

섬유혼입 내화 고강도 콘크리트의 열전달 모델

Heat Transfer Modeling of Fiber-embedded Fire-Resistant High Strength Concrete

신 영 섭* 한 동 석† 염 광 수** 전 현 규***
Shin, Young-Sub Han, Tong-Seok Youm, Kwang-Soo Jeon, Hyun-Kyu

요 지

대형 구조물에 주로 사용되는 고강도 콘크리트는 화재 시 폭발이 발생하여 구조물의 심각한 손상을 초래한다. 최근 고강도 콘크리트의 폭발현상을 감소시켜 구조물의 내화성능을 확보하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 본 논문에서는 섬유를 혼입한 고강도 콘크리트에 대한 내화해석 모델을 제시하였다. 섬유의 거동 및 고온에서의 콘크리트 내부의 물리적인 현상을 고려하여 수정한 고강도 콘크리트의 재료모델을 섬유혼입 고강도 콘크리트의 재료모델로 선택하였다. 수정된 재료모델을 이용하여 얻은 섬유혼입 고강도 콘크리트의 내화해석 결과를 실험결과와 비교하였고, 섬유혼입 고강도 콘크리트 재료모델을 제안하였다.

핵심용어 : 열전달 모델링, 폭발, 내화, 고강도 콘크리트, 섬유혼입

Abstract

High strength concrete used for large structures is vulnerable to fire due to explosive spalling when it is heated. Recently, various research is conducted to enhance the fire-resistance of the high strength concrete by reducing the explosive spalling at the elevated temperature. In this study, a heat transfer analysis model is proposed for a fiber-embedded fire-resistant high strength concrete. The material model of the fire-resistant high strength concrete is selected from the calibrated material model of a high strength concrete incorporating thermal properties of fibers and physical behavior of internal concrete at the elevated temperature. By comparing the simulated results using the calibrated model with the experimental results, the heat transfer model of the fiber-embedded fire-resistant high strength concrete is proposed.

Keywords : heat transfer modeling, explosive spalling, fire resistance, high strength concrete, fiber-embedded

1. 서 론

최근 사회기반 시설물의 대형화, 건축물의 초고층화 되어 감에 따라 내구성 및 사용성이 우수한 고강도 콘크리트의 사용이 증가하고 있다. 그러나 수밀성이 높은 고강도 콘크리트는 화재 시 콘크리트 내부에서 발생한 수증기압과 온도응력(thermal stress)으로 인하여 콘크리트 기둥의 피복 손실을 일으키는 폭발(explosive spalling)현상이 발생한다. 콘크리트 기둥의 피복손실은 콘크리트와 철근의 급격한 온도상승을 유발하여 구조물 부재의 하중저항 능력을 감소시켜 구조물의

안전성에 위험을 주게 된다(권영진 등, 2005; 김홍열 등, 2010; Connolly, 1997). 이러한 고강도 콘크리트의 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있으며, 본 논문에서 내화성능을 확보하기 위해 사용한 섬유혼입공법은 화재 시 섬유가 용융되어 콘크리트 내부에 통로를 형성함으로써 수증기압을 완화시키고, 수분이동을 용이하게 하여 콘크리트의 폭발을 방지하는 폴리프로필렌(polypropylene) 섬유와 내부철근의 온도상승과 균열을 억제하는 강섬유를 동시에 혼입한 내화공법이다. 섬유혼입된 고내화 고강도 콘크리트 기둥 시험체를 제작한 후 내화실험을 실시하여 콘크리트

† 책임저자, 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 조교수
Tel: 02-2123-5801 ; Fax: 02-364-5300

E-mail: tshan@yonsei.ac.kr

* 학생회원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정

** (주)GS건설 기술연구소 선임연구원

*** (주)GS건설 기술연구소 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

내부의 온도분포를 측정하고 폭발발생 여부 등의 내화성능을 평가하여 적용 가능성을 검증하였으나(염광수 등, 2009a; 2009b), 해석 모델에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 화재 시 섬유가 혼입된 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 내화거동 예측을 위하여 비열(specific heat)과 열전도도(thermal conductivity)에 대한 섬유혼입된 고강도 콘크리트의 열전달 해석에 필요한 재료모델을 구축하였다. 또한 내화실험과의 비교를 통해 콘크리트 온도 분포에 대한 재료모델의 신뢰도를 검증하였다.

2. 섬유혼입 고강도 콘크리트 내화실험

고강도 콘크리트 폭발을 방지하기 위하여 표 1의 특성을 가진 폴리프로필렌 섬유와 강섬유를 배합강도, 시공성 그리고 경제성을 고려하여 콘크리트 내부 부피비(volume fraction)가 각각 0.13%(폴리프로필렌 섬유), 0.09%(강섬유)가 되도록 혼입한 후 91일 재령 목표 강도를 80MPa로 설정하여 표 2의 배합으로 시험체를 제작하였다(염광수 등, 2009a; 2009b).

