

# 지하박스구조물 온도균열제어를 위한 시공방안연구

## A Study on the Construction Method for the Thermal Crack Control of Underground Box Structure

오 병 환\*      유 성 원\*\*      김 의 성\*\*      전 세 진\*\*  
Oh, Byung Hwan      Yoo, Sung Won      Kim, Eui Sung      Jeon Se Jin

### ABSTRACT

The strength and dimension of recent constructed subway box structures are increased considerably. These increases are resulting in much initial cracks by hydration heat and thermal stress.

According to previous studies, decrease of cement amount by using superplasticizer and L/H value is the best way to eliminate hydration heat and stress. The analyses using finite element model were performed. By the results of analysis, the use of superplasticizer and the decrease of the change of longitudinal placing length are proved to be more effective for eliminating thermal cracks. By ACI Code, for longitudinal placing length 25 m, the amount of wall temperature reinforcement is always lack despite of concrete mix proportion. With analytical result and the inducing crack joint, the in-site test were performed and the analytical results proved to be effective. However, the inducing crack joint is not effective if it is a small size.

### 1. 서론

최근들어 설계·시공되고 있는 지하박스 구조물들은 기존 구조물들에 비해서 강도 및 치수가 상당히 증가하였다. 이러한 부재 치수와 콘크리트 강도 증가는 시멘트 수화열발생과 열응력증가로 시공초기 균열 발생을 초래하고 있어 이에 대한 설계·시공상의 대책이 절실하게 요망되고 있다.

본 연구에서는 현재 시공중인 2기 지하철의 일부 지하박스 구조물구간에 발생된 균열의 원인을 유한요소해석을 통하여 규명하고 이에 대한 대책을 해석적으로 제시한 후 현장실험을 통해서 그 효과를 확인함으로써 최적 시공방안을 도출하여 향후 시공될 지하철에 대한 적절한 균열제어 방안을 제안하는데 그 목적이 있다.

### 2. 콘크리트 수화열 발생 및 열응력의 이론 및 특성

#### 2.1 매스 콘크리트

매스콘크리트의 정의는 각국의 지방서마다 달라지고 있으나 일반적으로 열발생 및 이에 따른 체적 변화에 기인하는 균열에 대한 대책이 필요한 커다란 크기의 콘크리트 구조체를 일컫는데 매스 콘크리트

\* 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 서울대학교 토목공학과 박사수료

트에 대한 각 학회의 규정은 일반적으로 단면치수가 0.8~1m이상일 때 매스콘크리트로 정의하고 있고, 또한 외부구속도가 큰 0.5m이상의 벽체도 이에 포함하는 것이 바람직한 것으로 보고되고 있다.

## 2.2 온도균열

매스콘크리트는 시멘트의 수화현상에 의해 수화열이 발생할 경우 외부로의 열 방출이 늦어져 내부 온도가 크게 상승하게 되며, 이에 따른 체적변화가 내·외부적으로 구속을 받게 되면 구조물 내에는 온도응력이 발생하며 이 응력에 의해 발생하는 균열을 온도균열이라 부른다.

## 2.3 내부, 외부구속 및 열응력에 의한 균열

### (1) 내부구속에 의한 응력

내부구속은 그림 1과 같이 수화열에 의해 콘크리트의 내부는 온도가 상승하지만 표면은 대기공기에 의해 온도가 낮아 콘크리트의 내부와 표면의 온도차에 의해 부피변화가 일어날 때 발생한다.

### (2) 외부구속에 의한 응력

외부구속에 의한 균열은 타설된 콘크리트의 열변형이 지반 또는 기타설한 콘크리트에 의해 구속되는 경우 발생한다. 그림 2에 나타난 바와 같이 타설된 콘크리트는 온도가 최고점에 도달한 후에 최종적으로 외기온도와 같을 때까지 온도가 하강한다. 이 온도강하에 의해 콘크리트의 체적은 수축하지만, 이것이 하층의 콘크리트 또는 지반에 의해 구속되어, 외부구속균열이 발생하는 것이다.

