

지반 깊이 및 열특성 영향에 따른 매스콘크리트의 수화열 해석

A Parameter Study on Heat of Hydration in Mass Concrete Affected by Foundation Depth and Various Thermal Properties

채 속 희* 양 성 철** 박 종 원***
Sook-hie Chai Sung-Chul Yang Jong-Won Park

ABSTRACT

This paper is mainly intended to show an effect of foundation depth on heat of hydration in mass concrete. From the analysis, it was found that the foundation depth which is not affected by the heat conduction is more than 5 m. But this study shows that, an optimum foundation depth for the FEM analysis for heat of hydration in mass concrete is approximately 1 m from this study. And in order to study the significance of various parameters, a sensitivity analysis of heat transfer in mass concrete is performed and the amount of heat liberated at complete hydration of unit weight of cement and the reaction velocity of hydration are the most sensitive parameters factors of other various parameters.

1. 서론

매스콘크리트의 수화열에 의한 온도균열은 시멘트 수화열 초기 내부구속에 의해 표면부와 중심부의 온도차이에 따라 발생하는 표면균열과 시멘트 수화열에 의한 온도상승이 최고치에 달한 후 온도강하에 의한 수축의 외적구속으로 인한 관통균열로 구분된다. 매스콘크리트의 시공이 날로 늘어감에 따라 온도균열 제어방안에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

매스콘크리트의 수화열 해석 시 콘크리트 하부로 전도에 의한 열의 전달을 포함하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 지반깊이를 변수로 하여 열전달이 안정화되는 깊이를 찾아 매스콘크리트 타설 후 온도변화에 영향을 미치는 지반깊이 범위를 제시하고자 한다. 따라서 열전도의 영향이 안정화되는 깊이에 고정온도 조건을 입력, 해석함으로써 좀 더 합리적인 모델을 수립하고자 하였으며, 제시된 지반깊이로 매스콘크리트의 매개변수에 미치는 영향을 파악코자 민감도 분석을 실시하였다.

* 정회원, 홍익대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수

*** 정회원, 홍익대학교 건축공학과 조교수

2. 수화열 해석을 위한 지반깊이의 온도변화

지반모델에 사용된 물성치는 표 1과 같으며, 열전달계수는 콘크리트 표준시방서⁽¹⁾에 의해 풍속 2~3 m/sec에 대한 표면열전달계수 $12 \text{ kcal/m}^2\text{hr } ^\circ\text{C}$ 를 사용하였다. 지반을 무한평면으로 보고 양면을 대칭으로 단열경계 조건을 사용하였으며 지반의 밀면만을 변위 구속조건과 20°C 고정온도 조건 하에서 360시간 동안 MIDAS GENw를 이용하여 유한요소해석을 실시하였다.⁽²⁾

표 1. 지반해석모델 입력 자료

비중 (kg/m^3)	비열 ($\text{kcal/kgf } ^\circ\text{C}$)	열전도율 ($\text{kcal/mhr } ^\circ\text{C}$)	표면열전달계수($\text{kcal/m}^2\text{hr } ^\circ\text{C}$)
1800	0.2	1.7	12

지반해석모델은 높이를 변수로 하여 0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m, 5 m, 6 m에 따라서 24 시간, 48 시간, 72 시간, 168 시간, 360 시간별로 열전달의 영향을 살펴보았다. 그림 1은 각 깊이에 따른 360시간 이후의 지반온도분포이고 깊이 5 m에서부터는 비 선형 온도 분포를 보이며 시간에 따라 온도변화가 안정되는 것을 볼 수 있다. 깊이 6 m 모델의 지반온도변화 결과는 깊이 5 m 일 때와 유사하며 유한요소법에 의해 해석을 할 경우 요소가 많을수록 많은 시간이 소모되므로 매스콘크리트의 수화열에 대한 영향을 알아보기 위한 모델은 5 m, 3 m, 2 m, 1 m, 0.5 m를 변수로 선택하였다. 그림 2는 지반온도분포 해석모델 $21 \text{ m} \times 9 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 의 시간별 온도분포 이다.

