

매스콘크리트 시험체의 수화열 해석 및 실험

Numerical Simulation of Temperature and Stress Distribution in Mass Concrete with pipe cooling and Comparison with Experimental Measurements

주영춘* 김은겸** 신치범*** 조규영**** 박용남*****
Ju Young Chun, Kim Eun Kyum, Shin Chee Burm, Cho Kyu Young, Park Yong Nam

Abstract

Various methods have been developed for mass concrete structures to reduce the temperature increase of concrete mass due to exothermic hydration reactions of concrete compounds and thereby to avoid thermal cracks. One of the methods widely acceptable for practical use is pipe cooling, in which cooling is achieved by circulating cold water through thin-wall steel pipes embedded in the concrete. A numerical simulation was performed to investigate the effectiveness of pipe cooling. A three-dimensional finite element method was proposed to analyse the transient three-dimensional heat transfer between the hardening concrete and the cooling water in pipe and to predict the stress development during the curing process. The effects of the cement type and content and the environment were taken into consideration by the heat generation rate and the boundary conditions, respectively. In order to test the validity of the numerical simulation, a model RC structure with pipe cooling was constructed and the time-dependent temperature and stress distributions within the structure as well as the variation of the temperature of cooling water along the pipe were measured. The results of the simulation agreed well with the experimental measurements. The results of this study have important implications for the optimal design of the cooling pipe layout and for the estimation of thermal stress in order to eliminate thermal cracks.

1. 서 론

매스콘크리트 구조물 시공시 시멘트의 수화열에 의한 온도균열 문제가 구조물의 사용성 및 내구성을 증진시키기 위한 관점에서 관심이 높아져 가고 있다. 수화열에 의한 온도균열이 발생하게 되면 벽체식 구조물인 경우 관통균열이 발생하게 되며, 슬래브식 구조물의 경우에는 표면균열이 발생하게 되어 구조물의 내구성, 방수성, 미관은 물론 궁극에 가서는 내하력을 감소시킬 수 있는 요인이 될 수 있다.

본 논문은 영종도 인천신공항 여객터미널 전면 고가교량 상부슬래브(PSC구조)의 수화열 대책을 수립하기 위한 일환으로서 제작된 대형 mok-up 시험체에 대한 해석 및 실험결과에 대한 내

- * 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 석사과정
- ** 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수
- *** 정회원, 아주대학교 화학공학과 부교수
- **** 정회원, 동아건설산업(주) 부장 (인천출장소)
- ***** 정회원, 인천국제공항공사 과장

용을 정리한 것이다.

고가교량 상부슬래브와 같이 내부구속의 영향이 큰 구조물에서 수화열에 의한 온도균열을 적극적으로 제어하기 위해서는 수화열에 의한 콘크리트 내부의 최대온도상승량을 감소시켜야 한다. 이 목적을 달성하기 위하여는 초기에 수화열이 적은 시멘트의 사용, 단위시멘트량의 감소, 사용 재료의 pre-cooling에 의한 콘크리트 치기온도의 저감 또는 파이프쿨링에 의한 콘크리트 내부 온도의 강제적 저감 방법 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 [1종시멘트+pipe cooling]의 경우와 [5종시멘트+non pipe cooling]의 경우에 대하여 시험체를 각각 1체씩 제작하여 수화열에 의한 온도균열 제어를 위한 해석 및 실험을 실시하였다. 해석에서는 시험체가 놓일 지역의 환경조건과 시험체 콘크리트에 사용될 시멘트의 종류, 콘크리트의 치기온도, 양생조건, 쿨링파이프의 간격, 쿨링수의 온도 등을 미리 선정하여 균열발생 여부를 평가하였으며, 이 결과를 시험체 시험결과와 비교·검토하였다.

2. 시험체의 단면형상 및 해석조건

2.1 시험체의 선정

시험체는 그림 1과 그림 2에 나타난 바와 같이 높이, 폭, 길이가 각각 $2.8\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ 인 직육면체 형상의 2체를 제작하였으며, 1체는 5종시멘트를 사용하여 파이프 쿨링을 실시하지 않는 것으로 하였고, 나머지 1체는 1종시멘트를 사용하여 쿨링파이프를 수평간격 50cm, 수직간격 60cm로 3단 배치하였다.

