

철근의 영향을 고려한 콘크리트 구조물의 수화열 해석

An Analysis on the Effect of Reinforced Steel Bar to the Heat of Hydration in the Concrete Structures

양 옥 빈*

윤 동 용**

민 창 식***

Yang, Ok Bin

Yoon, Dong Young

Min, Chang Shik

ABSTRACT

This paper presents a numerical study on the heat of hydration of reinforced concrete with different steel ratio. And, this study intends to determine the effect of the steel on the variation of temperatures during hydration. In order to do this, the thermal analyses of the pier-foundation models were carried out using the finite element analysis program, ADINA. As the steel rate increased, the maximum temperature and the internal-external temperature difference decreased.

1. 서 론

콘크리트의 경화과정에서 시멘트와 물의 화학적 반응에 의해 발생하는 열량을 수화열이라고 한다. 일반적으로 두께가 얇고 공기 중에 접한 면이 많은 구조물은 내부에서 발생하는 열을 외부로 쉽게 전달시키기 때문에 문제가 발생되지 않지만, 부재의 두께가 큰 매스콘크리트 구조물에서는 수화반응에 의한 발열량은 콘크리트의 내부와 표면사이의 온도 차이를 발생시킨다. 결과적으로 일정하지 않은 온도 분포로 인해 예기치 못한 온도응력이 발생하게 되며, 이러한 수화열에 의한 온도응력은 매스 콘크리트 구조물에 상당한 부정적 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁴⁾

일반적으로 수화열의 분포에 영향을 미치는 요인으로 시멘트의 종류, 타설 온도, 혼화재료의 종류, 콘크리트의 열적특성 등이 있다. 그런데, 실제 철근 콘크리트 구조물에서 배치되는 철근의 총량은 상당히 많은 양이며, 철근의 열적 특성은 콘크리트의 열적 특성과 분명한 차이를 보이고 있음에도 불구하고, 대부분의 수화열 해석에 있어서 철근의 영향을 고려하지 않고 있다. 콘크리트의 열해석을 수행할 때, 열적 특성 계수값의 결정시 철근비를 반영하여 결정하는 재료적 측면에서의 접근이 적용^{2) 3)}되기는 하지만, 이는 철근이 구조물 전체에 균질하게 분포하는 것이 아니라 일정한 위치에 배근되기 때문에 정확히 반영되었다고 보기는 어렵다.

* 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 석사과정

** 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 공학박사

*** 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 교수

철근의 열전도율이나 비열 등의 열적 특성은 콘크리트의 열적특성에 비해 상당히 큰 값을 가진다. 따라서, 본 연구에서는 철근 콘크리트 구조물에서 배근된 철근이 수화열의 발생과 분포에 어떤 영향을 미치는지에 대해서 유한요소 해석을 통해 검토를 수행하였다. 이를 통하여 실제 구조물에 근접하는 수화열의 분포와 온도응력을 산정하고자 한다.

2. 해석대상 구조물의 모델링

2.1 기하학적 형상

본 연구에서는 ADINA 7.4를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 구조물에 배근된 철근이 수화열의 분포에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하기 위해서 “논산~당진간 고속도로 건설공사 제2공구 대교천교”의 교각 기초를 모델로 선정하였다. 해석 대상 구조물의 기초부에서 사용된 철근비는 1.6 % 이다. 이 철근비는 기초부의 주철근 뿐만이 아니라, 압축철근, 스테럽, 기둥부의 측방향철근, 기둥부의 띠철근 등 기초부에 배근된 모든 철근을 포함하여 계산하였다. 따라서 철근비는 기초부의 전체 체적에 대한 철근의 총체적의 비로 계산된 값이다. 본 논문에서는 철근비에 따른 수화열의 분포 양상을 파악하기 위해서 철근비 0 %, 1.4 %, 1.6 %, 1.8 % 각각의 구조물에 대해 유한 요소해석을 수행하였다. 또한 본 논문은 2차원 해석을 수행하였기 때문에 철근의 전체 체적을 고려하여 2차원 단면에서의 철근 두께를 환산하여 계산하였다. 그림 1 은 유한 요소 해석에 사용된 기초 암반, 콘크리트, 철근으로 구성된 구조물의 2차원 모델링을 보여주고 있다. 본 연구에서 모델링된 구조물은 콘크리트 요소와 암반요소, 그리고 철근 요소로 구성되었다. 콘크리트, 암반, 철근의 모든 요소에 대하여 8절점 2-D 전도요소가 동일하게 적용되었으며, 각 방향에 대하여 5cm 간격으로 분할하였다. 따라서, 1542개의 콘크리트 요소, 2460개의 암반 요소, 472개의 철근요소가 이용되었다.

