

매스 콘크리트 구조물의 수화열 및 응력 해석의 민감도 분석

김광수 · 차수원^{*†}

서울대학교 공학연구소 · 한경대학교 토목공학과
(2001. 11. 26. 접수 / 2001. 12. 15. 채택)

Sensitivity Study of Thermal Stresses in Mass Concrete Structures

Kwang-Soo Kim · Soo-Won Cha^{*†}

Research Institute of Engineering Science, Seoul National University

^{*}Department of Civil Engineering, Hankyong National University

(Received November 26, 2001 / Accepted December 15, 2001)

Abstract : Cracking in concrete structures is one of the main issues of structural design next to ensuring the load-bearing capacity. Thermal analysis is used to prevent thermal cracking, but concrete properties are uncertain variable, and analysis results have uncertainty, too. In this study, sensitivity analysis is performed to investigate the effect of conductivity, specific heat and pouring temperature. The results show that lower conductivity and higher specific heat increase the maximum temperature and maximum tensile stress. The structure with internal restraint is mostly influenced by the change of conductivity and specific heat.

Key Words : thermal cracking, uncertainty, sensitivity analysis

1. 서론

최근 들어 대규모 구조물들의 시공이 증가하고 있고, 대형 구조물을 건설하기 위해서는 매스 콘크리트의 시공이 필연적으로 따르게 된다. 매스 콘크리트 구조물은 내부에서 발생하는 수화열이 과도할 경우 심각한 열응력이 발생할 수 있다. 수화열로 인한 온도 균열은 보통 그 폭이 크고 구조물을 관통하는 경우가 많으며, 구조물의 시공 초기에 발생하여 구조물의 내력, 수밀성 및 미관 등과 특히 장기적인 내구성능의 저하를 초래하므로 설계, 시공 및 관리 단계에서 면밀한 검토를 하여야 한다.¹⁾

일반적으로 수화열에 의한 온도 균열의 가능성을 검토하기 위하여 수화열 온도-응력 해석을 수행하게 되지만, 강재와 같이 재료 물성치가 일정하고 비교적 명확하게 알려진 재료와는 다르게 콘크리트의 물성치는 여러 불확실성을 내포하고 있다. 심지어는 동일한 강도의 콘크리트에 대해서도 사용재료 및 배합, 재령에 따라서 물성치들이 다르게 나타나는

등 재료 물성치의 불확실성 때문에 결과 또한 불확실성을 가지게 된다.

따라서, 본 연구에서는 본 연구자가 개발한 수화열 해석 전용 프로그램을 사용하였고,¹⁾ 수화열에 의한 온도-응력 해석에 사용되는 물성치들의 값을 변화시켜 해석하여 온도 관련 물성치들이 해석결과에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

2. 수화열 해석 유한요소 정식화

2.1. 열전도 지배방정식

내부 발열이 있는 고체내에서의 온도분포는 Fourier 법칙을 따르게 된다. 따라서, 미소체적요소에서의 열평형을 생각하여 열전달 편미분 방정식을 만들면 식(1)과 같다.^{3,5,6)}

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, $\alpha = k/\rho c$ 는 열확산율이고, q 는 콘크리트의 내부발열량을 나타낸다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
chasw@simmani.com

2.2. 초기조건과 경계조건

편미분 방정식의 형태로 주어진 3차원 열류 평형 방정식을 풀기 위해서는 열현상에 대한 물리적 상황에 적합한 초기조건과 경계조건이 주어져야 한다.

초기조건으로 시간이 0일 때의 물체의 온도조건에 대한 기지의 함수가 주어진다.^{5,6)}

$$T(x, y, z, t = 0) = f(x, y, z) \quad (2)$$

고정 온도 절점 조건에 해당하는 필수경계조건(essential boundary condition)은 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \\ x, y, z \text{ on } S_t \quad (3)$$

또한 표면에서 열류 출입량을 정의하는 대류경계 조건, 즉 자연경계조건(natural boundary condition)은 다음 식(4)로 정의된다.^{5,6)}

$$k \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = q_n(x, y, z, t) \\ x, y, z \text{ on } S_q \quad (4)$$

