

## 지하철 구조물의 온도균열제어를 위한 시공조건별 해석적 영향 분석

# Parametric Analysis on Construction Conditions to Control Thermal Cracks in Subway Concrete Structure

김연태<sup>1</sup> · 김상철<sup>2</sup>

Yun-Tae Kim · Sang-Chel Kim

### Abstract

The wall in a subway structure is easily subject to crack occurrence since its expansion and shrinkage associated with hydration heat reaction is constrained by the slab. The greater problem is that the crack in the wall may be developed to pass through thickness and eventually deteriorate the structure due to rusting of reinforced steel. Thus, this study aims at controlling thermal cracks as much as possible and determining an optimized size of concrete placement through hydration heat analysis. For this study, effects of placement height, length, temperature and types of cement on the thermal cracks were evaluated by temperature rise, thermal stress and crack index. As results of parametric study, it was found that placement height and length do not have an effect on the temperature rise but have significant one on thermal stress which relates to direct possibility of thermal crack occurrence. This means that proper selection of size balancing internal constraint with external one is much more important than reducing the placement height and length simply. In order to prevent from thermal cracks most effectively, in addition, it was noted to reduce placement temperature and to use the cement blended with mineral admixture.

**Keywords** : Thermal Cracks(온도균열), Thermal Crack Index(온도균열지수), Placement Height(타설고), Placement Length(타설길이), Placement Temperature(타설온도), Types of Cement(시멘트 종류)

## 1. 서론

콘크리트 지하박스구조물에서 통상 발생하는 균열은 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 원인으로는 콘크리트의 건조수축과 수화열 하강을 들 수 있지만, 지하철 구조물의 경우는 매스콘크리트 구조물로써 수화열의 하강에 따른 영향이 보다 지배적으로 작용하게 된다.

이외에도 박스구조물에 발생하는 횡방향 균열로는 콘크리트 침하에 의한 슬래브 면에서의 균열과 지반침하에 의한 균열을 들 수 있다. 콘크리트 침하에 의한 균열은 슬래브에서 주로 철근을 따라 횡방향으로 발생하거나, 타설높이가 다른 경계면에서 발생하게 되며 주로 타설 후 1~3시간에 발생된다. 또 콘크리트 박스구조물은 횡방향에 비해 종방향 길이가 길기 때문에 연약지반이나 서로간의 강성이 다른 지반 위에 놓일 가능성이 크며, 이러한 경우 시공시 지반에 대한 충분한 고려가 없이 시공하면 부등침하에 의한 횡방향 균열이 발생할 수 있다.

횡방향 균열이외에도 박스 길이 방향으로 발생하는 종방향 균열이 있다. 이 균열은 수화열에 의해 콘크리트 내부에 발생한 온도와 외기 온도와의 온도차이로 인한 온도응력의 비균일성에 의해 발생하거나 혹은 콘크리트 구조체의 신축을 방해받아 인장응력이 발생하여 유발되기도 하며, 또는 높은 온도나 낮은 온도에서 콘크리트를 타설한 후 복토하지 않고 장기간 외부에 노출된 경우에 발생된다.

이외에도 박스구조물에 발생하는 횡방향 균열로는 콘크리트 침하에 의한 슬래브 면에서의 균열과 지반침하에 의한 균열을 들 수 있다. 콘크리트 침하에 의한 균열은 슬래브에서 주로 철근을 따라 횡방향으로 발생하거나, 타설높이가 다른 경계면에서 발생하게 되며 주로 타설 후 1~3시간에 발생된다. 또 콘크리트 박스구조물은 횡방향에 비해 종방향 길이가 길기 때문에 연약지반이나 서로간의 강성이 다른 지반 위에 놓일 가능성이 크며, 이러한 경우 시공시 지반에 대한 충분한 고려가 없이 시공하면 부등침하에 의한 횡방향 균열이 발생할 수 있다.

1 정희원, 서울산업대학교 구조공학과 교수  
2 정희원, 한서대학교 토목공학과 교수

콘크리트표준시방서에 따르면[1], 하단이 구속된 벽체에 서는 두께가 50cm 이상인 경우에 수화열을 고려하여야 하는 매스콘크리트로 규정하고 있지만, 실제로는 두께가 이보다 작은 경우에도 단위 시멘트량이 많고, 지간/높이의 비가 클 경우에 온도균열이 발생될 수 있다. 그러므로 벽의 두께가 상대적으로 두꺼운 지하철 구조물의 경우는 온도균열에 대한 검토가 필수적이라 할 수 있다.