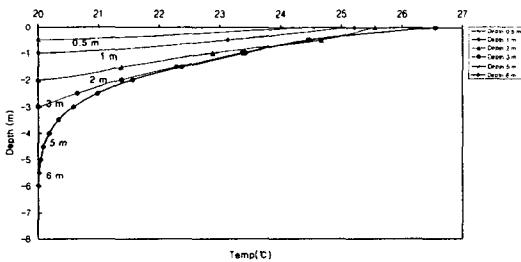


그림 1. 깊이 별 지반 온도분포 (360시간)

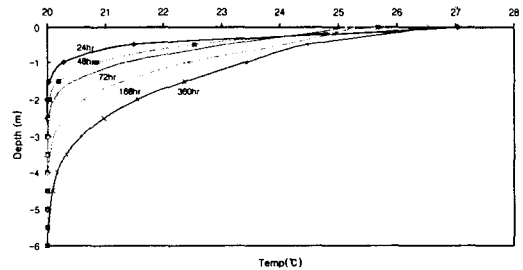


그림 2. 지반깊이 6m의 시간에 따른 온도분포

그리고 본 논문에 해석결과를 제시하진 않았으나 5개의 지반모델 깊이 6 m, 5 m, 3 m, 1 m, 0.5 m를 360 시간 동안 열전달 해석을 한 후 위치별 온도분포를 콘크리트 구조물 해석모델의 입력자료로서 사용하는 것이 FEM을 이용한 수화열 해석에 있어서 합리적이라 판단하여 각 지반모델의 결과를 지반의 위치별 온도로 사용하여 해석하였다. 그러나 결과는 지반모델의 최하부에 고정온도조건만을 입력하여 해석한 결과 값이 더 실측에 가까운 것으로 나타났다. 이 또한 계속 계속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 온도계측 및 해석 결과

본 논문에 사용되어진 온도계측 데이터는 ○○ 현장에서 계측되었으며 현장 실험에 참가한 ○○대학

연구원으로부터 사용 허락을 받은 후 사용함을 미리 밝힌다.⁽³⁾ 콘크리트 구조물의 크기는 $38\text{ m} \times 12\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 이며, 1회 타설 되었고 비닐을 덮어 양생하였다. 콘크리트 배합은 표 2와 같으며 해석모델은 그림 3과 같으며 대칭을 이용하여 전체 구조물의 1/4만을 모델링하였으며 표면으로부터 5cm 떨어진 위치에서 온도측정 되었다.

표 2. 콘크리트 배합표

W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m ³)					
		W	C	FA	S	G	AD
49.1	49.3	154	338	37	864	876	1.5

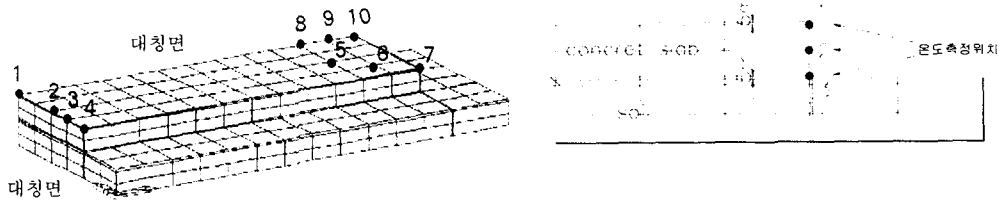


그림 3. 온도해석 모델 (온도측정위치)

유한요소해석법에 의해 수화열을 해석할 경우 열전달의 영향이 안정화되는 지반깊이는 5 m로 판단되어지나 그림 4는 1 m이상 5 m미만 범위에서는 매스콘크리트의 수화열에 거의 영향을 미치지 않는 것을 나타낸다. 따라서 최소 1 m이상의 지반을 포함하여 모델링하는 것이 바람직하다고 판단된다. 그리고 하부온도 분포는 초기에는 타 모델과 유사하나 시간이 경과함에 따라 온도가 낮게 평가되는 것으로 나타났다. 그림 5는 수화열 해석모델에 포함하는 지반깊이에 따른 영향이 구조물의 상부온도분포에는 거의 미치지 않으나 중앙과 하부의 온도에 영향을 미치는 결과를 보인다. 그러나 현장계측결과와 해석모델의 표면온도결과가 외기온도에 따라 증감하는 경향은 비슷하나 해석결과와 상승온도가 다소 상이한 이유는 복잡한 표면 열전달 메카니즘 때문으로 생각되어지며 추후 태양열 복사 등, 환경변수에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

콘크리트 구조물은 밤 시간에 비해 낮 기온에서 콘크리트 상부와 하부의 온도차이에 의해 하부는 수축하러 경향을 보일 것이다. 그러나 지반의 구속에 의해 콘크리트 하부에서는 인장응력이 발생하여 온도균열이 발생 할 가능성이 있으므로 콘크리트 구조물 하부의 온도제어에도 관심을 가져야 한다.