2.3. 콘크리트의 내부 발열과정

콘크리트의 발열과정을 모델링하기 위하여 식(5)와 같은 최대 온도 상승량과 반응속도에 따른 단열 온도상승곡선을 사용하였다.²⁾

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad (5)$$

여기서, $Q(t)$: 시간 t 일에서의 단열온도 상승량(°C)

Q_{∞} : 최대상승온도(°C)

r : 반응속도

t : 시간 (일)

2.4. 공간영역과 시간영역에서 차분화

열전달 문제를 유한요소법을 이용하여 해석하기 위해서 변분법을 적용한 후 전체좌표계의 절점 온도에 대하여 각각의 요소를 조합하면 식(6)과 같다.^{5,6)}

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{R\} \quad (6) \\ [K] = [K]^{cond} + [K]^{conv} \\ \{R\} = \{R\}^{heat} + \{R\}^{conv}$$

식(6)에서 $[C]$ 는 열용량 행렬, $[K]$ 는 열전도 행렬, $\{R\}$ 은 열하중벡터를 나타내고, 윗 첨자는 cond는 전도를, conv은 대류를, heat은 내부발열을 의미한다. 본 해석의 콘크리트 모델링에는 8절점 3차원 SOLID요소를 사용하였다.

시간에 대한 1계 도함수의 근사값을 얻기 위한 방법으로는 두 개의 연속적인 시간 단계에서 각 단계에서의 변수를 선형보간에 의해 가중평균해서 근사시키는 방법을 보편적으로 사용한다. α 값이 0이면 Euler의 전방차분법이 되고 1/2이면 중앙차분법 또는 Crank-Nicolson방법, 2/3이면 Galerkin방법, 1이면 후방차분법이 된다. 이러한 시간적분법은 다음 식(7)과 같이 표현된다.

$$[\hat{K}]\{T\}_{n+1} = \{\hat{R}\} \quad (7)$$

여기서, $[\hat{K}] = [C] + \alpha \Delta t_{n+1} [K]$

$$\{\hat{R}\} = ([C] - (1-\alpha)\Delta t_{n+1} [K])\{T\}_n \\ + \Delta t_{n+1} (\alpha\{R\}_{n+1} + (1-\alpha)\{R\}_n)$$

3. 수화열 및 온도응력 해석모델 및 조건

콘크리트 표준 시방서 매스콘크리트 편에 따르면 일반적인 콘크리트 구조물에 쓰이는 콘크리트의 열전도율은 2.2~2.4kcal/m·hr·°C, 비열은 0.25~0.30 kcal/kg·°C 정도로 제시하고 있다.²⁾ 그리고, 콘크리트의 단위시멘트량에 따라 단열 상승 온도가 정해지며 그 값은 타설온도에 따라 달라지게 된다. 즉, 수화열 온도해석에 필요한 물성치인 열전도율, 비열, 타설온도에 따라서 수화열 온도 및 응력 해석결과가 변화한다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 범위의 열전도율과 비열, 그리고 타설 온도에 따른 해석을 수행하여 그에 따른 결과분석을 수행하고자 한다.

수화열에 의한 균열은 균열발생형태에 따라서 표면부에서 균열이 발생하는 내부구속에 의한 균열과 중심부에서 균열이 발생하는 외부구속균열로 나눌 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 그림 1과 같이 기초를 타설한 후에 벽체를 타설하는 구조물을 가정하여, 내부구속이 지배적인 대표적인 구조물인 지반위에 타설되는 기초구조물과 외부구속이 지배적인 대표적인 구조물인 기타설 슬래브 위에 타설되는 벽

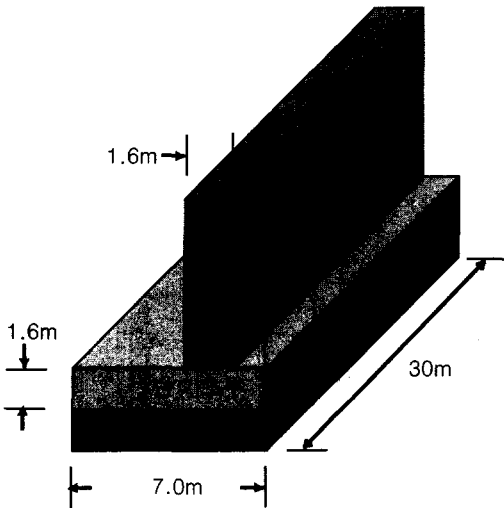


Fig. 1. Geometry of analysis model

체구조물을 해석모델로 사용하였다.