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

## 2. 대상구조물의 제원 및 해석조건

### 2.1 대상구조물

대상구조물은 설계기준강도가 27MPa(270kgf/cm<sup>2</sup>)인 박스형 콘크리트 구조물로서 형상은 기존 구조물의 조건에 따라 상부 슬래브 두께가 0.9m이고 하부는 1.0m로 설정하였다. 구조물이 좌우 대칭으로 되어 있으므로 경제적 해석을 위해 Fig. 1과 같이 구조물의 1/2(전체에 대해서는 1/4)만을 고려하여 수화열 해석을 수행하였다.

### 2.2 해석변수

본 해석에서는 최적의 타설크기 결정을 위해 먼저 벽체

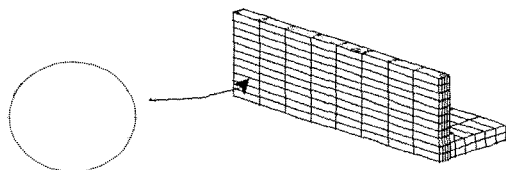


Fig. 1. Configuration of section for analysis

Table 1. Analytical Parameters

영향 검토 항목		변 수
타설고		3.0m
		4.5m
		6.0m
중방향 타설길이		20m
		30m
배합비		OPC만 사용
		FA20(OPC+F/A20%)
타설온도	상시	20℃
	서중	30℃
	한중	10℃

두께 0.9m에 대해 타설고 및 타설길이, 타설온도, 시멘트 종류를 해석변수로 설정하고 각 인자가 온도 및 온도응력에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

벽체부의 적절한 타설크기 산정을 위해서는 Table 1과 같이 타설고를 3.0m 및 4.5m로 한 경우와 현치부를 제외한 벽체 전부를 일괄 타설한 6.0m의 경우 등 3가지 경우로 설정하였다. 중방향 타설길이에 대해서는 기존에 통상적으로 사용하여 온 30m를 그대로 타설할 경우와 기존 구조물에 있어서 균열 발생의 주원인이 타설길이가 커서 발생된 점을 감안하여 중방향으로 20m를 타설한 경우 두 가지에 대해 검토하였다. 시멘트 종류가 온도응력에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트만을 적용한 경우와 2성분계 혼합형 시멘트(1종 시멘트+플라이애쉬 20%, 이하 FA20으로 표기)를 사용한 경우에 대해 비교하였다.

타설온도와 관련하여서는 지상에서 작업하는 일반적 경우와는 달리 지하철 공사는 지하로 굴착하여 작업하기 때문에 일반적으로 우려하고 있는 서중이나 한중콘크리트와는 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 해석에서는 해석변수조건으로 보통의 외기상태인 20℃와 서중시 30℃, 한중시의 10℃를 적용하였다.

## 3. 온도 및 온도응력 해석

### 3.1 단열온도특성

매스콘크리트 구조물에 있어서 구조물 내부에 존재하고 있는 콘크리트 입자는 단열상태에서 내·외부의 열량이동이 차단되기 때문에 단열온도식의 변수들 즉, 최대온도상승치(Q<sub>∞</sub>)와 반응속도(a)가 수화열해석의 주요 입력데이터로 사용되게 된다.

$$T = Q_{\infty}(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

여기서, t는 콘크리트의 재령 일수를 나타낸다. 본 연구에서는 네덜란드의 Delft 공대에서 수화열 시뮬레이션 목적으로 개발한 Hymo-Struc(DIANA Module)을 사용하여 Table 2의 시멘트 종류에 따른 성분비와 배합비의 상태가 고려된 단열온도값들을 도출하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

### 3.2 온도균열발생 가능성 평가

수화열 해석은 3차원 범용프로그램인 DIANA를 사용하였다. 콘크리트의 발열특성, 외기온도 등의 시간의존 물성치와 각 재료별 열전도율 등의 데이터 입력으로 온도해석이 수행되고, 외부의 구속조건, 콘크리트의 인장강도 및 탄성계