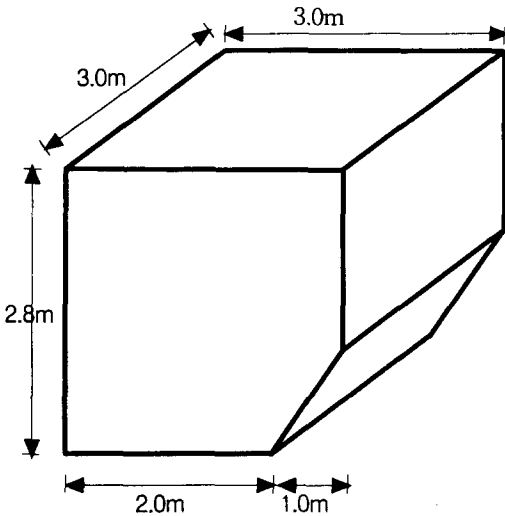


그림 1. 해석대상 시험체의 형상

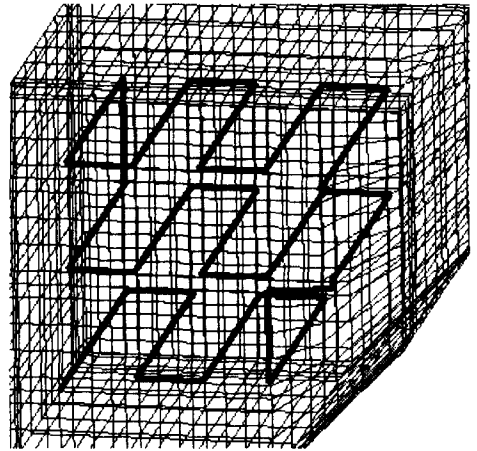


그림 2. [1종+pipe cooling] 시험체의 유한요소 mesh

2.2 콘크리트의 열적특성

시험체 해석에 사용된 콘크리트의 열적특성치는 표 1에 나타난 바와 같다

표.1 해석에 사용된 콘크리트의 열적 특성치

콘크리트의 열적 특성		5종 시멘트를 사용한 시험체	1종 시멘트를 사용한 시험체
단열온도상승 특성치	$K(^{\circ}\text{C})$	47.0	52.6
	$\alpha (\text{h}^{-1})$	0.70	1.332
밀도	$\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$	2400	2400
열전도율	$k (\text{kcal}/\text{m h}^{\circ}\text{C})$	2.1	2.1
비열	$C_p (\text{kcal}/\text{kg}^{\circ}\text{C})$	0.25	0.25

2.3 수치해석방법

열전달기본식과 적용된 경계조건 및 초기조건을 만족하는 해는 통상의 Galerkin 유한요소법을 사용하여 구한다. 시험체의 해석에 사용된 mesh는 그림 2와 같다. 파이프 쿨링을 실시하는 시험체의 경우 파이프 주변 영역의 mesh는 조밀하게 구성하였고, 그 외의 영역에서는 그 보다 큰 mesh를 사용하였다. 파이프쿨링을 실시하지 않는 시험체는 일정한 크기의 mesh를 사용하여 모델링하였다.

그림 2에 나타난 요소는 파이프쿨링을 실시하는 시험체의 모델링으로서 5382개의 trilinear hexahedral element(6384 nodes)가 사용되었다. 또한, 시간에 따른 온도분포의 변화를 추적하기 위하여 implicit predictor multicorrector 방법이 사용되었다. 계산은 HP workstation 715/50에서 수행하였다.

3. 콘크리트 온도해석 및 시험결과

3.1 콘크리트의 온도해석 결과

온도해석에 사용된 대기온도 $T_{air}=7.5^{\circ}\text{C}$, 치기시의 콘크리트온도 $T_i=15^{\circ}\text{C}$, [1종+pipe cooling] 시험체의 경우 쿨링수 수온은 15°C , 쿨링시간은 36시간으로 하였다. 콘크리트 치기가 끝난 후에는 두 시험체 모두 양생시트(두께 5mm) 2장을 덮어 8일간 시트양생을 실시하였다.

그림 3 및 그림 4는 각각 [1종+pipe cooling] 시험체와 [5종+non pipe cooling] 시험체의 온도 해석 결과를 재령의 경과에 따라 나타낸 것이다.

[1종+pipe cooling] 시험체 콘크리트의 내부 최고온도 및 외부온도는 각각 61.5°C 및 49.5°C 이며, 내외부 최대 온도차는 18.3°C 를 나타내고 있다. [5종+non pipe cooling] 시험체의 콘크리트 내부 최고온도 및 외부온도는 각각 70.7°C 및 45.8°C 이며 내외부 온도차는 26.7°C 를 나타내고 있다.

이들 [1종+pipe cooling] 시험체 및 [5종+non pipe cooling] 시험체의 온도균열지수를 계산하면 각각 0.82 및 0.56이 되며, 균열발생확률은 각각 68% 및 93%에 해당되는 것으로 특히, [5종+non pipe cooling] 시험체의 경우 수화열에 의한 온도균열발생이 예상된다.

