 5층의 바닥판은 횡 토압으로 인하여 면내 압축력이

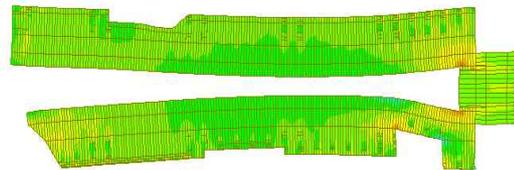


그림 10. 지붕 슬래브의 횡 토압에 의한 슬래브 휨 발생

표 1. 콘크리트 프레임 LF1의 단면표

프레임명			LF1																				
			<p>프레임 위치</p>																				
			<p>각 층 슬래브 유효폭</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>층별</th> <th>두께</th> <th>유효폭</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B1</td> <td>350</td> <td>1,850</td> </tr> <tr> <td>B2</td> <td>350</td> <td>1,850</td> </tr> <tr> <td>B3</td> <td>350</td> <td>1,850</td> </tr> <tr> <td>B4</td> <td>250</td> <td>1,550</td> </tr> <tr> <td>B5</td> <td>250</td> <td>1,550</td> </tr> </tbody> </table> <p>* 표기가 없는 부재는 각 부재의 일람표 참조</p>			층별	두께	유효폭	B1	350	1,850	B2	350	1,850	B3	350	1,850	B4	250	1,550	B5	250	1,550
층별	두께	유효폭																					
B1	350	1,850																					
B2	350	1,850																					
B3	350	1,850																					
B4	250	1,550																					
B5	250	1,550																					
부재명	크기	부재명	크기	크기																			
Grade Beam	1,100(W) × 2700(H)	Pedestal	4,650(L) × 3,550(H) × 800(W)	C 60																			
Post	800(W) × 2,050(H)	지하외벽	THK : 650 - 1,150	C 35																			
Long Strut(LS)	800(W) × 1,000(H)	기둥(C6)	400 × 1,200	C 40																			
Short Strut(SS)	800(W) × 1,000(H)	지붕층 보 G3A	600 × 900	C 35																			
Link Beam	LB1	800(W) × 1,000(H)	슬래브	지하 4, 5층	THK : 250	C 35																	
	LB2	800(W) × 1,000(H)		지하 1, 2, 3층	THK : 350	C 35																	
Frame Beam(FB1)	800(W) × 600(H)																						

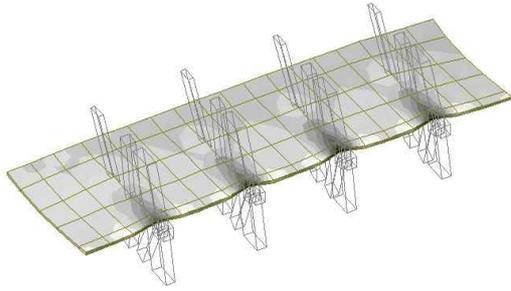


그림 11. 지하 4층 프레임과 슬래브 접합부

발생하며, 수직하중과 바닥판 압축력의 P-Δ 효과로 인한 부가 휨 응력에 대하여 보강을 하였다<그림 12>.

4.2.6 기둥의 응력

토압에 대한 바닥판의 수평변위로 추가로 발생하는 기둥의 휨 응력은 부재의 내력범위 내에 있음이 확인되었다.

4.2.7 바닥판 및 기타 부재의 보강

- 1) 각층 바닥판이 벨리 구간을 지점으로 하는 수평보 역할을 하였으며, 상대적으로 강성이 수직프레임과 동-서측간 지붕면이 연결되는 부분(DD ~ FF열)으로 인해 휨력이 재분배되어 처짐량이 줄었다.
- 2) 바닥판이 없는 쉰큰 구간에서 흠의 수직마찰력을 고려하면 수직프레임의 기초에서 인발력이 발생하지 않았다.
- 3) 지하 ~ 지하 3층의 바닥판이 구속 기능을 하여 수평 휨 부재 역할로 이에 따른 바닥판 내측 끝단의 휨(인장)철근을 추가하였다.
- 4) 지하 4층 바닥은 수직 프레임과 바닥판의 슬래브의 교차부분에서 큰 지압력이 발생하나 콘크리트 지압강도 내에 있다.
- 5) 지하 4 ~ 5층 바닥판은 면내 압축력이 발생하며, 수직하중과 바닥판의 압축력으로 인한 P-Δ 효과를 내력이 부족한 부분이 있어 이를 보강하였다.

