

대형 슬래브 건물의 온도하중 및 조인트 해석

김중수 우리회 감사
(주)CS구조엔지니어링 대표
jskim@cs.co.kr

1. 머리말

콘크리트는 시공시나 사용시에 온도변화, 건조수축 등의 온도하중으로 인하여 체적이 변화한다. 특히, 넓은 면적의 슬래브는 이러한 체적 변화가 크므로 슬래브에는 상당량의 면내 방향 응력이 발생하고, 이 응력에 의해서 슬래브에는 휨균열 외에 직접인장력에 의한 추가적인 균열이 발생한다.

일반적으로 온도변화중 온도감소가 증가시보다 구조물에 더 큰 피해를 준다고 알려져 있다. 온도증가시에는 슬래브가 팽창하여 슬래브에 압축력이 발생하지만, 온도 감소시에는 슬래브의 수축으로 인하여 콘크리트에 더 치명적인 인장력이 발생하여 결국 균열을 야기하기 때문이다.

온도변화 및 건조수축등에 의한 온도하중을 감소시키기 위하여 지연조인트(Delay Joint) 및 팽창조인트(Expansion Joint)등을 설치하기도 한다. 건조수축 변형은 지연조인트를 설치할 경우에 상당량 감소하고, 장기간에 걸쳐 조금씩 발생할 뿐만 아니라 콘크리트의 크리프 작용과도 상쇄되기 때문에 그 영향은 크지 않지만 온도변화의 경우는 팽창조인트를 사용해야만 막을 수 있는 것으로 알려져 있다.

팽창조인트의 간격 및 설치여부는 일반적으로 사용성과 안전성 면에서 검토되어질 수 있다. 사용성에서의 검토는 구조물이 수축함에 따라 발생하는 균열이 허용기준치 이내의 값이 되도록 제한하는 것과 구조물의 수축·팽창에 의한 변형에 의해 마감재 등의 박리 현상이 발생하지 않도록 하는 것 등으로 분류할 수 있을 것이다.

안전성면에서는 구조물의 수축·팽창의 직접적인 영향에 의하여 부재에 발생하는 응력에 대한 검토 및 변형에 의해 수직부재와 수평부재의 연결부에 발생하는 모멘트 및 전단력에 대한 검토 등이 있다.

그러나 현재까지는 건조수축 및 온도변화에 의한 변형을 흡수할 수 있는 팽창조인트 간격에 대한 일반적인 설계 접근방법이 없는 상태이다.

따라서 건조수축 및 온도변화 등의 온도하중에 의한 사용성과 안전성을 콘크리트설계기준과 ACI 매뉴얼 및 3-D 구조해석을 이용하여 평가하므로써 넓은 면적의 슬래브를 가진 철근콘크리트 조 건물의 온도하중 해석의 기초적 자료를 제시하는 데 그 목적이 있다.

2. 온도하중 효과 및 관련 기준

구조물은 온도변화에 따라 신축한다. 구조물이 구속되어 있지 않으면 단순히 신축만 일어난다. 그러나 현실적으로 어떤 형태로든지 구속이 되어 있으므로 이에 따른 응력이 발생한다.

이와같이 온도변화에 따라 생기는 온도응력은 고정하중, 적재하중, 풍하중 및 지진하중과 같은 외력에 의한 응력과는 다른 자기변형 응력이므로 건축물 설계시 이 영향을 무시할 수 없다.

온도변화는 그림 1에 나타난 것처럼 평균온도변화 ΔT_a 와 온도구배 $\Delta T_b/t$ 의 두가지로 구분하고 온도변화로 인한 하중효과도 두가지로 나눌 수 있다.