- 모델 1. 지반 위의 기초 콘크리트 타설하는 기초부 모델
- 모델 2. 기타설 콘크리트 위의 벽체 콘크리트를 타설하는 벽체부 모델

해석에 사용된 콘크리트 배합은 설계기준강도 270 kgf/cm²으로부터 단위시멘트량 365kg/m³의 보통시멘트를 사용하는 것으로 가정하였다. 타설온도는 10, 20, 30°C를 해석변수로 정하였으며, 외기온도는 타설온도와 동일한 온도로 가정하고 해석을 수행하였다.

콘크리트 내부발열량은 시멘트종류, 단위시멘트량 및 타설온도에 따라 다르며,²⁾ 다음 식(8)은 해석에 사용된 타설온도에 따른 단위온도상승곡선이다. 또한 해석에 사용된 재료의 열적, 역학적 물성값은 표 1에 보인 바와 같고, 기하학적 모델은 대칭성을 이용하여 1/2모델을 사용하였다.

Table 1. Material properties used in analysis

물 성	사용재료	콘크리트	지반
비열(kcal/kg · °C)		0.25 - 0.30	0.20
열전도율(kcal/m · hr · °C)		2.2 - 2.4	1.7
대류계수(kcal/m ² · hr · °C)		12	12
타설온도 및 외기온도(°C)		10, 20, 30	10, 20, 30
압축강도(kgf/cm ²)		270	-
탄성계수(kgf/cm ²)		246000	5000
열팽창계수(1/°C)		10.0 × 10 ⁻⁶	10.0 × 10 ⁻⁶
포아송비		0.18	0.18

$$\text{타설온도 } 10^{\circ}\text{C}, T = 54.80(1 - e^{-0.68t}) \quad (8a)$$

$$\text{타설온도 } 20^{\circ}\text{C}, T = 53.15(1 - e^{-1.35t}) \quad (8b)$$

$$\text{타설온도 } 30^{\circ}\text{C}, T = 52.15(1 - e^{-1.80t}) \quad (8c)$$

4. 해석수행 및 결과분석

4.1. 열전도도 및 비열에 따른 해석

주요 해석변수에 대한 결정을 위하여 열전도도 K = 2.2, 2.4kcal/m · hr · °C와 비열 C=0.25, 0.3kcal/kg · °C 인 두 변수의 값을 조합하여 타설온도 20°C인 경우에 대한 해석을 수행하였다.

4.1.1. 모델 1 - 내부구속이 지배하는 구조물

내부구속이 지배하는 기초 구조물에 대한 해석결과 최대온도발생시점의 온도분포는 그림 2와 같으며, 구조물의 중앙부에서 최대온도가 발생한다. 또한, 최대 응력발생시점의 응력분포를 그림 3에 나타내었으며, 구조물의 표면부에서 인장응력이 발생하는, 즉 내부구속이 지배하는 구조물의 특징을 나타내고 있다.

그림 4와 그림 5에 4가지의 해석변수에 대하여 최대온도이력과 최대응력이력을 나타내었다. 비열과 열전도율의 크기에 따라 콘크리트의 온도 및 응력이력이 변화하고, 비열이 클수록 온도와 응력이 크게 나타났으며 또한, 열전도율은 낮을수록 온도와 응력이 크게 나타남을 알 수 있다.