Table 2. Mix proportions of concrete mixture

종별	Gmax (mm)	W/B (%)	S/a (%)	공기량 (%)	슬럼프 (cm)	단위 재료량(kg/m <sup>3</sup> )					
						시멘트	물	잔골재	플라이 애쉬	굵은 골재	고성능 AE감수제
OPC	25	50.3	46.5	6.1	16.7	368	185	808	-	944	-
FA20	25	45	44.5	4.8	14.7	291	164	789	73	999	2.47

Table 3. Adiabatic parameters of Q<sub>∞</sub> and α

시멘트 종류	타설온도(°C)	T ≈ Q <sub>∞</sub> (1 - e <sup>-at</sup> )			
		Q <sub>∞</sub> =a · C + b		a= g · C + h	
		a	b	g	h
OPC	10	0.12	11.0	1.5	0.135
	20	0.11	13.0	3.8	-0.036
	30	0.11	12.0	4.0	0.337
FA20	10	0.15	-3.0	0.7	0.141
	20	0.12	8.0	2.8	-0.143
	30	0.11	11.0	3.0	0.059

Table 4. Main input data for hydration heat analysis

구분	입력 데이터
비열(Kcal/kg · °C)	0.25
열전도율(Kcal/m · hr · °C)	2.3
외기대류계수 (Kcal/m <sup>2</sup> · hr · °C)	9(상부) 5(측면)
콘크리트 초기온도(°C)	30(서중시) 20(상시) 10(한중시)
28일 압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	270
28일 탄성계수(kgf/cm <sup>2</sup> )	2.5 × 10 <sup>5</sup>
열팽창계수(°C)	1.0 × 10 <sup>-5</sup>
포아송비	0.2

수의 경시변화를 통해 각 요소에서의 온도응력이 산출되게 된다. Table 4는 해석 프로그램의 입력으로 사용된 열적 특성치를 나타낸 것이다.

수화열 해석을 통해 구조물의 온도균열 발생 위험도는 콘크리트표준시방서에서 제시하고 있는 온도균열지수를 통해 평가하였다.

$$\text{온도균열지수}(I_c) = \frac{f(t)}{\alpha(t)} \quad (2)$$

여기서, α(t)는 재령 t일에서 수화열에 의해 발생한 부재중의 온도응력의 최대치이며, f(t)는 재령 t일에서의 콘크리트 인장강도로서 양생온도를 고려하여 구한 값을 나타낸다.

온도균열지수는 균열에 대한 안전성을 나타내는 지수로서 그 값이 적을수록 균열 발생확률이 높고, 균열도 많아지

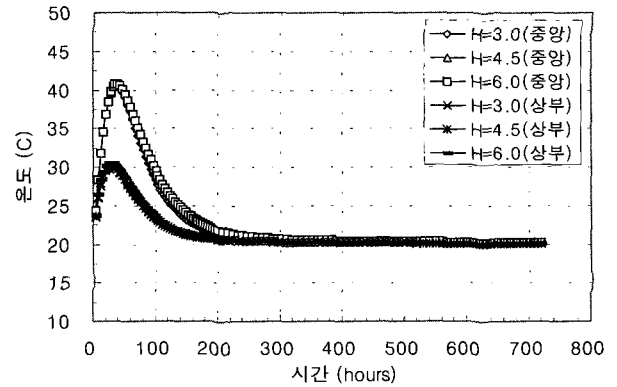


Fig. 2. Temperature rise associated with placement height(L=20m)

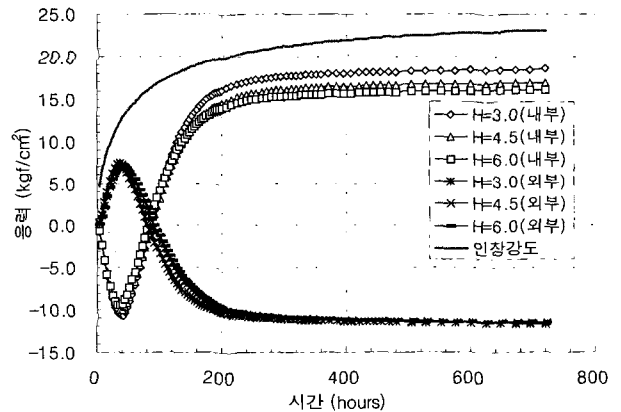


Fig. 3. Thermal stresses associated with placement height(L=20m)