28일 압축강도는 55MPa이며, 91일 강도는 84MPa로 측정되었다. 내화 시험체는 길이 3,000mm, 한 면의 길이가 350mm인 정사각형단면으로, 내화의 온도를 측정하기 위하여 기둥의 중앙단면과 중앙단면에서 각각 상하로 900mm 떨어진 부분에 그림 1과 같이 열전대(thermocouple)를 설치하였다. 특히 콘크리트의 온도측정을 위해서 시험체 표면으로부터 30mm, 50mm, 60mm, 그리고 중심부에 열전대를 삽입하였다. 비재하 내화시험은 표준 화재조건에 노출시킨 내화시험방법(한국표준협회, 1999)에 따라 한국건설기술연구원 방내화 실험실에서 실시하였다. ISO-834 표준화재 가열곡선(ISO, 1975)을 적용하였으며(그림 2), 180분간 비재하 내화시험을 실시하였다. 180분의 내화시험 후 시험체에 폭발이 발생하지 않았음을 확인하였으며, 폭발억제를 위해서

표 1 사용된 섬유의 특성치

Items	Polypropylene fiber	Steel fiber
Density(g/cm ³)	0.91	7.8
Diameter	2.0~3.0µm	0.5mm
Length(mm)	20	30
Tensile Strength(MPa)	640	800
Elastic Modulus(GPa)	3.5	200

표 2 콘크리트 배합설계(Unit : kg/m³)

W/B (%)	S/a (%)	Water	Cement	Sand	Gravel	Fly Ash	Silica Fume	Admixture	Polypropylene fiber(Vol.%)	Steel fiber (Vol.%)
24.9	41.5	169	530	623	899	54	95	14.9	1.2(0.13)	7(0.09)

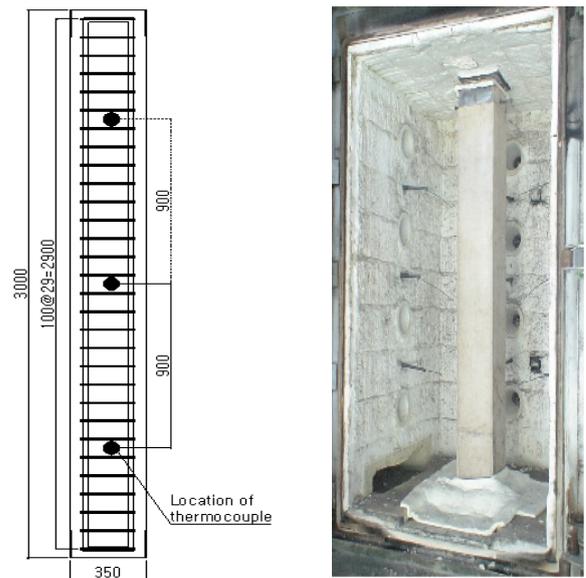


그림 1 시험체 단면과 열전대 그림 2 내화시험 종료 후 시험체 전경

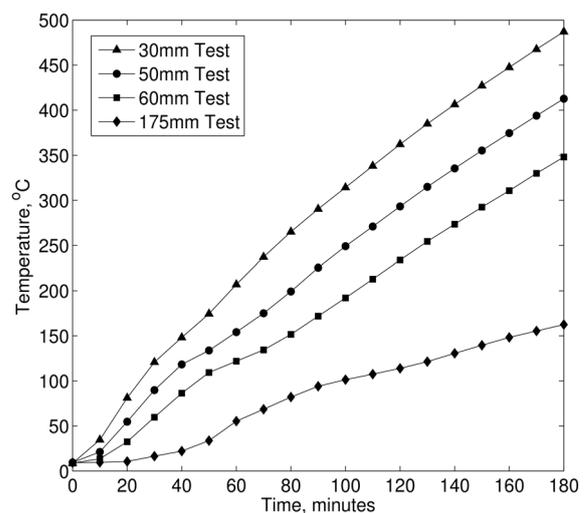


그림 3 깊이별 콘크리트 온도분포

는 폴리프로필렌 섬유의 혼입 여부가 중요한 요인으로 기존의 연구결과와 일치하는 것을 확인하였다(Atkinson, 2004; Nishida 등, 1995; Kalifa 등, 2001; Liu 등, 2008). 콘크리트의 지점별 온도분포 결과는 그림 3과 같다. 콘크리트 표면에서 깊이 30mm, 50mm지점의 3시간 후 평균온도는 484.9°C, 421.3°C이지만, 60mm지점에서는 340.8°C로써 상대적으로 온도가 급감하였고, 175mm지점은 163.4°C로 측정되었다.

3. 섬유혼입 고강도 콘크리트 내화해석

3.1 고강도 콘크리트 내화해석

섬유혼입 고강도 콘크리트에 대한 기존 내화해석 연구결과가 미비하여 일반 고강도 콘크리트의 열전달 해석과 관련된 연구결과를 바탕으로 섬유혼입 고강도 콘크리트의 재료모델을 보정하고 내화해석을 실시하였다. Capua 등(2007)과 Ellobody 등(2008)은 유한요소모델(finite element model)을 사용하여 화재조건 하에서 콘크리트와 슬래브(slab)의 열전달 해석과 열 하중의 영향에 대한 콘크리트의 거동 연구를 하였고, Kodur 등(2004)과 Lie 등(1995)은 유한차분모델(finite difference model)을 사용하여 콘크리트 기둥의 열전달 및

수직하중에 대한 기계적 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 Kodur 등(2004)이 실행한 고강도 콘크리트의 내화해석에 대해 상용 유한요소프로그램인 midas-FEA(MIDASIT, 2005)를 사용하여 유한요소해석(finite element analysis)을 실행하였다.