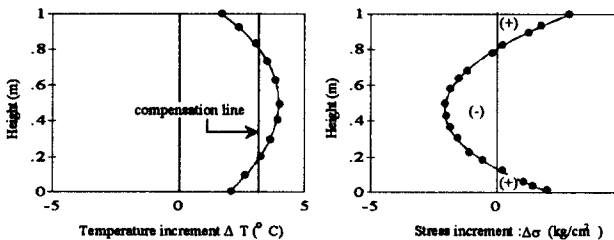


그림 1 내부구속응력의 발생기구

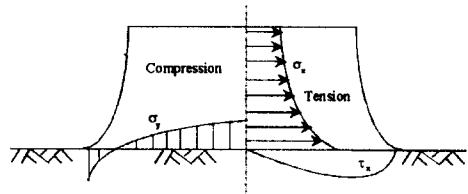


그림 2 외부구속응력의 발생기구

## 3. 수화열에 의한 온도 및 열응력의 유한요소해석

### 3.1 해석방법

본 연구에서는 유한요소 범용프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.

### 3.2 해석에 사용된 콘크리트의 제반 물성치

본 연구의 전산구조해석에서는 주로 콘크리트 표준시방서 등의 식에 따라 물성치를 가정하였다.

#### (1) 압축강도 및 인장강도

보통 포틀랜드 시멘트를 사용했을 때 재령에 따른 압축강도발현곡선은 다음과 같다.

$$\sigma_c' = \sigma_{c(91)}' \cdot t / (4.5 + 0.95t) \quad \sigma_t = 1.4\sqrt{\sigma_c'}$$

여기서, t : 재령(일),  $\sigma_c'$  : 압축강도,  $\sigma_{c(91)}'$  : 91일 재령의 압축강도

(2) 탄성계수

본 해석에서 채택한 식은 우리나라 콘크리트 시방서 제안식이며 아래와 같다.

$$E_c(t) = \phi(t) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f_c'(t)} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

여기서,  $E_c(t)$  : 재령 t일 유효탄성계수,  $\phi(t)$  : 온도상승보정계수,  $f_c'(t)$  : 재령에 따른 압축강도

(3) 단열온도상승곡선

시방서의 단열온도상승식의 형태는 다음과 같다.

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

여기서,  $Q_\infty$  : 최종온도상승량, r : 온도상승속도 계수, t : 재령(일), Q(t) : t일 온도상승량(℃)

(4) 기타 물성

기타 재료물성의 경우, 밀도는  $2300 \text{ kg/m}^3$ , 열전도도는  $96.2 \text{ J/(cm h } ^\circ\text{C)}$ , 비열은  $1150.6 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}$ , 열팽창계수는  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 대류계수는  $4.60 \text{ J/(cm}^2 \text{ h } ^\circ\text{C)}$ 로 입력하였다.

### 3.3 해석변수

내부구속의 최소화를 위해서 설계당시에 선정된 원설계배합과 배합실험을 통하여 얻어진 고성능AE 감수제를 사용한 배합을 해석변수로 선정하였으며 이는 표 1과 같다. 외부구속의 경우, L/H의 변경을 통한 균열을 억제하기 위해 종방향 1회 타설길이를 15m와 25m로 구분하여 해석을 수행후 종방향 1회 타설길이의 영향을 평가하고자 하였다. 본 연구에서의 해석변수를 표 2에 정리하여 나타내었다

표 1 해석에 사용된 콘크리트배합  
(단위 :  $\text{kg/m}^3$ )

	C	W	S	G	혼화제
원설계배합	441	193	723	951	AE제
고성능 AE감수제배합	380	141	884	974	고성능 AE감수제

표 2 본 연구에서의 해석변수

해석변수	내 용	비 고
단위시멘트량	$380 \text{ kg/m}^3$	고성능AE감수제
	$441 \text{ kg/m}^3$	설계시방배합
종방향 1회타설길이	15 m	설계시방안
	25 m	

### 3.4 해석결과

(1) 수화열 해석 결과

온도해석 결과에 의하면 고성능AE감수제 콘크리트의 사용이 내부온도증가 억제에 가장 효과적임을 알 수 있으며, 종방향 타설길이는 박스 중앙부보다는 시점부의 내부 온도저하에 효과적으로 나타났다.

