

# 지하철 구조물의 온도균열제어를 위한 수화열해석

## Analysis for the Control of Thermal Cracks in a Subway Concrete Structure

김상철\*                      김연태\*\*  
Kim, SangChel   Kim, YeonTae

---

### ABSTRACT

Cracks in the underground structures are mainly observed due to internal ununiformity of thermal stresses or restraint of structural movement in associate with rapid temperature gradient. Especially, thermal cracks are known to occur easily in a massive structure, but possibility of these depend on the amount of cement applied and ratio of span to height of the structure even though the thickness is less than specification's.

Thus, this study aims at how to control thermal cracks in a massive subway structure and figures out an optimized construction method and procedure. As results of parametric study for length, height and outer temperature for concrete placement, it is found that hydration heats were not affected by both length and height of concrete placement but thermal stresses were greatly dependent. Most effective ways of controlling thermal cracks were to fit a proper ratio of length to height of concrete placement and to decrease temperature of concrete placement as much as possible.

---

### 1. 서 론

지하 박스구조물에서 통상 발생하는 균열을 살펴보면, 벽체 콘크리트를 타설한 후 거푸집을 제거하였을 때 발견되는 시공초기의 횡방향 균열로써 벽체를 따라 상부 구조물로 전달되는 형태의 균열로 나타난다. 이러한 균열은 강성이 큰 바닥슬래브 위에 시간을 두고 새로 콘크리트를 타설 시공하는 벽체에 있어서 일반적으로 나중에 타설된 콘크리트의 수축을 강성이 큰 바닥슬래브가 억제하기 때문에 발생한다. 콘크리트가 수축하는 주요 원인은 콘크리트의 건조수축과 수화열 하강을 들 수 있으나 지하철 구조물의 경우는 매스콘크리트 구조물로써 수화열의 하강에 따른 영향이 보다 지배적으로 작용하게 된다. 특히, 박스 구조물에는 박스 길이 방향으로 발생하는 종방향 균열이 있는데, 이 균열은 수화열에 의해 콘크리트 내부에 발생한 온도와 외기 온도와의 온도차이로 인한 온도응력의 비균일성에 의해 발생하거나 혹은 콘크리트 구조체의 신축을 방해받아 인장응력

---

\* 한서대학교 토목공학과 부교수, 정회원

\*\* 서울산업대학교 구조공학과 교수, 정회원

이 발생하여 유발되기도 하며, 또는 높은 온도나 낮은 온도에서 콘크리트를 타설한 후 복토하지 않고 장기간 외부에 노출된 경우에 발생된다.

콘크리트표준시방서에 따르면 하단이 구속된 벽체에서는 두께가 50cm 이상인 경우에 수화열을 고려하여야 하는 매스콘크리트로 규정하고 있으나, 실제로는 두께가 이보다 작은 경우에도 단위 시멘트량이 많고, 지간/높이의 비가 클 경우에 온도균열이 발생하는 경우가 있다. 그러므로 벽의 두께가 상대적으로 두꺼운 지하철 구조물의 경우는 온도균열에 대한 검토가 필수적이라 할 수 있다.

이 점을 고려하여 본 연구에서는 범용 수화열 해석프로그램을 사용하여 지하철 구조물의 온도 응력 및 온도균열 해석을 실시함으로써 최적의 시공방법을 도출하고, 온도균열을 최소화 또는 제어할 수 있는 방법을 제시하고자 하는 것을 주목적으로 하였다.

## 2. 재료의 제원 및 조건

### 2.1 배합조건

구조물의 설계기준강도는 270kgf/cm<sup>2</sup>로서 다음 두 가지 종류의 콘크리트에 대해 해석을 수행하였으며 사용된 콘크리트 배합비는 표 1과 같다.

표 1. 콘크리트의 배합특성

종별	G <sub>max</sub> (mm)	W/B (%)	S/a (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위 재료량 (kg/m <sup>3</sup> )					
						시멘트	물	잔골재	플라이 애쉬	굵은 골재	고성능 AE감수제
1종	25	50.3	46.5	6.1	16.7	368	185	808	-	944	-
1종+F/A	25	45	44.5	4.8	14.7	291	164	789	73	999	2.47

### 2.2 타설시의 대기온도

일반적으로 현장에서는 공기 때문에 극한적인 외기상태에서도 시공을 수행하게 되므로 이에 대비하여야 한다. 그러나 지하철 공사의 경우는 노상에서 작업을 수행하는 경우와는 달리 지상에서 굴착하여 작업하기 때문에 일반적으로 우려하고 있는 서중이나 한중 콘크리트와는 다소 차이가 있다. 따라서 본 해석에서는 보통의 외기상태인 20℃와 서중시의 경우로는 30℃ 및 한중시는 10℃로 하여 해석을 수행하였다.