며, 균열의 크기도 커지는 경향이 있다. 현재 국내 시방서에 규정되어 있는 온도균열지수에서는 온도균열지수가 1.0인 경우 균열발생확률을 40%로 보고 있으며, 균열이 거의 발생되지 않을 것으로 예상되는 온도균열지수인 1.5의 경우는 균열발생확률이 약 8%인 것으로 보고 있다. 일반적으로 온도균열지수의 목표치를 높게 하는 것은 균열의 발생위험성을 감소시켜 주지만, 그 대신 방지를 위한 공사비도 증대하여 경제성에 커다란 영향을 미친다. 따라서 목표치는 구조물에 요구되는 수밀성이나 기밀성 등의 기능, 균열의 내구성이나 내력에 미치는 영향, 구조물이 놓여지는 환경 등을 감안하여 정할 필요가 있다.

## 4. 수화열해석 결과 및 고찰

### 4.1 타설고의 영향

Table 5는 1종 보통 포틀랜드 시멘트에 플라이애쉬 20%를 혼합한 2성분계 혼합형 시멘트(FA20)를 적용하고 타설시의 온도는 20℃로 하였을 때 각 타설고별로 해석한 결과를 요약 정리한 것이다. 이 표의 온도해석 결과로부터 타설고가 증가하여도 온도의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.

Table 5. Results of hydration heat analysis associated with placement length and height

타설 길이	타설고 (m)	최대온도 (℃)	발생시기(일)	최대인장응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ic	발생 시기(일)
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

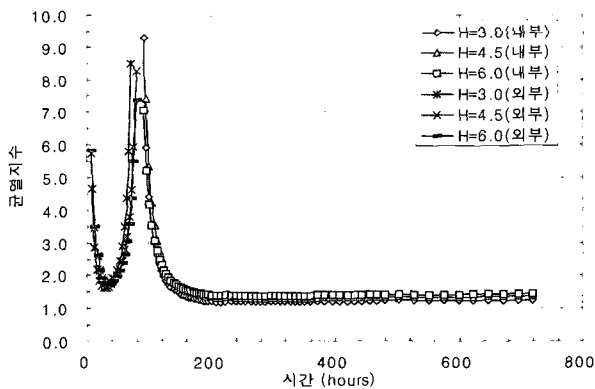


Fig. 4. Crack indices in external and internal points associated with placement height(L=20m)

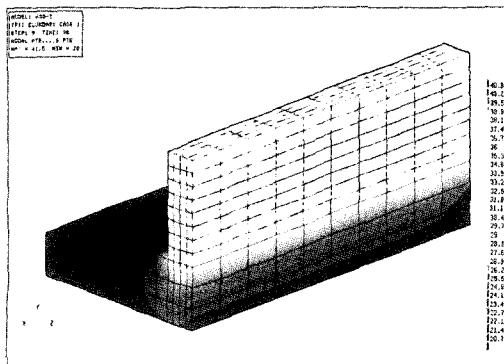


Fig. 5. Temperature distribution(FA20, L=30m, H=3.0m)

그 예로서 타설고가 3m인 경우에 최고온도 40.7℃와 6m 타설시의 최고온도 40.8℃와는 단지 0.1℃밖에 차이가 나지 않고 있으며, 최고온도에 도달하는 시기도 거의 대부분이 1.5~1.7일로 타설 후 적어도 2일 이내에 가장 높은 온도에 도달함을 알 수 있다. 이와 같이 타설고에 의한 영향이 적은 이유를 살펴보면, 슬래브와 달리 벽체는 내부 중심부에서 외기에 접하는 거리가 짧기 때문에 수화열이 타설고 방향보다는 짧은 거리의 벽체 두께방향으로 전달되어 소산되기 때문에 타설고의 영향을 거의 받지 않은 것으로 분석된다. 또한, 벽체의 구속요소로 작용하는 슬래브의 타설 길이를 증가시켜도 이는 단순히 응력의 외부구속 요인으로만 작용하기 때문에 같은 원리에 의해 온도의 변화에는 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

그러나 온도응력의 경우는 온도해석과는 달리 벽체의 타설 높이에 따라 상당히 영향을 받고 있음을 Table 5를 통해 알 수 있다. 벽체 구조물의 경우는 기대한 바와 달리 타설 높이를 낮게 하는 것이 외부구속도를 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.