2.2 재료 특성값의 입력

재료의 열적 특성은 수화열의 발생 정도를 지배하는 가장 주요한 요인이다. 본 연구에서 최종적으로 얻고자 하는 목적이 철근비에 따른 수화열의 분포 양상과 이로 인한 온도 응력의 변화를 확인하는 것이므로, 재료적 특성은 본 연구에서는 변수로 고려하지 않았다. 따라서, 임의의 열적 특성을 선정하고, 이를 철근비에 따른 각각의 해석에 동일하게 적용하도록 하였

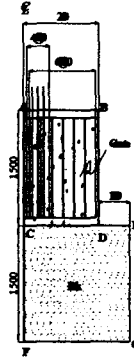


그림 1 대상 구조물의 2차원 모델링

표 1 재료의 열적특성의 입력값

| 열적 특성 | 입력값 | | |
|-------------------|--------|---------|---------|
| | 콘크리트 | 기초 암반 | 철근 |
| 열전도율, kJ/m hr °C | 8.14 | 8.12 | 242.5 |
| 비열, kJ/m³ °C | 2058.3 | 2719.60 | 3619.82 |
| 열전달율, kJ/m² hr °C | 노출면 | - | 1372.35 |
| | 거푸집 | | |
| 단위중량, kg/m³ | 2287 | 2600 | 7500 |

표 2 콘크리트의 역학적 특성의 입력값

| 역학적 특성 | 입력값 |
|---------------|----------------------|
| 압축강도, kgf/cm² | 240 |
| 탄성계수, tonf/m² | 2.32×10 ⁶ |
| 팽창계수, /°C | 10×10 ⁻⁶ |
| 프와송비 | 0.167 |

다. 콘크리트와 암반에 대한 일반적인 열적 특성값은 1995년에 발표된 문헌, “김은겸 외, 유한요소법에 의한 매스 콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발”¹⁾에 적용된 값을 사용하였으며, 철근에 대한 열적 특성값은 일반적으로 알려진 철의 물리적 값을 적용하였다. 표 1과 2는 해석에 적용된 열적 특성과 역학적 특성의 입력값을 보여주고 있다. 표 1과 2에서, 각 재료의 열적 특성값을 살펴보면, 철근의 열적 특성이 콘크리트에 비해서 현저히 큰 값이라는 사실을 알 수 있다. 특히 철근의 열전도율은 콘크리트 열전도성에 비해 30배 이상임을 감안한다면, 구조물 내부에서의 열흐름은 철근에서 상대적으로 빠른 흐름을 나타낼 것이다. 또한 외기 대류계수는 6배 이상으로서 콘크리트의 표면부에서 보다 외부로 노출된 철근의 표면에서 대기로의 열 유출이 훨씬 많을 것이라고 예상할 수 있다.