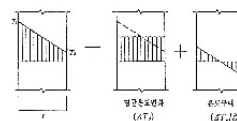


그림 1. 온도변화

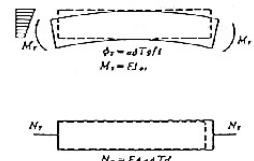


그림 2. 온도응력

구조부재는 온도변화 ΔT_a 가 있으면 선팽창계수 α ($=1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$)를 곱한 신축변형 $\alpha \Delta T_a$ 가 발생한다. 구조물은 어떤 형태로든 다소의 구속이 되어 있으므로 변형은 작으며 자유변형과의 차이만큼 온

도응력이 발생하는데 변형에 대한 완전한 구속이 되어 있다면 축력 $N_r (=EA\alpha\Delta T_s)$ 이 일어나고 온도구배 $\Delta T_s/t$ 에 의해 일어난 온도응력은 곡률 $\psi_r (= \frac{\alpha\Delta T_s}{t})$ 의 변형이 생기는 구속이 되므로 휨모멘트 $M_T (=EI\alpha\Delta T_s/l)$ 가 일어난다.

Mark Fintel은 철근콘크리트 구조물의 건조수축 변형은 장기간에 걸쳐 점차적으로 진행되므로 부재의 크리프와 미세균열들 때문에 계수 1/5을 곱하므로써 감소시킬 수 있다고 말하고 있다.

마찬가지 이유로 온도변화에 의한 변형도 계수 1/2을 곱하므로써 감소시킬 수 있으나 일반적으로 60 ~ 90일 이내의 짧은 기간에 최대의 온도변형이 발생한다고 제시하고 있다.

2.1 건조수축 변형에 의한 하중효과

국내 콘크리트구조설계기준에서는 설계기준강도, f_{ck} 를 가진 콘크리트의 건조수축 변형률은 대기의 평균상대습도, 부재의 크기 등을 고려하여 다음 식에 따라 구할 수 있다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_s) = \epsilon_{sho} B_s(t, t_s) \quad (1)$$

여기서,

t : 콘크리트의 재령, 일(day)

t_s : 콘크리트가 외기중에 노출되었을 때의 재령, 일(day)

$$\epsilon_{sho} = \epsilon_s(f_{cu}) B_{RH}$$

$$\epsilon_s(f_{cu}) = [160 + 10 B_{sc}(9 - f_{cu}/100)] \times 10^{-6}$$

$$f_{cu} = f_{ck} + 80$$

$$B_{RH} = \begin{cases} -1.55[1 - (RH/100)^3] & (40\% \leq RH \leq 99\%) \\ 0.25 & (RH \geq 99\%) \end{cases}$$

$$B_s(t-t_s) = \sqrt{\frac{(t-t_s)}{3.5t_s^2 + (t-t_s)}}$$

4: 2중 시멘트

$B_{sc} = 5$: 1중, 5중 시멘트

6: 3중 시멘트

ACI 매뉴얼 209에 나타난 건조수축 변형률을 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{(t-t_0)}{35 + (t-t_0)} \cdot \epsilon_{shoo} \quad (2)$$

$$\epsilon_{shoo} = 780 \times \gamma_{sh} \times 10^{-6}$$

여기서,

$\epsilon(t, t_0)$: 타설일(t_0)로부터 재령 t 일까지의 건조수축 변형률(10^{-5})

t_0 : 콘크리트 타설일

t : 건조수축 계산일

γ_{sh} : 건조수축 보정계수로 콘크리트 재료물성 및 부재두께 등에 의해 결정된다.

2.2 온도변화에 의한 하중효과

건축물에 직접적으로 영향을 주는 온도변화는 외기온도, 일사온도, 지중온도, 건물내의 실내 온도 등을 생각할 수 있다. 온도변화에 의한 하중효과를 적절히 평가하려면, 온도조건에 따라 건축물에 일어나는 온도분포를 정확히 파악해야 한다.

온도변화의 범위를 설정하는 경우, 철근콘크리트조의 기준이 되는 온도는 건설하는 지역의 시공시기의 평균기온을 기준으로 한다.

