

철근의 영향을 고려한 수화열 유한요소해석

윤동용¹⁾, 양옥빈²⁾, 민창식^{3)*}

¹⁾INI STEEL, ²⁾도담 엔지니어링, ³⁾동국대학교 토목환경공학과

(2004년 4월 15일 원고접수, 2004년 12월 19일 심사완료)

Finite Element Analysis on Heat of Hydration with Reinforcing Steel Bars

Dong-Yong Yoon^{1)*}, Ok-Bin Yang²⁾, and Chang-Sik Min³⁾

¹⁾INI STEEL co., 1, Songhyun-dong, Dong-gu, Incheon, 401-712, Korea

²⁾Dodam E&C co.,Ltd, Dongan-gu Gwanyang-dong 799, Anyang-si Gyeonggi-do, 431-060, Korea

³⁾Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul, 100-715, Korea

(Received April 15, 2004, Accepted December 19, 2004)

ABSTRACT

In the concrete structures, the magnitude and distribution of the temperature due to the heat of hydration are related to the thermal properties of each component composed of the concrete, the initial temperature, the type of formwork, and the ambient temperature of exposed surfaces. Even though the reinforcing steel bar has completely different thermal properties, it has been excluded in the thermal analysis on the concrete structures. In this study, finite element analysis was performed on the concrete structures including the reinforcing steel in order to investigate their effect on temperature and stress distribution due to the heat of hydration. As the steel ratio increased, the maximum temperature and the internal-external temperature difference decreased by 32.5% and 10.0%, respectively. It is clear that the inclusion of reinforcing steel bars on the heat of hydration analysis is indispensable to obtain realistic solutions for the prediction of the maximum temperature and stresses

Keywords : finite element analysis, heat of hydration, steel ratio, thermal property

1. 서 론

콘크리트는 수화작용에 의해서 상당한 양의 수화열이 발생하는데, 두께가 얇고 공기 중에 접한 면이 많은 구조물은 내부에서 발생하는 수화열을 외부로 비교적 쉽게 전달하기 때문에 그렇게 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 규모가 큰 구조물에서는 콘크리트의 내부에서 발생하는 수화열과 이를 외부로 방출하는 표면에서 온도차가 커지게 되고, 이 온도 변화로 인하여 체적변화가 일어난다. 이러한 체적 변화가 구속됨으로써 Fig. 1과 같은 원리에 의해 구속응력이 발생하는데, 변형의 구속은 매스콘크리트 구조물의 온도응력 발생 및 크기에 큰 영향을 미친다. 수화열에 의한 온도응력은 구조물에 심각한 균열을 유발할 수 있기 때문에 수화열의 전달과 분포 등을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다.

수화열에 영향을 미치는 요인으로 시멘트의 종류, 타설 시 온도, 혼화재료의 종류, 콘크리트의 열특성(열전도율, 비열, 밀도, 발열량) 등이 있다. 특히 콘크리트의 열특성을 지배하는 주요한 성분은 골재의 특성이다. 그러나 철근콘크리트 구조물에서 배치되는 철근의 총량 역시 무시할 수 없을 정도로 많으며, 철근의 열특성 또한 콘크리트와는 큰 차이를 보인다. 특히 철근의 열전도율이 콘크리트에 비해 30~60 배 정도 큰 값을 갖는데, 구조물 내부에서 열 전달속도에 영향을 미칠 뿐만 아니라 시공 연결을 위해 외부로 노출되는 철근은 마치 파이프쿨링의 역할을 수행할 수 있어 수화열에 의한 구조물 내부의 최대 온도를 감소시킬 것으로 예상된다. 그럼에도 수화열의 전달 및 응력 검토에서 철근의 영향을 고려한 연구는 아직까지 미비하다. 기존의 강석화 등¹⁾의 실험연구나 김은겸 등²⁾, 김진근 등^{3,4)} 오병환 등⁵⁾의 유한요소해석연구는 콘크리트와 골재 등의 재료적 측면이나 파이프쿨링의 효과적인 예측, 요소 개발 등에 주안점이 맞추어져 진행되었다. 콘크리트의 열 해석을 수행할 때 열특성 값에 철근비를 반영하는 방법도 가능하지만, 철근이 구조물 전체에 균질하게 분포하는 것

* Corresponding author

E-mail : csmin@dongguk.edu

©2005 by Korea Concrete Institute

이 아니라 특정한 위치에 배치되기 때문에 정확한 예측을 위해서는 철근을 콘크리트와 구분하여 고려한 해석이 바람직하다.