2.3 초기 조건 및 경계조건

초기 조건은 비정상해석(transient analysis)에 있어서 반드시 입력해야 할 값이며, 수화열 해석에 있어서 초기 조건은 굳지 않은 콘크리트의 타설 온도 및 각 재료의 온도, 그리고 마지막으로 주변 대기의 온도가 초기 온도값으로 입력된다. 콘크리트의 타설 온도는 $T_{i,c} = 20^{\circ}\text{C}$, 철근의 초기 온도는 $T_{i,s} = 20^{\circ}\text{C}$ 로 가정하였다. 또한 기초부가 타설되는 지반암의 초기 온도는 $T_{i,r} = 10^{\circ}\text{C}$, 대기의 온도는 $T_{air} = 17^{\circ}\text{C}$ 로 가정하였다.

경계조건은 구조물의 표면부에서 설정되는 열적 특성으로서 임의 매질과 대기중 공기의 열전달 정도를 나타내는 대류계수에 의해서 정의된다. 그림 1에서, 윗면(AB)은 콘크리트가 최초 타설되는 시점으로부터 완전 경화시까지 대기중에 완전 노출된 상태로 설정하였고, 측면(BD)는 최초 타설시에는 거푸집을 설치하고, 이후 7일(168 hr) 뒤에 거푸집을 제거하여 대기중에 노출되는 것으로 설정하였다. 기타 대칭면과 암반의 표면부는 열의 전달이 전혀 없는 단열 조건으로 가정하였다. 또한 교각의 기둥부의 압축철근도 윗면과 동일하게 외부에 완전 노출된 상태로 설정하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

3.1 열흐름의 전달 양상

그림 2은 유한요소 해석을 통하여 얻어진 열흐름의 전달 양상을 벡터량으로 보여주고 있다. 여기서, 화살표의 길이는 상대적인 벡터량으로서 콘크리트에 비해서, 철근에서의 열흐름 속도가 대단히 크다는 사실을 확인할 수 있다. 이는 열전달에 있어서 콘크리트에 비해 철근이 동일한 시간내에 훨씬 많은 열량을 전달하고 있으며, 이로 인해 구조물 전체의 온도 분포는 철근을 고려하는 것과 그렇지 않은 것의 분명한 차이를 발생시킬 것이다. 또한 외부로의 열 유출 역시, 철근을 고려함으로써 많은 양의 열이 철근을 통해서 외부로 유출된다. 따라서, 철근은 내부에서 발생되는 최대온도를 감소시키는데 상당한 역할을 수행하게 될 것으로 판단된다.

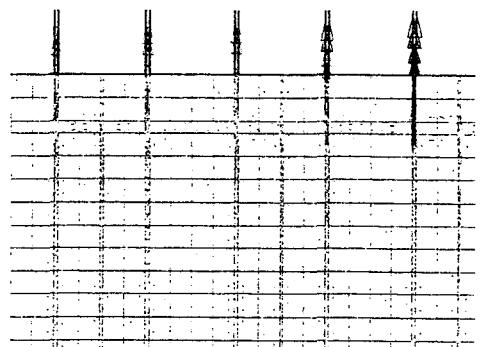


그림 2 열흐름의 전달 양상

3.2 철근비에 따른 온도 분포

수화열에 의한 최대 온도는 초기 양생기간에 발생되며, 온도 해석에 있어서 초기 재령에서의 온도 분포가 중요하다고 알려져 있다. 그림 3은 유한요소 해석을 수행 결과 최대 온도가 발생하는 48시간에서의 각 철근비에 따른 온도 분포 양상을 보여준다. 철근을 고려하지 않았을 때는 중심부의 최대온도는 55.0℃가 발생하였다. 그리고, 철근비가 1.4%, 1.6%, 1.8%로 증가할 때, 중심부의 최대온도는 각각 52.5℃, 50.1℃, 47.2℃로 감소하였다. 온도 분포는 중심부에서 최대 온도가 발생되고, 외부 표면으로 갈수록 온도가 점차 낮아지는 등온선의 분포를 보이고 있다. 특히, 철근이 배치되지 않았다고 가정한 철근비 0%에 대한 해석에 있어서 온도는 외부로 갈수록 일정한 비율로 감소하고 있으며, 이는 콘크리트의 낮은 열전도성으로 인해 외부로 유출되는 열량에 비해 내부에서 발생하는 열량이 외부로 전달되는 속도가 느리기 때문에 발생하는 온도분포임을 잘 보여주고 있다.