표 2. 해석 변수

영향 검토 항목	변 수	
타설고	3.0m	
	4.5m	
	6.0m	
종방향 타설길이	20m	
	30m	
배합비	1종 OPC만 사용	
	2성분계 혼합형시멘트(OPC+F/A20%)	
타설온도	상시	20℃
	서중	30℃
	한중	10℃

### 2.3 해석변수

지하철 본선부의 최적 타설 크기를 설정하기 위해서는 온도균열발생 확률이 가장 높은 벽체에 대해 변수별 수화열 해석을 수행할 필요가 있다. 따라서 본 해석에서는 먼저 벽체 두께 90cm에 대해 타설고 및 타설길이, 타설온도, 시멘트 종류 등을 변수로 하여 수화열 해석을 수행하였다. 구조물이 좌우 대칭으로 되어 있으므로 경제적 해석을 위해 그림 1과 같이 구조물의 1/2 (전체에 대해서는 1/4)만을 고려하여 수화열 해석을 수행하였다.

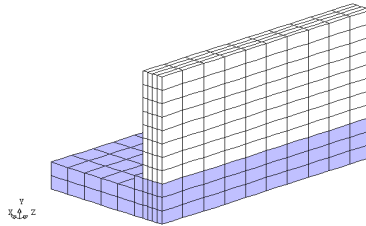


그림 1. 해석단면

### 3. 해석결과 및 분석

#### 3.1 타설고에 따른 온도 및 온도응력

본 구조물은 앞서 설명한 바와 같이 슬래브에 의해 벽체가 구속을 받는 전형적으로 외부구속에 의해 지배받는 것으로 해석되었다. 그림 2는 온도해석 결과를 나타낸 것으로 타설고가 3m인 경우는 40.7°C인 반면 6m를 타설하여도 최고온도는 40.8°C로 단지 0.1°C밖에 차이가 나지 않으며, 최고온도에 도달하는 시기도 거의 대부분이 1.5~1.7일로 타설 후 적어도 2일 이내에는 가장 높은 온도에 도달함을 알 수 있다. 이와 같이 타설고에 의한 영향이 적은 이유는 슬래브와 달리 벽체는 내부 중심부에서 외기까지의 거리가 짧기 때문에 일반적으로 타설고의 영향이 그리 크지 않게 나타난다. 그러나 온도응력의 경우는 온도해석과는 달리 벽체의 타설 높이에 따라 상당히 영향을 받고 있음을 그림 3을 통해 알 수 있다. 벽체 구조물의 경우는 타설 높이를 낮게 하는 것이 구속도를 증가시키기 때문에 오히려 온도균열 제어에 불리하고 특히, 종방향 타설길이를 증가할수록 더 불리한 것으로 나타났다. 따라서 벽체의 길이/높이의 비(L/H의 비)에 따른 외부구속의 영향이 크지 않도록 하기 위해서는 주어진 종방향 타설길이에 대해 가능한 한 타설고를 높여주는 것이 바람직하다는 것을 본 해석을 통해 알 수 있다.

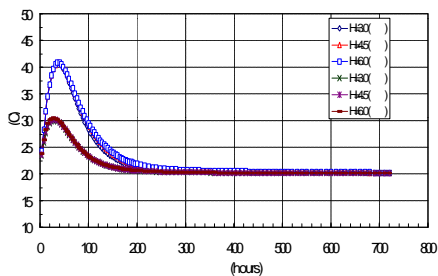


그림 2. 타설고별 온도해석결과

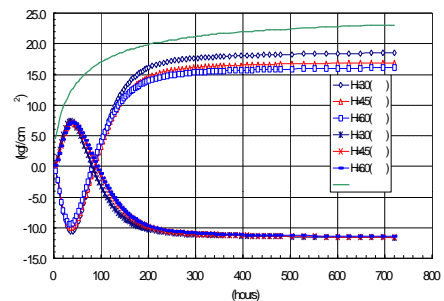


그림 3. 타설고별 온도응력 해석결과

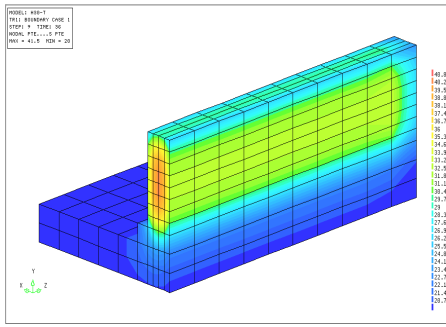


그림 4. 타설고별 온도분포결과  
(H=3.0m, 2성분계)

