

매트부 온도 균열 발생 예측 해석



정봉오 과장
대림산업 기술연구소

1. 공사개요

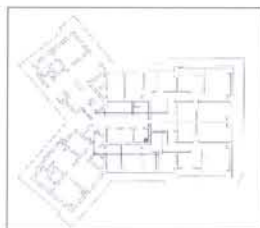
본 공사현장은 부산시 해운대구에 위치한 아파트 신축공사이다. 총 29개동에 51층의 타워형과 25층의 판상형으로 이루어져 있으며 공사개요는 [표 1.1]과 같다.

51층의 타워형의 경우 매트의 형상은 <그림 1.1>과 같으며 세로방향으로 22.3m 가로방향으로 21.5m, 높이는 2.5m인 일자형 블록에 Y자형의 두 블록이 11m×10m×2.5m의 크기로 붙어 있는 형상이다. 이러한 매트 기초 1회에 타설시 수화열에 의한 온도균열이 예상되므로 타설방법 및 양생조건에 대하여 고려할 필요가 있다.

[표 1.1] 공사개요

<그림 1.1> Mat 기초 평면도

공사명	OOO아파트 신축공사
규모	지하 1층, 지상 51층
구조	철근콘크리트조
구조시스템	전단벽+Outrigger+Belt Wall
연면적	199,853평
콘크리트 강도	240~400kgf/cm ²



2. 단열 온도 상승 실험

단열온도 상승실험의 목적은 수화열의 온도해석시 당 현장에 사용되는 배합비에 대하여 시방서에 나타난 (식 1.1)의 단열온도상승식에 사용될 계수를 찾아내는 것이다.

그러나 기존 연구발표에 의하면 콘크리트 타설 후 곧바로 수화반응이 일어나는 것이 아니라 일정한 시간이 경과 후 수화반응이 일

어나는 수화휴지기가 존재한다는 것이 알려져 있다. 따라서 본 해석에서는 정확한 최고온도 도달 시기를 파악하기 위하여 다음의 (식 1.2)와 같은 수정된 단열온도 상승식을 사용한다.

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (\text{식 1.1})$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-r(t-t_0)}) \quad (\text{식 1.2})$$

여기서,

$Q(t)$: 재령 t일에서의 단열온도 상승량(°C)

Q_{∞} : 최종 단열온도 상승량(°C)

r : 온도상승 속도 계수

t : 재령(일)

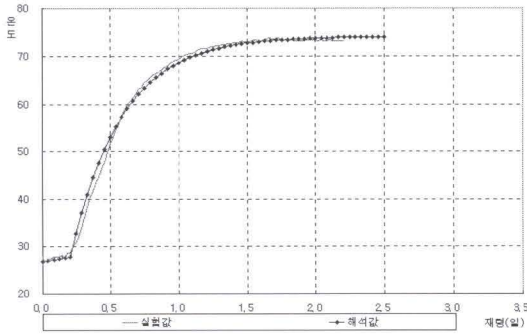
단열온도 상승식은 차후 블록분할 및 양생방법을 결정하는 전산 해석의 중요한 입력자료로 활용되며 계수를 구하는 방법은 다음과 같다.

(1) 실험방법

- 실험할 배합의 수에 맞추어 단열상자(Plain 배합 포함)를 준비한다.
- 단열상자는 내부용적 1m³이상, 단열재로 외부를 감싼다.
- 단열상자 내부에 센서 고정용 철근을 설치한다.
- 온도 측정 센서를 단열상자 내부 중앙부에 설치한다.
- 단열상자내에 콘크리트를 밀실하게 타설하고 뚜껑을 덮는다.
- 압축강도 시험용 몰드를 제작한다.
- 1시간 간격으로 재령 7일 이상 내부온도를 기록한다.(7일 이후에 계속 온도가 상승할 경우 온도가 하강할 때까지 실험을 지속한다.)
- 재령별 압축강도를 측정한다.

(2) 데이터 분석

- 에서 구한 단열온도상승실험결과와 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 <그림 2.1>에 나타난 바와 같이 두 결과값을 비교하여 (식 2)의 , r, t₀를 구한다.