콘크리트 단면은 그림 4와 같이 콘크리트 단면 305mm×305mm, 철근의 지름 8mm, 콘크리트의 피복 두께 40mm를 대칭성을 사용하여 1/4 모델링을 하였다. 콘크리트와 철근의 형상은 열전달 해석을 위한 4절점 요소(quadrilateral element)를 사용하였고, 총 elements의 개수는 1,265개였다. 콘크리트 단면의 온도 기열곡선 및 재료 물성치는 Kodur 등(2004)이 제시한 자료를 참조하였다. 유한요소해석 결과는 그림 5와 같이 선행 연구의 결과와 유사한 경향을 나타냈다. Kodur 등(2004)은 콘크리트 내부의 수분효과(effect of moisture), 폭발현상, 방사율(emissivity)을 고려하여 유한차분방법으로 해석을 하였지만, 본 연구의 유한요소해석에서는 이러한 것들을 고려할 수 없었고, 최소한의 매개변수(parameter)를 사용하여 해석을 실행했기 때문에 각 지점마다 온도 차이가 발생한 것으로 판단된다.

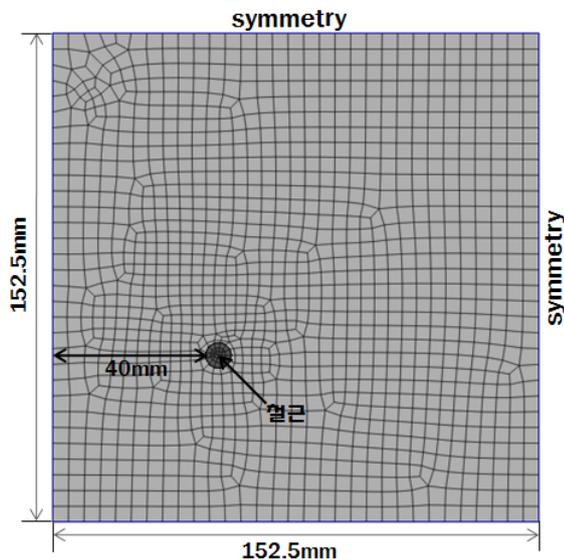


그림 4 고강도 콘크리트 단면 Mesh

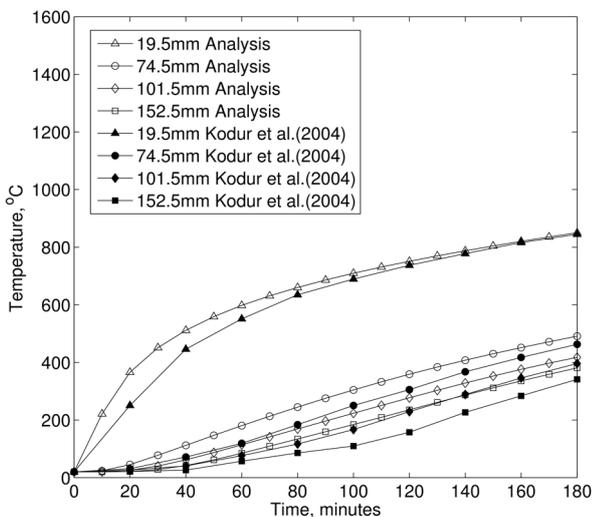


그림 5 고강도 콘크리트 온도분포 비교

3.2 고강도 콘크리트 재료모델을 이용한 섬유혼입 고강도 콘크리트 내화해석

3.1절에서 사용한 고강도 콘크리트의 재료모델을 이용하여 내화실험에 대한 섬유혼입 고강도 콘크리트의 유한요소해석을 실행하였다. 그림 6과 같이 전체 350mm×350mm 콘크리트 단면을 대칭성을 이용하여 1/4 모델링하였다. 콘크리트와 철근은 4절점 요소(quadrilateral element)를 사용하였고, 총 요소의 개수는 1,152개였다.

유한요소해석 결과는 그림 7과 같이 내화실험 결과와 큰 차이가 있었다. 30mm(C1), 50mm(C2), 60mm(C3) 지점에서 해석결과와 실험결과의 차이가 약 200°C정도였고, 175mm(C4)지점에서도 150°C정도의 온도 차이가 나타났다. 실험에서 측정된 온도가 해석결과보다 낮은 이유는 화재시 콘크리트 내부의 섬유가 콘크리트의 온도상승을 지연시키는 역할을 하는 것으로 추정하였다. 따라서 섬유혼입 고강도 콘크리트의 내화해석을 하기 위해서는 고온에서 섬유의 특성을 고려한 콘크리트의 재료모델 수정이 필요하다고 판단하였고, 그 과정을 4절에 기술하였다.

