

고온에 노출된 PCM 충전형 바닥 시스템의 거동 특성

Behavior Characteristics of PCM Infilled Floor System at Elevated Temperature

박민재*
Park, Min-Jae

민정기**
Min, Jeong-Ki

윤성원***
Yoon, Sung-Won

주영규****
Ju, Young K.

Abstract

Composite Floor system infilled with PCM(Phase Change Material) between upper and lower steel plates was developed to apply the steel frame. When steel frames were applied this system, it can absolutely reduce the duration of construction due to dry construction method. However to apply this system as a structural floor member without fire resistance covering, it must have 2 hours fire resistance performance. Because PCM consisted of three quarters of section with thermal insulation performance, fire resistance performance of this floor system was expected to easily have 2 hours fire resistance performance. This paper was to investigate behavior characteristics of PCM infilled floor system at elevated temperature using FEM analysis to develop the fire resistance performance of it.

Keywords : PCM, Fire resistance performance, Fire furnace test, Composite floor system, Steel frame

1. 서론

현대 건축물은 고층화 및 대형화가 진행되고 있으며, 이에 따라 구조부재의 강도와 강성 증진을 위한 연구개발이 꾸준히 진행되고 있다. 구조부재 재료로 가장 많이 사용되는 콘크리트는 인성을 증가시킨 프리스트레스 콘크리트¹⁾, 압축강도가 180MPa 이상인 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, UHPC)²⁾, 유리, 탄소, 아라미드 섬유 등을 사용한 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete)³⁾, 시

공성 향상을 위해 초유동 특성을 이용한 자기충전 콘크리트⁴⁾ 등으로 개발되어 초고층 및 대공간 건축물에 사용되고 있다. 콘크리트와 마찬가지로 구조부재 재료로 많이 사용되는 강재의 경우, SS400, SM490 등 일반 강재를 많이 사용하지만, 설계기준 강도가 낮으며 40mm 이상의 두께에서 설계기준 강도를 약 10% 저감시켜야 하므로, 초고층 및 대공간 건축물에 적용이 비효율적이다⁵⁾. 이후에 소성변형능력, 용접성능 등의 성질을 지닌 건축구조용 SN강재⁶⁾, 소려 및 소입(Quenching and Tempering, QT) 열처리, 열가공제(Thermo-Mechanically Controlled, TMC)를 각각 사용한 인장강도 570MPa인, SM570QT와 SM570TMC가 개발되었다⁷⁾. 최근 국내에서 800MPa 초고강도 강재를 개발하여 롯데월드타워, 인천공항 제2여객터미널에 적용하였다⁷⁾. 일본의 경우, 1000MPa급 초고강도 강재를 최초 개발하여 Obayashi 기술연구소 건물의 기둥에 부분 적용하였다⁸⁾.

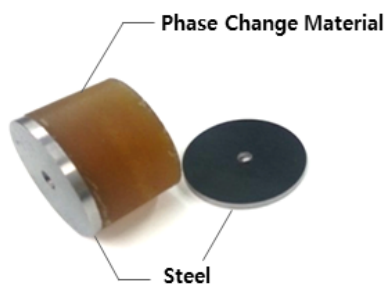
단일 재료의 개발뿐만 아니라, 콘크리트와 강재를 합성하여 사용한 CFT(Concrete Filled Steel Tube) 기둥, 비좌굴가새(Buckling Restrained Brace, BRB), iT ECH(Innovative Technical Economical & Convenient Hybrid) System, Slim floor 등 다양한 합성구조 시

* 주저자, 학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학과, 석박사통합과정
Department of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University.
** 정회원, 한국건설생활환경시험연구원 삼척실화재시험연구센터 선임연구원, 공학박사
Samcheock Real-scale Fire Testing & Research, Korea Conformity Laboratories
*** 정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology
**** 교신저자, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수, 공학박사
School of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University
Tel: 02-3290-3327 Fax: 02-928-7656
E-mail: tallsite@korea.ac.kr

시스템들이 개발되었다. 또한 기존에 건설에 사용하지 않은 신소재를 활용하여 지붕재 및 벽재로 사용되는 EPS 패널과 그라스울 패널, 면요소인 벽과 바닥구조 부재로 사용되는 Metawell, SPS 등이 연구 개발되고 있다.