이에 본 연구에서는 철근이 구조물 내부에서 수화열의 확산과 온도분포, 그리고 그로 인한 온도응력에 어떤 영향을 미치는지에 대해서 중점적으로 검토하였다. 연구는 상용 유한요소해석 프로그램⁷⁾을 이용하였으며, 모델은 실제 시공된 교각을 대상으로 하였다. 끝으로, 본 해석연구 결과를 바탕으로 온도균열을 제어하기 위해 배치되는 온도 철근량의 감소가 가능한지도 검토하였다.

2. 수화열의 분포와 온도응력의 특성

2.1 수화열 분포에 영향을 미치는 요인

수화반응에 의해 발생하는 열량은 콘크리트 내부의 열전도와 서로 다른 물질간의 열전달에 의해 열의 흐름이 발생되는데, 여기에는 콘크리트의 열전도율, 비열 및 대류계수 등이 영향을 미치게 된다. 콘크리트의 열전도율(thermal conductivity)은 2.2~2.4 kcal/mhr°C의 분포를 보이는데, 콘크리트를 구성하는 재료의 성질에 의해 지배되며 각각의 재료의 특성값에 중량비를 반영한 평균값으로 결정할 수 있다. 단위중량당 단위온도를 변화시키는데 필요한 열량의 크기인 비열은 콘크리트의 함수비와 온도 증가에 따라 상당히 증가하는 경향을 보인다. 콘크리트의 비열(specific heat)은 일반적으로 0.25~0.3 kcal/kg°C이다.

대류계수(heat convectivity)는 콘크리트 구조물과 대기 중의 공기 사이에 이루어지는 열흐름의 특성을 나타내는 값이다. 따라서 콘크리트의 대류계수는 표면 부근의 온도 분포에 큰 영향을 받으며, 콘크리트의 수분상태에 따라 민감하게 변화한다. 현장에서의 일사량, 수분증발, 잠열, 바람, 양생수 살포 여부, 보온재 유무 등과 같은 많은 인자의 영향을 받는데, 이들 값들은 시시각각으로 변하기 때문에 정확하게 파악하기는 곤란한 것이 사실이다. 따라

서 동일 현장을 대상으로 타설시의 양생조건이 크게 변하지 않는다는 가정하에 각 현장조건에 대한 대류계수를 그 현장의 고유한 열특성 값으로 취급한다. 일반적으로는 현장의 평균 풍속과 인위적인 양생 조건만을 고려한다.

본 연구에 적용한 콘크리트와 암반의 열특성 값은 김은겸 등²⁾에서 적용한 값을 사용하였으며, 철근의 열특성 값은 콘크리트 표준시방서⁶⁾를 적용하였다. Table 1에 본 해석연구에 적용된 열특성 값을 정리하였다.

2.2 온도응력에 대한 영향요인

온도응력의 발생 원리는 Fig. 1에서 소개한 것처럼 콘크리트의 수화열로 인한 내부온도의 상승과 외부로의 유출로 인한 온도저하가 동시에 발생하여 각 위치에서 체적변화를 일으키고, 기초판이나 기설 콘크리트 등에 의해 체적 변화가 구속됨으로써 구속 응력이 발생되게 된다. 이러한 구속 응력은 구속변형률과 탄성계수에 의해 결정되며 단면의 위치에 따라 응력의 크기가 다르게 나타난다. 탄성계수는 시간에 따른 함수가 되지만 본 연구에서는 프로그램⁶⁾ 해석모델의 한계로 일정한 값으로 고정하였다. 또한 체적 변화는 콘크리트의 열팽창 계수와 온도 변화량에 의해 결정되는데, 콘크리트를 구성하는 시멘트 페이스트와 골재의 열팽창 계수는 서로 다른 값을 갖는다. 일반

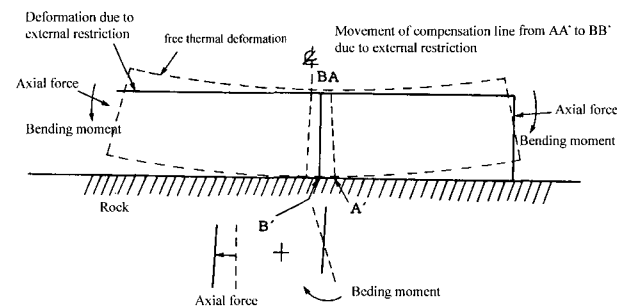


Fig. 1 Deformation due to external restriction⁷⁾

Table 1 Thermal properties of materials

Property	Thermal conductivity (kJ/m hr °C)	Specific heat (kJ/m ³ °C)	Heat convectivity (kJ/m ² hr °C)		Unit weight (N/m ³)
			surface	form	
Concrete	8.14	2,058.3	50.21	20.92	23,000
Base rock	8.12	2,719.6	-		26,000
Steel	242.5	3,619.8	1,372.4		75,000

Table 2 Mechanical properties of materials

Properties	Compressive strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Coefficient of expansion (/°C)	Poisson's ratio
Value	25	2.3 × 10 ⁴	10 × 10 ⁻⁶	0.167

적으로 시멘트 페이스트의 열팽창계수는 $10\sim 20\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이며, 골재는 $6\sim 12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도를 나타낸다. Table 2에서는 본 연구에서 적용한 콘크리트의 역학적 특성값을 정리하였다.