4.1.2. 모델 2 - 외부구속이 지배하는 구조물

외부구속이 지배하는 대표적인 구조물로 벽체 구



Fig. 2. Temperature distribution when maximum temperature occurred

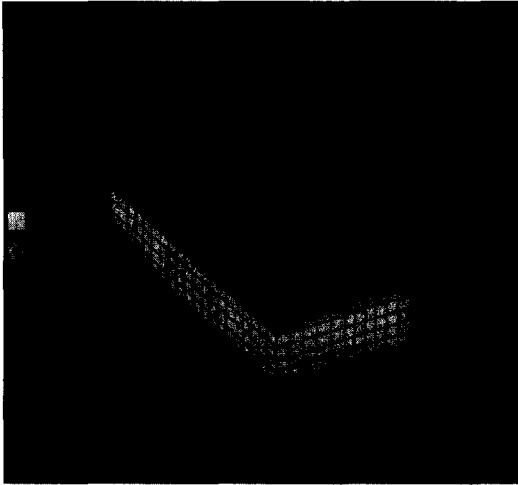


Fig. 3. Thermal stress distribution when maximum stress occurred

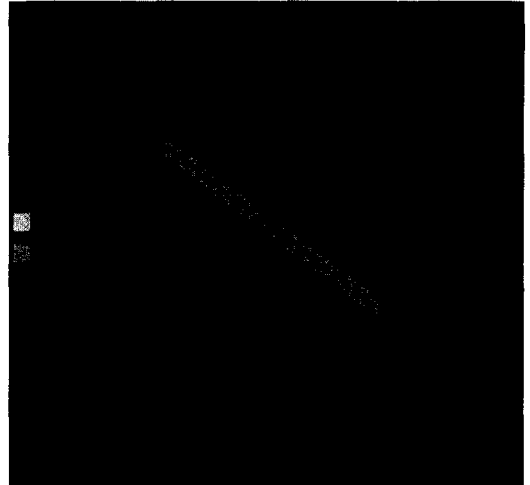


Fig. 6. Temperature distribution when maximum temperature occurred

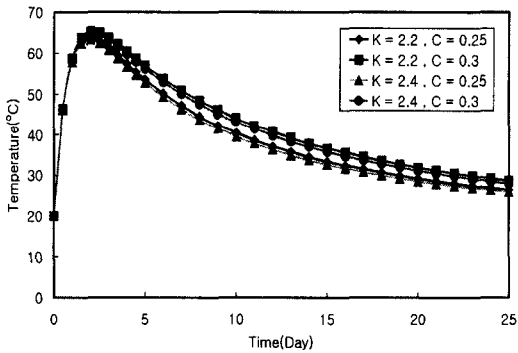


Fig. 4. Temperature history of maximum temperature

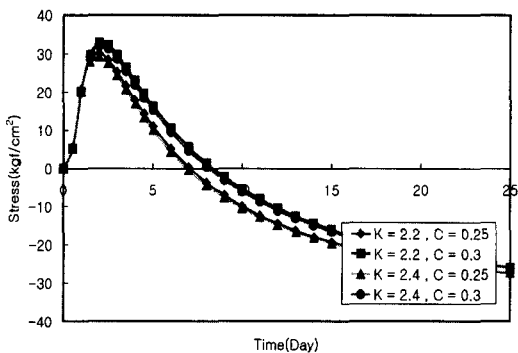


Fig. 5. Stress history of maximum stress

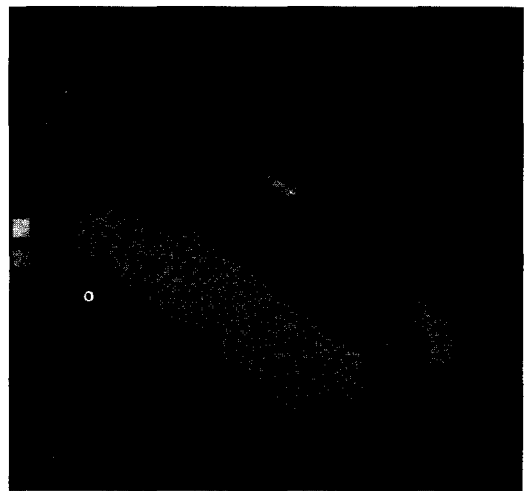


Fig. 7. Thermal stress distribution when maximum stress occurred

구조물을 들 수 있고, 이에 대한 해석결과 최대온도 발생시점의 온도분포는 그림 6과 같으며, 구조물의 중앙부에서 최대온도가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 최대응력발생시점은 온도하강이 종료하는 시점

으로, 이때 응력분포는 그림 7과 같으며 구조물의 중앙부에서 인장응력이 발생하는 경향을 보여주고 있다.

4가지의 해석변수에 대하여 최대온도이력과 최대응력이력은 그림 8과 그림 9에 보인 바와 같다. 벽체구조물의 온도분포에서 모델 1의 경우와 마찬가지로 열용량과 전도도는 온도분포에 반대된 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 비열이 클수록 온도 상승량이 크며, 열전도율은 낮을수록 온도 상승량이 커진다.