4. 섬유혼입 고강도 콘크리트의 재료모델과 검증

고강도 콘크리트의 재료모델(Kodur 등, 2004)을 이용한

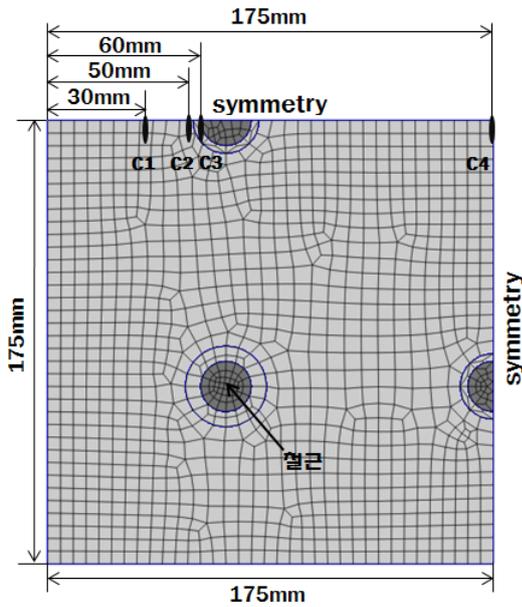


그림 6 섬유혼입 고강도 콘크리트 단면 Mesh (C1, C2, C3, C4 : 온도측정 지점)

여 섬유가 혼입된 고강도 콘크리트의 내화해석을 한 결과는 내화실험 결과(염광수 등, 2009a; 2009b)와 큰 차이를 보여 섬유혼입 고강도 콘크리트의 내화해석을 하기 위해서 재료모델을 수정하는 것이 요구되었다. 열전달 해석에서 필요한 열적 물성치(thermal property)는 비열(specific heat)과 열전도도(thermal conductivity)이다. 따라서 콘크리트의 비열(specific heat)과 열전도도(thermal conductivity)를 고온에서의 섬유 특성과 콘크리트 내부의 물리적인 현상을 고려하여 수정하는 것이 요구되었다.

4.1 열적 물성치 수정

비열(specific heat)이란 어떤 물질 1g을 1°C 높이는 데 필요한 열에너지(W/g°C)를 뜻하고, 비열값은 주위 환경, 물질의 상태 등에 따라 달라진다(Michael 등, 2008). 고강도 콘크리트와 섬유혼입 고강도 콘크리트는 엄연히 다른 물질이지만 질량 및 밀도는 거의 동일하다. 또한, 화재 시 섬유혼입 고강도 콘크리트의 질량 및 밀도 변화는 고강도 콘크리트와 유사한 경향을 나타내기 때문에(한국콘크리트학회, 2004a) 고온에서 섬유의 특성이 비열에 주는 영향은 크지 않을 것이라고 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 섬유혼입 고강도 콘크리트의 비열은 고강도 콘크리트의 비열과 동일한 값을 가질 것이라고 가정하였고, 이와 같은 판단을 근거로 하여 특별한 수정없이 Kodur 등(2004)이 제시한 기존의 고강도 콘크리트 비열을 섬유혼입 고강도 콘크리트의 비열로 사용하였다.

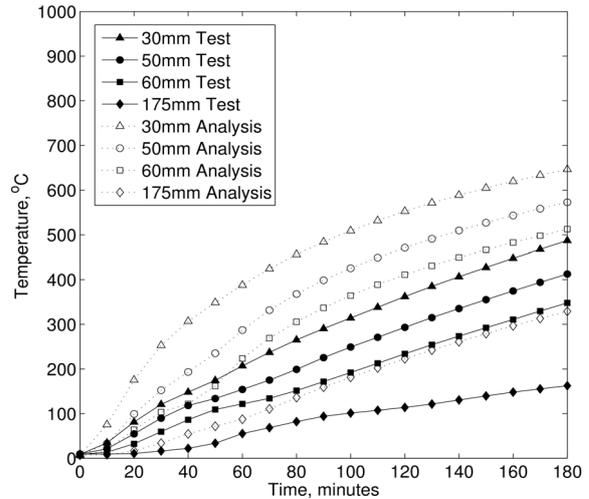


그림 7 해석과 실험의 깊이별 콘크리트 온도분포 비교

열전도(heat conduction)란 열이 물질의 이동없이 고온부에서 저온부로 연속적으로 전달되는 현상으로써 주로 고체 내부에서 일어나고 열전도도(thermal conductivity)는 물질 내부에서 단위 면적당 전달되는 에너지(W/m°C)를 뜻한다(Holman, 2010). 고강도 콘크리트에 혼입되는 섬유는 160~200°C에서 용융되며(Kalifa 등, 2001), 이 때 콘크리트 내부의 온도 상승을 방해하는 “안정기 현상”(한국콘크리트학회, 2004a)이 나타난다. 본 연구에서는 안정기 현상이 고강도 콘크리트와 섬유혼입 고강도 콘크리트의 열전도도 차이의 근본적인 원인이라고 판단하였다. 섬유혼입 고강도 콘크리트는 내부의 섬유 이외에는 고강도 콘크리트와 비슷한 특성을 가지므로, 섬유의 용융에 의한 안정기 현상이 나타나는 온도 구간을 제외하고는 온도에 따른 섬유혼입 고강도 콘크리트의 열전도도 변화 추세를 고강도 콘크리트의 열전도도(Kodur 등, 2004)와 동일하게 선형적으로 감소한다고 가정하였다. 또한, 안정기 현상을 고려하여 고강도 콘크리트의 열전도도를 수정하였다.