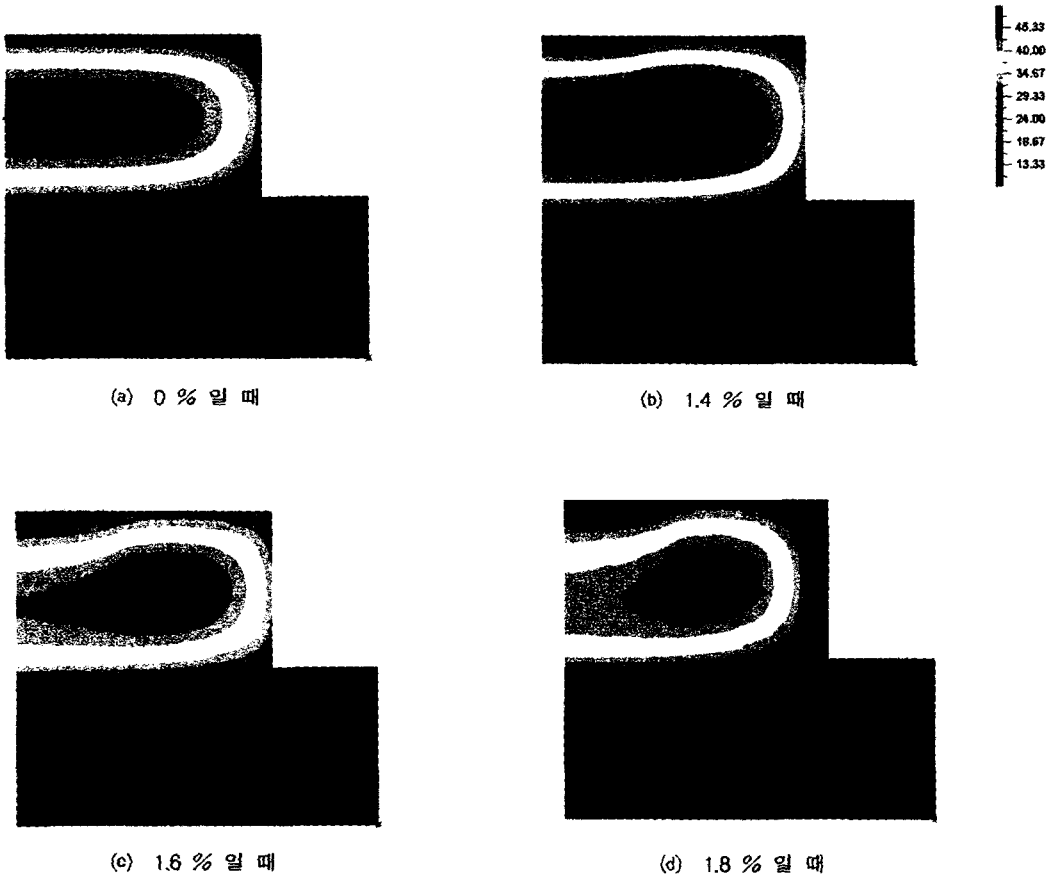


그림 3 48시간 경과 후 온도 분포

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 크게 나타남을 알

수 있다. 그렇기 때문에, 철근비가 증가할수록 중심부의 최대 온도가 감소하는 것으로 판단된다. 48시간에서 최대 온도가 발생된 이후에는 시간 경과에 따라 중심부의 온도는 감소하여, 최종적으로는 초기 타설온도와 외부 공기 온도의 일정한 값으로 수렴하는 양상을 보인다.