### 4.2 타설길이에 따른 영향

지하 구조물을 종방향으로 20m, 30m 길이로 시공하였을 때 대상 단면에 발생하는 온도는 앞의 Table 5에 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 슬래

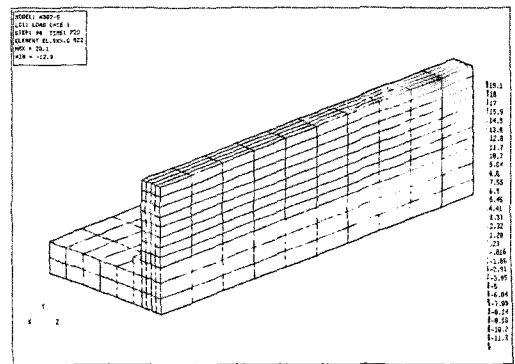


Fig. 6. Thermal stress distribution(FA20, L=30m, H=3.0m)

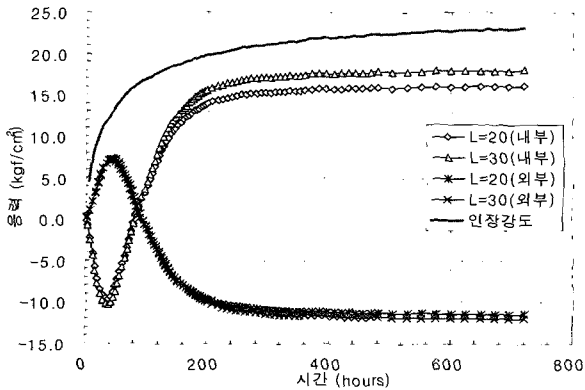


Fig. 7. Thermal stresses associated with placement length (H=6.0m)

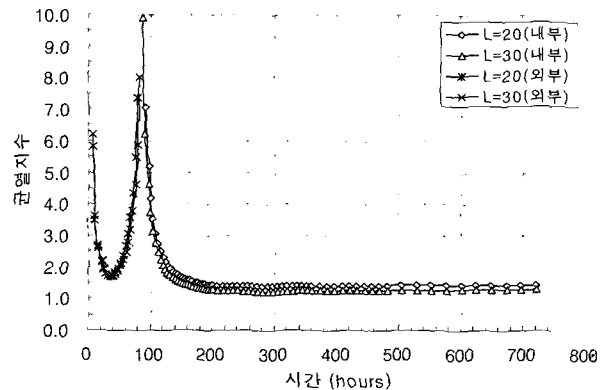


Fig. 8. Crack indices in external and internal points associated with placement length(H=6.0m)

브의 구속효과가 커지기 때문에 인장응력의 값이 크게 나타났다. 그 일례로써 2성분계 혼합시멘트를 사용하고 타설온도 20℃, 타설고 4.5m를 기준 조건으로 하였을 때 종방향 타설길이가 20m에서는 온도균열지수가 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.

앞 절에 검토한 타설고의 영향과 종방향 타설길이의 영향을 종합하여 볼 때 온도균열을 제어하기 위해서 일반적으로 알려져 있는 타설고나 타설길이를 단순히 낮추는 것보다는 외부구속과 내부구속이 서로 균형을 이루도록 크기를 조절하는 것이 효과적이라는 것을 본 해석을 통해 알 수 있다. 그러므로 콘크리트 구조물이 매스콘크리트로 판단될 경우에는 반드시 수화열해석으로 통해 적절한 타설크기를 설정하여야 할 것으로 판단된다.

4.3 타설온도에 따른 영향

매스콘크리트 구조물에 있어서 구조물의 온도는 콘크리트 타설온도, 수화열량 및 외부환경조건에 의해 크게 영향을 받는다. 구조물에 작용되는 온도변화는 구조물의 열적 팽창 및 수축변형을 유발시키며, 이러한 팽창과 수축이 구조물 각 부위의 온도차에 따른 내부구속이나 주변 부재에 의한 외부구속을 받게 되면 균열이 발생하거나 내부에 잔류응력이 존재하게 된다. 따라서 내부의 온도를 낮춰 줌으로써 매스콘크리트에 있어서 수화열의 저감은 물론이고 온도응력의 완화를 기대할 수 있다.

