

화재 시 중공슬래브의 온도분포 예측을 위한 1방향 열전달 모델

정주홍¹, 최현기^{2*}

One-Dimensional Heat Transfer Model to Predict Temperature Distribution in Voided slabs subjected to fire

Joo-Hong Chung¹, Hyun-Ki Choi^{2*}

Abstract : In general, a reinforced concrete slabs are known to have a high fire resistance performance due to thermal properties of concrete materials. However, according to previous research, the thermal behavior of voided slabs is reported to be different from that of conventional RC solid slabs, and the differences seem to be caused by the air layer formed inside the voided slab. Therefore, it is difficult to estimate the temperature distribution of the voided slab under fire by using the existing methods that do not take into account the air layer inside the voided slab. In this study, a numerical analysis model was proposed to estimate the temperature distribution of voided slabs under fire, and evaluated. Heat transfer of slabs under fire is generally caused by conduction, convection and radiation, and time-dependent temperature changes of slab can be determined considering these phenomena. This study proposed a numerical method to estimate the temperature distribution of voided slabs under fire based on a finite difference method in which a cross-section of the slab is divided into a number of layers. This method is also developed to allow consideration of heat transfer through convection and radiation in air layer inside of slabs. In addition, the proposed model was also validated by comparison with the experimental results, and the results showed that the proposed model appropriately predicts the temperature distribution of voided slabs under fire.

Keywords: Voided slabs, heat transfer, thermal distribution, finite difference method

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 건축물이 고층화 대형화됨에 따라 화재에 의한 인명 및 재산의 피해규모가 증가하고 있는 추세인 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 철근 콘크리트 구조 부재의 경우 콘크리트의 낮은 열전도율 및 낮은 열확산계수, 우수한 축열 효과, 고온에서 완전붕괴에 도달하기까지의 높은 에너지소산능력 등에 의해 우수한 내화구조로 평가되고 있다. 한편, 건축물의 내화 설계는 구조부재가 일정 기준을 만족하도록 의무화된 사양적 내화설계법과 새롭게 개발된 신재료 및 신공법 등을 반영할 수 있도록 유연성을 갖춘 성능기반 내화설계법으로 구분할 수 있다. 국내 내화설계기준의 경우 사양적 내화설계법을 기반으로 화열의 온도 및 지속시간, 사용골재 등을 고려하여 부재별로 피복두께만 규정하고 있을 뿐 구체적인 설계 방법은 제시하지 않고 있다. 국내 규정과 달리 국외에서는 법

정 내화구조기준 뿐만 아니라 철근 및 콘크리트의 재료특성, 화재 발생에 따른 부재의 온도상승을 고려하여 부재의 강도 및 변형을 산정하여 보, 기둥, 슬래브 등의 단일부재의 내화성능을 평가하는 구체적인 방법을 제시하고 있다. (ACI, 2007 and Eurocode 2, 2004)

부재가 고온에 노출 될 경우 온도상승에 의해 단면의 구조적 변형 이 발생할 수 있으며, 재료 물성의 화학적 변화가 발생하게 된다. 따라서 부재 단면의 온도분포를 합리적으로 산정할 경우 온도증가에 따른 단면 내의 열응력 및 재료특성을 고려한 구조물의 강도, 변형 등을 이론적으로 확인 할 수 있다. 따라서 철근콘크리트 부재의 성능기반 내화설계를 위해서는 화재 시 부재 내부의 온도분포를 산정하는 것이 필수적이다. 이에 따라 ACI-216R 및 EuroCode 2에서는 슬래브 부재의 화재 시간에 따른 단면 내 온도분포를 산정할 수 있는 방법을 제시하고 있다.(ACI, 1989 and Eurocode 2, 2004) 또한 실험 및 해석적 연구를 통해 도출한 경험식으로써 Hertz's Method와 Wickström's Method 등 간략 식을 통해 화재 시 슬래브 부재의 깊이별 온도를 산정할 수 있는 방법을 제시하고 있다.(Hertz, 1981 and Wickström, 1986)

한편, 중공슬래브의 경우 슬래브 내부에 형성된 공기층에 의해 열전달 경로가 복잡해짐에 따라 기존 철근콘크리트 슬

¹정회원, 삼육대학교 건축학과 교수

²정회원, 경남대학교 소방방재공학과 교수

*Corresponding author: chk7796@kyungnam.ac.kr

Dept. of Fire and Disaster Prevention Engineering, Kyungnam Univ., Korea.

•본 논문에 대한 토의를 2019년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

래브와는 상이한 온도분포를 보이는 것으로 보고되고 있으며, 화재 시 중공슬래브의 온도분포에 중공형상, 부피, 위치 등 다양한 영향변수가 있는 것으로 나타났다.(Choi et al., 2015) 이에 따라 중공슬래브의 내화성능 및 열적거동을 파악하기 위한 연구가 수행되었으나, 대부분이 개발된 중공슬래브 상재에 대한 내화성능을 검증하는 수준에 그치고 있는 실정이다.(Kim et al., 2011; Chung et al, 2012)

따라서 본 연구에서는 화재 시 고온에 노출된 중공슬래브의 시간에 따른 단면 내 온도변화를 추정하기 위하여, 기존의 유한차분법을 적용한 슬래브 열전달 모델을 검토하고 이를 기반으로 중공슬래브의 특성을 고려할 수 있는 새로운 열전달 모델을 제시하고자 한다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 열전달 이론을 기반으로 화재 시 중공슬래브의 온도분포를 추정할 수 있는 수치해석적 열전달 모델을 개발하고자 하였다. 이를 위해 T.T. Lie 등 (T.T. Lie et al, 1979)의 연구결과를 기초로 하여 유한차분법을 활용한 양해법 형태의 중공슬래브 열전달 방정식을 유도하였다. 또한, 이를 통해 중공슬래브에서 발생할 수 있는 전도, 대류, 복사에 의한 열전달 경로를 모두 고려할 수 있는 열전달 모델을 개발하였으며, 기 수행한 중공슬래브 내화실험과의 비교를 통해 제안모델의 신뢰도를 검증하였다.