5. 신축이음(E.J.)이 없는 길이 240m 바닥판 설계

5.1 기본 방침

당초의 설계안에서는 가로, 세로 방향으로 8.0m의 6개 모듈

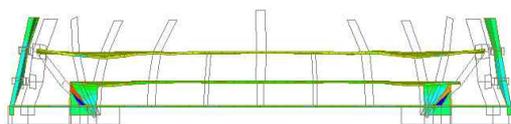


그림 12. 휨력에 의한 슬래브 면내 압축력 발생

인 48m마다 신축이음을 두어 바닥판을 분리, 장내 건물이 5개씩 분할되어 각자 거동을 하도록 하였다. 그러나 E.J.는 시공이 번잡하고 아무리 철저한 시공을 하여도 하자 발생의 소지를 안고 있다. 더구나 E.J.로 인한 공정관리가 용이하지 않고 이에 따른 공기지연이 우려되었다. 이에 E.J.를 생략하는 방안을 검토하게 되었으며, 이를 위해 바닥판에 대한 온도응력의 검토를 통해 바닥판 및 기둥의 국부적인 응력집중현상과 변형 부분을 확인하고 보강유무를 판단할 필요가 있었다. 다만, 건조수축 및 수화열에 의해 발생하는 바닥판 응력은 시공중 지연이음(delay joint)을 두어 해소한다는 원칙을 세웠다.

5.2 온도하중

기상청 자료에 따른 온도차를 적용하였고, 사용시 온도하중은 슬래브내 축열시스템 온도를 근거로 온도하중을 산정하였다<표 2>.

5.3 바닥판의 응력

5.3.1 온도 응력

1) 시공시

- 전층 온도차 ±30°C로 적용.
- 온도해석은 48m 지연이음으로 분할되는 구간에 대하여 해석

2) 사용시

- B4 ~ Roof층 온도차 +15°C로 적용(슬래브내 축열, 난방시스템)
- B5 ~ B6층 및 벨리 온도차 ±15°C로 적용(축열시스템 없음)

5.3.2 온도하중

온도하중과 수직하중 및 토압하중의 조합응력은 <그림 13>과 같다.

5.4 온도응력에 따른 보강

공사 및 사용시 온도응력에 따른 보강을 하였다.

표 2. 온도하중

시공시 온도차 산정(B6 ~ Roof) (기상청 서울지역 자료)	사용시 온도차 산정(B4 ~ Roof) (슬래브 축열 설비시스템 가동시)
겨울철 가장 낮은 온도 : -15°C 여름철 가장 높은 온도 : +38°C	슬래브내 겨울철 가장 높은 온도 : +29°C 슬래브내 여름철 가장 낮은 온도 : +17°C
시공시 가정 온도 : +10°C	
전체 온도변화 : ±30°C	전체 온도변화 : +15°C B5, B6층 사용시 온도차 : ±15°C

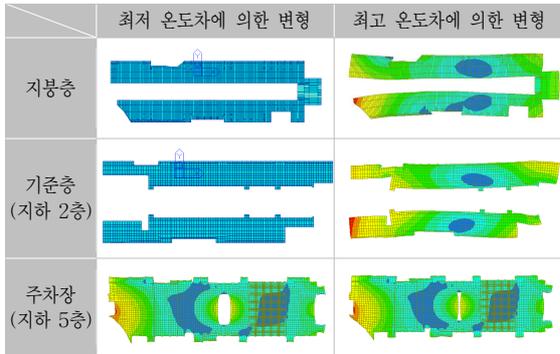


그림 13. 온도하중에 따른 변형도

5.4.1 공사의 온도변화에 따른 응력에 대하여

지연이음으로 분할되는 48m의 바닥판에 대한 온도해석 결과 온도차(±30℃)에 의한 부재력은 증가하나 마감하중을 제외한 고정하중과 활하중을 작업하중으로만 적용하여 시공시 내력은 사용시 부재 내력보다 작으므로 보강이 필요치 않았다<그림 14>.