응력분포의 경우 양생시간의 경과에 따라 대소값의 경향이 바뀔 수 있다. 즉, 후반부에는 모델 1과 같이 비열이 크고 열전도율이 낮을수록 응력이

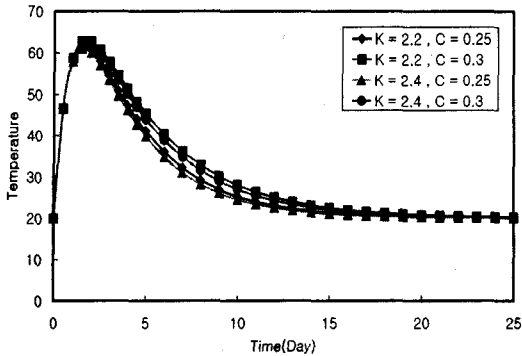


Fig. 8. Temperature history of maximum temperature

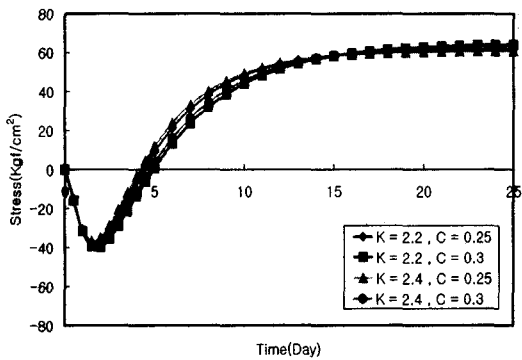


Fig. 9. Stress history of maximum stress

크게 나타났으나 해석 초반부에는 반대의 경향을 나타낸다. 그러나, 외부구속균열의 발생 유무 및 크기 등을 결정하는 인자는 해석 초·중반부의 결과가 아니라 응력이 가장 크게 발생하는 해석 후반부의 결과이므로 외부구속이 지배적인 모델 2 구조물의 경우도 모델 1에서의 경향과 같이 비열이 크고 열전도율이 낮을수록 응력이 크게 나타났다.

4.1.3. 해석 결과 분석

열전도도 및 비열에 대한 민감도 해석을 통하여 열전도도 보다는 비열에 의하여 온도 및 응력 해석 결과의 변동이 크다는 것을 알 수 있다. 해석 결과를 통해 비열이 작고, 열전도도가 큰 경우가 응력이 가장 작게 나타나고, 비열이 크고, 열전도도가 낮은 경우가 응력이 가장 크게 나타난다는 결론을 얻었다.

4.2. 타설온도에 따른 해석

4.1절의 해석을 통하여 비열이 작고, 열전도도가 큰 경우가 응력이 가장 작게 나타나고, 비열이 크고, 열전도도가 낮은 경우가 응력이 가장 크게 나타난다

다는 결론을 얻었다.

따라서 ① 열전도도가 크고, 비열이 작은 경우($K=2.4, C=0.25$) ② 열전도도가 작고, 비열이 큰 경우($K=2.2, C=0.3$)의 두 가지에 대한 경우를 ③ 열전도도, 비열 각각 중간값을 사용한 경우($K=0.23, C=0.275$)와 비교하여 각 타설 온도별 해석을 수행하였다.

4.2.1. 모델 1 - 내부구속이 지배하는 구조물

타설온도 10, 20, 30°C인 경우에 대하여 수화열

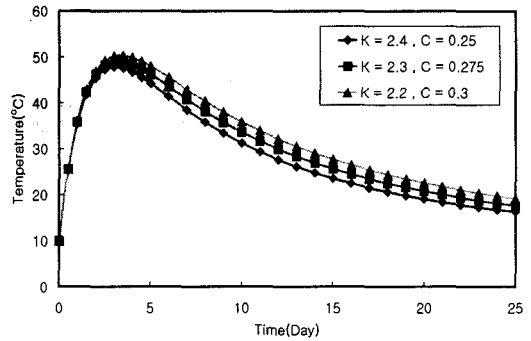


Fig. 10. Temperature history (pouring temperature 10°C)