2. 슬래브의 유한차분 모델링

2.1 지배방정식

슬래브와 같이 부재의 두께가 슬래브의 폭 및 길이에 비해 작으며, 가열면의 열에너지의 유입이 균등할 경우 부재 내부의 열전달이 슬래브 두께방향으로만 전달되는 것으로 가정할 수 있다. 또한, 경화된 콘크리트에서의 열 발생이 없다고 가정할 경우, 전도에 의한 비정상상태의 슬래브 열전달 지배방정식은 다음 식(1)과 같이 Fourier 미분방정식 형태로 나타낼 수 있으며, 경계조건에 따른 대류 및 복사에 의한 경계면의 열전달 지배방정식은 다음 식 (2) 및 (3)과 같이 정의 할 수 있다.(Wang, 1995)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \left(\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right) \right) = \rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = h_{conv} (T_{ambient} - T_{sur}) \quad (2)$$

$$k(T) \frac{\partial T}{\partial n} = F\epsilon [(T_{cor} + 273)^4 - (T_{sur} + 273)^4] \quad (3)$$

여기서, $k(T)$, $\rho(T)$, $c(T)$ 는 온도에 따른 콘크리트의 열전도율, 밀도, 비열로 재료의 열적특성을 나타내며, x 는 슬래브 가열면 부터의 거리, t 는 시간을 의미한다. T_{sur} 는 대류 및 복사가 발생하는 경계면의 온도, $T_{ambient}$ 및 T_{cor} 은 각각 경계면 주변 공기 및 복사 대응면의 온도를 의미한다. 또한, h_{conv} 는 경계면의 대류계수, F 는 복사면의 관측계수, ϵ 는 복사면의 방사율, σ 는 슈테판-볼츠만 상수이다.

2.2 유한차분법을 통한 슬래브 온도분포모델 정식화

전도, 대류, 복사의 열전달 경로에 따른 미분방정식 형태의 비정상상태의 슬래브 열전달 지배방정식의 경우 에너지보존의 법칙에 근거하여 다음 식 (4)와 같이 열유속에 대한 함수로 간략화 할 수 있다. 에너지평형조건에 따른 열전달 지배방정식을 구성함에 있어 정의되는 \dot{q}_{cond} , \dot{q}_{conv} , \dot{q}_{rad} 는 각각 부재 요소의 재료특성 및 경계조건에 따라 정의되는 전도 열유속, 대류 열유속, 복사 열유속이다.

$$\dot{q}_{cond} + \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} = \rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

에너지보존 법칙에 근거한 식 (4)와 같은 미분방정식 형태의 비정상상태의 열전달 지배방정식을 통해 부재의 온도변화를 예측하기 위해서는 일반적으로 두 가지 방법이 사용된다. 첫 번째 방법의 경우 엄밀한 수치해석론에 기초하여 수학적 으로 미분방정식의 해를 도출하는 방법이며, 두 번째 방법은 유한차분법을 통해 도함수를 차분형으로 대치하여 대수방정식형태의 온도분포 추정식을 도출하는 방법이다. T.T. Lie 등 (T.T. Lie et al, 1979)은 식 (4)와 같은 열전달 지배방정식을 기반으로 유한차분법을 통해 슬래브 부재의 온도분포를 산정하는 방법을 제안하였다. 이를 위해 T.T. Lie 등은 슬래브 부재를 Fig. 1과 같이 임의의 두께(Δx)를 가지는 유한개(M)의 층으

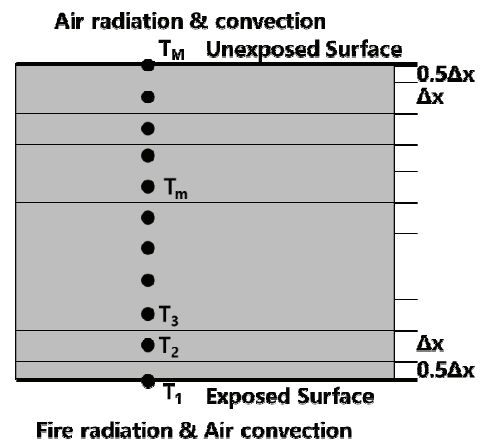


Fig. 1 Heat transfer Model by Finite difference method

로 분할한 후, 각 층의 경계조건에 따라 가열시간에 따른 각 층의 온도(T_m)를 산정하였으며, 다음 식 (5)~(8)과 같은 가열 시간에 따른 온도분포 추정식을 제안하였다.

2.2.1 슬래브 내부 층 온도분포 산정식

다음 식 (5) 및 (6)은 슬래브 내부 층(m)에 대한 시간에 따른 온도 추정식이다. 인접한 층에서의 전도에 의한 열 유입 및 손실만을 고려하여 유도되었으며, 전진차분법을 통해 임의의 시간 ' $t = (i+1)\Delta t$ '에서의 온도변화를 순차적으로 도출할 수 있다.

$$T_m^{i+1} = F_o \left[\frac{2(k_{m-1,m}T_{m-1}^i + k_{m+1,m}T_{m+1}^i)}{k_{m-1,m} + k_{m+1,m}} + T_m^i \left(\frac{1}{F_o} - 2 \right) \right] \quad (5)$$

$$F_o = \frac{(k_{m-1,m} + k_{m+1,m})\Delta t}{2\rho c(\Delta x)^2} \quad (6)$$

2.2.2 슬래브 경계층 온도분포 산정식

다음 식 (7) 및 (8)은 슬래브 경계면(가열면 및 비가열면)을 포함한 층에 대한 시간에 따른 온도 추정식이다. 가열면 및 비가열면의 경계조건인 대류와 복사에 의한 열전달을 고려하여 유도되었으며, 전진차분법을 통해 임의의 시간 ' $t = (i+1)\Delta t$ '에서의 온도변화를 순차적으로 도출할 수 있다.