(2) 열응력 해석 결과

열응력 해석결과, 발생 인장응력은 콘크리트 인장강도를 초과하고 있는 것으로 나타나고 있다. 또한 종방향 1회 타설 길이를 어느 정도 한도내에서 조정하여 시공을 하더라도 균열가능성을 완전히 배제하기 어려우며 따라서 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도균열을 합리적으로 제어하기 위해서는 타설

길이 조정을 채택하면서 온도저감을 위한 고성능AE감수제 사용의 고려를 해야 하는 것으로 나타났다.

#### 4. ACI규정에 의한 온도철근 검토

ACI 207.2R-90 수화열 제어지침에 따라 서울지하철 A공구 박스구조물을 대상으로 단면형상과 배합 특성에 따른 온도상승량을 계산하고, 계산된 온도 및 구속도를 바탕으로 온도철근량을 검토하였다.

설계시방배합 콘크리트 및 고성능AE감수제 사용배합 콘크리트를 이용하여 종방향 1회 타설길이를 15m 및 25m로 시공하는 모든 경우에 대해서 현 설계상의 벽체 온도철근량을 ACI 규정에 의해 검토한 결과를 표 3에 나타내었다. 표 3에서 알 수 있듯이 종방향으로 25m 타설하는 경우는 모두 현 설계상의 벽체 온도철근량이 ACI규정의 소요온도철근량에 미치지 못하고 있다.

표 3 ACI규정에 의한 벽체온도철근검토

사용배합	타설길이 L(m)	소요철근량 (cm <sup>2</sup> )	사용철근량 (cm <sup>2</sup> )	판정	추천철근량 (cm <sup>2</sup> )
설계배합	25 m	7.68	H16×3 = 5.958	N.G	H16×4 = 7.940
고성능AE배합	25 m	6.86		N.G	
	15 m	4.65		O.K	H16×3

#### 5. 현장시험 및 결과분석

##### 5.1 현장시험의 변수

현장시험은 벽체 2개소와 슬래브 1개소의 부재 3개소에서 실시하였다. "1"벽체구간은 종방향 1회 타설길이 18m, 타설높이 3.0m로 하였으며, "2"벽체의 경우에는 종방향 1회 타설길이 17m, 타설높이 1.6m로 하였고 슬래브는 종방향 1회 타설길이 18.5m로 현장시험하였다. 콘크리트배합은 고성능AE감수제 사용배합만을 실시하였다. 또한 "2"벽체의 우측에 4.5m 간격으로 균열유발줄눈을 설치하였다.

##### 5.2 현장시험후 수화열 측정결과

현장시험 타설 직후부터 각 위치별로 수화열 발생 과정을 자동 계측하였다. "1"벽체구조물의 자동계측 게이지의 위치와 각 위치별 온도 발생이력을 그림 3에 나타내었다. 측정 결과, 구조물 중앙부(Point A) 지점에서 46시간 경과후 최고 상승온도 43.2℃를 발현하였고 그 외의 지점에서는 약 40~44시간 경과후 28~40℃ 가량의 최고온도상승을 나타내었다.