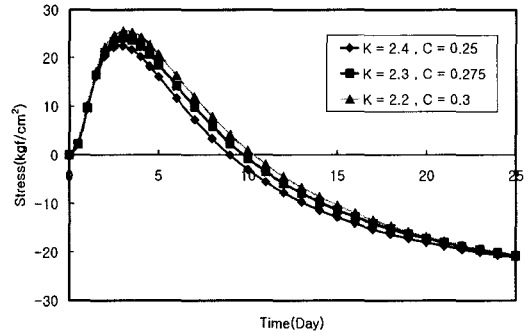


Fig. 11. Thermal stress history (pouring temperature 10°C)

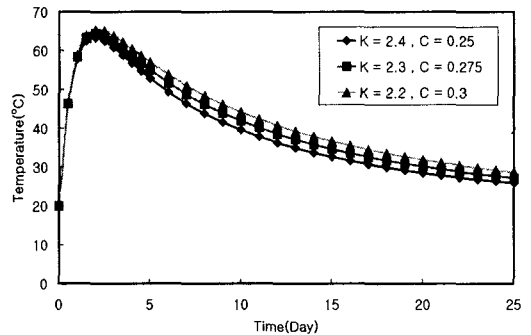


Fig. 12. Temperature history (pouring temperature 20°C)

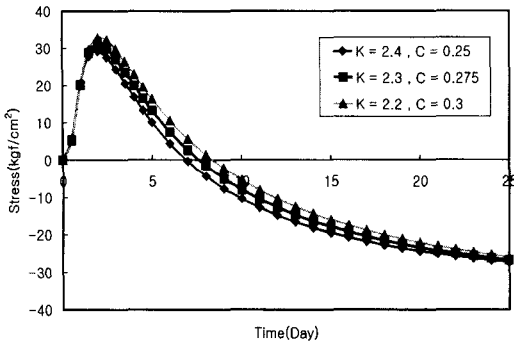


Fig. 13. Thermal stress history (pouring temperature 20°C)

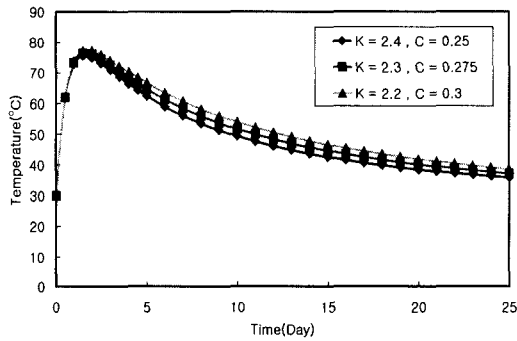


Fig. 14. Temperature history (pouring temperature 30°C)

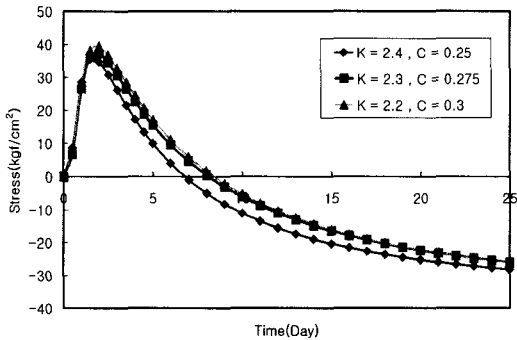


Fig. 15. Thermal stress history (pouring temperature 30°C)

해석 결과는 각각 그림 10, 11, 그림 12, 13 및 그림 14, 15에 나타낸 것과 같다.

해석결과 최대온도 및 최대인장응력의 값이 ① 열전도도가 크고, 비열이 작은 경우인 경우 가장 작게 나타났으며, ② 열전도도가 작고, 비열이 큰 경우에 대한 결과가 가장 크게 나타났다. 한편, 모델 1 구조물의 해석변수의 변화에 의한 최대온도 및 최대인장응력의 민감도를 타설온도에 따라 표 2에 나타내었고, 온도 변화율보다 응력 변화율이 2배 이상

Table 2. Variation of maximum temperature and stress and analysis model 1

타설온도	최대온도변화율(%)	최대인장응력변화율(%)
10°C	-2.6 ~ +2.6 (5.2)	-7.2 ~ +6.8 (14.0)
20°C	-1.7 ~ +1.4 (3.1)	-6.1 ~ +5.4 (11.5)
30°C	-1.2 ~ +1.0 (2.2)	-4.5 ~ +5.9 (10.4)

큰 것을 알 수 있으며, 타설온도가 높을수록 최대값의 변화율이 작아짐을 알 수 있다.

