

# 벽체 타설길이별 수화열 해석

## Hydration Heat Analysis of Wall according to Placement Length

김태홍\* 하재담\*\* 유재상\*\*\* 이종열\*\*\*\* 권영호\*\*\*\*\* 배수호\*\*\*\*\*  
Tae-Hong Kim Jae-Dam Ha Jae-Sang Ryu Jong-Ryul Lee Young-Ho Kwon Soo-Ho Bae

### ABSTRACT

Nowadays, hydration heat analysis using FEM is common in thermal crack control of concrete structure. Many kinds of general FEM programs for hydration heat analysis are used in practice. But there are some problems in this using.

In this study hydration heat analysis of wall according to placement length are performed. In this results we could get two conclusions. First, general structures like wall having general geometry and construction condition have similar behavior. So it is not necessary to analysis thermal crack in every case. Second, the results of 2D analysis is possible to be applied instead of those of 3D analysis because the results of 2D analysis is similar to 3D analysis in long wall having about 15~18m or over length at 3m height.

### 1. 서론

콘크리트 구조물의 온도균열 제어 실무에서 유한요소법 수화열 해석을 통한 온도균열 발생 위험 정도의 정량적 평가 및 대책 수립이 보편화되고 있다. 국내외의 많은 연구를 통하여 각종 수화열 전용 해석프로그램이 개발되었으며, 각종 범용 유한요소 해석프로그램도 수화열 해석 기능이 내장되어 가는 추세이다. 이러한 해석프로그램을 사용할 경우 큰 어려움 없이 수화열 해석이 가능하다. 그러나 이러한 추세에는 다음과 같은 문제점이 있다.

첫째, 전형적인 구조물에 있어서 매번 수화열 해석이 필요한가에 대한 의문이다. 여기서 전형적인 구조물이라 함은 구조물 형상과 시공조건이 유사한 구조물을 말한다. 물론 엄밀한 관점에서 동일한 구조물은 실제에 존재하지 않는다. 그러나 이러한 엄밀한 조건을 해석에 그대로 적용할 수는 없고 해석에 필요한 각종 변수를 보편적인 값으로 가정하게 되고 이렇게 되면 결국 전형적인 구조물에서 유사한 해석 결과를 얻게된다. 전형적인 구조물에 대하여 가장 일반적인 몇 가지 조건에 대하여 해석 결과가 정리된다면 많은 경우 해석을 수행하지 않고도 또는 해석에 앞서 대략적인 평가가 가능할 것이다.

둘째, 3차원 해석이 꼭 필요한지에 대한 의문이다. 수화열 해석은 비정상 상태의 열전달 해석 및 재령에 따른 콘크리트 강도 변화를 고려한 해석으로 인하여 많은 해석 시간이 소요된다. 또한, 적절한 온도균열 제어 대책을 수립하기 위해서는 각종 변수에 대한 반복적인 해석을 피할 수 없다. 이러한 상황에서 2차원 해석만으로도 평가가 가능한 구조물에는 2차원 해석을 적극 적용해 볼만하다. 특히, 온

\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 연구원

\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 책임연구원, 공학박사

\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 실장, 공학박사

\*\*\*\* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장

\*\*\*\*\* 정회원, 동양대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\*\*\* 정회원, 안동대학교 토목환경공학과 부교수, 공학박사

도균열 발생 가능성이 높아 많은 해석이 수행되고 있는 벽체 구조물의 경우 길이 방향으로 단면 형상이 일정하고 일반적인 구조 해석과 설계에서 2차원 해석이 적용되고 있으므로 수화열 해석에 있어서도 2차원 해석을 적용해 볼만하다.

본 연구에서는 전형적인 지하박스 구조물 벽체에 대하여 두께(t), 타설길이(L), 그리고, 적용 배합을 변수로 하는 매개변수 해석 연구를 통하여, 해석을 통하지 않고도 일반적인 경우에 대략적인 결과를 예측할 수 있도록 해석 결과를 제시함과 더불어 벽체의 적정 타설길이를 제시하고자한다. 또한, 타설길이를 변수로 하는 해석과 더불어 2차원 해석을 실시하여 2차원 해석의 타당성 및 2차원 해석을 통한 대략적인 3차원 해석 결과, 즉 타설길이별 결과 예측 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 구조물 형상 및 해석 조건

#### 2.1.1 구조물 형상

본 연구에서 대상으로 한 구조물은 가장 일반적인 형태의 벽체로서 지하철 본선 박스 등의 벽체에 해당하는 부재이다. 다음 그림은 지하철 지하 박스의 형상 및 유한요소 mesh이다.

박스 구조물에서 벽체만을 선택하여 두께, 타설길이 등을 변수로 하는 매개변수로 하는 해석을 수행하였다. 두께는 각각 0.5m, 1.0m, 1.5m로 하였으며, 타설길이는 12m, 15m, 18m, 21m, 24m, 그리고 2차원 해석으로 하였다. 타설높이는 3m로 고정하였다.