일반적으로 열 해석문제에 있어서의 하중조건은 내부 저장된 열량과 복사, 대류 등에 의한 외부로부터의 열 유입이 대표적이다. 본 연구에 있어서 수화열 해석에 대한 하중조건은 내부에서 발생하는 수화발열량과 구조물 표면에서 외부 공기로 유출되는 대류계수만을 고려하고, 복사에너지에 대한 조건은 무시하였다.

2.3 단열온도 상승식

시멘트의 수화열에 의한 발열온도의 이력을 추정하는 식을 단열온도 상승식이라고 하며, 이를 정확하게 산정하는 것은 온도 해석에 있어서 대단히 중요한 요소이다. 콘크리트 표준시방서⁶⁾의 단열온도 상승식은 다음과 같다.

$$T = K(1 - e^{-at}) \quad (1)$$

여기서 t 는 재령(day)이고 K 는 최종단열온도상승량, a 는 온도상승속도이다. 본 연구에서는 김은겸 등²⁾의 연구에서 단열온도 상승 실험을 통하여 결정한 $K=45.5^{\circ}\text{C}$, $a=0.86$ 를 적용하였다. 콘크리트 내부의 발열량은 식(1)에 의해 계산된 내부 발열 온도를 시간에 대하여 미분한 후 체적적열 용량($\rho_c C_c$)을 곱하여 얻을 수 있다. 따라서 내부 발열량은 다음 식과 같다.

$$q = \frac{\rho_c C_c \Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{24} \rho_c C_c \alpha K e^{-\frac{at}{24}} \quad (2)$$

여기서, ρ_c : 콘크리트의 밀도
 C_c : 콘크리트의 비열

Fig. 2는 본 연구에 적용한 단열온도 상승식에서 시간에 따른 콘크리트 내부의 발열량을 플로팅한 것이다.

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 일반

본 연구에서는 범용구조해석 프로그램인 ADINA⁷⁾를 이용하여 수화열에 관한 해석과 이로 인한 온도응력 해석을 수행하였다. 해석과정은 시간 변화에 따른 온도분포 해석을 선행하고, 그 결과에서 온도를 하중으로 입력하여 다시 응력에 관한 해석을 수행하게 된다. 본 연구에 사용

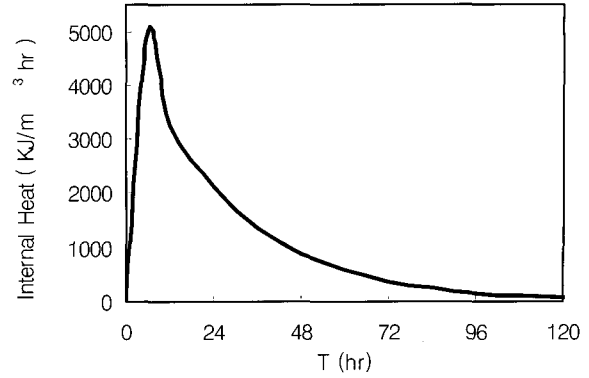


Fig. 2 Internal heat generation

한 유한요소 프로그램에서는 다음과 같은 열흐름 평형 방정식을 적용하고 있다.

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{Q\} \quad (3)$$

여기서, $[C]$: 열용량행렬
 $[K]$: 열전도행렬
 $\{Q\}$: 온도 하중벡터

한편 ADINA⁷⁾에서는 위와 같은 문제의 해를 구하기 위해서 Euler Backward 적분법과 비정상해석(transient analysis) 기법을 적용하고 있다.

3.2 해석대상 구조물

3.2.1 모델

본 연구의 해석에 적용한 모델은 논산~당진간 고속도로 제 x 공구 xxx 교의 교각 기초를 선정하였다. 이 대상 모델은 교량의 교각에서 많이 시공되고 있는 전형적인 구조물이다. Fig. 3과 4는 해석 대상 교각의 철근 배근도다.

3.2.2 철근비 및 2차원 환산 두께의 계산

본 연구에서는 철근비에 따른 수화열의 분포 양상을 파악하기 위해서 철근비를 0%, 1.4%, 1.6%, 1.8%로 변화시켜가면서 유한요소해석을 수행하였다. 대상 구조물의 기초부에서 사용된 콘크리트 체적대비 철근의 체적비(이하 철근비)만을 변수로 설정하고 나머지 조건은 고정시켰다. 철근비 계산에는 기초부의 주철근뿐만 아니라, 압축철근, 스테럽, 기둥부의 축방향철근, 띠철근 등 기초부에 배근된 모든 철근의 체적을 고려하였다.