해석모델 입력자료는 표 3과 같으며 지반깊이 1 m를 포함한 모델의 경우 그림 6에서 보여주듯 실측 데이터와 해석결과가 차이가 거의 없으므로 본 해석모델을 이용하여 변수에 따른 온도 변화 등을 예

표 3. 해석입력자료

매스 콘크리트			지 반			단열온도상승량			환경조건	
밀도 (kg/m ³)	비열 (kcal/kg °C)	열전도율 (kcal/m hr °C)	밀도 (kg/m ³)	비열 (kcal/kg °C)	열전도율 (kcal/m hr °C)	최종단열 온도상승 량(°C)	온도상승 속도계수	초기온도 (°C)	대류계수 (합판) (kcal/m ² h °C)	대류계수 (비닐) (kcal/m ² h °C)
2300	0.2709	2.2	1800	0.2	1.7	55	1.8	20	14.6	21.5

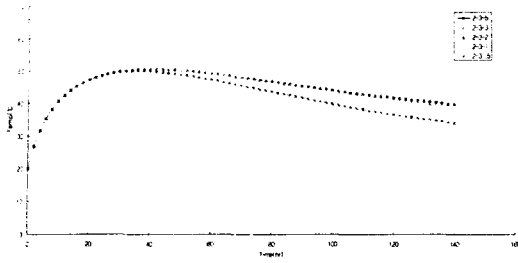


그림 4. 지반깊이에 따른 하부온도분포

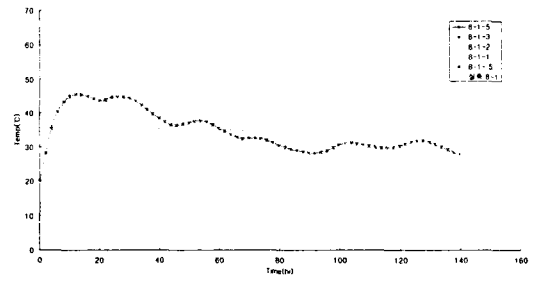


그림 5. 지반깊이에 따른 상부온도분포

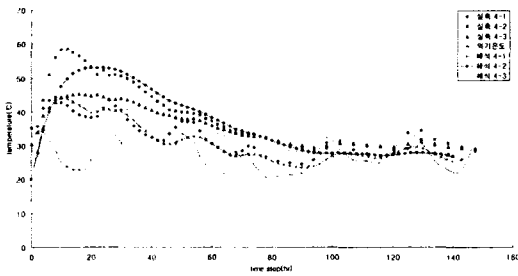


그림 6. 수직온도분포

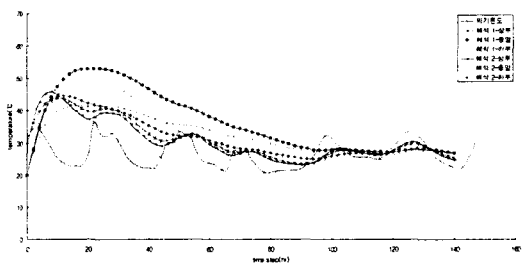


그림 7. 해석방법에 따른 수직온도분포

측 가능하다고 판단된다.

그림 7은 MIDAS 해석결과와 기 실행된 ANSYS 해석결과와의 비교이며 구조물의 상부온도분포가 아주 흡사한 결과를 보이고 있다. 해석결과 그래프에서 4-1-5는 위치 4에서의 표면온도를 나타내며 지반깊이 5 m를 의미한다.

4. 열전달 민감도 해석 결과

이상에서 수립된 해석모델을 바탕으로 수화열 발현에 중요한 변수들을 20 %, 10 %, -10 %, -20 % 증감함에 따라 수화열에 미치는 매개변수 해석을 실시하였다. 그림 8과 같이 ΔT_1 은 콘크리트 구조물이 최고일 때 내부와 표면의 온도차이고, ΔT_2 는 단면 중앙부의 최고온도와 최저온도의 차이다.

부재단면의 온도차이에 의해 생기는 온도균열이 부재가 커질수록 콘크리트 구조물에 치명적인 손상을 줄 수 있으므로 주요 변수들의 증감에 따른 부재내의 온도차를 예측함으로써 수화열에 의한 온도균열 제어에 많은 도움이 될 것으로 판단되어 표 4에 주어진 변수들을 사용해 수화열에 대한 민감도 분석을 실시하였다.