또한 외부로 노출되어 있는 교각 기둥부의 압축철근이 배근된 주변의 온도분포가 기초부의 스티럽이 배근된 주변의 온도 분포보다 더 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 스티럽이 피복 두께 만큼의 콘크리트에 쌓여 있는 반면에, 기둥부의 압축철근은 외부 공기중에 직접 노출되어 있으므로 열전달이 상대적으로 용이하기 때문으로 판단된다. 따라서, 구조물의 종류에 따라 철근의 영향은 그 정도가 다양한 형태로 나타날 것으로 예상된다.

3.3 철근비에 따른 중심부와 표면부의 온도차

내부 구속응력은 표면부와 중심부 간의 온도차에 의해 발생되며, 내부온도가 표면 온도보다 높은 초기 매스 콘크리트 구조물에서 발생하기 쉽다고 알려져 있다. 그래서, 콘크리트 표준 시방서에서는 균열의 발생 여부를 표면부와 중심부의 온도차에 대한 함수로서 제시하고 있다. 만약 표면부와 중심부의 온도차가 감소하면, 내부 구속응력도 감소하게 되고, 이로 인해 전체 온도응력이 감소하는 효과를 얻을 수 있다. 따라서, 중심부와 표면부의 온도차는 온도응력에 영향을 미치는 중요한 변수라고 할 수 있다. 그림 4, 5, 6은 철근비에 따른 중심부와 표면부의 최대온도와 온도차를 나타낸 그림이다. 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. 이로 인해 궁극적으로는 온도응력의 감소를 유도 할 수 있을 것으로 판단한다.

3.4 철근비에 따른 표면의 인장응력 분포

응력 해석은 구조물에서 균열이 발생되는지의 여부를 판단하기 위해서 수행되는데, 온도 해석을 수행하여 얻은 온도 분포가 하중값으로 입력되어 응력에 대한 결과값이 얻어졌다. 일반적으로 매스 콘크리트 구조물에서 발생하는 균열은 표면부의 인장응력이 인장 강도보다 더 크면 발생된다.

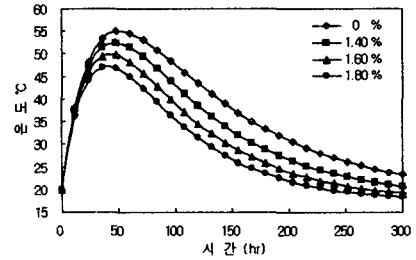


그림 4 중심부의 최대 온도 분포

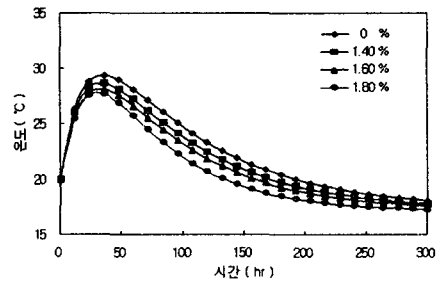


그림 5 표면부의 최대 온도 분포

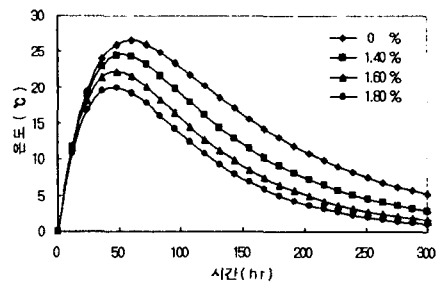


그림 6 중심부와 표면부의 최대 온도차

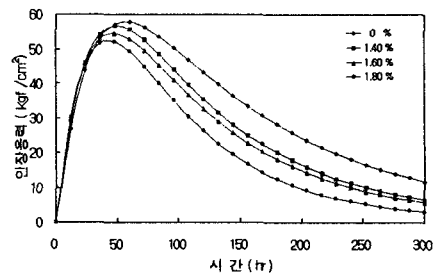


그림 7 표면부의 인장응력 분포

따라서 본 연구에서도 압축응력보다도 인장응력에 대한 검토를 집중적으로 수행하였다. 유한요소 해석 결과 철근을 고려하지 않는 단면의 표면부 최대 인장응력은 60시간에서 57.7 kgf/cm^2 이 발생하였다. 그리고 철근비 1.4%, 1.6%, 1.8%에 대하여 각각 56.7 kgf/cm^2 , 54.4 kgf/cm^2 , 52.0 kgf/cm^2 의 최대 인장응력이 발생하였다. 그림 7은 표면부의 인장응력 분포를 나타내고 있다.