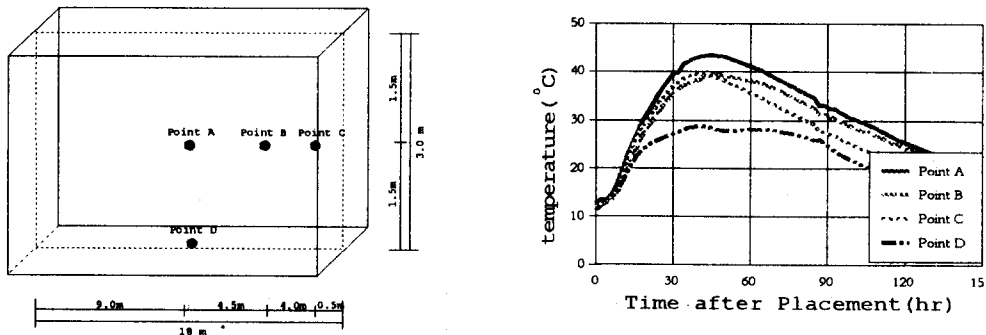


그림 3 "1"벽체구조물의 게이지 위치 및 온도발생이력

### 5.3 균열 발생 조사 및 균열유발준위의 효과

약 10일 양생 후 현장시험 구간의 균열조사를 수행한 결과, 각 벽체에 균열간격 약 8.1m, 균열폭 0.05 mm의 균열이 발생되었다. 이 균열은 당초 시공된 부위보다 상당히 감소한 것으로 나타났다. 한편, 균열은 줄눈위치에 유도되지 않았으며, 이것은 줄눈의 크기가 작기 때문인 것으로 판단된다.

### 5.5 해석치와 실측치의 비교

#### (1) 수화열 및 열응력해석

“1” 벽체구조물의 수화열해석결과, 타설 후 약 2일 후 내부온도가 약 43℃의 최대치에 도달하며 그림 4~5에 나타나듯 온도변화에 있어 해석치와 측정치가 거의 일치하고 있다.

벽체 내부의 열이 대부분 외부로 빠져나가서 거의 일정한 온도에 도달하는 15일 경과시점에서 중심부의 온도균열지수(인장장도/열응력)는 0.75, 표면부의 온도균열지수는 1.09이다. 즉, 표면에서의 응력이 인장장도와 거의 같은 값을 나타내고 있어 균열 발생의 가능성이 있는 것으로 나타났다.

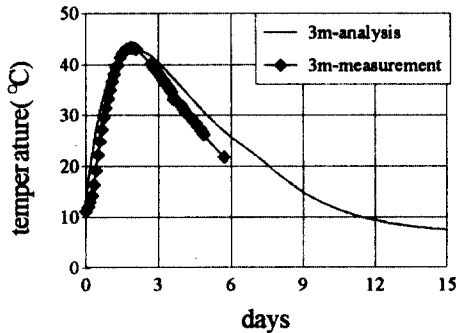


그림 4 중심부 온도의 계측/해석 비교

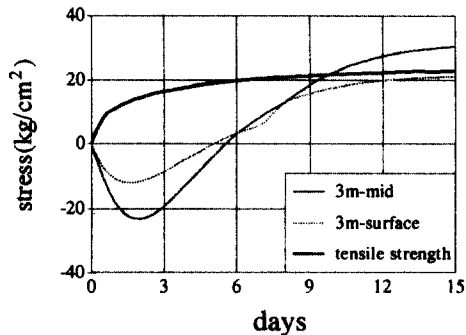


그림 5 3m 벽체 중심부와 표면 응력

#### (2) 벽체 해석결과의 비교분석

##### 1) 1.6m/3.0m높이 벽체 비교

그림 6에 나타나 있듯이 3m벽체와 1.6m벽체의 최대온도상승량은 각각 43℃, 40℃ 정도로 약 3℃ 차이를 보이고 있다. 벽체의 두께가 1.0m이므로 대략적으로 타설높이 1.0m 이상에서는 최소열전달경로가 더 길어지지 않으므로 최대온도상승량이 차이가 나지는 않는 것으로 사료된다.