〈그림 .1〉 단열온도상승실험의 비교

3. 온도 및 응력 평가 방법

3.1 응력해석 절차

콘크리트 응결과정에 따라 발생하는 수화열에 의하여 최고온도 상승이전까지는 단면의 온도차에 의한 내부구속응력이 발생하고, 최고온도 이후에는 전체적으로 구조물의 온도하강에 따른 수축에 대하여 기타설 및 지반에 의한 외부구속에 의한 응력이 발생한다. 발생한 인장응력이 발현하는 인장강도를 초과할 경우에는 균열이 발생하게 된다.

매스콘크리트 구조물의 역학적 거동의 파악 및 평가를 위한 온도 균열해석 및 평가의 순서는 다음과 같다.

- ① 매스콘크리트에 대한 열원은 시멘트의 수화열에 있기 때문에, 부재중심부 온도의 시간적 변화는 수화열에 의한 단열온도상승곡선으로 따르게 한다.
- ② 콘크리트의 열특성(열전도율, 밀도, 비열)을 이용하고, 부재경계면의 열적경계조건을 고려하여 각시간에 부재내의 온도분포를 구한다.
- ③ 온도균열발생 가능성이 큰 위치 및 재령에 대해서 부재내의 온도분포 내부구속작용 및 외부구속작용을 고려해서 온도변형을 구하고, 이것에 콘크리트의 유효탄성계수를 곱하여 온도응력을 산정한다.
- ④ 부재내의 온도응력의 최대치로 그 재령의 콘크리트의 인장강도를 나눠 균열지수를 구하고, 온도균열지수가 소정의 값 이상인지를 확인한다.

3.2 응력 간이 계산식

1) 내부 구속응력

콘크리트의 열적특성이나 재령시의 역학적 성질 및 구속도의 취급이 미해결인 점이 있어 해석을 행할 경우에는 이것에 유의해서 입력하는 기초자료를 입수하는 것이 필요하다.

간역법의 대표적인 예로는 내부구속응력에 대해서는 포물선 온도분포를 기초로 하는 방법, 외부구속응력에 대해서는 ACI방법이 이용되는 경우가 많다. 일반적으로 내부구속응력이 문제가 되는 것은 부재두께가 클 경우로 콘크리트 판에 생기는 온도분포는 그림과 같이 포물선이며, 최고온도는 단면중앙부에 발생하는 것으로 가정, 발생하는 응력은 아래식과 같다.

$$\alpha_{s,max} = \frac{2}{3} \times \frac{\alpha_c \times E_e}{1-\nu} \times \Delta T_{g,max} \quad (\text{식 3.1})$$

여기서,

- α_c : 열팽창계수
- E_e : 재령 t에 유효탄성계수
- ν : 콘크리트의 포아송비
- $T_{g,max}$: 재령 t일에서 중앙부 최대온도와 표면온도의 차

상기식은 온도분포를 X축을 대상($H_e = 0$)으로 해서 유도한 것이지만, 온노는 베이스매트에 관한 실험결과 포물선분포에 기초로 최대온도상승은 의 위치에 발생한다고 하여 아래식을 제안하였다.

$$\alpha_{s,max} = \frac{3}{8} \times \frac{\alpha_c \times E_e}{1-\nu} \times \Delta T_{g,max} \quad (\text{식 3.2})$$

2) 외부구속응력

외부구속에 의한 응력의 산정은 아래식에 의해서 구하는 경우가 많다.

$$\sigma_s(t) = \sum_{i=1}^{i=t} K(i) \cdot E_e(i) \cdot \alpha_c \cdot (T_a(i) - T_a(i-1)) \quad (\text{식 3.3})$$

여기서,

- $\sigma_s(t)$: 재령 t일에서의 외부구속 응력(kg/cm²)
- $K(i)$: 재령 i일에서의 유효구속도
- $E_e(i)$: 재령 i일에서의 크리이프를 고려한 유효탄성계수(kg/cm²)
- α_c : 콘크리트의 열팽창계수 = 10-5 (1/°C)
- $T_a(i)$: 재령 i일의 단면평균 온도

유효구속도는 다음과 같이 외부구속계수와 수정계수의 곱으로 나타내진다.

$$K(i) = M(i) \times K_R \quad (\text{식 3.4})$$

여기서,

- $K(i)$: 재령 i 일에서의 유효구속도
- $M(i)$: 재령 i 일에서의 수정계수
- K_R : 외부 구속계수

$$K(i) = \frac{1}{1 + \frac{A_g \cdot E_C(i)}{A_F \cdot E_F(i)}} \quad (\text{식 3.5})$$