중심부와 표면부의 최대 온도차가 철근비의 증가에 따라 상당히 감소하기 때문에, 콘크리트의 내부 구속응력이 감소하게 되고, 그 결과 표면부의 최대 인장응력이 감소하는 것으로 판단된다. 철근을 고려하지 않는 해석에 비해서 1.8%의 철근을 고려한 해석은 10%의 인장응력 감소를 발생시켰다. 일반적으로 기초 구조물의 철근비는 2.0~2.4% 정도로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서 채택한 구조물은 상대적으로 적은 철근비를 가진 구조물임에 비춰 볼 때 여타의 구조물에서는 더 큰 인장응력의 감소가 발생될 것으로 판단한다.

4. 결 론

철근의 열적 특성값이 콘크리트의 열적 특성값에 비교해 보았을 때, 대단히 상이한 특징을 갖고 있다는 사실에도 불구하고 이에 대한 고려가 이루어지지 않는다는 것은 실질적인 온도분포를 정확하게 예상하지 못하고 있다는 의미이다. 따라서, 본 연구에서는 수화열에 의해 발생하는 온도분포와 온도응력의 해석에 있어서, 구조물에 배근된 철근이 어떤 영향을 주는지에 대한 검토를 수행하였다. 이를 위해 교각 기초부에 대한 2차원 유한요소 해석을 이용하였으며, 철근을 전혀 고려하지 않은 모델과 철근비를 점차 증가시킨 모델에 대해서 동일한 방법으로 해석을 수행하였다. 철근을 고려하지 않은 모델과 철근을 고려한 모델을 비교했을 때, 구조물 내부에서 발생하는 최대 온도 및 중심부와 표면부의 최대 온도차는 철근의 상대적으로 빠른 열전달 특성에 의하여 32.5%의 감소가 이루어지고, 철근비가 증가할수록 감소 정도도 증가한다는 사실을 확인하였다. 따라서, 철근을 고려하지 않는 해석은 지나치게 안전측의 결과를 유발하는 것으로 판단된다. 또한, 구조물 내외부의 온도차의 감소는 결과적으로 온도응력의 감소를 유발한다. 본 연구에서 채택한 구조물의 경우 10%의 표면부 인장응력 감소가 발생되었다. 따라서, 수화열의 해석에 있어서 철근의 영향을 고려하는 것이 합리적이며 경제적이라고 판단된다. 추가적으로 다양한 형태의 구조물에 대한 해석과 이를 검증할 실험 연구가 이루어진다면 정확한 온도응력의 예상과 합리적인 설계를 실시함으로써 경제적인 시공을 수행하는데 상당 부분 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

1. 김은점 외, "유한요소법에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도해석 프로그램 개발", 콘크리트 학회 논문집 제7권 6호, 1995, pp.167~175.
2. 김진근 외, "온도저감공법을 고려한 콘크리트 수화열 해석기법에 관한 연구", 콘크리트 학회 논문집 제7권 6호, 1995, pp.176~185.
3. 오병환 외, "대형 콘크리트 구조물의 수화열 예측 및 균열제어 연구", 콘크리트학회 논문집, 제7권 1호, 1995, pp97~108.
4. A.M. Neville, "Properties of Concrete", Fourth Edition, Longman, 1996.
5. Eric Aoytte, Bruno Masicotte, and Jules Houde, "Modeling the Thermal Stresses at Early Ages in a Concrete Monolith", ACI Material Journal, Vol. 94, 1997, pp.577~587.