Table 6은 총 타설길이를 30m로 하고 1회 타설고는 4.5m, 시멘트는 2성분계 혼합형 시멘트(FA20)를 적용하였을 때 각 타설온도별 최대 발생온도와 인장응력 및 온도균열지수

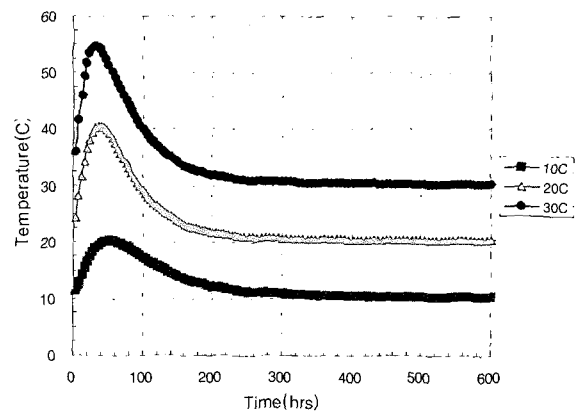


Fig. 9. Temperature rise associated with placement temperature (Fa20, L=30m, H=4.5m)

Table 6. Results of hydration heat analysis associated with placement temperature(FA20, L=30m, H=4.5m)

타설온도 (°C)	최대온도 (°C)	발생시기 (일)	최대인장응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	온도균열 지수	발생시기 (일)
10	20.6	2.0	11.1	2.05	20.0
20	40.8	1.7	19.4	1.15	11.7
30	54.9	1.3	24.4	0.94	8.9

를 정리한 것이다. 예상한대로 타설온도가 높을수록 최대온도의 증가에 따른 잔류 응력이 증가하게 되어 균열발생 확률이 높은 것으로 나타났다.

최대 온도 발생량은 타설온도가 증가함에 따라 거의 타설 온도 증가분의 2배 내외로 온도가 상승하게 되어 타설온도를 낮추는 것이 온도균열 균열제어에 있어 매우 중요한 요소로 작용하고 있음을 알 수 있고, 최대 온도 도달시기도 기 대한 바와 같이 타설온도가 높을수록 시멘트의 수화작용이 활발하게 되어 그 시기가 일찍 나타나고 있어 매스콘크리트

의 온도균열 제어 측면에서 불리하게 나타나고 있다. 균열의 발생 여부를 예측할 수 있는 온도균열지수의 경우 타설 온도를 10℃로 유지할 경우에는 2.05로 균열이 발생할 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 온도균열 제어에 있어 보다 큰 요소로 작용하고 있음을 나타내며, 공기상 타설량(즉, 타설길이나 타설고)을 증가하고자 할 때에는 반드시 타설 온도를 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 타설 온도를 낮추는데 도움이 된다.

#### 4.4 시멘트 종류에 따른 영향

매스콘크리트에 있어 온도균열은 시멘트의 수화열에 의한 온도상승이 주원인이기 때문에 온도균열의 발생을 억제하기 위해서는 콘크리트의 온도 상승량을 감소시키거나 시멘트의 수화반응을 지연시키는 것이 매우 중요하다. 이를 위한 재료적 측면에서의 대책으로는 단위 시멘트의 사용량을 저감시키는 방안을 고려할 수 있으며 기준강도 및 시공성 등을 만족시키는 범위에서 수화열이 시멘트보다 낮은 물질을 혼합재로 시멘트에 대체 첨가한 저발열성 혼합시멘트 사용이 이에 속한다. 이 시멘트를 사용한 콘크리트의 특성은

사용되는 혼합재의 종류, 혼입비율에 따라 변화하며, 일반적으로 응결시간이 일반 시멘트만 사용한 경우보다 길어지므로 압축강도 및 수화열의 발현이 상대적으로 완만하게 된다. 따라서 본 해석에서는 수화열 저감 목적으로 플라이애쉬 20%를 1종 포틀랜드 시멘트에 대체 혼입한 2성분계 혼합시멘트의 경우와 단순히 1종 포틀랜드 시멘트만을 단독으로 적용한 경우에 대해 비교하였다. 총 종방향 타설길이를 20m로 정하고 타설고 4.5m, 타설온도가 20℃인 경우에 대해 해석을 수행한 결과는 Table 7과 같다.