$$T_1^{i+1} = 2F_o \left[T_2^i + \frac{h_{conv}\Delta x}{k_1} T_{ambient} + \left(\frac{1}{2F_o} - 1 - \frac{h_{conv}\Delta x}{k_1} \right) T_1^i + F\epsilon\sigma \left[(T_{fire} + 273)^4 - (T_1^i + 273)^4 \right] \frac{2\Delta t}{\rho c\Delta x} \right] \quad (7)$$

$$F_o = \frac{k_1\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2} \quad (8)$$

2.2.3 안정성 조건

온도분포 추정식 (5)~(8)은 앞서 도출한 해를 기반으로 순차적으로 다음 해를 도출하는 전진차분법을 통해 도출한 양해법 형태의 근사해이다. 따라서 앞서 도출한 해의 오차가 후속 계산에 반영되어 오차가 증폭되지 않기 위해서는 수렴을 위한 안정성 조건이 필요하다. 이를 위해 푸리에 수(F_o)는 다음 식 (9)와 같은 제한조건을 만족하도록 시간증분(Δt)과 요소의 크기(Δx)가 정의되어야 한다.

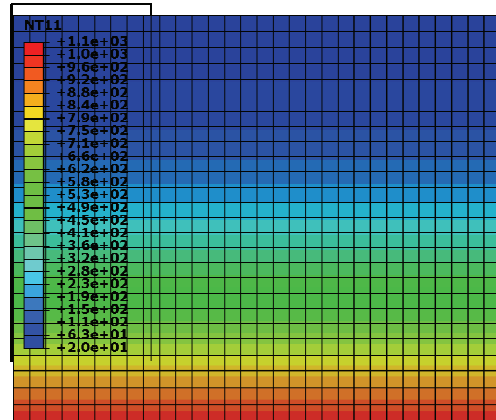
$$F_o \leq \frac{1}{2 \left[1 + \frac{h_{conv}\Delta x}{k_1} + \frac{F\epsilon\sigma\Delta x}{k_1} \times \frac{(T_1^i + 273)^4}{T_1^i} \right]} \quad (9)$$

3. 중공슬래브 열전달 모델

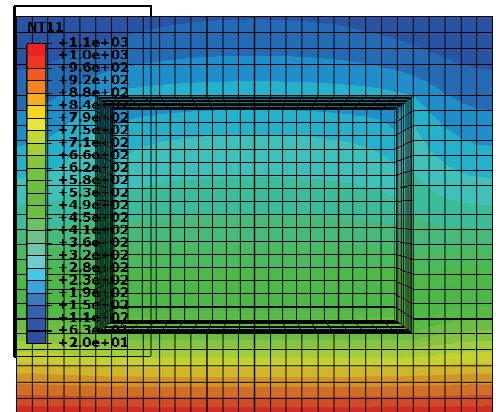
3.1 중공슬래브 열확산 경로

본 연구에서는 중공슬래브의 열확산 경로를 확인하기 위하여 중공슬래브에 대한 과도상태 열전달 해석을 수행하였다. 중공의 유/무를 변수로 하여 과도상태 열전달 해석을 수행한 결과는 Fig. 2와 같다.

중공슬래브에 대한 과도상태 열전달 해석결과 동일 가열시간에서 비가열면의 최대 온도가 솔리드슬래브 모델에 비해 중공슬래브 모델이 더 높은 것으로 나타났으며, 중공부 비가열면의 온도가 솔리드 부분의 비가열면의 온도에 비해 높은 것을 확인 할 수 있다. 또한, 솔리드 모델이 슬래브 두께방향으로 1방향 형태의 온도변화를 보이는데 반해, 중공슬래브 모



(a) Solid Slab



(b) Voided Slab

Fig. 2 Results of Heat transfer Analysis

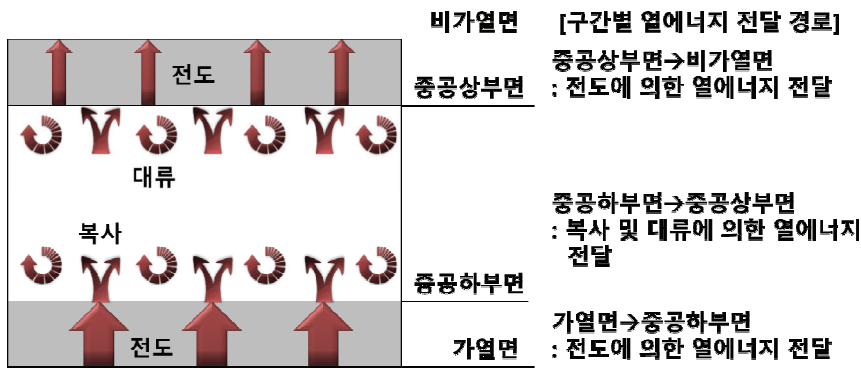


Fig. 3 Heat transfer Path of Voided Region

델의 경우 온도변화가 중공부 공기층을 중심으로 X축, Y축, Z축의 세 방향으로 변화되는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 해석 결과를 통해 중공슬래브의 온도변화에 중공부 공기층이 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있으며, 일반적으로 슬래브에 적용되는 전도만을 고려한 기존의 1방향 열전달 모델은 중공슬래브 적용이 어려운 것으로 나타났다.