4.2.2. 모델 2 - 외부구속이 지배하는 구조물

타설온도 10, 20, 30°C인 경우에 대하여 수화열 해석 결과는 각각 그림 16, 17, 그림 18, 19 및 그림 20, 21에 나타낸 것과 같다.

온도해석의 경우 모델 1과 마찬가지로 ① 열전도도가 크고, 비열이 작은 경우인 경우 최대값이 가장 작게 나타났으며, ② 열전도도가 작고, 비열이 큰 경우에 대한 결과가 가장 크게 나타났다.

응력해석의 경우 해석시점에 따라 초-중반과 후반의 경향이 반대로 나타났다. 그러나 4.1절의 해석결과와 같이 외부구속균열의 발생 유무 및 크기 등

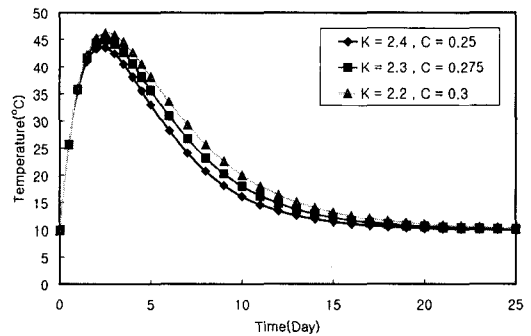


Fig. 16. Temperature history (pouring temperature 10°C)

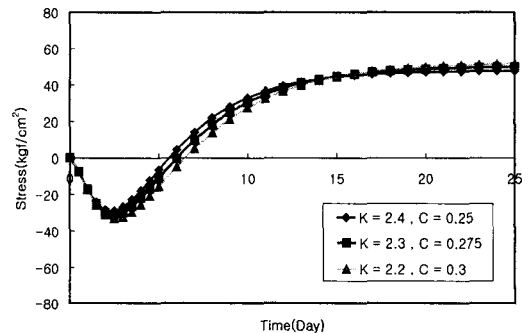


Fig. 17. Thermal stress history (pouring temperature 10°C)

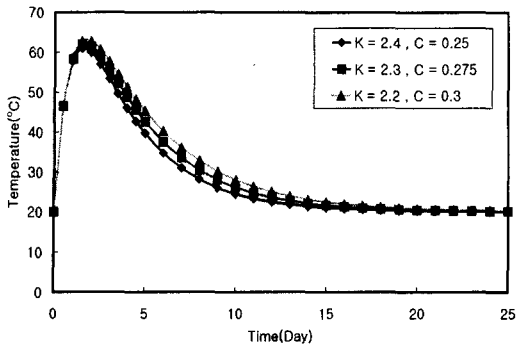


Fig. 18. Temperature history (pouring temperature 20°C)

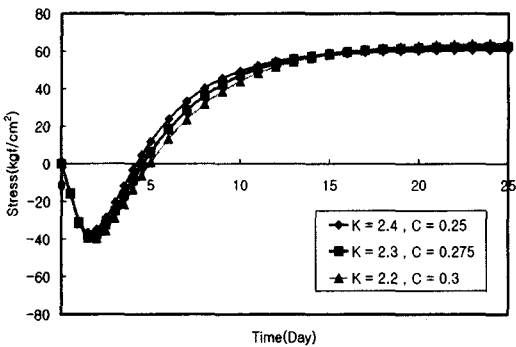


Fig. 19. Thermal stress history (pouring temperature 20°C)

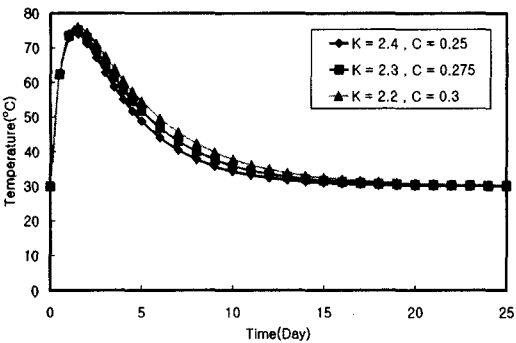


Fig. 20. Thermal stress history (pouring temperature 30°C)

을 결정하는 인자는 해석 초·중반부의 결과가 아니라 응력이 가장 크게 발생하는 해석 후반부의 결과이므로 외부구속이 지배적인 모델 2 구조물의 경우도 모델 1에서의 경향과 같이 비열이 크고 열전도율이 낮을수록 온도 응력이 크게 나타났다.