그림 5와 그림 6은 각각의 시험체에 대한 콘크리트 내부온도가 최대가 되는 시점에서 시험체 중앙 단면의 온도분포를 나타낸 것이다.

Pipe cooling을 실시하지 않은 [5종+non pipe cooling] 시험체의 경우, 콘크리트 내부온도는 7

0℃ 정도를 나타내고 있으며, 외부쪽으로 향하면서 온도는 낮아져 표면에서는 40℃ 이상의 온도를 나타내고 있어 내부와 외부의 온도경사를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

또한, [1종+pipe cooling] 시험체의 경우, 쿨링파이프 주변의 콘크리트 온도는 매우 낮은 값을 나타내고 있으며, 파이프 간격이 50cm인 수평방향 파이프간 중앙부의 온도는 50℃, 파이프간격이 60cm인 수직방향 파이프간 중앙부의 온도는 60~65℃ 정도를 나타내고 있어서 파이프 간격 및 파이프 배관에 따른 전체적인 온도이력을 잘 표현하고 있다.

그림 7과 그림 8은 시험체의 온도해석결과와 계측에 의한 시험체 내부의 수화열에 의한 콘크리트 온도를 재령별로 나타낸 것이다. [1종+pipe cooling] 및 [5종+non pipe cooling] 시험체 모두 시험치와 해석치는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

[1종+pipe cooling]의 경우 재령 1일에서 최대 53℃의 온도상승을 나타내고 있으며, 파이프쿨링을 정지시킨 36시간 이후에는 다소 수화열 상승은 있으나 거의 재령 1일에서의 온도와 큰 차이가 없다.