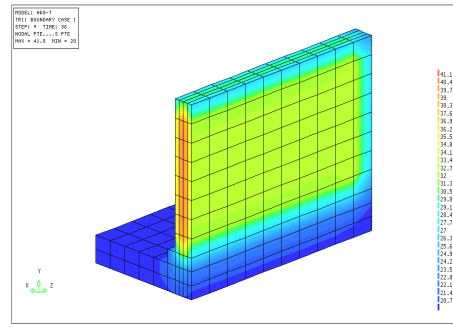


그림 5. 타설고별 온도분포결과  
(H=6.0m, 2성분계)

### 3.2 타설길이에 따른 온도 및 온도응력

지하 구조물을 종방향으로 20m, 30m 길이로 시공하였을 때 동일한 조건에서 대상 단면에 발생하는 온도는 앞의 표 3에 나타난 바와 같이 타설길이에 관계없이 동일하게 나타났으며 앞 절에서도 설명한 바와 같이 타설고의 영향도 거의 없는 것으로 나타났다.

이와 반면에 응력의 경우는 타설길이를 길게 할수록 슬래브의 구속효과가 커지기 때문에 인장응력의 값이 크게 나타나는 것이 보통이다. 그 일례로써 2성분계 혼합시멘트를 사용하고 타설온도 20℃, 타설고 4.5m를 기준 조건으로 하였을 때 종방향 타설길이가 20m에서는 균열지수가 1.31이었으나 30m로 시공할 경우에는 1.15로 균열발생 확률이 증가되었다. 따라서 타설길이의 증가에 따른 외부구속 효과를 저감시키기 위해서는 길이/높이(L/H)비를 줄이는, 다시 말해서 타설고를 증가시켜야 균열발생의 억제효과가 있게 된다.

본 해석결과에 따르면, 종방향 타설길이가 20m인 경우는 타설고 3.0, 4.5, 6.0m 모두에 대해 온도균열지수가 1.2이상으로 수화열로 인한 균열발생 우려가 크지 않은 것으로 나타났지만, 종방향 타설길이를 30m로 하였을 때에는 타설고 6.0m를 제외하고는 1.2이하로 나타나고 있다.

표 3. 타설고에 따른 온도 및 온도응력 해석 결과

타설길이	타설고 (m)	최대온도 (℃)	발생시기 (일)	최대인장응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	균열지수	발생시기 (일)	비고
20m	3.0	40.7	1.5	18.5	1.20	11.3	
	4.5	40.8	1.7	16.9	1.31	12.0	
	6.0	40.8	1.7	16.1	1.38	11.7	
30m	3.0	40.7	1.5	20.1	1.10	11.0	
	4.5	40.8	1.7	19.4	1.15	11.7	
	6.0	40.8	1.7	18.0	1.23	11.3	

주 : 본 해석 결과는 2성분계 혼합형 시멘트를 사용하고 타설온도는 20℃를 기준으로 함.

### 3.3 타설온도에 따른 온도 및 온도응력

타설온도가 본 구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해 상시 타설온도인 20℃를 기준으로 서중시의 온도인 30℃와 한중시인 10℃에 대해 해석을 수행하였다. 실질적으로 지하철의 경우 굴착깊이가 깊기 때문에 한중콘크리트로 정의하고 있는 4℃이하의 경우는 거의 드물고 또한, 혹서의 경우도 발생하지 않을 것으로 판단하여 본 수치를 설정하였다.