한편, 모델 2 구조물의 타설온도에 따른 최대 온도 및 최대인장응력의 민감도는 표 3에 나타난 것과 같다. 타설온도에 따라 최대 온도 변화율보다 최대 응력 변화율이 크게 나타남을 알 수 있으며, 타

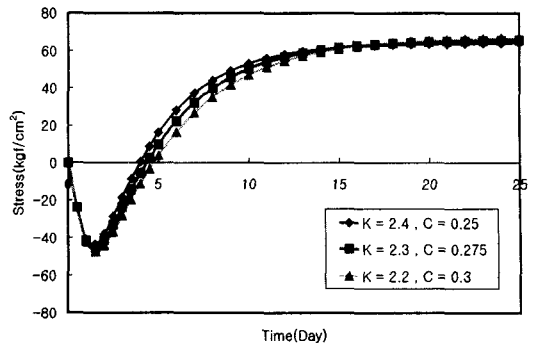


Fig. 21. Thermal stress history (pouring temperature 30°C)

Table 3. Variation of maximum temperature and stress and analysis model 2

타설온도	최대온도변화율(%)	최대인장응력변화율(%)
10°C	-3.3 ~ +2.8 (6.1)	-4.4 ~ +3.5 (7.9)
20°C	-1.6 ~ +1.3 (2.9)	-3.1 ~ +2.4 (5.5)
30°C	-1.5 ~ +1.3 (2.8)	-2.3 ~ +1.8 (4.1)

설온도가 높을수록 최대값의 변화율이 작아짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 수화열에 의한 온도-응력 해석에 사용되는 물성치들의 값을 변화시켜 개발된 전용해석 프로그램을 이용하여 온도 관련 물성치들이 해석결과에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 내부구속과 외부구속이 지배적인 콘크리트 구조물에 대하여 열전도도, 비열의 값을 변화시켜 해석을 수행한 결과, 열전도도보다는 비열이 해석결과에 많은 영향을 미치며, 비열이 클수록, 열전도도가 작을수록 구조물에 발생하는 최대 상승 온도 및 최대 인장응력의 값이 커진다.

2) 구조물에 발생하는 최대인장응력의 값은 해석 시간에 따라 서로 반대의 경향을 나타내지만, 외부구속에 의한 균열의 발생 유무 및 크기 등을 결정하는 인자는 해석 초·중반부의 결과가 아니라 응력이 가장 크게 발생하는 해석 후반부의 결과이므로 외부구속이 지배적인 구조물의 경우도 비열이 크고 열전도율이 낮을수록 최대인장응력이 커진다고 볼 수 있다.

3) 타설온도가 최대 상승 온도의 변화에 미치는 영향을 분석한 결과, 전도도 및 비열의 값의 변화가

최대 온도보다는 최대인장응력에 많은 영향을 미칠 수 있다. 또한, 내부구속이 지배적인 구조물의 최대인장응력 변화율이 타설온도의 변화에 의한 영향을 가장 크게 받음을 알 수 있다. 따라서 내부 구속이 지배하는 구조물인 경우 타설온도 관리에 의한 온도균열제어 대책이 유효할 수 있다.

참고문헌

1) 차수원, 초기재령 콘크리트의 수화과정 모델링

과 온도 및 습도응력 해석, 박사학위논문, 서울대학교, 1999.

2) 건설교통부, 콘크리트표준 시방서, 2000.

3) 이태식 외, 열전달, 회중당, 1992.

4) ACI 207.2R-90, "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete," ACI Manual of Concrete Practice, 1990.

5) J. N. Reddy and D. K. Gartling, The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics, CRC Press, 1994.

6) K. J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice-Hall, 1996.