본 연구에서는 콘크리트의 열전도도를 1구간(0~160°C), 2구간(160~200°C), 3구간(200~1000°C)으로 나누어서 수정하였다. 1구간에서는 섬유의 안정기 현상이 나타나지 않으므로 그림 8과 같이 고강도 콘크리트의 열전도도와 동일한 변화 구간을 나타낸다고 가정하였다. 2구간은 콘크리트 내부에서 섬유가 용융되면서 안정기 현상이 발생하는 구간이다. 안정기 현상은 콘크리트 내부의 온도상승을 방해하므로 열전도도가 급격히 떨어질 것이라고 판단하였고, 콘크리트 열전도도의 변화 양상은 고강도 콘크리트의 변화 양상과 같이 선형적으로 감소한다고 가정하여 그림 8과 같이 수정하였다. 섬유가 모두 용융된 후 고강도 콘크리트와 섬유혼입 고강도

콘크리트의 열전도도 변화 양상은 유사하다고 가정하였다. 3 구간에서는 안정기 현상 이후 섬유의 용융으로 인하여 콘크리트 내부에서 생성된 공극의 영향을 반영하여 섬유혼입 고강도 콘크리트의 열전도도가 작은 열전도도 값을 유지하면서 고강도 콘크리트의 열전도도와 동일한 기울기를 가지고 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였다. 일반적으로 공극의 열전도도는 상온에서 0.026W/m°C(Yunus, 2004) 정도로써 이는 콘크리트의 열전도도보다 매우 작은 값이기 때문이다. 고강도 콘크리트의 열전도도와 수정한 섬유혼입 고강도 콘크리트의 열전도도의 식은

Kodur 등(2004)

$$k = 1.7 - 0.000935 T \quad (0 \leq T \leq 1000)$$

수정 열전도도

$$\begin{aligned} k &= 1.7 - 0.000935 T & (0 \leq T \leq 160) \\ k &= 3.58 - 0.012685 T & (160 \leq T \leq 200) \\ k &= 1.23 - 0.000935 T & (200 \leq T \leq 1000) \end{aligned} \quad (1)$$

이며, 위 식에서 k 는 열전도도(W/m°C)이고, T 는 온도(°C)이다.

4.2 콘크리트 표층부 열전도도 수정 재료모델

수정한 열전도도를 이용하여 내화해석을 실행한 결과 콘크리트의 온도분포는 고강도 콘크리트의 재료모델을 이용한 해석 결과보다 섬유혼입 고강도 콘크리트의 내화실험 자료와 유사한 경향을 나타냈지만 상대적으로 콘크리트 표면과 가까운 지점에서는 다른 지점들에 비해 해석결과가 실험결과와 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 콘크리트 표층부의 특성 때문으로 추측하였다.

콘크리트 내부의 탄산칼슘은 약 900°C에서 열분해 반응을 일으키는데(대한건축학회, 2008) 화재 시 콘크리트 표면층의 온도는 단 시간 내에 가열 곡선의 온도와 거의 일치할 정도로 높아져서 탄산칼슘의 열분해 반응이 발생하여 콘크리트의 온도상승을 억제할 수 있다. 콘크리트 표층부는 내부보다 모르타르 양이 많은 부분이기 때문에 상대적으로 밀도가 낮고, 마감으로 인하여 수밀성이 높은 부분이다. 콘크리트는 밀도가 낮고, 굵은 골재의 비율이 작을수록 열전도도가 감소하는 경향을 나타낸다(한국콘크리트학회, 2004b; 김국한 등, 2001). 따라서 콘크리트 표면층은 내부 콘크리트와 다른 열적 특성을 가진 것으로 예측할 수 있고, 이를 바탕으로 재료 모델을 다시 수정하였다.