여기서,

- $M(i)$: 재령 i 일에서의 수정계수
- A_g : 콘크리트의 단면적(m^2)
- A_F : 구속체의 단면적(m^2)
- $E_C(i)$: 재령 i 일에서의 콘크리트의 탄성계수(kg/cm^2)
- $E_F(i)$: 재령 i 일에서의 구속체의 탄성계수(kg/cm^2)

상기 (식 3.3)은 식은 재령에 따라 발생하는 응력증가분을 계속 더해가서 각 재령에서의 응력을 계산하여 각 재령별 인장강도와 비교할 때 사용할 수 있는 식이다. 그러나, 그 계산방법이 복잡하므로 다음과 같은 약산식을 쓸 수도 있다. (식 3.6)는 최대응력은 단면평균온도가 최대일 때 발생한다고 보고, 그 때의 응력을 구하는 방법으로, (식 3.3)보다 응력값이 높게 계산되어 안전측에 속한다. 이 식은 단면평균온도가 최대온도에서 안정온도(대기온도)까지 떨어질 때 발생하는 응력을 나타낸다.

$$\sigma_{E,max} = K(t) \cdot E_e(t) \cdot (T_{aMAX}(t) - T_{surf}) \quad (\text{식 3.6})$$

여기서,

- $\sigma_{E,max}$: 최대 외부 구속응력(kg/cm^2)
- t : 단면 평균온도가 최대일 때의 재령
- $K(t)$: 재령 t 일에서의 유효구속도
- $E_e(t)$: 재령 t 일에서의 크리이프를 고려한 유효탄성계수(kg/cm^2)
- α_c : 콘크리트의 열팽창계수 = 10^{-5} ($1/^\circ C$)
- $T_{amax}(t)$: 단면 평균온도의 최대치 (재령 t 일) ($^\circ C$)
- T_{surf} : 안정온도(대기온도) ($^\circ C$)

콘크리트가 거푸집에 면해 있을 경우에는 그 면에서 Slip이 일어나므로 외부구속에 의한 영향은 전무하다고 할 수 있다. 이 경우에는 내부구속에 의한 균열 여부만 검토하게 된다.

3.3 온도균열지수

온도균열지수란 재령 t 일에서의 콘크리트 인장강도를 수화열에 의하여 생긴 부재의 온도응력 최대값을 나눈 값으로 균열발생에 대한 안정성의 척도이다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (\text{식 3.7})$$

$f_t(t)$: 재령 t 일에서의 수화열에 의하여 생긴 부재 내부의 온도응력 최대값

$f_{sp}(t)$: 재령 t 일에서의 콘크리트의 인장강도로서, 재령 및 양생 온도를 고려하여 구함.

균열지수에 대한 기준은 아래와 같다.

[표 2.1] 균열지수 기준

균열을 방지할 경우	1.5 이상
균열 발생을 제한할 경우	1.2이상 1.5미만
유해한 균열 발생을 제한할 경우	0.7이상 1.2미만

4. 온도해석결과

당 현장에 대한 단열온도상승실험을 수행하고 나서 그 자료를 기초로 엘리베이터 피트층에 대한 온도해석을 실시하여 이론적인 균열지수를 구하여 수화열에 의한 영향을 검토하였다.

4.1 부재 사이즈 및 경계조건

10월 8일날 타설할 부재의 크기는 $13.5m \times 8.75m \times 2.5m$ 이다. 부재의 경계조건으로는 부재하부에는 연약지반위의 버림콘크리트에 의한 온도 영향, 측면에는 유로폼의 열영향을 고려하였으며 상부의 양생은 아래의 4.3의 경우와 같이 4가지 경우로 가정하여 모델링하였다.

4.2 기온조건

대기조건은 기상청의 부산지역 20년 동안의 최고, 최저 기온 및 평균 기온값을 이용하였다. 그리고, 콘크리트의 초기온도는 $26.8^\circ C$ 로 가정하였다.

4.3 양생조건

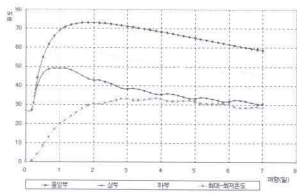
콘크리트 타설후 상부의 양생조건은 아래와 같은 4가지 조건에 대하여 해석을 실시하여 당 현장에 맞는 양생조건을 검토하였다.



