

수화발열량차 및 열전달계수 변화를 고려한 매스콘크리트의 수화열 해석

Hydration Heat Analysis of Mass Concrete considering Heat Transfer Coefficient and Hydration Heat Difference

한 승 백* 이 성 수* 신 호 범* 김 호 수**
Han, Seung Baek Lee, Seong Su Shin, Hyo Bum Kim, Ho Soo

ABSTRACT

In recent large-scale structures, as mass concrete type structure is frequently applied to the building, temperature crack due to hydration heat needs to be considered. Since a volume change is internally or externally restricted in a mold after placing concrete, temperature crack of mass concrete takes place. By this reason, the reduction method to control this crack is required.

In this study, low heat mixture and hydration heat difference is used to execute the analysis of hydration heat, considering the changes of heat transfer coefficient according to curing conditions and block placement of mass concrete. For the analytical modelling, original portland cement and concrete of low heat mixture are placed in the upper and lower payer, respectively. A convection boundary condition is fixed because mass concrete of block placement is characterized by the difference of mold form and curing condition. Through the analysis results considering the changes of low heat mixture, block placement, and heat transfer coefficient, we check out the temperature and stress distribution and analyze the temperature crack reduction effect.

요 약

최근 대규모화된 건축 구조물에서 매스콘크리트 형식의 구조체가 많이 적용됨에 따라 수화열에 의한 온도균열의 발생이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 매스콘크리트의 온도균열은 타설 후 시멘트의 수화열에 의한 온도상승 및 강하에 따라 생기는 체적변화가 내부 또는 외부적으로 구속을 받아 발생하는 것으로, 이를 제어하기 위한 수화열 저감대책이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 저발열배합 및 수화발열량차를 이용하여 분할타설된 매스콘크리트를 대상으로 양생조건에 따른 열전달계수 변화를 고려한 수화열 해석을 수행한다. 이를 위한 해석모델은 분할타설을 고려하여 상부층은 일반콘크리트를 타설하고 하부층은 저발열배합 콘크리트를 타설한다. 분할타설된 매스콘크리트는 외기노출 부분과 거푸집 부분, 양생조건부분이 다르기 때문에 그에 따른 대류경계조건을 설정한다. 이에 따라 저발열배합 및 분할타설, 열전달계수 변화 등을 고려한 수화열 해석결과를 통해 온도분포 및 응력분포를 확인하고, 온도균열저감효과를 분석한다.

* 정회원, 청주대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 청주대학교 건축공학과 교수

1. 서 론

최근 콘크리트 구조물이 대형화됨에 따라 매스콘크리트 형식의 구조체가 많이 적용되고 있는 실정이다. 매스콘크리트는 타설 후 두꺼운 부재의 크기와 낮은 열전도율 등과 같은 요인으로 인해 내부의 수화열에 의한 온도상승 및 강하에 따른 온도균열과 부재표면에서 외기와의 열전달에 의한 온도균열 발생이 문제점으로 대두된다. 이러한 내부 또는 외부적 구속으로 발생하는 온도균열을 제어하기 위해서 상황에 맞는 수화열 저감대책을 마련하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 매스콘크리트의 분할타설을 고려하여 상부층은 일반콘크리트를 타설하고 하부층은 수화발열량이 적은 저발열배합 콘크리트를 타설하여, 해석모델의 외기노출부분과 거푸집 부분, 양생조건부분에 따른 대류경계조건을 설정하여 열전달 계수의 변화에 따른 수화열 해석을 수행한다. 이를 통해 저발열배합 및 분할타설, 열전달계수 변화 등을 고려한 수화열 해석결과를 비교하여 온도균열 저감효과를 분석하고자 한다.

2. 열전달 계수

2.1 열전달 해석의 전도 및 대류

수화열 해석과정에서는 콘크리트의 수화과정에서 발생하는 발열, 전도, 대류 등에 의한 시간에 따른 절점온도 변화를 계산하게 된다. 식(1)은 수화열 해석과정 중 열전달 해석에서 전도는 기본적인 이론인 Fourier's Law¹⁾가 사용된다.

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

여기서, Q : 열전달률, A : 면적, k : 열전도율, $\frac{\partial T}{\partial x}$: 온도구배

매스콘크리트의 표면에서는 대류에 의한 열전달이 발생하게 되는데, 이를 고려하기 위해 식 (2)와 같은 계산식에 의해 열전달 해석을 고려하게 된다.

$$Q = h_c(T - T_\infty) \quad (2)$$

여기서, h_c : 열전달계수, T : 물체 표면온도, T_∞ : 유체의 평균온도

2.2 열전달 계수의 산정

매스콘크리트의 수화열 해석과정에서는 대류경계조건을 정의하게 된다. 이는 매스콘크리트의 표면 부위가 외기 노출, 거푸집 접촉, 타설후 양생조건 등에 따라 열전달 해석결과가 다르게 나타나는 것을 고려하기 위한 것이다. 따라서 대류경계조건에 입력되는 열전달 계수는 외기에 노출된 경우는 식 (3)을 이용하고, 거푸집 접촉면은 식 (4)를 사용³⁾하여 산정하였다.

$$h_c = 9.60 + 1.12v \quad (3)$$

$$h_c = 5.92 + 1.43v \quad (4)$$

여기서 v 는 풍속으로 평균 2m/s로 가정하였다. 또한 매스콘크리트의 양생조건에 따른 열전달 계수는 각각의 양생재료의 열전달 특성을 고려한 값을 수화열 해석에 사용하였다.