Table 7과 Figs. 11~13에 나타난 바와 같이 2성분계 혼합시멘트를 사용할 경우 동일조건에서 1종 시멘트만 사용할 때보다 최고 온도를 8℃ 정도 저감시킬 수 있었으며 그로 인해 콘크리트의 팽창과 수축에 따른 인장응력의 발생량도 크게 감소되었다. 1종 포틀랜드 시멘트만을 사용할 경우는 온도균열지수가 0.98로써 시방서에서 제시하고 있는 유해한 균열의 발생만을 제한하는 범주에 속하고 있으며, 균열발생 시기도 거의 10일이 경과한 후부터로 인장응력이 지속적으로 상승되는 시점에서 균열이 발생한다는 점에 비추어 관통균열일 가능성이 매우 높다. 지하철 구조물은 내구년한을 100년으로 보고 있고, 지하 구조물이기 때문에 균열이 발생되면 항상 누수에 노출된다는 점을 감안하면 1종 포틀랜드 시멘트의 사용은 본 구조물에서 불합리하다. 그러나 플라이애쉬를 20% 대체 사용할 경우에는 온도균열지수가 1.31로

Table 7. Results of hydration heat analysis associated with cement types(L=20m, H=4.5m, 20℃)

종 류	최대온도 (℃)	발생 시기(일)	최대인장응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	균열 지수	발생 시기(일)
OPC	48.1	1.2	21.9	0.98	9.7
FA20	40.8	1.5	16.9	1.31	12.0

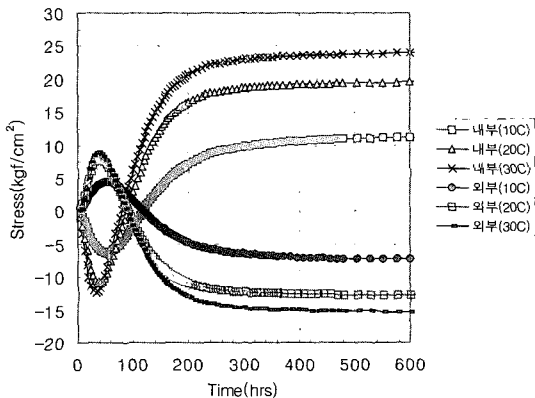


Fig. 10. Thermal stresses associated with placement temperature (FA20, L=30m, H=4.5m)

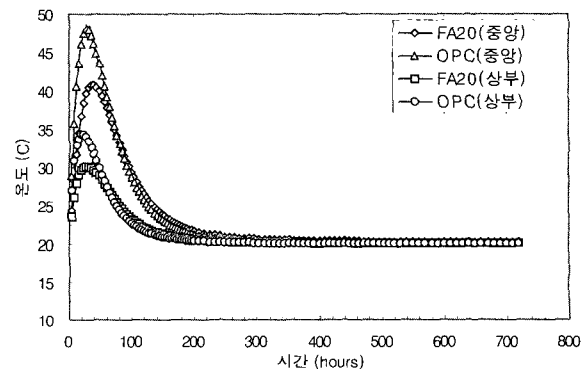


Fig. 11. Temperature rise associated with cement types(L=20m, H=4.5m, 20℃)

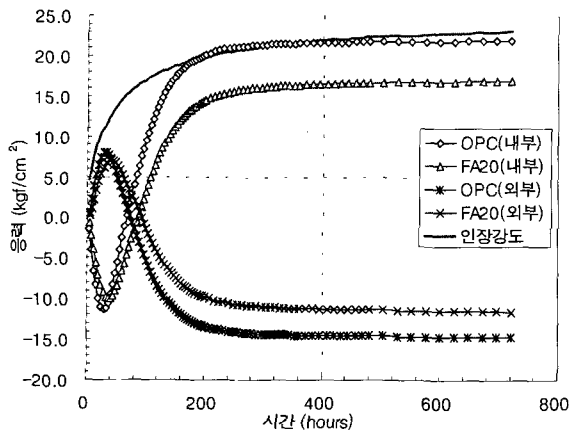


Fig. 12. Thermal stresses associated with cement types(L=20m, h=4.5m, 20°C)