그러나 해석결과 화재 시 중공슬래브의 내화성능에 취약할 것으로 예상되는 최대 온도가 발생하는 부분이 공기층을 포함하고 있는 중공부인 것으로 확인하였으며, 일반적으로 중공슬래브의 중공부가 슬래브 면적의 80% 이상임을 고려하였을 때 중공슬래브의 상부와 하부 슬래브를 연결하는 복부 콘크리트가 중공부의 온도변화에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단하였다.

따라서 본 연구에서는 해석상 편의를 위해 중공슬래브의 상부와 하부 슬래브를 연결하는 복부 콘크리트를 무시하고 중공부의 공기층만을 고려하여 Fig. 3와 같이 하부콘크리트, 공기층, 상부콘크리트 3개의 요소로 구성된 1방향 열전달 경로로 간략화 하였다. 또한, 각 요소에서의 열전달 경로의 경우 상/하부 콘크리트 층 내부에서는 전도에 의해서 열에너지가 전달되는 것으로 가정하였으며, 공기층에서는 공기의 전도에 의한 열전달을 무시하고 대류 및 복사에 의해서만 열이 전달되는 것으로 가정하여 간략화 하였다.

3.2 중공슬래브 열전달 모델 및 내부온도 추정식

본 연구에서는 기존의 T.T. Lie의 모델을 기반으로, 중공슬래브 공기층에 의해 발생하는 경계면의 경계조건을 고려할 수 있는 새로운 모델을 개발하였다. T.T. Lie 등(T.T. Lie et al, 1979)은 각 층 사이의 평균 열전도율(k_{ave})의 개념을 도입하여 기존 이론식을 간략화 시킨 모델을 제안하였다. 해당 모델은 주어진 시간대에서 반복계산 없이 직접적으로 슬래브 층의

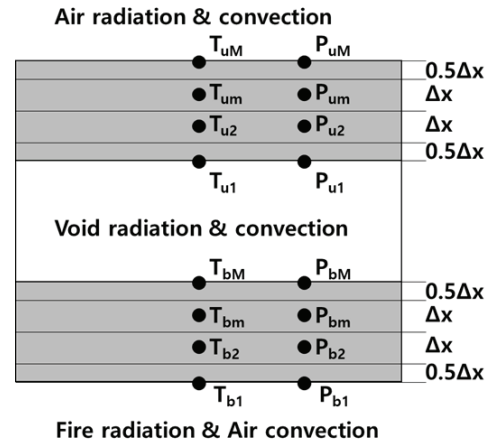


Fig. 4 Heat transfer Model of Voided Slab by Finite difference method

온도를 계산할 수 있는 장점이 있으나 중공슬래브 내부의 공기층의 영향을 고려하지 못하는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 중공부의 공기층을 고려하여 화재 시 중공슬래브의 온도변화를 예측하기 위해 중공부 단면을 Fig. 3과 같이 하부콘크리트, 공기층, 상부콘크리트 3개의 요소와 4개의 경계면(가열면, 중공하부면, 중공상부면, 비가열면)으로 구성되는 것으로 모델링하였다. 또한, 중공슬래브 중공부의 열전달 경로를 앞서 가정한 바와 같이 1방향 열전달만을 고려하는 것으로 가정하였다. 4개의 특정면을 제외한 각 콘크리트 층에서는 전도를 통해서만 열전달이 발생하는 것으로 가정하였으며, 중공 공기층에서의 열전달은 복사와 대류를 통해서만 전달되는 것으로 가정하였다.

유한차분법을 기반으로 화재 시 중공슬래브 내부의 온도 추정식을 도출하기 위해, 공기층 상부 및 하부의 콘크리트를 Fig.4와 같이 각각 유한개(M)의 층으로 분할하여 모델링하였으며, 공기층의 경우 전도를 무시하였으며 단일 층인 것으로 가정하였다. 각 층의 두께는 경계면에서 $0.5\Delta x$, 콘크리트 내부에서 $1.0\Delta x$ 의 두께를 가지도록 분할하였으며, 각 층에서의 콘크리트 온도는 일정한 것으로 가정하였다. 시간 변화에 따른 각 층의 온도추정식은 양해법에 근거하여 유도하였으며, 재료의 열적 비선형성이 고려될 수 있도록 유도하였다.

3.2.1 가열면 열전달 경계조건 및 온도추정식

중공슬래브 가열면에서 열에너지는 전도, 대류, 복사에 의해 전달되며, 가열면의 온도(T_{bi})는 가열면에서의 열전달 경계조건 및 에너지평형조건을 통해 산정할 수 있다. 가열면(P_{bi})의 열에너지 변화를 살펴보면 열에너지의 유입은 열원과 가열면 사이에서의 복사 및 대류에 의해서 발생하게 되며, 열에너지 방출은 인접한 상부 콘크리트층(P_{b2})으로의 전도를 통해 발생한다. 최종적으로 에너지평형조건에 의해 가열면 콘

크리트층(P_{bl})은 흡수된 열에너지에 의해 온도가 상승된다. 중공슬래브 가열면에서의 열전달 경계조건 및 에너지평형조건을 기반으로 시간에 따른 가열면 온도(T_{bl}^{i+1})를 식(10)과 같은 양해법 형태의 열전달 방정식으로 유도 할 수 있다.

$$T_{bl}^{i+1} = T_{bl}^i + \frac{\Delta t}{(\rho(T)c(T))_{bl}^i \Delta x} \times \left[2 \left\{ \begin{array}{l} F\sigma\epsilon_c\epsilon_f((T_f^i + 273)^4) \\ - (T_{bl}^i + 273)^4 \\ + h_f(T_f^i - T_{bl}^i) \end{array} \right\} - \frac{(k_{bl}^i + k_{b2}^i)}{\Delta x} (T_{bl}^i - T_{b2}^i) \right] \quad (10)$$

여기서, T_f^i 는 시간에 따른 열원 온도이며, T_{bl}^i 및 T_{b2}^i 는 시간에 따른 해당 층의 온도이다. k_{bl} 및 k_{b2} 는 온도에 따른 해당 층 콘크리트의 열전도율이다. 열원의 방사율(ϵ_f)은 1.0으로 가정하였으며, 가열면 콘크리트의 방사율(ϵ_c)은 0.9로 가정하였다. 열원에서 가열면으로의 관측계수(F)는 서로 평행한 무한 평면으로 가정하여 1.0의 값을 사용하였다. 가열로의 대류계수(h_f)는 강제대류로 가정하여 $40 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 사용하였다.