온도분포는 열전달률과 열전도율의 영향을 받는다. 즉 벽 및 슬래브의 온도분포는 열전달률이나 열전도율의 영향을 받으면서 동시에 외기온도의 변화와 함께 시간에 따라 변동을 반복한다. 따라서 외기온도의 변화에 따른 슬래브(T_{slab}) 및 벽체(T_{wall})내의 온도하중은 아래의 열평형방정식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{A1}{\frac{1}{h_0} + \frac{d1}{k} + \frac{1}{h_1}} (T_{air} - T_B) + \frac{A1}{\frac{1}{h_0} + \frac{d1}{k} + \frac{1}{h_1}} \times (T_{earth} - T_B) + \frac{A2}{\frac{d1}{k} + \frac{1}{h_1}} (T_{air} - T_B) + V \cdot (T_{air} - T_B) \cdot n \cdot 0.29 \quad (3)$$

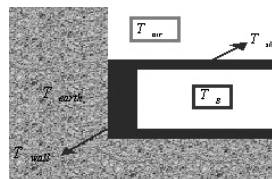


그림 3. 벽체, 슬래브 온도 산정

$$T_{slab} = \frac{T_{air} + T_B}{2}, \quad T_{wall} = \frac{T_{earth} + T_B}{2}$$

여기서,

$A1, A2$: 슬래브 및 벽체면적 (m^2)

h_0, h_1 : 외부 및 실내열전달계수 ($kcal/m^2hr^\circ C$)

$d1, d2$: 슬래브 및 벽체 두께 (m)

k : 콘크리트의 열전도율 ($kcal/m^2hr^\circ C$)

T_{air} : 대기온도 ($^\circ C$)

T_B : 지하층 실내온도 ($^\circ C$)

V : 지하층 체적 (m^3)

n : 환기횟수 (1회)

3. 예제설계

건조수축 및 온도변화에 의한 변형율을 산정하므로써 콘크리트의 인장응력을 계산하고 인장강도와 비교하여 지연조인트 설치여부, 최대변형량을 고려한 팽창조인트의 설치 필요 및 구속부재들의 안전성을 검토하기 위하여 상용프로그램에 의한 3차원 구조해석을 슬래브 면적이 428.6m×276.6m인 경기도 소재 P건물에 대하여 실시하였다.

지상 1층 및 2층(Deck층)의 슬래브 두께는 20cm이고 지하 1층의 벽체두께는 40cm, 높이는 5.0m이다. 또한 지상 2층 데크층의 높이는 4.5m이다. 지하 1층 벽체 및 지상 1층 슬래브의 콘크리트 타설시기는 4월로 가정하였다.

지하벽체 외부는 시공후 30일이내에 되메우기를 한다고 가정하여, 온도계산시 지중 매립조건으로 적용하였다. 공사 시작 2개월 후의 지하공간 기온은 열평형방정식에 의해 계산하여 적용하였다.

상대습도는 월평균습도의 3년 평균치를 적용하였고 타설 콘크리트의 슬럼프는 21cm, 잔골재율(S/A)은 46.2%, 단위시멘트량은 119kg/m³, 공기량은 4.5%, 콘크리트의 설계기준강도(f_{ck})는 270kgf/cm²를 적용하였다. 그림 4는 예제건물에 대한 평면형상을 나타내었다.

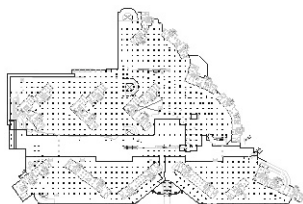


그림 4. 예제건물에 대한 평면형상

3.1 해석개요

해석시 사용한 모델은 지상1층 및 2층의 슬래브와 거더, 지하층 외부벽체와 기둥, 코어 벽체까지 포함하였으며 경계조건은 지하 1층 바닥 Level에서 6개의 자유도에 대해 모두 고정하였다.

또한 지상 1층과 2층 바닥의 Opening을 모델에 포함하여 Opening 구간에서의 응력의 분산효과를 고려하였다. 코어 및 외부벽체의 경우 강성이 크기 때문에 구조물의 구속효과를 고려하여 모델링에 포함시켰다.

슬래브, 보 및 벽체는 플레이트 요소, 기둥은 보요소로 모델링하여 적용하였다.