5.4.2 사용시 응력에 대하여

지하 4층 ~ 5층의 바닥판은 서측과 동측 건물간 연결되어 있으며, 기둥과 수직 프레임에 의해 구속되어 있다. 온도영향(+15℃)에 의한 판의 변형과 면내축방향력(=P-Δ)으로 추가된 부재력에 대하여 보강을 하였다<그림 15>.

5.4.3 보강

- 1) 지연이음으로 분할되는 48m 프레임에 대한 온도해석으로 전 층 바닥 사용시 부재내력보다 작게 나타나 보강하지 않는다.
- 2) 지하 4층 ~ 5층은 온도영향(±15℃)에 의한 바닥판은 P-Δ 효과로 인해 수직하중으로 부가적인 부재력이 확인되어 일부 바닥판을 보강하였다.

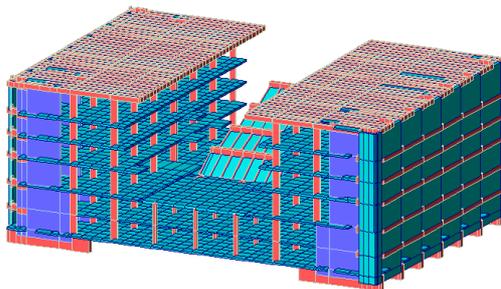
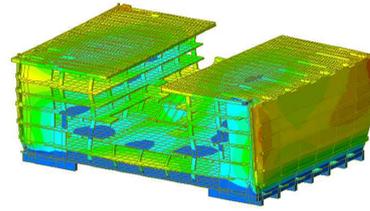
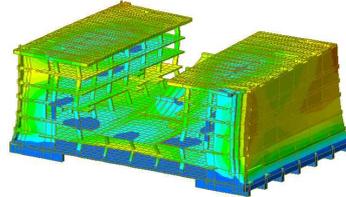


그림 14. 시공시 모델링 - E.J.를 기준으로 한 48m 프레임



(a) 온도 상승시 처짐 형상



(b) 온도 하강시 처짐 형상

그림 15. 온도변화에 따른 처짐

- 3) 지하 1층 ~ 3층은 바닥판내 설비상 축열시스템의 설치로 온도차(+15℃)에 대한 P-Δ 효과에 따른 부가적인 부재력이 발생했으나 부재 내력이 충분하여 보강하지 않는다.
- 4) 지붕층 바닥은 상승시 바닥판의 팽창으로 인하여 조이스트 보에 응력이 발생하였으나 이에 따른 보강은 필요치 않았다.

6. 결론

설계사와 시공사는 이 건물의 설계와 시공으로 2008년도 한국콘크리트학회의 작품상을 수상하여 이 프로젝트에 참여한 모든 이가 함께 한 영광이었다. 필자는 2004년 1월의 국제현상설계공모전에서 기술자문위원장으로서 작품 선정에 참여하였고, 본설계의 구조설계 책임자로서 구조설계와 감리 및 기술 지원 등으로 참여하였다. 공동저자인 아흐마드 압델라작은 시공사인 삼성물산의 기술담당 임원으로서 이 구조체의 엔지니어링 전반에 걸친 책임과 함께 공사기간의 단축 및 공사비 절감에 기여하였다. 두 저자는 본 고의 2개 주제에 대하여 공동연구를 하였다.



담당 편집위원 :
천영수(LH공사) cysoo@lh.or.kr