4.1절의 수정 모델을 기본으로 하여 표층부와 중앙부, 두

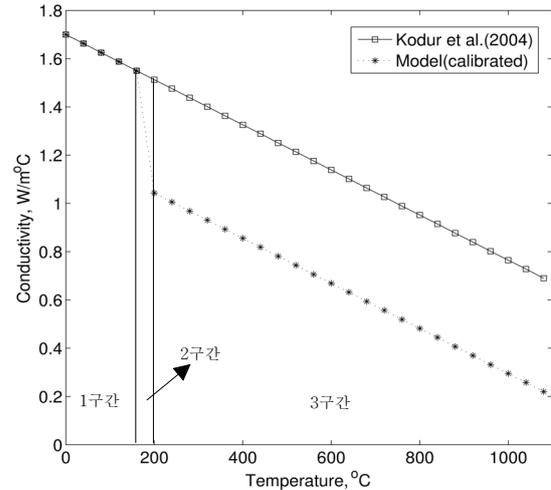


그림 8 콘크리트 수정 열전도도 비교

부분으로 나누어 콘크리트의 열전도도를 수정하였다. 유한요소 해석을 통해 표층부는 가열곡선의 온도와 거의 동일한 지점인 콘크리트 표면에서부터 7mm 깊이로 정하였고, 그 이외에 부분을 중앙부로 결정하였다(그림 11). 콘크리트 비열은 표층부와 중앙부 모두 4.1절과 동일한 값을 사용하였다. 중앙부 열전도도는 수정없이 4.1절의 열전도도를 사용하고 고온에서의 콘크리트 특성을 고려하여 표층부 열전도도를 수정하였다. 내화실험 시 콘크리트 표층부는 단 시간 내에 가열곡선의 온도와 거의 일치하여 탄산칼슘의 열분해 반응이 일어나(900°C) 콘크리트의 온도상승을 억제하고, 내부 콘크리트보다 수밀성이 높고 밀도가 낮아 작은 열전도도 값을 갖는다고 가정하여 900°C에서의 내부 콘크리트 열전도도 값을 초기 표층부 콘크리트의 열전도도 값으로 결정하였다. 표층부 열전도도는 내부와 마찬가지로 온도가 올라감에 따라 선형적으로 감소한다고 가정하였고, 화재 시 표층부 온도는 160~200°C보다 매우 높은 약 900~1000°C정도인 것을 감안하여 섬유의 용융에 의한 안정기 현상은 고려하지 않았다. 수정한 열전도도 식은 다음과 같고 그래프는 그림 9와 같다.

표층부

$$k = 0.3885 - 0.00017 T \quad (0 \leq T \leq 1000)$$

중앙부

$$\begin{aligned} k &= 1.7 - 0.000935 T & (0 \leq T \leq 160) \\ k &= 3.58 - 0.012685 T & (160 \leq T \leq 200) \\ k &= 1.23 - 0.000935 T & (200 \leq T \leq 1000) \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 k 는 열전도도(W/m°C), T 는 온도(°C)이다.

기존 모델과 같이 전체 단면의 1/4을 4절점 요소(quad-

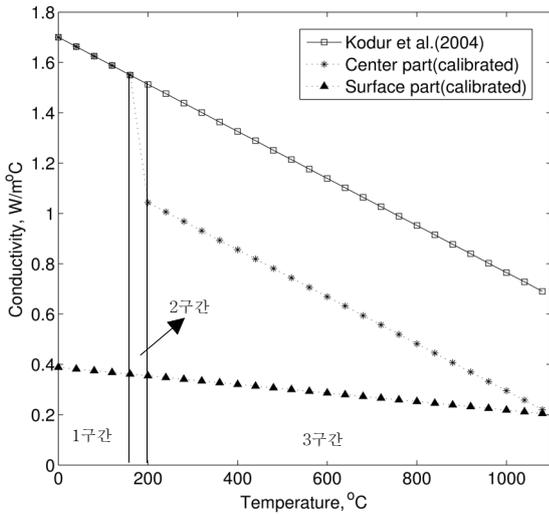


그림 9 표층부 수정 열전도도 비교

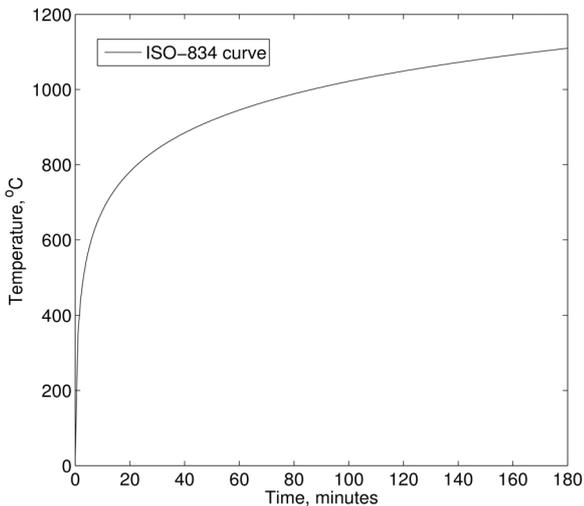


그림 10 화재 가열곡선(ISO, 1975)

rilateral element)로 모델링하였고, 단면 요소의 개수는 1,493개였다(그림 11). 콘크리트의 열전달은 화재의 대류, 복사에 의한 영향보다는 표면 온도의 증가에 따른 열전도의 영향이 크다고 판단하였고, 선행 연구(김홍열 등, 2010; Kodur 등, 2004)를 참조하여 열하중 경계조건은 고정 온도(prescribed temperature)로 결정하여 ISO 834 화재곡선(그림 10)을 사용하였다. 표층부 수정 재료모델을 이용한 유한요소 해석 결과는 그림 12와 같다. 3시간 후의 콘크리트 각 지점의 온도를 표층부 수정 전의 모델 해석결과와 비교하면 C4 지점은 약 20°C, C2, C3 지점은 약 40°C 감소한 반면 C1 지점은 약 100°C 감소하였고, C2, C3, C4 지점뿐만 아니라 C1 지점에서도 해석결과와 실험결과가 잘 일치하였다. 표층부 열전도도를 수정하는 것은 다른 지점들 보다 표면에 가까운 C1지점의 온도변화에 관련이 큰 것으로 나타났다. 수정 재료모델을