2차원 평면요소를 사용하여 해석하기 위해 철근의 전체 체적을 평면에서의 철근 두께로 환산하였다. Figs. 3과 4

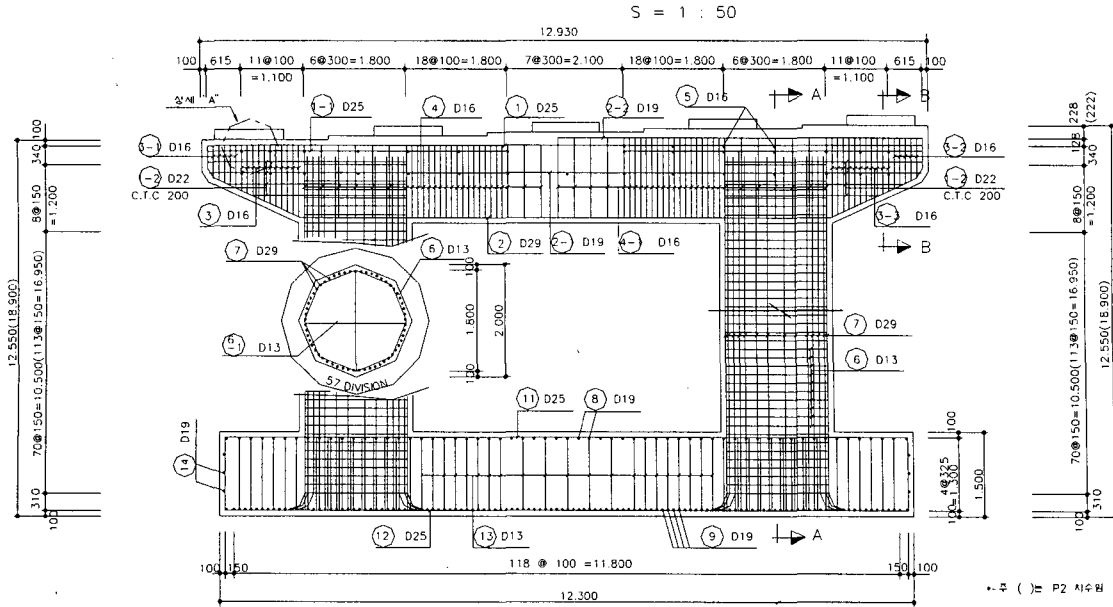


Fig. 3 Arrangement of reinforcing bar(Front view)

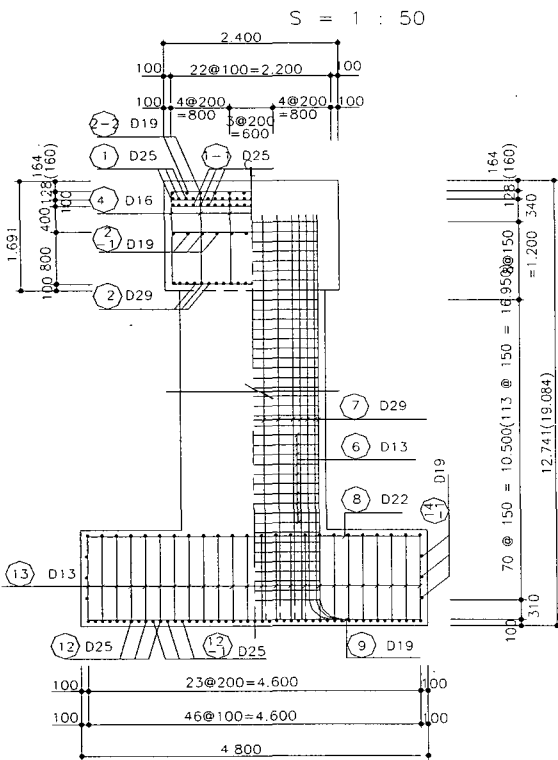


Fig. 4 Arrangement of reinforcing bar(Side view)

에서 보는 것처럼 실제 구조물에서 교축방향 주철근과 교축 직각방향 주철근은 동일한 위치에 서로 다른 방향으로 배근되었기 때문에, 2차원 환산시 하나의 철근으로 모델링 하였다. 2차원 환산의 예로 주철근을 보면, 교축방향으로 10cm 간격으로 46-D25 철근이 배근되어 있으므로 5.067

× 46/440 = 0.530 cm의 두께를 갖는다. 여기서 5.067은 철근 1개의 단면적이고, 440은 바닥판의 폭이다. 교축직각방향은 10cm 간격으로 121-D19의 주철근이 배치되어 있으므로 $2.865 \times 121 / 1,210 = 0.287$ cm가 되므로 2차원 환산단면에서 주철근의 최종 두께는 $0.530 + 0.287 = 0.817$ cm가 된다. 같은 방법을 압축철근이나 스테럽 등의 모든 철근에 적용하여 환산단면에서의 두께를 결정하였다.