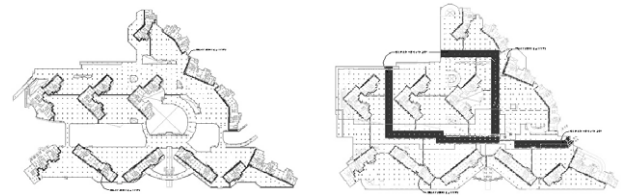
지상 1층과 2층 및 지하 벽체, 기둥에 지연조인트(Delay Joint)와 팽창조인트(Expansion Joint)의 설치에 따른 온도하중 효과를 평가하기 위하여 표 1 및 그림 5와 같이 네가지의 해석모델을 가정

하여 해석하였다.

데크층인 지상 2층 슬래브의 경우는 외기에 노출되어 있으므로 팽창조인트를 설치하고 지연조인트의 존치기간은 건조수축 변형이 50%정도 발휘되는 6주간을 존치하는 것으로 가정하였다.

구분	지연조인트				팽창조인트				비고
	지상2층	지상1층	지하벽체	기둥	지상2층	지상1층	지하벽체	기둥	
모델1	○	○	×	○	○(1개소)	×	×	×	230×60m(2층) 420×260m(1층)
모델2	○	○	×	○	○(2개소)	○(1개소)	○(1개소)	×	160×60m(2층) 260×260m(1층)
모델3	○	○	×	○	○(3개소)	○(1개소)	○(1개소)	×	80×60m(2층) 260×260m(1층)
모델4	○	○	×	○	○(3개소)	×	×	×	80×60m(2층) 420×260m(1층)

표 1. 해석모델 선정



(a) 지상 2층(Deck층)

(b) 지상 1층

그림 5. 모델 4에 대한 지연/팽창조인트 위치도

슬래브 콘크리트 타설시 온도를 최고온도와 최저온도의 중간값인 10℃로 가정하였으며, 최고온도와 최저온도는 3년간의 기상청 자료에 근거하여 35℃와 -15℃로 결정하였다.

실제로 온도변화의 범위를 설정하는 경우, 철근콘크리트조의 기준이 되는 온도는 건설하는 지역의 시공시기의 평균기온을 기준으로 해야 한다. 즉 지상1층 슬래브의 경우는 콘크리트 타설시의 외기 온도와 지하 1층 실내기온의 평균기온으로 지상 1층과 지상 2층의 콘크리트 타설시기가 4(13.8℃) ~ 5월(18.0℃)이므로 10℃의 가정은 큰 오차가 없을 것으로 판단된다.

건조수축에 가장 많은 영향을 주는 상대습도는 기상청 자료에 따라 3년간 평균상대습도인 55%, 온도변화에 따른 콘크리트의 변형율은 1×10⁻⁵/℃로 가정하였다.

콘크리트 타설후 건조수축중 50%를 지연조인트가 감소시키고 지상 1층 슬래브의 온도변화는 슬래브 상부에 흙이 덮이고 내부공간이므로 온도변화가 지상 2층의 절반이라고 가정하였다. 또한 Mark Fintel의 이론에 따라 슬래브 면내의 응력은 하중의 점차적인 증감과 슬래브의 미세균열에 의해 온도변화에 의한 응력은 1/2, 건조수축변형은 1/5로 감소되는 것으로 가정하였다. 또한 건조수

축에 의한 영향을 해석에 반영시키기 위하여 콘크리트구조설계기준(1999, 건설교통부)에 의해 계산된 변형율을 온도로 치환하여 반영하였다. 따라서 지상 1층과 2층에 적용시킨 온도하중은 다음과 같다.

- ① 지상 2층 : $25^{\circ}\text{C}/2 \times 1 \times 10^{-5}$ (온도변화) + $42.2^{\circ}\text{C}/(2 \times 5) \times 10^{-5}$ (건조수축) = $16.22^{\circ}\text{C} \times 10^{-5}$
- ② 지상 1층 : $12.5^{\circ}\text{C}/2 \times 1 \times 10^{-5}$ (온도변화) + $42.2^{\circ}\text{C}/(2 \times 5) \times 10^{-5}$ (건조수축) = $10.47^{\circ}\text{C} \times 10^{-5}$

3.2 해석결과 및 비교 분석

지연조인트와 팽창조인트의 유무에 따른 온도하중 효과가 건물에 미치는 영향을 평가하기 위하여 네가지의 모델을 가정하여 해석한 결과를 정리하여 나타내면 표 2와 같다.