변수에 따른 민감도 분석 결과는 표 4와 같으며 변수들을 20 % 증가했을 때 부재 내에서 발생하는 온도차를 백분율로 환산한 값으로서 콘크리트의 비열과 열전도율의 증가는 ΔT_1 1.55 % 감소, ΔT_2 6.94 % 증가시킨 반면 지반의 비열과 열전도율은 내부온도차에 거의 영향을 미치지 않는다. 수화도의 재료상수인 최종 단열온도 상승량과 온도상승 속도계수 그리고 초기온도의 20 % 증가는 ΔT_1 은 29.78 %, 7.29 %, 13.14 % 감소시키며 ΔT_2 는 22.07 %, 7.40 %, 8.10 % 감소시킨다. 그리고 외기온도의 상승 또한 ΔT_1 과 ΔT_2 를 7.28 %, 9.01 % 증가시키는 것으로 나타났다.

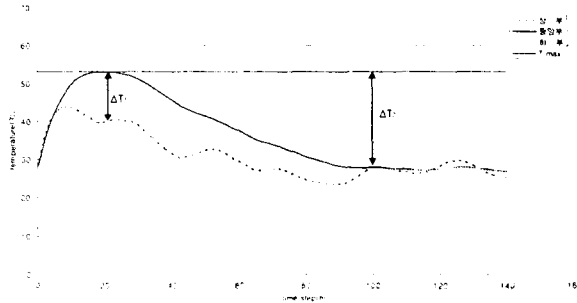


그림 8. 시간에 따른 온도차

ΔT_1 이 클수록 내적구속에 의한 표면균열 발생가능성이 커지며 또한 ΔT_2 가 클수록 최고온도에서의 온도강하 폭이 커지므로 외적구속에 의한 관통균열 발생 가능성이 크다. 따라서 온도균열제어를 위한 매개변수로서 온도변화에 가장 민감한 변수인 최종 단열온도 상승량과 온도상승 속도계수 그리고 초기온도 등을 제어함으로써 수화발열 초기에 표면균열을 유발할 수 있는 좀 더 나은 품질의 콘크리트 구조물을 시공할 수 있으리라 판단된다.

표 4. 민감도 분석 결과 (20% up)

	변 수	ΔT_1	ΔT_2
콘크리트	비열(kcal/kg °C)	-1.55	6.94
	열전도율(kcal/m hr °C)	-1.68	3.78
지 반	비열(kcal/kg °C)	0.48	0.22
	열전도율(kcal/m hr °C)	0.15	-0.38
환경조건	대류계수(비닐)(kcal/m ² h °C)	-6.52	0.38
	외기온도 (°C)	7.28	9.01
	초기온도(°C)	-13.14	-8.10
시멘트 수화	최종단열온도상승량(°C)	-29.78	-22.07
	온도상승속도계수	-7.29	-7.40

4. 결론

(1) 열전달의 영향으로부터 안정되는 지반깊이는 5 m로 판단되어지나 깊이 1 m이상 5 m미만 범위에서는 매스콘크리트의 열전달 해석에 영향을 미치지 않으므로 최소 1 m이상의 지반을 포함하여 모델링하는 것이 바람직하다고 판단된다.

(2) 지반깊이 1 m를 포함한 해석을 통해 민감도를 분석한 결과 최종 단열온도 상승량과 온도상승 속도계수 그리고 초기온도의 20% 증가는 ΔT_1 은 29.78%, 7.29%, 13.14% 감소시키며 ΔT_2 는 22.07%, 7.40%, 8.10% 감소시킨다. 온도균열 제어를 위한 매개변수로서 온도변화에 가장 민감한 변수인 최종 단열온도 상승량과 온도상승 속도계수 그리고 초기온도 등을 제어함으로써 좀 더 나은 품질의 콘크리

트 구조물을 시공할 수 있으리라 판단된다.

(3) 현장계측결과와 해석모델의 표면온도결과가 다소 상이한 이유는 복잡한 표면 열전달 메카니즘 때문으로 생각되어지며 추후 태양열 복사 등, 환경변수에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

(4) 본 논문에는 결과를 제시하지 않았지만 각 지반모델의 열전달 해석결과를 해석모델에 포함된 지반의 위치별 온도로 사용하여 해석하였으나 결과는 지반모델의 최하부에 고정온도조건만을 입력하여 해석한 결과 값이 더 실측에 가까운 것으로 나타났다. 이 또한 계속 계속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로센타에서 지원한 연구수행결과입니다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 2000.
2. MIDAS/GENw Advanced Tutorials, 마이다스아이티, 2001.
3. 신성우 외5인, “매스콘크리트의 적정 타설높이 산정을 위한 수화열 해석”, 콘크리트학회 2001년도 가을 학술발표회 논문집, pp.385-390.
4. 양성철, “콘크리트재료의 열특성 및 수화열 해석,” 한국콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 9권 2호, pp.121-132.