Fig. 5는 유한요소해석에 사용된 기초 암반, 콘크리트, 철근으로 구성된 구조물의 2차원 모델링을 보여주고 있다. 본 연구에서는 모델링된 구조물은 콘크리트 요소와 암반 요소, 그리고 철근 요소로 구성되었다. 콘크리트, 암반, 철근의 모든 요소에 대하여 8절점 2-D 전도요소가 동일하게 적용되었으며, 각 방향에 대하여 5cm 간격으로 분할하였다. 따라서 1,542개의 콘크리트 요소, 2,460개의 암반 요소, 472개의 철근요소가 이용되었다.

3.2.3 초기조건 및 경계조건

수화열 해석에 있어서 초기 조건은 굳지 않은 콘크리트의 타설 온도 및 각 재료의 온도, 그리고 주변 대기의 온도 등이다. 해석에서는 콘크리트의 타설 온도와 철근의 초기온도를 동일하게 20℃로 가정하였다. 그리고 기초부가 타설되는 지반암의 초기 온도는 10℃, 대기의 온도는 17℃로 가정하였다.

경계조건은 구조물의 표면부에서 설정되는 열특성으로서 임의의 매질과 대기 중 공기의 열전달 정도를 나타내는 대류계수에 의해서 정의된다. Fig. 5에서 윗면(AB)은 콘크리트가 최초 타설되는 시점으로부터 완전 경화시까지 대기 중에 완전 노출된 상태로 설정하였고, 측면(BD)는