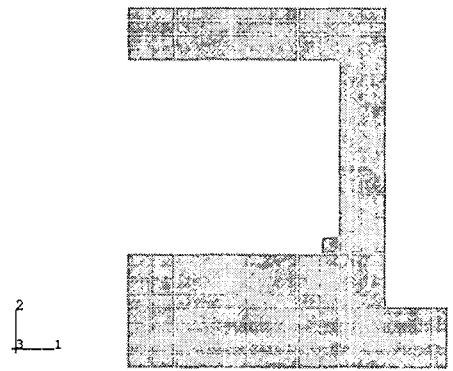


그림 1 구조물 형상 및 유한요소 mesh

#### 2.1.2 배합 및 단열온도상승 특성값

본 벽체에는 레미콘 규격으로 25-300-15의 배합을 적용하였다. 결합재별로 3가지 배합을 적용하였으며 배합별 단위 결합재량 및 단열온도상승 특성값과 계산 근거는 다음과 같다.

표 1. 배합별 단열온도상승 특성값

배합	단위 결합재량		K	a	계산 근거
	C	F/A			
N(1종)	398	-	56.8	1.478	콘크리트 표준시방서
L(4종)	405	-	42.7	0.355	건교부 보고서
NF20(1종+FA20%)	333	83	52.9	0.905	콘크리트 표준시방서

배합별로 단위 결합재량에 약간의 차이가 있으나 이 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 타설온도를 25℃로 가정하였기 때문에 타설온도에 따른 단열온도상승 특성값 보정을 실시하였으며 보정값 및 계산 근거는 다음과 같다.

표 2. 보정된 배합별 단열온도상승 특성값(타설온도 25℃)

배합	보정전 특성값		보정후 특성값		계산 근거
	K	a	K	a	
N(1종)	56.8	1.478	56.1	1.845	$m_K = 0.931e^{-\frac{1.49}{T}}$ $m_a = 0.05T$
L(4종)	42.7	0.355	42.2	0.443	
NF20(1종+FA20%)	52.9	0.905	52.3	1.131	

#### 2.1.3 타설조건 및 양생조건

타설온도는 앞서 언급하였듯이 25℃로 가정하였으며, 양생온도는 20℃로 가정하였다. 부재 측면은 4일간 목재 거푸집 양생후 3일간 양생포 + 살수 양생으로 가정하였다. 또한, 부재 상부는 7일간 양생포 + 살수 양생으로 가정하였다. 부재 측면 및 상부 모두 재령 7일 이후 외기조건에 노출된 상태로 양생되는 것으로 가정하였다.

### 2.1.4 경계조건 및 기타 해석 조건

벽체의 하부는 헌치에 의하여 구속되고 헌치의 하부는 바닥 슬래브에 의하여 구속되는 것으로 가정하였다. 일반적으로 벽체는 바닥 슬래브 등과는 달리 기타설된 콘크리트 위에 타설되기 때문에 비교적 그 경계조건이 명확하다. 재령별 콘크리트 압축강도, 인장강도, 그리고 탄성계수의 추정 및 콘크리트 열 특성값은 콘크리트표준시방서에 제안된 값을 따랐다.

### 2.1.5 해석프로그램 및 적용 유한요소

열전달 해석 및 열응력 해석에 공히 범용 유한요소해석 프로그램, ABAQUS를 사용하였다. 열전달 해석에는 DC3D8 및 DC2D4 요소를 사용하였다. DC3D8은 8절점 선형 열전달 3차원 요소이며, DC2D4는 4절점 선형 열전달 2차원 요소이다. 열응력 해석에는 C3D8 및 CPE4 요소를 사용하였다. C3D8은 8절점의 일반적인 3차원 요소이고, CPE4은 4절점 평면변형 4변형 요소이다.

## 2.2 해석 결과 및 분석

### 2.2.1 수화열 해석 결과

수화열 해석 결과는 벽체 길이 방향 중심 단면에서 벽체 길이 및 3차원 해석과 2차원 해석에 관계 없이 동일한 값을 나타냈다. 물론 벽체 길이 방향에 따른 온도분포는 상이할 것이다. 본 연구의 관점에서 이러한 내용은 생략하기로 한다. 부재 두께별로 수화열 해석 결과를 도시하면 다음과 같다.

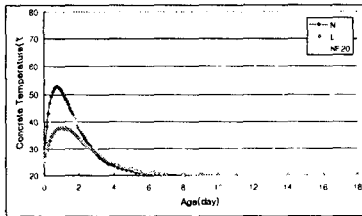


그림 2 수화열 해석결과(t=0.5m)

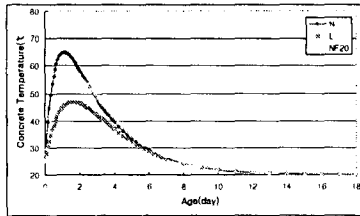


그림 3 수화열 해석결과(t=1.0m)

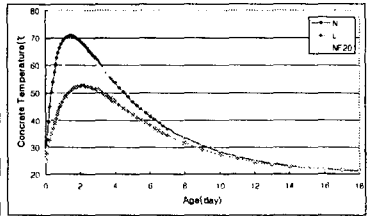


그림 4 수화열 해석결과(t=1.5m)

### 2.2.2 열응력 해석 결과

열응력 해석 결과 및 온도균열지수는 본 연구에서 선정한 변수에 따라 많은 결과가 얻어졌다. 그러나 그 경향에 있어서는 대체로 유사하였다. 해석 결과 중 부재 두께 1.0m, 타설길이 18m 부재의 해석 결과를 나타내면 다음과 같다.