3. 해석 모델링 및 결과분석

3.1. 해석 모델링

수화열 해석은 표 1에 제시된 바와 같이 대칭성을 고려한 1/4 해석모델을 사용하였고, 또한 열전달 계수 변화가 고려된 해석결과의 비교를 위해 해석모델은 표 2와 같이 제시하였다.

표 1. 수화열 해석 모델링

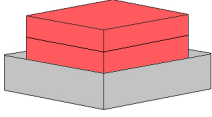
시공단계	수화열해석모델의 1/4 형상	해석모델링 세부사항
분할 타설 시공		·지반 : 12 x 10 x 1.2m ·매스콘크리트하부 : 10 x 8 x 1.0m ·매스콘크리트상부 : 10 x 8 x 1.0m

표 2. 해석모델별 열전달계수

모델명	열전달계수(kcal/m ² hr °C)		
	상하부경계층	측면	상부층표면
해석모델 1	외기 노출 (11.8)	목재 거푸집 (8.78)	외기노출 (11.8)
해석모델 2			염화비닐 (6.5)
해석모델 3			염화비닐+양생포 (3.5)
해석모델 4			양생용 버블시트 (1.31)

3.2. 재료의 열특성 데이터

본 수화열 해석에서 분할타설이 고려된 매스콘크리트의 상부층과 하부층의 열특성 데이터는 표 3과 같다. 상부층 일반콘크리트와 하부층 저발열배합 콘크리트의 열전도율 및 열팽창계수와 같은 열특성 데이터는 콘크리트표준시방서²⁾에 근거하여 그 값을 적용하였고, 그 외의 압축강도와 발열함수와 관련된 데이터는 기존 연구의 실험값⁴⁾을 토대로 적용하였다.

표 3. 재료의 열특성 데이터

사용재료 물성치	S-P ¹⁾	S-F30 ²⁾	지반
비열 (kcal/kg °C)	0.25	0.25	0.2
단위용적질량 (kg/m ³)	2300	2300	1800
열전도율(kcal/m hr °C)	2.3	2.3	1.7
외기온도 (°C, 청주지역)	24	24	-
타설온도 (°C)	19	19	-
28일 압축강도 (MPa)	30	28	-
91일 압축강도 (MPa)	35	38.5	-
탄성계수 (MPa)	2.5742×10 ⁴	2.9162×10 ⁴	1.0×10 ⁴
열팽창계수	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵
포아송비	0.167	0.167	0.2
단위시멘트량(kg/m ³)	389	272	-
압축강도 발현계수	a=4.49, b=0.97	a=7.73, b=0.97	-
발열함수 계수	K=40.73, a=0.95	K=36.68, a=0.72	-

¹⁾S-P : 일반콘크리트, ²⁾S-F30 : 저발열배합 콘크리트

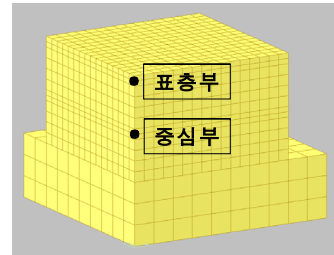


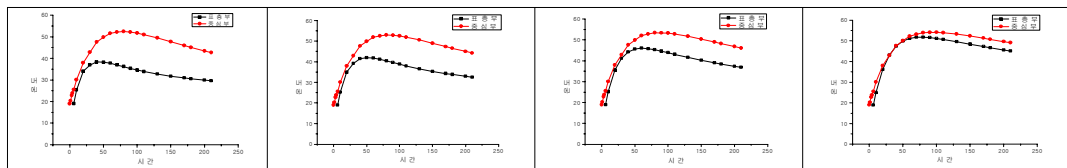
그림 1. 결과분석위치

3.3. 해석결과 및 분석

수화열 해석은 MIDAS/Gen을 사용하였으며, 분할타설을 고려하여 1차타설 6시간 후 2차타설이 진행되는 것으로 시간이력을 입력하였다. 총 해석시간은 210시간으로 하였고, 해석결과의 확인을 위해 그림 1에서 표시된 바와 같이 부재의 중심부와 표층부의 임의절점을 선택하여 온도 및 응력을 확인하였다.