표 2에서 알 수 있듯이 슬래브와 지하옹벽의 전단마찰, 슬래브와 주거동 전단벽의 전단마찰, 기둥의 추가적인 휨모멘트와 전단력, 각 동들의 밀면전단력, 슬래브 면내응력, 슬래브 수축과 팽창에 의한 지하옹벽의 휨모멘트와 전단력에 대하여 검토한 결과, 모델 4가 가장 합당한 것으로 나타났다. 그림 6 - 그림 14에 모델 4에 대한 해석 결과를 나타내었다.

구분	모델1	모델2	모델3	모델4
슬래브내 지상2	최대 : $\sigma=307\text{tonf/m}$	최대 : $\sigma=274\text{tonf/m}$	최대 : $\sigma=237\text{tonf/m}$	최대 : $\sigma=233\text{tonf/m}$
응력 지상1	최대 : $\sigma=173\text{tonf/m}$	최대 : $\sigma=192\text{tonf/m}$	최대 : $\sigma=192\text{tonf/m}$	최대 : $\sigma=175\text{tonf/m}$
지하옹벽과 슬래브사이의 전단력	최대 : $F_{xy}=86.7\text{tonf/m}$	최대 : $F_{xy}=87.2\text{tonf/m}$	최대 : $F_{xy}=87.2\text{tonf/m}$	최대 : $F_{xy}=86.8\text{tonf/m}$
기둥의 지상2	35tm	28tm	28tm	24tm
모멘트 지상1	36tm	47tm	47tm	36tm
밀면 전단력	9120tonf	8566tonf	5674tonf	5143tonf