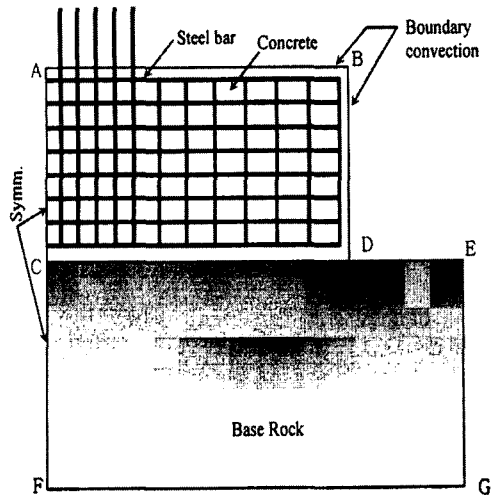


Fig. 5 Finite element model

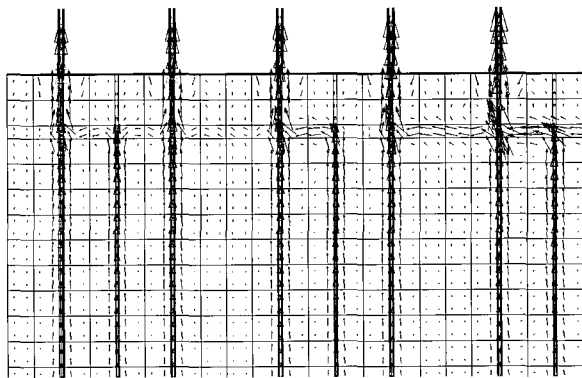


Fig. 6 Thermal vector flow

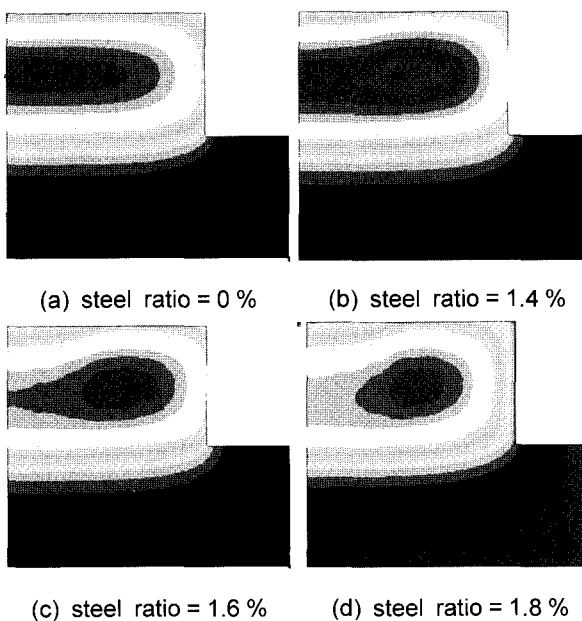


Fig. 7 Temperature distribution after 48 hours

최초 타설시에는 거푸집을 설치하고 이후 7 일(168 hr) 뒤에 거푸집을 제거하여 대기 중에 노출되는 것으로 하였다. 기타 대칭면과 암반의 표면부는 열의 전달이 전혀 없는 단열 조건으로 가정하였다. 그래서 윗면(AB)의 열전달 계수로 $50.21 \text{ kJ/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$, 거푸집이 설치된 측면(BD)의 열전달 계수는 7 일 동안은 $20.92 \text{ kJ/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 이 적용되고, 그 이후로는 거푸집을 제거한다는 가정하에 윗면과 동일한 외기 대류계수 값이 사용되었다. 또한, 교각 기둥의 압축 철근은 시공 과정에서 외부에 노출된 상태로 기초부의 콘크리트 타설이 이루어지기 때문에 공기 중에 노출된 상태로 모델링 되었으며, 외기 대류계수는 $1,372.35 \text{ kJ/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 이다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 열흐름의 전달 양상

Fig. 6은 유한요소 해석을 통하여 얻어진 열흐름의 전달 양상을 벡터량으로 보여주고 있다. Fig. 6에서 화살표의 길이는 상대적인 벡터량으로서 콘크리트에 비해서 철근에서의 열흐름 속도가 대단히 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 열전달에 있어서 콘크리트에 비해 철근이 동일한 시간내에 훨씬 많은 열량을 전달하고 있으며, 이로 인해 구조물 전체의 온도 분포는 철근을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 분명한 차이를 보이고 있다. 또한 외부로의 열 유출 역시 철근을 고려함으로써 무시할 수 없는 양의 열이 철근을 통해서 외부로 유출된다. 따라서 철근은 내부에서 발생하는 최대온도를 감소시키는데 상당한 역할을 수행하는 것으로 판단된다.

4.2 철근비에 따른 온도분포

Fig. 7은 각각 유한요소 해석을 수행하여 얻어진 48시간에서의 각 철근비에 따른 온도 분포 양상을 보여준다. 모든 철근비에 대하여 최대온도는 48 시간에서 발생하였으며, 철근을 고려하지 않았을 때는 중심부의 최대온도는 55.0°C 가 발생하였다. 철근비가 1.4%, 1.6%, 1.8%로 증가할 때 중심부의 최대온도는 각각 52.5°C , 50.1°C , 47.2°C 로 감소하였다. 온도 분포는 예상대로 중심부에서 최대온도가 발생되고, 외부 표면으로 갈수록 온도가 점차 낮아지는 등온선의 분포를 보이고 있다.

철근을 고려하지 않은 철근비 0%의 모델은 외부로 갈수록 일정한 비율로 온도가 감소하고 있다. 이는 콘크리트의 낮은 열전도성으로 인해 외부로 유출되는 열량에 비해 내부에서 발생하는 열량이 외부로 전달되는 속도가 느리기 때문에 발생하는 전형적인 온도분포이다. 반면에 철근을 고려한 해석에 있어서 온도 분포는 철근이 배근된 지점에서 심한 굴곡을 보이는 특징을 나타낸다. 이는 철근이

그 주변의 콘크리트에 비해서 열을 상대적으로 빨리 외부로 전달시키기 때문에 철근부에서 온도가 더 낮은 분포를 보이며, 철근비가 증가할수록 이러한 굴곡은 더 심하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 철근비가 증가할수록 중심부의 최대 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 48 시간에서 최대 온도가 발생된 이후에는 시간 경과에 따라 중심부의 온도는 감소하여, 최종적으로는 초기 타설온도와 외부 공기 온도의 일정한 값으로 수렴하는 양상을 보인다. 외부로 노출되어 있는 교각 기둥부의 압축철근이 배근된 주변의 온도분포가 기초부의 스테럽이 배근된 주변의 온도 분포보다 더 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 스테럽이 피복 두께만큼의 콘크리트에 쌓여 있는 반면에, 기둥부의 압축철근은 외부 공기 중에 직접 노출되어 있으므로 열전달이 상대적으로 용이하기 때문으로 판단된다. 따라서 구조물의 종류에 따라 철근의 영향은 그 정도가 다양한 형태로 나타날 것으로 예상된다.

본 연구에서 고려한 교각 기초는 대형 교량의 기초에 비해 부재의 크기가 상대적으로 작은 편이다. 그러나 규모가 큰 매스콘크리트는 부재의 높이가 크기 때문에 콘크리트를 여러 차례로 나누어 타설하는데, 이때 1회 타설시의 높이는 수화열의 발생정도를 고려하여 결정하게 된다. 이러한 경우에 기초부에 배근되는 모든 수직 방향의 철근은 시공 과정에서 외부에 노출되므로 철근에 의한 외부로의 열전달은 훨씬 원활하게 이루어질 것이며, 따라서 내부의 최대 온도 역시 더 큰 폭으로 감소할 것이다.