3.2.2 중공하부면 열전달 경계조건 및 온도추정식

중공하부면은 하부콘크리트층 최상부면과 중공의 공기층이 만나는 면으로 정의되며, 공기층과 맞닿아 있기 때문에 중공하부면에서의 열전달 또한 전도, 복사, 대류 3가지를 통해 이루어지는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 중공하부면(P_{bM})으로의 열에너지 유입은 인접한 하부층 콘크리트($P_{b,M-1}$)에서의 전도에 의해서만 발생하며, 열에너지 손실은 중공하부면과 중공상부면 사이의 복사 및 중공하부면과 공기층 온도차이에 의한 대류에 의해 발생하는 것으로 가정하였다. 여기서, 대류에 의한 열전달을 유발하는 공기층의 온도를 중공상부면 온도($T_{u,1}$)와 동일한 것으로 가정하였다. 이러한 중공하부면의 열전달 경계조건을 통해 시간에 따른 중공하부면 온도(T_{bM}^{i+1})를 다음 식(11)을 통해 산정할 수 있다.

$$T_{bM}^{i+1} = T_{bM}^i + \frac{\Delta t}{(\rho(T)c(T))_{bM}^i \Delta x} \times \left[\frac{(k_{bM-1}^i + k_{bM}^i)}{\Delta x} (T_{bM-1}^i - T_{bM}^i) - 2 \left\{ \begin{array}{l} \sigma\epsilon_c((T_{bM}^i + 273)^4 - (T_{u,1}^i + 273)^4) \\ + h_{void}(T_{bM}^i - T_{u,1}^i) \end{array} \right\} \right] \quad (11)$$

여기서, 중공내부 공기층의 대류계수(h_{void})는 폐공간에서의 자연대류로 가정하여 $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 사용하였다.

3.2.3 중공상부면 열전달 경계조건 및 온도추정식

중공상부면은 상부콘크리트층 최하부면과 중공의 공기층이 만나는 면으로 정의할 수 있다. 중공상부면($P_{u,1}$)으로의 열에너지 유입은 중공하부면($P_{b,M}$)에서 방출되어 중공상부면($P_{u,1}$)까지 도달 후 흡수되는 복사 에너지와 공기층의 대류에 의해 중공상부면으로 전달되는 열에너지를 통해 이루어진다. 중공상부면($P_{u,1}$)에서의 열에너지 손실은 인접한 상부 콘크리트층($P_{u,2}$)으로 전도에 의한 열에너지 손실만을 고려하였다. 이러한 경계조건을 통해 시간에 따른 중공상부면 온도($T_{u,1}^{i+1}$)를 다음 식(12)를 통해 산정할 수 있다.

$$T_{u,1}^{i+1} = T_{u,1}^i + \frac{\Delta t}{(\rho(T)c(T))_{u,1}^i \Delta x} \times \left[2 \left\{ \begin{array}{l} F\sigma\epsilon_c\epsilon_c((T_{bM}^i + 273)^4 - (T_{u,1}^i + 273)^4) \\ + h_{void}(T_{bM}^i - T_{u,1}^i) \end{array} \right\} - \frac{(k_{u,1}^i + k_{u,2}^i)}{\Delta x} (T_{u,1}^i - T_{u,2}^i) \right] \quad (12)$$

여기서, 중공하부면에서 중공상부면으로의 관측계수(F)는 유한한 크기를 가지는 평행한 면으로 가정하여, 중공의 높이, 폭, 너비 등을 통해 산정할 수 있다.

3.2.4 비가열면 열전달 경계조건 및 온도추정식

비가열면은 슬래브 최상부면으로 대기와 직접 접하는 면으로 정의할 수 있다. 비가열면($P_{u,M}$)으로의 열에너지 유입은 인접한 하부층 콘크리트($P_{u,M-1}$)과의 온도차이로 인해 발생하는 전도 열에너지 유입만을 고려하였다. 비가열면($P_{u,M}$)에서의 열에너지 손실은 비가열면에서 대기층으로 방출하는 복사 열에너지 및 비가열면과 대기의 온도차이에 의해 발생하는 대류에 의해 발생하는 것으로 가정하였으며, 대기의 온도(T_{air})는 시간에 상관없이 일정한 것으로 가정하였다. 이러한 경계조건을 통해 시간에 따른 비가열면 콘크리트층 온도($T_{u,M}^{i+1}$)를 다음 식(13)을 통해 산정할 수 있다.

$$T_{u,M}^{i+1} = T_{u,M}^i + \frac{\Delta t}{(\rho(T)c(T))_{u,M}^i \Delta x} \times \left[\frac{(k_{u,M-1}^i + k_{u,M}^i)}{\Delta x} (T_{u,M-1}^i - T_{u,M}^i) - 2 \left\{ \begin{array}{l} \sigma\epsilon_c((T_{u,M}^i + 273)^4 - (T_{air}^i + 273)^4) \\ + h_{air}(T_{u,M}^i - T_{air}^i) \end{array} \right\} \right] \quad (13)$$

여기서, 대기층의 대류계수(h_{air})는 자연대류로 가정하여 $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 사용하였다.