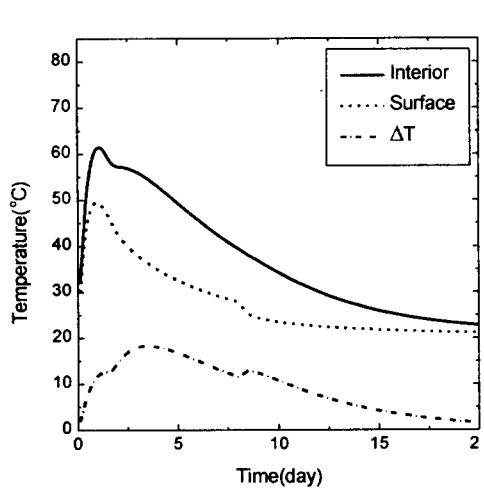


그림 3. [1종 + pipe cooling] 시험체의 온도분포

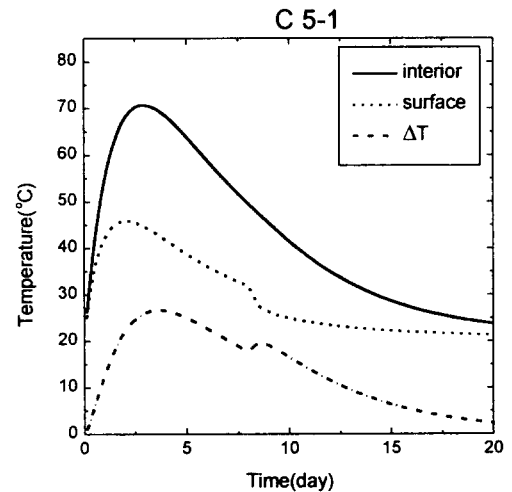


그림 4. [5종+non pipe cooling] 시험체의 온도분포

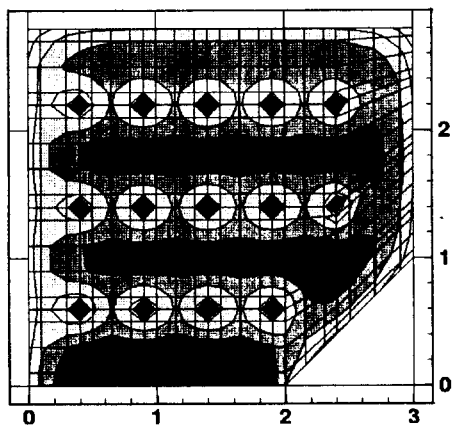


그림 5. [1종 + pipe cooling] 시험체 단면의 온도분포

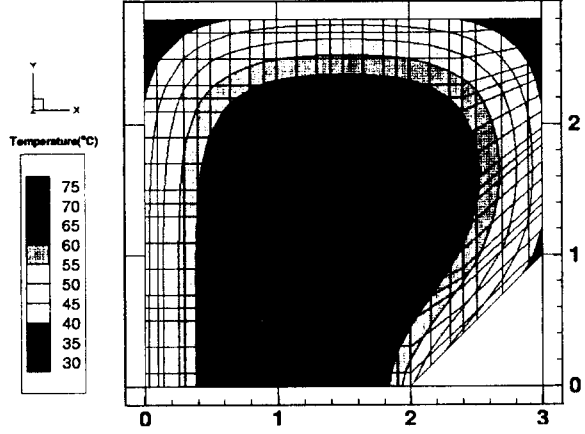


그림 6. [5종 + non pipe cooling] 시험체 단면의 온도분포

[5종+non pipe cooling] 시험체의 경우 콘크리트의 온도가 최대가 되는 시점은 재령 2~3일 경과 이후로서 1종시멘트에 비하여 1~2일 정도 지연되고 있으며, 최대값은 67℃ 정도로서 [1종+pipe cooling]의 경우에 비해 14℃ 정도 높은 값을 나타내고 있다.

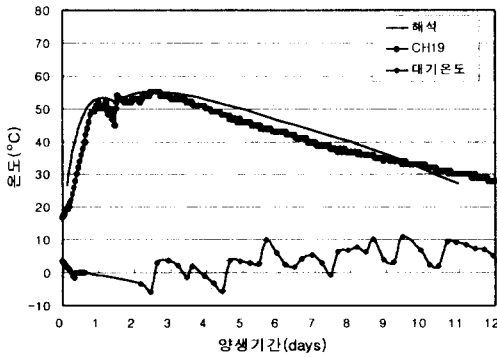


그림 7. [1종 + pipe cooling] 시험체의 해석치와 계측치의 온도비교

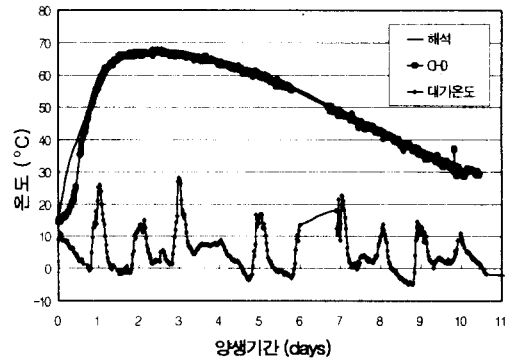


그림 8. [5종 + non pipe cooling] 시험체의 해석치와 계측치의 온도비교

4. 응력해석결과

그림 9와 그림 10은 각각 [1종+pipe cooling] 시험체와 [5종+non pipe cooling] 시험체의 온도 응력해석 결과를 나타낸 것이다.

[1종+pipe cooling] 시험체의 경우 재령 1일 이하에서 콘크리트에 발생하고 있는 인장응력은 콘크리트의 파괴인장강도를 초과하고 있지만, 1일 이후부터 콘크리트의 파괴인장강도는 인장응력을 초과하고 있으며, 인장응력이 최대가 되는 재령 3일에 있어서도 콘크리트의 인장응력이 16.0 kgf/cm^2 이고 파괴인장강도는 18.5 kgf/cm^2 로서 균열지수는 1.16, 이에 따른 균열발생확률은 22%를 나타내고 있어 균열발생확률이 적음을 알 수 있다.

[5종+non pipe cooling] 시험체의 경우에는 초기재령 1일 이전에는 콘크리트의 인장응력이 파괴인장강도 범위 안에 있지만, 이후 인장응력이 증가하여 재령 3일에서 콘크리트의 파괴인장강도는 13.1 kgf/cm^2 , 인장응력은 20.2 kgf/cm^2 로서 균열지수는 0.65, 이에 따른 균열발생확률은 88%를 나타내고 있어 수화열에 의한 표면의 온도균열발생이 상당히 높은 상태에 있을 것으로 예상된다.