Fig. 8은 시간에 따른 중심부와 표면부의 온도, 중심부와 표면부의 온도차를 보여주고 있다. 철근을 고려하지 않는 경우에 있어서 표면부와 중심부의 최대 온도차는 26.5℃ 이고, 1.8%의 철근비를 고려한 경우는 20.0℃이다. 따라서 1.8%의 철근비를 고려하면 최대온도차에 있어서, 32.5%의 감소 효과를 발휘하는 것으로 나타났다.

4.3 철근비에 따른 응력분포

응력 해석에서는 온도 해석의 결과인 온도 분포가 하중으로 입력되어 응력을 검토하였다.

Fig. 9는 표면부의 인장응력 분포를 보여주고 있다. 철근을 고려하지 않는 단면의 표면부 최대 인장응력은 60시간에서 5.77MPa이 발생하였다. 그리고 철근비 1.4%, 1.6%, 1.8%에 대하여 각각 5.67MPa, 5.44MPa, 5.20MPa의 최대인장응력이 발생하였다. 균열응력을 콘크리트 표준시방서⁶⁾의 규정인 $f_r = 0.63(f_{ck})^{1/2}$ 으로 계산할 경우 $f_{ck} = 25$ MPa를 대입하면 3.15MPa가 된다. 따라서 온도에 의한 균열이 예상된다.

중심부와 표면부의 최대 온도차가 철근비의 증가에 따라 상당히 감소하기 때문에 콘크리트의 내부 구속응력이 감소하게 되고, 그 결과 표면부의 최대 인장응력이 감소

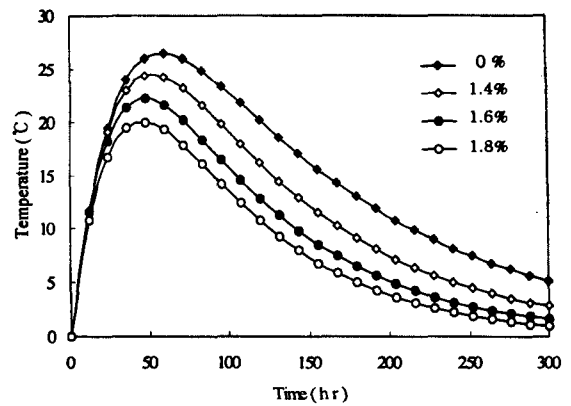


Fig. 8 Temperature difference between center and surface of concrete

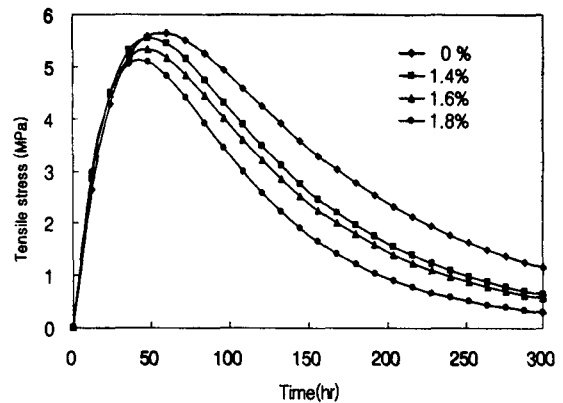


Fig. 9 Tensile stress distribution at surface

하는 것으로 판단된다. 철근을 고려하지 않는 해석에 비해서 1.8%의 철근을 고려한 해석은 10%의 인장응력 감소를 발생시켰다. 철근비 증가에 따라 응력감소가 커지는데, 일반적인 구조물의 철근비가 2.0~2.4% 정도인 것을 감안하면 더 큰 인장응력의 감소가 가능할 것으로 판단된다.

4.4 온도균열

콘크리트 표준시방서⁶⁾에서는 수화열에 의해 발생하는 온도응력에 의한 온도 균열을 제어하기 위해 온도 철근을 배치하도록 규정하고 있다. 이를 판단하는 균열지수는 다음과 같다.