3.2.5 콘크리트층 열전달 경계조건 및 온도추정식

중공 상부 및 하부에 위치한 콘크리트층 내부에서의 열전달은 인접한 콘크리트층 간의 온도차에 의한 전도를 통해서만 이루어지는 것으로 가정하였다. 임의의 콘크리트 내부층 ($P_{b,m}$)에서의 열전달은 인접한 하부층($P_{b,m-1}$)에서의 전도를 통한 유입과 인접한 상부층($P_{b,m+1}$)으로의 전도를 통한 열손실을 통해 이루어지게 된다. 이러한 경계조건을 통해 시간에 따른 상부 및 하부 콘크리트 내부층 온도 (T_{bm} 혹은 T_{um})를 다음 식 (14)를 통해 산정할 수 있다.

$$T_m^{i+1} = T_m^i + \frac{\Delta t}{2(\rho(T)c(T))_m^i \Delta x} \times \left[\frac{(k_{m-1}^i + k_m^i)}{\Delta x} (T_{m-1}^i - T_m^i) - \frac{(k_m^i + k_{m+1}^i)}{\Delta x} (T_m^i - T_{m+1}^i) \right] \quad (14)$$

3.2.6 안정성(stability) 조건

제안 모델은 양해법 형태로 유도되었으므로 수렴성 확보를 위해 변수간의 상대적인 크기가 제한되어야 한다. 안정성 문제는 시간에 따른 온도의 변화속도가 높은 가열면에서 발생하기 쉽기 때문에, 식 (9)를 준용하여 도출할 수 있다. T.T. Lie는 식 (9)를 기반으로 간략화 하여 각 층별 두께(Δx)와 가열 시간 증분(Δt)과의 관계로 정리하였으며, 다음 식 (15) 및 (16)과 같은 안정성 조건을 제안하였다. (T.T. Lie et al, 1979)

$$\Delta t \leq \frac{\rho c_{min} \Delta x^2}{2(k_{max} + \Delta x h_{max})} \quad (15)$$

$$h_{max} = 4\sigma \epsilon_c (T_{f,max} + 273)^3 \quad (16)$$

여기서, h_{max} 는 가열면을 통해 유입되는 열에너지에 대한 최대 열전달 계수이며, $T_{f,max}$ 는 열원의 최대온도이다.

4. 중공슬래브 열전달 모델 검증

4.1 수치해석

화재에 대한 중공슬래브의 경계조건 및 재료특성을 앞서 도출한 식(10)~(14)에 적용할 경우 반복적인 계산을 통해 임의의 가열시간에서 중공슬래브 단면의 온도분포를 도출할 수 있으며, 임의의 위치에서의 가열시간에 따른 온도변화를 산정할 수 있다. 제안 모델을 통해 화재 시 중공슬래브의 온도분포를 도출하기 위해서는 반복적인 계산이 필요하기 때문에

Matlab 프로그램을 통해 수치해석 알고리즘을 작성하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Chung 등(Chung et al., 2012)이 수행한 중공슬래브 표준화재실험체를 대상으로 제안된 해석모델에 대한 검증을 수행하였다. 검증을 위해 사용한 실험체는 두께 250mm 및 210mm의 중공슬래브로 도넛형 중공형성체가 적용된 실험체이며, 표준화재 곡선에 따라 슬래브 하부면을 120분 동안 가열한 실험체이다. 수치해석을 위한 경계조건으로 중공슬래브의 온도는 상온과 같은 것으로 가정하였으며, 실험체 및 대기의 초기온도(T_0)는 20°C로 가정하였다. 또한 시간에 따른 열원의 온도변화는 실험과 동일한 조건으로 식 (17)과 같이 표준시간-가열온도 곡선에 따라 열원의 온도가 상승하는 것으로 가정하였다.

$$T(t) = 345 \times \log(8t + 1) + T_0 \quad (17)$$

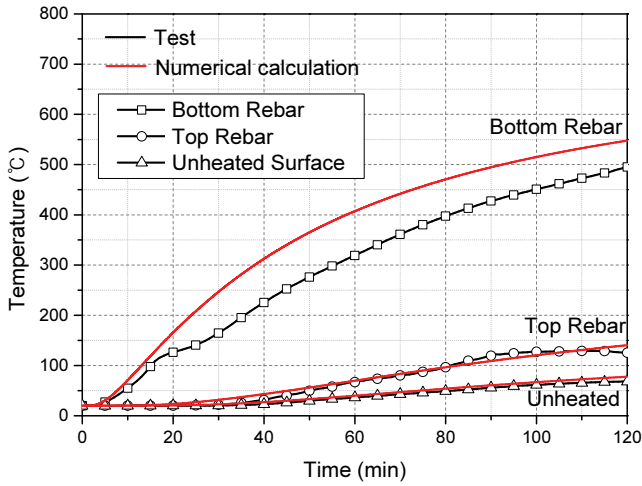
수치해석을 통한 중공슬래브 내부온도 추정을 위해 정의되어야 하는 재료특성은 콘크리트의 밀도, 비열, 열전도율로서 실험체 제원과 유사하도록 규산질 골재 콘크리트의 열적 특성 값을 적용하여 수치해석을 수행하였다. Eurocode 2에서는 Table 1과 같이 온도변화에 대한 콘크리트의 물리적, 화학적 변화를 고려하여 온도에 따라 콘크리트의 밀도, 비열, 열전도율을 산정하도록 제안하고 있다. 본 연구에서는 온도에 따른 규산질 골재 콘크리트의 열적특성으로 Eurocode 2에서 제시하고 있는 재료특성을 적용하였다.(Eurocode 2, 2004)

해석상의 편의를 위하여, 중공형상을 동일 높이를 가지는 동일부피의 직육면체 형태로 치환하여 모델링하였으며, 이를 통해 중공부에 대한 관측계수(F)를 산정하였다. 두께 250mm 및 210mm의 중공슬래브 해석모델의 관측계수(F)는 각 0.32 및 0.47을 사용하였다. 실험결과와 비교를 위하여 각 층별 두께(Δx)를 5mm로 하여 중공슬래브를 모델링하였으며, 해석모델의 안정적인 수렴을 위하여 식 (15)~(16)을 통해 적정 가열시간 증분(Δt)을 5.0초로 충분히 작게 설정하였다.