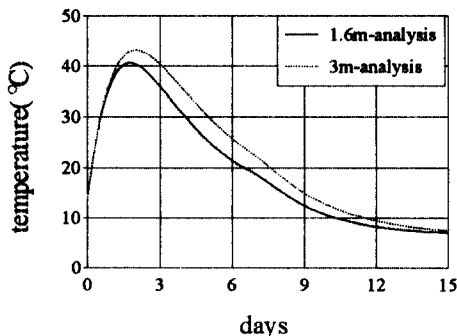


그림 6 3m/1.6m 벽체의 온도비교

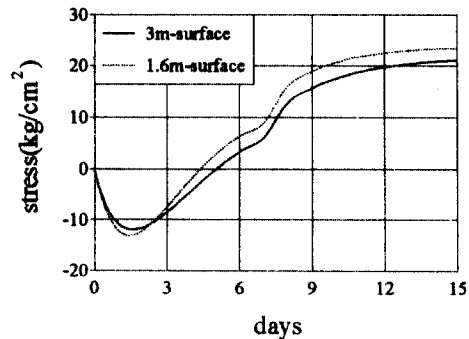


그림 7 3m/1.6m 벽체의 응력비교

인장응력은 최대온도상승량과 응력의 분배등에 관계되지만 본 구조물의 경우는 그림 7과 같이 3m 벽체와 1.6m벽체의 응력은 큰 차이를 보이고 있지는 않으며, 오히려 3m벽체가 응력면에서 다소 유리한 것으로 나타났다. 이는 ACI 207.2R의 L/H(길이/높이)와 외부구속효과의 관계를 반영하고 있다고도 볼 수 있으며, 외부구속의 효과만을 고려할 때 온도의 하강량이 비슷하다면 L/H가 클수록(3m벽체의 L/H=6, 1.6m벽체의 L/H=10.6) 최종인장응력이 크게 발생한다.

## 2) 종방향 타설길이 17.5m/30m 비교

그림 8은 같은 3m높이 벽체에서 종방향타설길이 변화에 대한 표면에서의 응력을 비교하고 있다. 해석에 의하면 종방향타설길이를 30m로 했을 때 응력이 미소하게 커지지만 큰 차이는 없었다. 이는 구조물의 형태상 타설길이를 17.5m로 했다면 이 이상으로 종방향타설길이를 설정하더라도 응력에 큰 변화는 없는 상태 즉, L/H의 영향이 크지 않은 상태에 있기 때문인 것으로 사료된다.

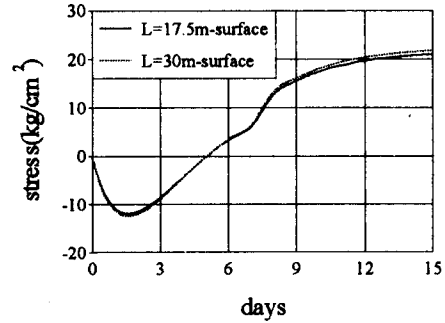


그림 8 종방향 타설길이의 응력비교

## 6. 결론

콘크리트 시공초기 온도균열의 억제를 위해 유한요소해석, ACI규정을 통한 검토를 실시한 후 현장 시험을 수행하고 이들 결과를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 수화열 및 내·외부 구속억제를 위한 방안은 시멘트량의 감소가 가장 적합하며 이를 위해서는 고성능AE감수제의 사용이 필요한 것으로 사료된다.
- (2) 박스 구조물의 L/H값의 감소를 위한 종방향 1회 시공길이 축소 효과는 상당히 미약하였다.
- (3) 현 설계상의 벽체 온도철근량은 ACI 규정을 만족하지 못하고 있다.
- (4) 균열유발률의 설치는 L/H값을 감소시켜 균열억제에 효과적일 것이나, 그 크기가 작은 경우는 효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

- (1) 콘크리트 표준시방서, 건설부, 1996.
- (2) 지하철 설계도, 시방서 및 구조계산서, 서울시 지하철건설본부, 1994.
- (3) Handbook '95 PERI Formwork Eng.
- (4) P. Kumar Metha, Concrete, 2<sup>nd</sup> Ed.
- (5) Joseph J. Waddell, Concrete Manual, International Conference of Building Official.
- (6) Neville, "Properties of Concrete", Pitman.
- (7) ACI Manual of Concrete Practice, 1992