균열발생확률을 제한하는 범주에 포함된다. 따라서 매스콘 콘크리트 구조물의 경우 1종 포틀랜드 시멘트만을 사용하는 것보다는 플라이애쉬나 고로슬래그 등 저발열성 무기혼화재를 혼입하여 사용하는 것이 수화열 저감이나 온도균열을 제어하는데 보다 유리하다는 것을 본 해석결과는 수치적으로 나타내고 있다.

### 5. 결론

지하철 박스구조물은 수화열에 의한 콘크리트의 신축을 구속하여 균열이 발생하는 전형적인 매스콘콘크리트 구조물로서 관통균열일 가능성이 높고 이로 인해 누수가 발생하여 종국에는 구조물의 성능저하가 발생하게 된다. 따라서 본 해석에서는 최적의 타설시기 결정을 위해 타설고 및 타설길이, 타설온도, 시멘트의 종류를 해석변수로 설정하여 수화열 해석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 타설고와 타설길이에 대한 온도의 영향은 벽체의 경우 내부 중심부에서 외기와 접하는 거리가 짧은 방향으로 온도가 소산되기 때문에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.
- (2) 그러나 온도응력의 경우는 타설길이와 타설고의 영향을 크게 받으며, 단순히 타설고나 타설길이를 감소하는 것보다는 외부구속과 내부구속이 적절히 평형을 이루도록 크기를 설정하는 것이 온도균열제어에 효과적이다.
- (3) 타설온도가 증가할수록 콘크리트 내부의 최대온도 상승

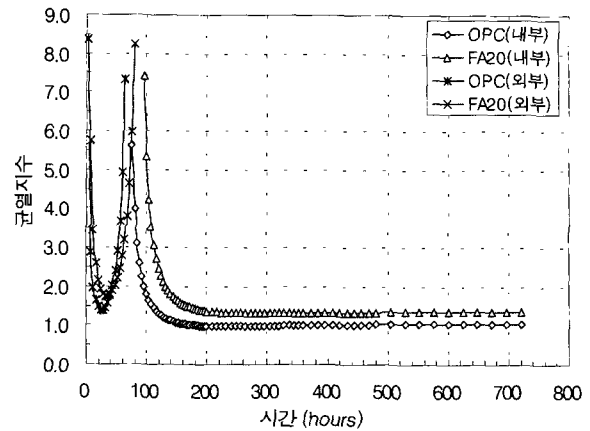


Fig. 13. Crack indices in external and internal points associated with cement types(L=20m, H=4.5m, 20°C)

량이나 온도균열 발생 가능성이 높아지며 이 인자의 효과는 타설고나 타설길이에 비해 보다 지배적으로 작용하므로 가능한 한 타설온도를 낮추는 것이 균열제어에 유리하다.

- (4) 1종 포틀랜드 시멘트만을 사용하는 것보다는 포졸란 성질을 갖고 있는 무기혼화재를 시멘트 대체 혼입하여 사용하는 것이 온도상승경사를 완화시키기 때문에 온도균열제어에 유리한 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. 콘크리트표준시방서 해설, 건설교통부, 2003.
2. 도시철도(지하철)공사 표준시방서, 건설교통부, 1997.
3. 서울특별시, "지하철 구조물의 내구성 확보를 위한 연구," 1999.
4. 지하박스 콘크리트 구조물의 결함원인 및 대책, 건설교통부, 2001.
5. 강석화, "매스콘콘크리트의 온도균열제어를 위한 시공방법," 콘크리트학회지, 제9권 3호, 1997, pp.4-14.
6. 김진근외 5인, "콘크리트 구조물의 균열," 한국콘크리트학회, 제7회 기술강좌, 1997.
7. ACI, "Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures," ACI Committee 224, 1984.
8. ACI, "Control of Cracking in Concrete Structures," ACI Committee 224, 1984.
9. Emmons, P.H., "Concrete REpair and Maintenance Illustrated," R.S. Mean Company, 1984.
10. Trout, J., "Epoxy Injection in Construction," The Aberdeen Group, 1993.