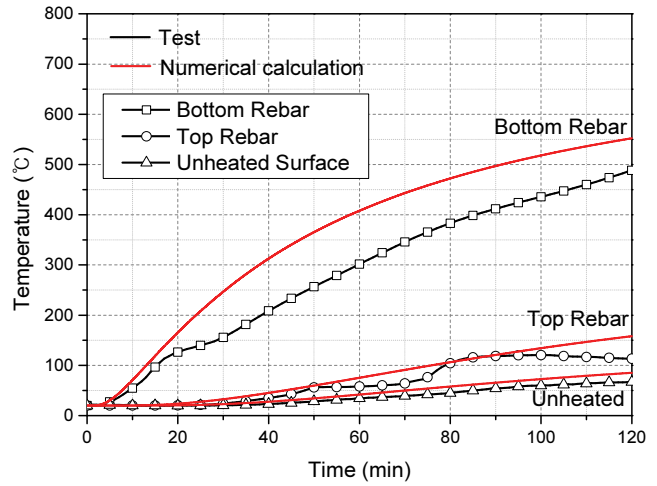
4.2 해석모델 검증 및 분석

수치해석 결과와 내화 실험결과와의 비교를 위해, 가열시간에 따른 하부 및 상부철근 위치와 비가열면의 온도변화 이력을 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 비교 결과 제안모델이 전반적으로 중공슬래브 온도변화 경향을 잘 예측하고 있는 것으로 나타났으나, 슬래브 하부 철근의 온도를 다소 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. 이는 기존 방법이 중공부 공기층을 고려하지 못함으로써 화재 시 중공슬래브의 온도를 저평가하는 것과는 정반대의 결과이다.

이러한 중공하부 콘크리트에서의 오차는 콘크리트 내부의



(a) 250mm thickness



(b) 210mm thickness

Fig. 5 Comparisons of model predictions with test results for temperature variations of concrete in voided slab

Table 1 Thermal Properties of Concrete by Eurocode 2

Index	Calculation method	Range(°C)
$\rho_c = \rho_{c,20^\circ\text{C}}$		$20 \leq T \leq 115$
ρ_c (kg/m ³)	$\rho_c = \rho_{c,20^\circ\text{C}} \left(1 - 0.02 \frac{(T-115)}{85} \right)$	$115 \leq T \leq 200$
	$\rho_c = \rho_{c,20^\circ\text{C}} \left(0.98 - 0.03 \frac{(T-200)}{200} \right)$	$200 \leq T \leq 400$
	$\rho_c = \rho_{c,20^\circ\text{C}} \left(0.95 - 0.07 \frac{(T-400)}{800} \right)$	$400 \leq T \leq 1200$
c (J/kgK)	$c = 900$	$20 \leq T \leq 100$
	$c = 900 + (T - 100)$	$100 \leq T \leq 200$
	$c = 1000 + (T - 200)/2$	$200 \leq T \leq 400$
	$c = 1100$	$400 \leq T \leq 1200$
k_c (W/mK)	$k_c = 1.36 - 0.136(T/100)$	$20 \leq T \leq 1200$
	$+ 0.0057(T/100)^2$	

잉여수 및 중공 내부의 수분의 기화열에 의한 온도증가 지연 현상 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5의 하부철근 위치에서의 온도변화에 대한 결과를 살펴보면 두 실험체 모두 가열 초기의 낮은 온도에서는 수치해석결과와 실험결과가 큰 차이 없이 일치하고 있으나, 하부철근위치의 온도가 100°C에 도달한 18분부터 온도변화 속도가 크게 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 또한, 일정 시간 이후 수분이 모두 증발하고 나서는 유사한 온도증가 속도를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

중공 상부 콘크리트에 위치한 상부철근 및 비가열면 온도 변화의 경우 제안 모델을 통해 추정된 온도가 실험결과에 비해 일부 높게 예측하고 있는 것을 확인할 수 있다. 실험결과를 살펴보면 중공 상부 부분은 비교적 저온인 상태로 중공하부 부분과 달리 가열시간 동안 콘크리트 내부 잉여수의 기화에 의한 열손실이 크지 않을 것으로 예상된다. 따라서 중공 상부에서의 오차는 실제 중공슬래브에서 발생하는 3차원 열전달

경로를 해석상의 편리를 위해 1차원 열전달 모델로 간략화 함에 따른 오차와 중공부 공기층의 환경 변화에 따른 중공 상부 층으로의 열에너지 전달이 감소됨에 따른 것으로 판단된다.