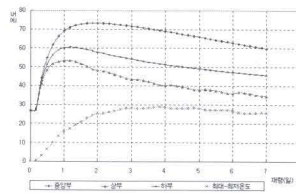
- Case 1 : 노출+살수
- Case 2 : 염화비닐
- Case 3 : 염화비닐+양생포
- Case 4 : 염화비닐+발포폴리스티렌+양생포

4.4 해석결과

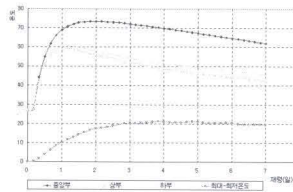
각각의 양생조건에 대한 결과를 <그림 4.1>에서 <그림 4.4>에 나타내었다. 온도 해석결과 Case 4의 경우가 최대온도와 최저온도의 차가 20℃ 이내로 유지되고 있음을 알수 있다. 위의 온도해석 결과를 이용하여 내부구속효과와 외부구속효과를 구한 결과를 [표 4.1]과 [표 4.2]에 나타내었다. 해석결과 외부구속에 의한 영향보다 내부구속에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 Case 1과 Case 2의 경우에는 유해한 균열만을 억제하는 것으로 나타났다. Case 3과 4의 경우에는 균열발생을 제한하는 수준으로 나타났다. 따라서 양생방법은 Case 3 또는 Case 4 중 한가지 방법을 선택하여 양생을 실시하는 것이 바람직하다고 판단된다.



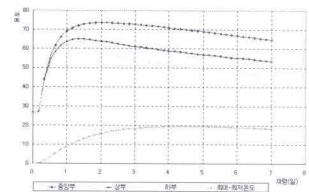
<그림 4.1> Case 1 수화열 해석



<그림 4.2> Case 2 수화열 해석



<그림 4.3> Case 3 수화열 해석



<그림 4.4> Case 4 수화열 해석

5. 결론

당 현장의 단열온도 상승실험을 통하여 시방서에 있는 단열온도 상승식에 필요한 계수를 결정하고 난 다음 Mat 기초 타설 전에 엘리베이터 피트층의 타설에 대하여 양생방법에 따른 온도 해석을 수행하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 양생조건에 대한 온도해석 결과 Case 3과 Case 4가 온도균열을 억제할 수 있는 양생방법으로 결정되었다.
- (2) 콘크리트의 내·외부 온도차가 20℃이상이면 수화열에 의한 구조물의 온도균열이 발생할 확률이 높다고 알려져 있는데 Case 4의 경우가 최대온도와 최저온도의 차가 20℃ 이내로 유지되고 있음을 알수 있다
- (3) 당 현장의 Mat 기초의 양생방법은 Case 3의 염화비닐+양생포 혹은 Case 4의 염화비닐+발포폴리스티렌+양생포의 양생방법을 선택하는 것이 바람직 하다.

[표 4.1] 내부구속효과

TYPE	재령(일)	최고온도(℃)	최저온도(℃)	온도차(℃)	압축강도(kg/cm ²)	인장강도(kg/cm ²)	탄성계수(kg/cm ²)	인장응력(kg/cm ²)	균열지수
CASE 4	4.50	69.80	50.30	19.50	184.00	18.99	162267	14.24	1.33
CASE 3	3.83	7.30	49.00	21.30	175.00	18.52	158249	15.17	1.22
CASE 2	3.83	69.4	10.5	28.90	175	18.52	158249	20.59	0.90
CASE 1	3.83	68.8	35.5	33.30	175	18.52	158249	23.72	0.78

[표 4.3] 외부구속효과

TYPE	재령(일)	최고온도(℃)	평균온도(℃)	온도상승량(℃)	안정온도(℃)	압축강도(kg/cm ²)	인장강도(kg/cm ²)	유효탄성계수(kg/cm ²)	인장응력(kg/cm ²)	균열지수
CASE 4	1.50	72.9	67.7	40.9	18.7	109	14.62	114321.36	9.35	1.56
CASE 3	1.50	72.8	66.0	39.2	18.7	109	14.62	114321.36	7.48	1.95
CASE 2	1.33	72.1	64.3	37.5	18.7	98	13.86	108399.47	7.08	1.96
CASE 1	1.33	72.0	63.2	36.4	18.7	98	13.86	108399.47	6.71	2.07