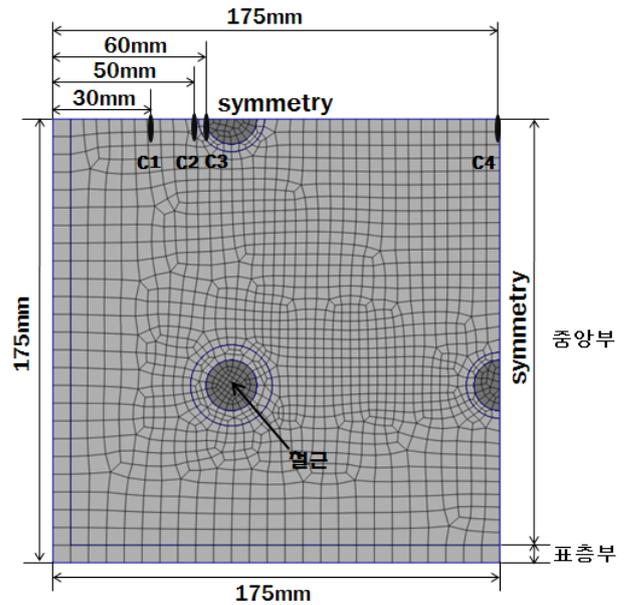


그림 11 표층부 수정 콘크리트 단면 Mesh (C1, C2, C3, C4 : 온도측정 지점)

이용한 내화해석 결과가 실험 자료와 근입 깊이에 대해서 유사한 결과를 얻었고, 수정된 재료모델을 섬유혼입 고강도 콘크리트의 재료모델로 제안하였다.

5. 결론 및 고찰

본 논문에서는 섬유혼입 고강도 콘크리트의 내화성능 해석에 대한 연구를 수행하였다. 섬유혼입 고강도 콘크리트에 대한 내화해석 전에 기존의 재료모델(Kodur 등, 2004)을 이용하여 고강도 콘크리트의 내화실험에 대한 유한요소해석을 실행하였다. 내화해석 결과, Kodur 등(2004)의 유한차분법을 이용한 해석결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었고, 내화 실험결과와도 잘 일치하였다. 이어서 고강도 콘크리트의 재료모델을 이용하여 한국건설기술원에서 실행한 섬유혼입 고강도 콘크리트의 내화실험 자료에 대한 유한요소해석을 실행하였다. 내화해석 결과와 실험결과는 큰 차이가 있어 섬유혼입 고강도 콘크리트의 재료모델은 고강도 콘크리트와 다른 것을 확인하였고, 고강도 콘크리트의 열적 물성치(thermal property)인 비열(specific heat)과 열전도도(thermal conductivity)를 수정하였다.

섬유혼입 고강도 콘크리트의 재료모델을 결정하기 위하여 고온에서 콘크리트 내부의 물리적인 현상과 섬유 특성을 고려하여 고강도 콘크리트의 열적 물성치를 수정하였다. 화재 시 섬유혼입 고강도 콘크리트의 질량변화는 고강도 콘크리트의 질량 변화와 유사한 사실에 기인하여 비열은 수정을 하지 않았고, 열전도도는 고온에서 섬유의 특성과 콘크리트

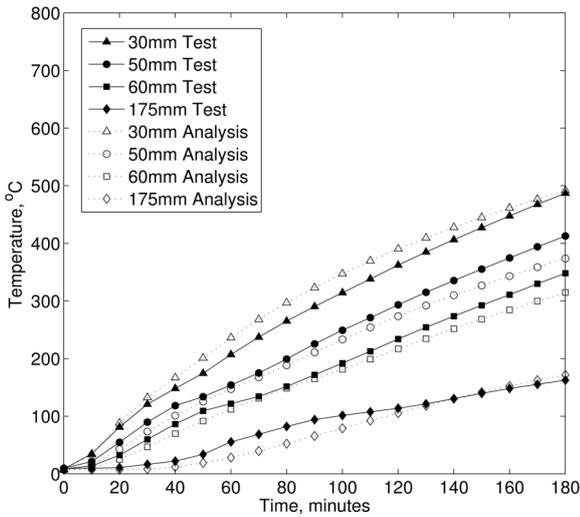


그림 12 표층부 수정 재료모델 온도분포 비교

내부의 물리적인 현상을 고려하여 수정하였다. 또한 콘크리트 표층부의 물리적, 화학적인 특성이 큰 기여를 한다고 판단하여 재료모델을 추가로 수정하였고, 보정한 재료모델을 이용하여 유한요소해석을 실행한 결과는 내화실험 결과와 일치하였다.