본 연구에 제안한 열전달 모델의 경우 중공 상부 콘크리트에 유입되는 모든 열에너지가 중공 하부면에서의 복사 및 대류를 통해 발생하는 것으로 가정하였다. 특히, 복사에 의한 열전달의 경우 콘크리트면 복사율 및 관측계수에 따라 산정된 복사에너지가 100% 전달되는 것으로 가정하였다. 하지만 실제 중공슬래브의 경우, 중공 공기층에 수증기 및 연소가스 등이 유입되어 중공 하부면에서 방출되는 복사에너지를 산란시킴으로써 중공 상부면에 복사 열에너지유입이 감소 될 수 있다. 또한, 이러한 중공 공기층의 환경조건의 변화는 대류 현상에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서 제안한 열전달 모델이 중공슬래브의 온도분포를 보다 정확히 예측하기 위해서는 슬래브 내부의 수분 기화 등에 의한 온도지연 현상 및 중공 공기층의 환경변화에 따른 복사에너지 및 대류에너지 변화 등을 고려할 수 있는 방안이 추가적으로 보완되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

화재 시 중공슬래브의 구조적 안전성을 검증하기 위해서는 정확한 단면 내 온도분포를 예측할 수 있어야 한다. 중공슬래브의 경우 슬래브 내부에 형성된 공기층에 의해 다양한 열전달 경로를 가지고 있으므로, 본 연구에서는 기존의 이론적 열전달 모델을 근거로 중공슬래브의 다양한 열전달 경로를 고려할 수 있는 수치해석 모델을 제시하였다. 또한, 제안된 열전

달 모델을 기존 실험결과와의 비교를 통해 검증하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제안된 열전달 모델을 통해 공기층에 의해 발생하는 중공슬래브의 다양한 열전달 경로를 고려하여 온도분포를 산정할 수 있는 것으로 확인하였다.
- 2) 제안된 열전달 모델은 중공슬래브의 다양한 열전달 경로를 고려함에 따라, 화재에 따른 중공슬래브의 온도분포 및 온도 변화를 비교적 잘 예측하는 것을 확인하였으나, 온도를 일부 높게 추정하는 것으로 나타났다.
- 3) 이러한 오차는 콘크리트 내부 잉여수 및 중공부에 잔류한 수분의 기화에 따른 열에너지 손실에 기인한 것으로 확인하였다. 따라서 중공슬래브의 열전달 해석 시 잉여수 및 수분의 기화에 의한 온도지연 현상이 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 또한, 실제 화재 시 중공슬래브 공기층 조건이 수증기 및 연소가스의 유입 등에 의해 변화될 수 있으므로, 이를 적절히 고려하여 중공 상부면으로 유입되는 복사 열에너지를 산정해야 할 것으로 판단되며, 변화된 공기층 조건에 따른 대류환경의 변화 또한 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2018R1D1A1B07045177).

References

1. ACI 216R-89 (1989), Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements, ACI Committee 216, ACI.
2. ACI 216R-07 (2007), Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies, ACI Committee 216, ACI.
3. Euro Code 2, Design of Concrete Structures-Part 1.2, 2004
4. Choi, H.K., and Bang, C.H. (2015), Analytical Study on Thermal Properties of Hollow Slab at Elevated Temperature, Journal of Korean Institute of Fire Sci. and Eng., KIFSE, 15(2), 17-23
5. Chung, J.H., Cho, H.J., Lee, S.C., Choi, H.K., and Choi, C.S. (2012), An Experimental Study on the Fire Resistance Performance for the Donut Type Biaxial Hollow Slab, Journal of Korea Architectural Institute, AIK, 28(12), 3-10.
6. Hertz, K. (1981), Simple Temperature Calculations of Fire Exposed Concrete Constructions, Report No 159, Institute of Building Design
7. Kim, H.Y., Kim, H.J., Cho, B.Y., Yeo, I.H., and Kwon, I.K. (2011), An Experimental Study on the Fire Behavior of Concrete Void Slab under Standard Fire with Loading Condition, Journal of Korean Institute of Fire Sci. and Eng., KIFSE, 25(6), 64-72
8. Lie, T.T., and Williams-Leir, G. (1979), Factors affecting temperature of fire-exposed concrete slabs, National Research Council Canada - Reprinted from Fire and Materials, 3(2), 74-79
9. Ulf Wickström. (1986) A Very simple method for estimating temperature in fire exposed concrete structures, Fire technology Technical report, 46
10. Hong-BO, Wang (1995) Heat Transfer Analysis of Components of Construction Exposed to Fire, Doctoral dissertation, University of Salford, 1-193

Received : 05/30/2019

Revised : 07/09/2019

Accepted : 08/20/2019

요 지 : 일반적으로 철근콘크리트 슬래브는 콘크리트 재료의 열적특성에 의해 높은 수준의 화재 저항 성능을 보유하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 기존연구에 따르면 중공슬래브의 열적거동은 일반 슬래브와 상이한 것으로 보고되고 있으며, 이는 중공슬래브 내부에 형성된 공기층 때문인 것으로 판단된다. 따라서 슬래브 내부의 공기층을 고려하지 못하는 기존의 방법을 통해서 화재 시 중공슬래브의 내부온도를 추정하는 것은 어려운 것으로 판단된다. 본 연구에서는 화재 시 중공슬래브의 내부온도 분포를 산정하기 위한 수치해석 모델을 제안하고 이를 평가하였다. 기본적으로 화재 시 슬래브의 열전달은 전도, 대류, 복사 등을 통해 발생하며, 이를 기반으로 시간에 따른 슬래브 내부 단면 온도분포를 산정하게 된다. 이에 본 연구에서는 슬래브를 유한개의 층으로 분할하여 각 층의 온도를 산정하는 유한차분법을 도입한 중공슬래브의 수치해석적 모델을 개발하였으며, 슬래브 내부 공기층에서의 대류 및 복사에 의한 열전달 경로를 고려할 수 있도록 개발하였다. 또한 제안된 모델을 실험결과와의 비교를 통해 검증하였으며, 그 결과 제안된 모델은 화재 시 중공슬래브의 온도변화를 적절히 예측하고 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 중공슬래브, 잔류성능, 온도분포, 하중조건