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)} \quad (4)$$

여기서, $f_t(t)$: 재령 t일에서의 온도응력 최대값
 $f_{sp}(t)$: 재령 t일에서 콘크리트의 인장강도

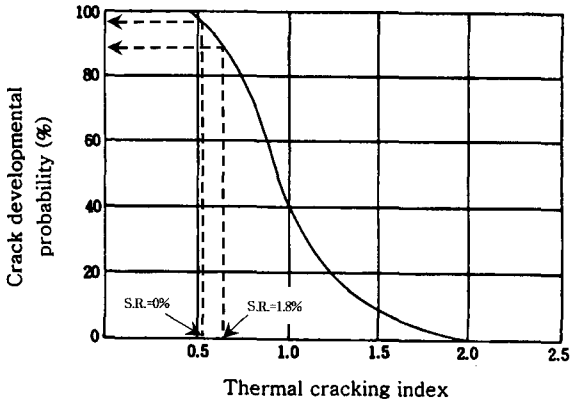


Fig. 10 Thermal cracking index vs. developmental probability

식(4)에 온도응력과 인장강도를 대입하여 검토한 결과, 1.8%의 철근비에서 11.0% 정도의 온도균열지수가 감소하였다. Fig. 10은 콘크리트 표준시방서⁶⁾에서 온도균열지수와 균열발생확률을 검토하는 그래프로 11.0%의 온도균열지수 감소는 10.0% 정도의 균열발생확률의 감소를 가능하게 한다. 이 10.0% 정도의 균열발생확률의 감소로부터 직접적인 온도철근의 감소량을 결정하기는 어렵지만, 콘크리트 표준시방서⁶⁾의 최대균열폭과 온도균열지수의 관계로부터 최대균열폭의 감소와 함께 대략 10% 정도의 온도철근 감소를 예상할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 수화열에 의한 열량의 확산과 분포, 그로 인해 발생하는 온도응력의 변화에 있어서 콘크리트 구조물에 배근된 철근이 어떤 영향을 주는지 검토하였다. 이를 위해 교각 기초부에 대한 2차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 철근을 전혀 고려하지 않은 모델과 철근비를 점차 증가시킨 모델을 비교하였다.

철근을 고려하지 않은 모델과 철근비 1.8%를 고려한 모델을 비교했을 때 구조물 중심부와 표면부의 최대 온도

차는 철근의 상대적으로 빠른 열전달 특성에 의하여 32.5%의 감소가 이루어졌다. 철근비가 증가할수록 감소 정도도 증가한다는 사실을 확인하였다. 또한 구조물 내부와 외부의 온도차 32.5%의 감소는 10% 정도의 표면부 인장응력 감소의 효과가 있는 것을 확인하였다. 그 결과 콘크리트 표준시방서⁶⁾에서 제시하고 있는 11%의 온도균열지수 감소와 15% 정도의 균열발생확률의 감소가 예상되어, 온도균열을 제어하기 위한 온도 철근량의 감소도 예상할 수 있다. 추가적으로, 다양한 형태의 구조물에 대한 해석과 실험 연구가 수행된다면 철근을 고려한 수화열 해석 및 온도 응력의 예상으로 보다 합리적인 설계와 시공이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 동국대학교의 연구비 지원 사업으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강석화, 정철현, 정한중, 이용호, 박칠림, "매스콘크리트 구조물의 온도응력평가에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 7권 2호, 1995, pp.126~135.
2. 김은겸, 김래현, 신치범, "유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발", 콘크리트학회 논문집, 7권 6호, 1995, pp.167~175.
3. 김진근, 양은익, "매스콘크리트의 수화열 및 온도응력에 대한 영향 요인", 콘크리트 학회지, 9권 3호, 1997, pp.15~23.
4. 김진근, 김국한, 양주경, "온도저감 공법을 고려한 콘크리트의 수화열 해석기법에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 7권 6호, 1995, pp.176~185.
5. 오병환, 백신원, "대형콘크리트구조물의 수화열 예측 및 균열제어 연구", 콘크리트학회논문집, 7권 1호, 1995, pp.97~108.
6. ADINA, "Theory and Application," ADINA, Vol.1, 2001.
7. 한국콘크리트학회, "콘크리트 표준시방서", 한국콘크리트학회, 1999.

요 약

수화열에 의한 콘크리트 구조물 내의 최대온도에는 재료의 열특성, 초기조건, 거푸집, 외부노출면 등이 영향을 미친다. 일반적인 콘크리트 구조물에는 콘크리트와는 전혀 다른 열특성을 갖는 철근이 보강되고 있으나 보통은 철근의 영향을 무시하고 수화열에 관한 해석을 실시하고 있다. 본 연구에서는 보강철근을 직접 고려하여 수화열의 분포 및 온도응력에 미치는 영향에 대해 유한요소 해석연구를 실시하였다. 해석결과 철근이 구조물 내의 빠른 열 확산과 외부로의 열량을 방출하는 효과에 기여하고 있음을 확인하였고, 콘크리트 표면의 인장응력을 감소시키는 것 또한 확인하였다. 따라서 정확한 수화열 해석을 위해서는 철근을 고려한 해석이 타당하며, 이를 통해 온도균열 감소와 온도철근량 감소효과를 기대할 수 있다.

핵심용어 : 유한요소해석, 수화열, 철근비, 열특성