3.3.1. 온도 해석 결과

온도해석에서는 타설후 80시간에서 최고온도가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 해석모델 1에서 중심부가 52.5°C로, 이때의 표층부와외 온도차는 16.3°C로 나타났다. 열전달계수 변화를 고려한 해석모델 2는 중심부가 52.9°C로, 표층부와외 온도차는 12.5°C로 나타났고, 해석모델 3은 중심부가 53.4°C로, 표층부와외 온도차는 12.1°C로 나타났다. 열전달계수가 가장 낮은 양생조건의 해석모델 4에서는 중심부가 54°C로, 표층부와외 온도차는 3°C로 나타나는 것을 확인하였다.



a) 해석모델1 b) 해석모델2 c) 해석모델3 d) 해석모델4

그림 2. 온도 해석 결과 그래프

3.3.2. 열응력 해석 결과

열응력 해석 결과는 그림 3에서 보는 바와 같이 열전달계수가 작을수록 중심부와 표층부의 온도응력차가 줄어드는 것을 확인하였다. 이에 따라 상·하부층의 수화발열량차를 적용하고, 이에 타설후 양생용 실시함으로써 매스콘크리트에서의 중심부와 표층부의 응력차 감소에 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

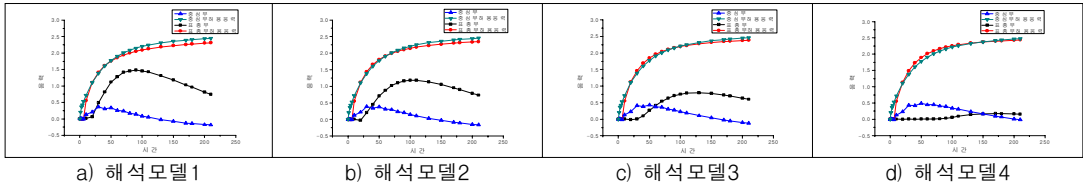


그림 3. 열응력 해석 결과 그래프

3.3.3. 온도균열지수

그림 4에서는 해석모델별 온도균열지수를 그래프로 나타낸 것이며, 모두 최고온도에서 균열지수가 가장 낮은 것으로 확인하였다. 해석모델 1은 1.37로 나타났으며 이는 균열발생을 제한할 경우의 범위인 1.2~1.5에 속하므로 균열에 안전한 것으로 판단되었다. 해석모델 2에서는 1.8로 균열을 방지할 경우의 1.5보다 크므로 매우 안전한 것으로 판단되었다. 나머지 해석모델 3과 4는 이보다 높은 균열지수를 나타내어 단열효과가 높은 양생조건일수록 뛰어남을 알 수 있었다. 여기서 모든 해석모델의 초기 중심부의 균열지수를 보면 급격히 저하하는 경향을 볼 수 있는데, 이는 하부층과 상부층의 시간차 타설에서 하부층이 외기에 노출되는 시간동안 응력이 변화하여 나타나는 것이지만, 균열의 영향은 없는 범위이다. 또한 해석모델 4는 표층부의 균열지수가 상당히 높은 값을 나타내었는데, 이는 양생조건이 우수하여 중심부와 표층부의 온도차와 응력차가 작기 때문에 나온 결과라고 할 수 있다.

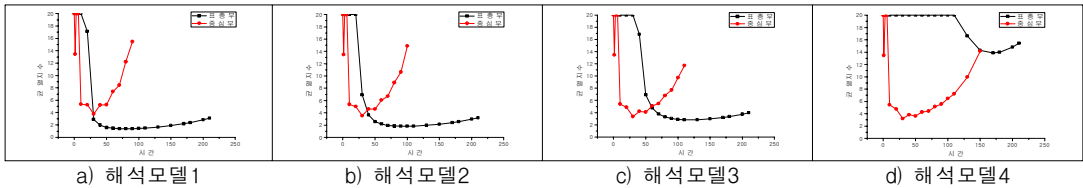


그림 4. 온도균열지수

4. 결론

수화발열량차 및 열전달계수 변화를 고려한 매스콘크리트의 수화열 해석 결과를 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 온도해석 결과에서 양생조건에 따른 열전달계수의 변화를 이용하여 표층부와 중심부의 온도차를 줄여 매스콘크리트의 온도균열을 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 수화발열량차와 열전달계수의 변화를 이용한 매스콘크리트의 온도응력해석에서 상·하부의 응력차가 줄어드는 것을 알 수 있으며, 이에 따라 온도균열지수는 열전달계수가 낮아짐에 따라 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 양생조건에서 열전달계수가 낮게 산정된다면 매스콘크리트의 온도균열발생확률을 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구결과는 수화발열량차를 이용한 분할타설된 매스콘크리트를 모델링하여, 양생조건에 따른 열전달계수 변화를 고려한 수화열 해석을 비교·분석한 것으로써, 상·하부층의 발열량차를 줄이면서 우수한 양생조건을 적용할 경우 매스콘크리트의 온도균열제어에 우수한 성능효과가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. J P. Holman, “열전달 Heat Transfer”, 2000
2. 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서”, 2003
3. 김진근, “매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 해석”, 한국콘크리트학회 연구소위원회 발표집, 1999
4. 한천구, 오선교, 신동안, 전충근, 김종, “2중 버블시트를 이용한 한중 콘크리트의 단열보온양생 공법”, 한국콘크리트학회지 18권 6호, 2006