해석결과, 최대 온도 발생량은 타설온도가 증가함에 따라 거의 타설온도 증가분의 2배 내외로 온도가 상승하게 되어 타설온도를 낮추는 것이 온도균열 균열제어에 있어 매우 중요한 요소로 작

용하고 있음을 알 수 있고, 최대 온도 도달시기도 기대한 바와 같이 타설온도가 높을수록 시멘트의 수화작용이 활발하게 되어 그 시기가 일찍 나타나고 있어 매스콘크리트의 온도균열 제어 측면에서 불리하게 나타나고 있다. 균열의 발생 여부를 예측할 수 있는 균열지수의 경우 타설온도를 10℃로 유지할 경우에는 2.05로 균열이 발생될 확률이 전혀 없으나 (시방서 기준), 타설온도가 30℃일 경우는 균열지수가 0.94로 외부구속에 의해 지배되는 관통균열발생 확률이 매우 높은 것으로 해석되었다. 이는 앞서 타설고나 타설길이와의 연관성으로 판단하여 볼 때, 벽체의 타설길이의 제어에 비해 타설온도가 보다 온도균열제어에 있어 보다 큰 요소로 작용하고 있음을 나타내며, 공기상 타설량(즉, 타설길이나 타설고)을 증가하고자 할 때에는 타설온도를 낮추어야 한다는 것을 본 해석 결과를 통해 알 수 있다. 따라서 타설시의 온도는 가능한 한 20℃이내의 온도를 유지하여 타설하는 것이 바람직하며, 특히 서중시에는 골재가 직사광선에 직접 노출되는 것을 피하여야 하고 적절히 골재 표면에 살수하여 혹서기에 골재의 온도상승을 제어하는 것이 중요하다. 골재보다는 배합수의 온도를 낮추는 것이 콘크리트 배합 온도 저하에 보다 효과적이므로 경우에 따라서는 얼음(ice flake)을 투입하여 저온의 배합수를 사용하면 타설온도를 낮추는데 도움이 된다.

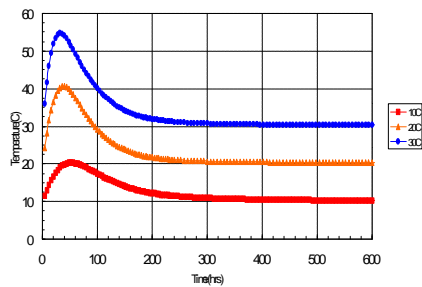


그림 6. 타설온도에 따른 온도해석결과  
(L=30m, h=4.5m 2성분계)

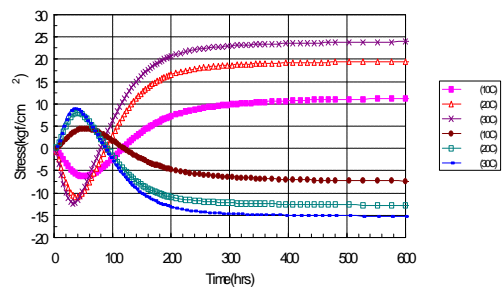


그림 7. 타설온도에 따른 온도응력 해석결과  
(L=30m, h=4.5m, 2성분계)

#### 4. 결 론

- (1) 타설고와 타설길이가 온도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 해석되었다.
- (2) 온도응력의 경우는 타설높이와 타설길이에 의한 영향이 매우 높아 벽체구조물에 있어서 타설 높이를 낮게 하는 것이 오히려 온도균열에 취약하며 종방향 타설길이를 증가할수록 불리하게 나타났다.
- (3) 따라서 종방향의 길이에 대한 타설높이가 서로 각각의 구속도에 대해 서로 평형을 이루도록 수화열 해석을 통해 적절한 비율을 결정하는 것이 온도균열제어에 대해 효과적이다.
- (4) 타설온도의 영향이 타설길이나 타설고에 비해 더 크게 작용하므로 가능한 한 타설온도를 낮추는 것이 온도균열제어에 있어 보다 효과적이다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부 (2003), “매스콘크리트,” 콘크리트표준시방서.
2. 정철현 등 (1994), “매스콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요변수에 관한 연구”, 콘크리트

학회지, 제 6권 5호, pp. 203-212

3. 김진근, 양은익 (1997), "매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향요인," 콘크리트학회지, 제 9권3호, pp. 15-23.
4. ACI Committee 207 (1990), "Effects of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete," ACI Manual of Concrete Practice, 207.2R.
5. ACI Committee 207 (1987), "Mass Concrete," ACI Manual of Concrete Practice, 207.1R.
6. Carlson, R.W. et al. (1979), "Cause and Control of Cracking in Unreinforced Mass Concrete," ACI Journal, V. 76, No. 7, pp. 821-837.