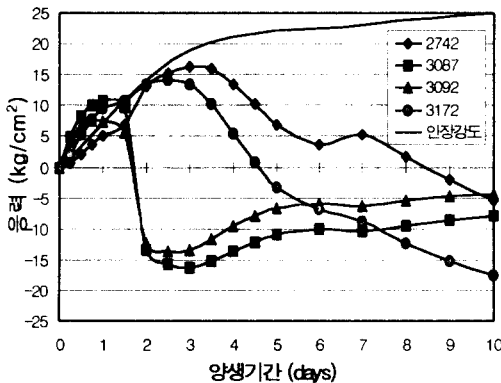


그림 9. [1종+pipe cooling] 시험체의 응력분포

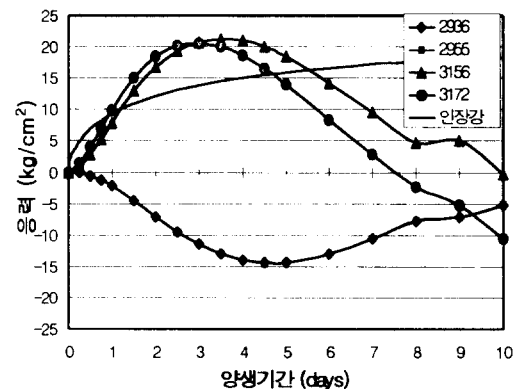


그림 10. [5종+non pipe cooling] 시험체의 온도분포

그림 11과 그림 12는 콘크리트 인장응력이 최대가 되는 시점에서의 시험체 중앙단면의 온도응력 분포를 나타낸 것으로서 [1종+pipe cooling]의 경우와 [5종+non pipe cooling]의 시험체의 내부와 외부의 온도응력 분포를 전체적으로 잘 파악할 수 있다.

이 그림으로부터 콘크리트 표면온도가 최대가 되는 시점에서 콘크리트 내부에는 압축응력의 발생으로 내부구속에 의하여 표면부에 온도균열이 발생한다는 이론을 뒷받침 해주고 있음을 알 수 있다. 특히, 그림 12에서는 콘크리트 표면의 온도가 높은 것은 물론, 온도경사가 [1종+pipe cooling] 시험체에 비하여 급함으로서 온도균열발생 가능성이 높은 것으로 판단된다.

실험결과 [1종+pipe cooling]의 경우에는 콘크리트 표면에 수화열에 의한 온도균열이 전혀 발생하지 않았고, [5종+non pipe cooling]의 경우에는 재령 1일까지는 인장응력이 인장강도를 초과하지 않았으나, 재령 1일 이후 인장응력이 인장강도를 초과하여 시험체의 표면에는 온도균열이 발생하여 해석결과의 신뢰성을 입증할 수가 있었다. 그 결과 5종시멘트의 적용보다는 [1종+pipe cooling]방법이 수화열에 의한 온도균열을 저감시키는데 효과가 있음을 알 수 있었다.

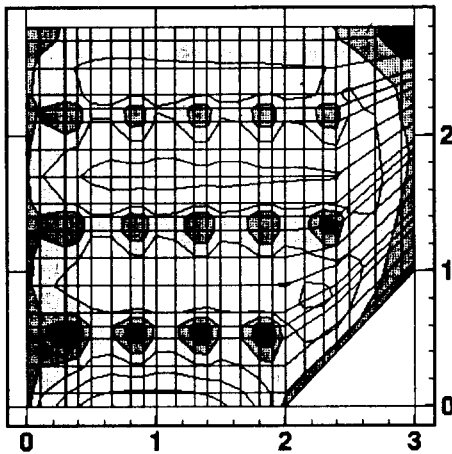


그림 11. 5종 non-pipe cooling 시험체의 응력분포

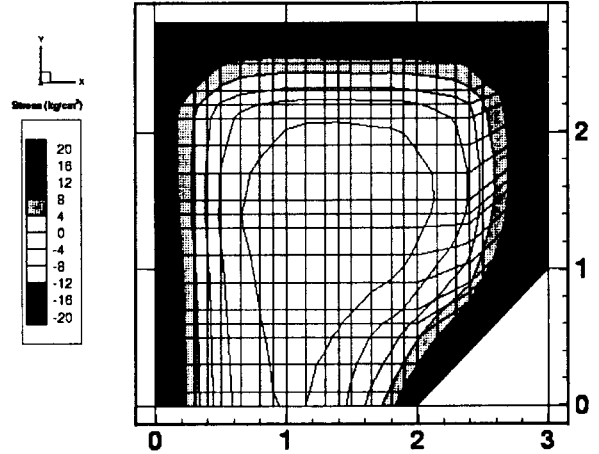


그림 12. 5종 non-pipe cooling 시험체의 응력분포

참고문헌

1. 김은겸, 김래현, 신치범, 「유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발」, 한국콘크리트학회 논문집, 제7권 6호 1995, 12. p.p.167~175
2. 일본콘크리트공학협회, 「매스콘크리트 온도응력 연구위원회 보고서」, 1998년 4월
3. 김은겸, 신치범, 주영춘, 「매스콘크리트 교각의 수화열에 의한 온도 및 응력 거동에 대한 3차원 유한요소 해석」, 한국콘크리트학회 1998년 가을학술발표회 논문집, 제 10권 2호 1999. 11. p.p 928~933