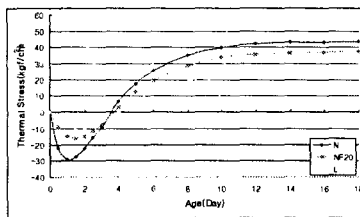


그림 5 열응력 해석 결과

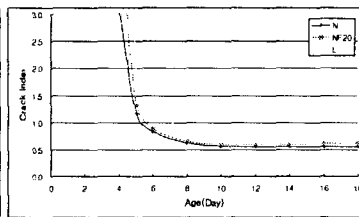


그림 6 온도균열지수

### 2.3 결과 분석

위에 나타난 바와 같이 벽체의 타설길이에 상관없이 경향은 대체로 비슷하게 나타났다. 따라서, 결과 분석은 변수별 명확한 비교를 위하여 최소 온도균열지수만으로 행하였다. 결합재별로 타설길이에 따른 최소 온도균열지수를 도시하면 다음과 같다.

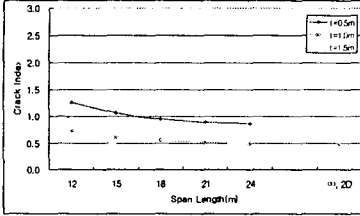


그림 7 타설길이별  
최소온도균열지수(N)

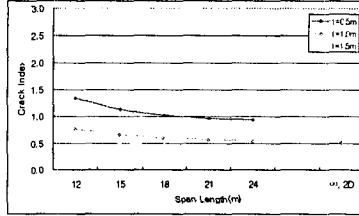


그림 8 타설길이별  
최소온도균열지수(NF)

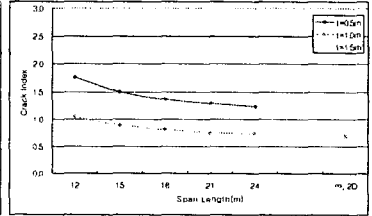


그림 9 타설길이별  
최소온도균열지수(L)

해석 결과 최소 온도균열지수가 비교적 낮게 나타났다. 이는 문헌 등에서 타설온도를 외기온도보다 2~3℃ 높게 보는데 비해 본 해석에서는 5℃ 높게 가정하였고, 지하박스 구조물에서 철재 거푸집 등이 보편화 되는데 반해 목재 거푸집을 사용하는 등의 영향으로 판단된다. 그러나 이러한 가정은 크게 무리 없는 가정일뿐더러 대체적인 경향 파악에는 별 영향이 없을 것으로 판단된다.

### 3. 결론

해석 결과를 변수별로 살펴보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 벽체 두께가 0.5m 정도일 때는 벽체 타설길이에 상관없이 구조물에 유해한 균열은 발생하지 않을 것으로 판단된다. 그러나, 벽체의 두께가 1.0m 정도일 때는 구조물에 유해한 균열이 발생할 것으로 판단된다. 이러한 경우 저발열 시멘트 등을 써서 유해한 온도균열을 방지하고 타설길이 및 시공조건에 따른 적절한 대책을 수립하여야 할 것으로 판단된다.

둘째, 벽체 타설길이에 따라 벽체 길이 방향 중심부에서 최소 온도균열지수는 크게 변화하지 않는다. 특히 벽체의 길이가 15~18m에 이르면 벽체 타설길이 영향은 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 벽체의 타설길이를 통해 온도균열을 제어하고자할 경우 타설길이를 매우 짧게 하여야 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 적절한 대책이 동반된다면 벽체의 타설길이를 늘리는 것도 온도균열 측면에서 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

셋째, 벽체의 타설길이가 15~18m 이상이 되면 3차원 해석과 2차원 해석이 매우 유사한 결과를 나타낸다. 따라서, 특별한 이유가 없는 경우 벽체의 타설길이가 15~18m 이상이 되면 2차원 해석으로도 실무의 관점에서 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 본 연구의 해석 결과는 벽체 길이 방향 중심부에서 온도균열지수 비교이지 벽체 길이 방향 전반에 대한 검토는 아니라는 것을 간과해서는 안 된다. 또한, 3차원 해석에서 편의상 동일한 유한요소 mesh를 사용하였기 때문에 aspect ratio에 따른 해석에 오차가 있을 수 있다. 물론 이러한 해석상의 오차는 크지 않을 것이다.

### 참고문헌

1. 1999 산학연 연구개발사업 제2차년도 최종보고서, 지하철 구조물의 재료, 설계, 시공 통합시스템 구축에 관한 연구, 건설교통부, 2002. 2.
2. 콘크리트 표준시방서, 1999.
3. ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.7.
4. ACI Manual of Concrete Practice, 2002.