표 2. 온도하중에 대한 각 모델의 해석결과

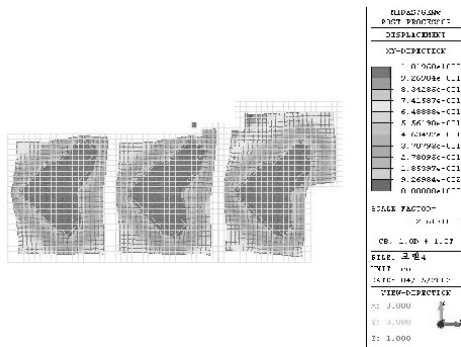


그림 6. 모델 4에 대한 지상 2층 슬래브 변형

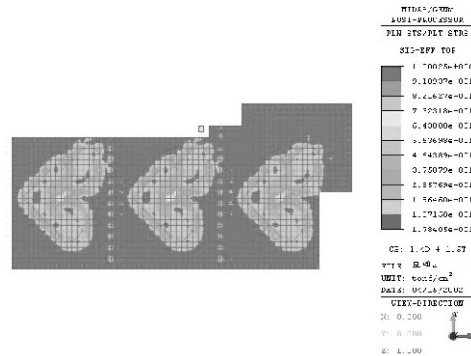


그림 8. 모델 4에 대한 지상 2층 슬래브 내 응력

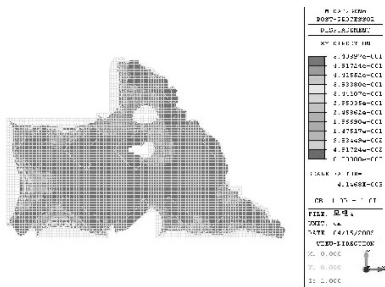


그림 7. 모델 4에 대한 지상 1층 슬래브 변형

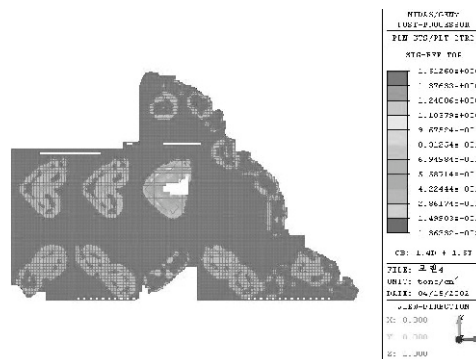


그림 9. 모델 4에 대한 지상 1층 슬래브 내 응력

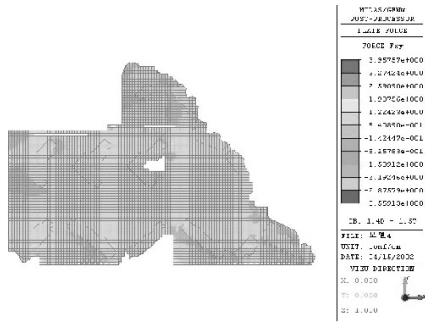


그림 10. 모델 4에 대한 지하옹벽과 슬래브 접합부 전단력

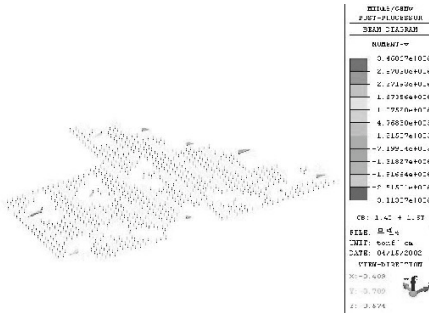


그림 11. 모델 4에 대한 지상 1층 기둥의 휨모멘트

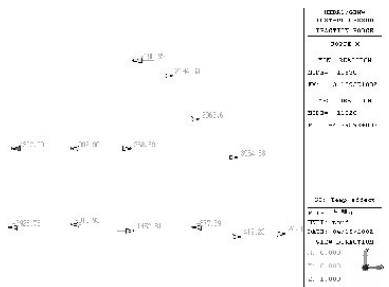


그림 12. 모델 4에 대한 온도하중 효과에 의한 밑면전단력(x-방향)

4. 결론 및 제언

예제건물의 지연조인트 및 팽창조인트의 합리적인 배치를 통한 건조수축 및 온도변화에 의한 구속부재들의 안전성 및 사용성을 검토하기 위하여 상용프로그램에 의한 3차원 구조해석을 통하여 다음과 같은 경향을 얻을 수 있었다.

- (1) 최대변위는 0.55cm로 강성이 작은 면외방향 지하옹벽에서 발생하였다. 온도변화 변형량이 10×10^{-5} 이므로 장변방향의 신장량은 2.15cm가 되어야 하나 주거동 및 기둥의 구속효과에 의하여 작게 나오는 것으로 판단된다.
- (2) 강도면에서 슬래브 면내응력의 경우 7은 1.4×고정하중+1.7

×적재하중의 경우가 온도하중을 포함한 조합하중보다 지배적이 되어 보강이 필요하지 않은 것으로 나타났다.

- (3) 슬래브와 지하옹벽의 전단마찰, 슬래브와 주거동 전단벽의 전단마찰에 대한 보강량을 검토해 본 결과, 1.4×고정하중+1.7×적재하중의 경우가 온도하중을 포함한 조합하중보다 지배적이 되어 보강이 필요하지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 온도하중에 대한 지상 2(테크)층 기둥의 추가적인 휨모멘트와 전단력은 1.4×고정하중+1.7×적재하중의 20%정도가 되었으나, 지상1층은 500%이상이 나와 세밀한 검토가 필요한 것으로 나타났다.
- (5) 온도하중에 대한 각동의 밑면전단력은 5,147tf로 지진하중 4,947tf와 거의 동일하게 나와 구속전단벽의 보강은 크게 필요하지 않은 것으로 나타났다.

건조수축 및 온도하중에 대하여 MARK FINTEL에 의한 감소계수를 사용하였으나, ACI에서는 프리임액션에 의한 감소계수를 1/2 정도의 사용과 구조해석보다는 실제계측을 통한 방법을 권장하고 있는 실정이므로 신중한 접근이 필요할 것으로 판단되나, 부재들의 구속효과 등을 신뢰성 있게 판단하기 위해서는 이론해석보다는 구조해석 방법이 유리할 수도 있다.

단 구조해석을 실시하는 경우에 구속부재들의 강성평가를 위한 자료 입력 및 경계조건, 특히 슬래브 단차 등의 정확한 평가가 필요할 것으로 판단된다. **KSEA**