제안된 재료모델은 섬유혼입 고강도 콘크리트의 복잡한 내화거동을 열전도도의 수정을 통하여 보정한 모델이다. 추가의 모델링 매개변수 도입이나 구성 재료의 표현없이 일반 유한요소해석 프로그램을 이용하여 섬유혼입 고강도 콘크리트의 내화거동을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 현 콘크리트 모델의 모델링 변수들은 본 연구에서 사용된 특정 섬유혼입량 및 배합비의 고강도 콘크리트에 대한 것으로 다른 배합설계의 섬유혼입 콘크리트에 대해서는 열전도도 식의 매개변수가 변할 것으로 기대된다. 하지만, 온도상승에 대한 표층부부터 중앙부까지의 정확한 온도 분포 예측을 위해 물리적 현상에 근거한 비열과 열전도도의 수정 모델은 섬유혼입 고강도 콘크리트 내화거동 예측에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

권영진, 김무한, 김용로, 장재봉 (2005) 화재 피해를 입은 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 대한건축학회, 21(1), pp.107~114.
 김국한, 전상은, 방기성, 김진근 (2001) 콘크리트의 열전도도에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 13(4), pp.305~313.
 김홍열, 김형준, 전현규, 염광수 (2010) 표준화재 재하조건

Fiber Cocktail을 혼입한 고강도 콘크리트 기둥의 전열 특성 및 화재 거동에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 22(1), pp.29~39.
 대한건축학회 (2008) 고강도 콘크리트 구조내화 설계, 대한건축학회.
 염광수, 전현규, 김홍열 (2009a) 섬유혼입공법을 적용한 고강도 콘크리트 기둥의 비재하 내화시험, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 21(4), pp.467~473.
 염광수, 전현규, 김홍열 (2009b) 섬유혼입공법을 적용한 고강도 콘크리트 기둥의 재하 내화시험, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 21(4), pp.473~480.
 한국콘크리트학회 (2004a) 철근콘크리트 구조물의 내화특성, 한국콘크리트학회.
 한국콘크리트학회 (2004b) 최신 콘크리트 공학, 한국콘크리트학회.
 한국표준협회 (1999) KS F 2257-1, 4, 5, 6, 7 건축구조부재의 내화시험방법, 한국표준협회.
 Atkinson, T. (2004) Polypropylene Fibers Control Explosive Spalling in High-Performance Concrete, *Concrete*, 38(10), pp.69~70.
 Capua, D.D., Mari, A.R. (2007) Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Cross-Section Exposed to Fire, *Fire Safety Journal*, 42, pp.139~149.
 Connolly, R.J. (1997) The Spalling of Concrete, *Fire Engineering*, 38~40.
 Ellobody, E., Bailey, C.G. (2008) Modelling of Unbonded Post-Tensioned Concrete Slabs under Fire Conditions, *Fire Safety Journal*, 44, pp.159~167.
 Holman, J.P. (2010) *HEAT TRANSFER*, 10th Edition, McGraw-Hill, pp.1~24.
 Huebner, K.H., Bewhirst, D.L., Smith, D.E., Byrom T.G. (2001) *The Finite Element Methods for Engineers*, Fourth Edition, Wiley Inter-science, pp.313~375.
 ISO (1975) Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction, *ISO 834-1975, International Organization for Standardization*.
 Kalifa, P., Chene, G., Galle, C. (2001) High-Temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fibers, From spalling to microstructure, *Cement and Concrete Research*, 31, pp.1487~1499.
 Kodur, V.K.R., Wang, T.C., Cheng, F.P. (2004) Predicting the Fire Resistance Behaviour of High Strength Concrete Columns, *Cement & Concrete Composites*, 26, pp.141~153.
 Lie, T.T., Irwin, R.J. (1995) Fire Resistance of Rectangular Steel Columns Filled with Bar-Rein-

forced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 121(5), pp.797~805.

Liu, X., Ye, G., Schutter, G.D., Yuan, Taerwe Y.L. (2008), On the Mechanism of Polypropylene Fibres in Preventing Fire Spalling in Self Compacting and High Performance Cement Paste, *Cement & Concrete Research*, 38, pp.487~499.

MIDASIT (2005) Midas-FEA Version 1.1.0.

Michael, J., Moran, Howard N., Shapiro (2008) *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Wiley, pp.80~105.

Nishida, A., Ymazaki, N., Inoue, H., Schneider, U., Diederichs, U. (1995) Study on the Properties of High-Strength Concrete with Short Polypropylene

Fibre for Spalling Resistance, *Proceedings of International Conference on Concrete Under Severe Conditions*. CONSEC'95, 2, Sapporo, Japan, pp.1141~1150.

Yunus, A. Çengel (2004) *Heat Transfer : A Practical Approach*. Brief Edition, McGraw-Hill, pp.389~415.

- 논문접수일 2010년 8월 12일
- 논문심사일
1차 2010년 8월 18일
2차 2010년 12월 9일
- 게재확정일 2010년 1월 13일