하지만 위에서 언급한 개발된 콘크리트와 강재를 사용한 부재의 경우, 구조 부재의 단면 감소, 자중 저감 등의 구조적 효율성이 크게 변하지 않고, 합성 구조 시스템의 경우, 설치 및 운반이 어려워 시공성이 떨어진다 단점이 있다. 또한 신소재를 활용한 시스템들의 경우 연구 진행단계가 초기 수준이며, 대부분 해외에서 생산되는 시스템이기 때문에 구조재로 사용하기 위해서는 몰량 증가로 인해 경제성이 떨어진다. 또한 설치의 어려움, 정밀 시공 등의 시공 효율성이 낮고 공기를 증가시켜 현장 적용가능성이 아직 상당히 낮다고 볼 수 있다. 따라서 시공효율성 및 공기 문제를 해결하고 획기적인 단면 감소, 자중 저감으로 구조 효율성을 높일 수 있는 iFLASH(Innovative Fire proof, Light-weighted, Absorbed, Shallow and Hybrid) System을 개발하였다.

iFLASH System은 <Fig. 1>과 같이 상하부 강판 사이에 강한 부착력을 가진 친환경 상변화물질(Phase Change Material, PCM)을 충전한 조립식 합성바닥 부재이다. iFLASH System의 주요 특징은 자중저감, 층고절감, 공기단축, 친환경성, 방폭¹⁰⁾ 및 진동 저항 성능¹¹⁾, 내화성능^{12),13)}으로 크게 나눌 수 있다.



<Fig. 1> Components of iFLASH system

내부에 충전된 PCM의 밀도는 $1,180\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 상당히 가볍고 두께가 25~80mm로 기존 슬래브의 비해 최소 50% 이상 얇기 때문에 건물의 구조 몰량뿐

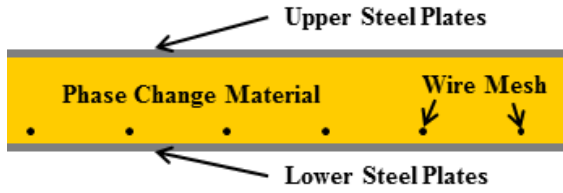
만 아니라 층고절감 효과가 뛰어나다¹⁴⁾. 또한 공장에서 사전 제작되어 건식공법으로 현장에서 설치되기 때문에 공사 기간의 많은 부분을 차지하는 기존 바닥 공사의 공기를 단축시킬 수 있다. 또한 재활용되는 강판과 재사용이 가능한 PCM은 건설폐기물이 최소한으로 발생하여 친환경적이다. PCM은 탄성중합체의 일종으로 충격과 진동 저항에 큰 효과를 나타낸다.



<Fig. 2> Application of iFLASH system

iFLASH System은 휨성능 실험⁹⁾을 통해 수평부재로서의 적합성과 연성 능력에 대해 확인하였다. 또한 <Fig. 2>와 같이 iFLASH System을 적용한 건물에 대해 바닥 진동 실험을 진행하여 진동저항 성능¹¹⁾을 확인하였다. 내화피복이 없는 바닥 구조부재로 사용하기 위해 각 성능별 연구가 계속 진행 중이며, 부착력을 바탕으로 개발된 PCM을 충전한 초기 iFLASH System의 내화실험 결과에 기초하여 iFLASH System의 내화성능 연구가 진행 중이다. KS기준^{15),16)}의 내화 시험 방법에 따라 iFLASH System을 가열할 경우 하부 강판의 내력저하가 나타나면서 처짐이 급격하게 증가하기 시작한다. 이로 인해 고온에서 휨성능을 증가시키기 위해 <Fig. 3>과 같이 Wire-mesh가 설치된 모듈을 개발진행 중에 있다. Wire-Mesh는 하부 강판과 포인트 용접으로 연결되며, 하부와 직접 만나는 폭방향 Wire는 구조부재로 사용되지 않는다. 반면 하부와 직접 만나지 않는 길이방향 Wire는 고온에서 내력저하로 인장력을 받지 못하는 하부 강판 대신에 인장력을 발휘한다. 본 논문에서는 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS/CAE 6.10-1로 해석을 수행하여 고온에서 iFLASH System 내부에 설치된 Wire-mesh의

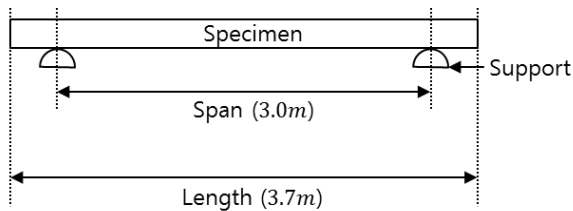
직경에 따른 역학적 거동 특성을 분석하고자 한다.



〈Fig. 3〉 Section of iFLASH system

2015년 일부 개정된 국토교통부령 제193호 건축물의 피난방화구조 등의 기준에 관한 규칙에 따르면 바닥구조의 최대 내화성능은 2시간이다. 내화성능 2시간은 KS기준에 따라 2시간 내화시험을 실시한 후, 성능 기준을 만족하는 시험체의 내화성능을 의미한다.

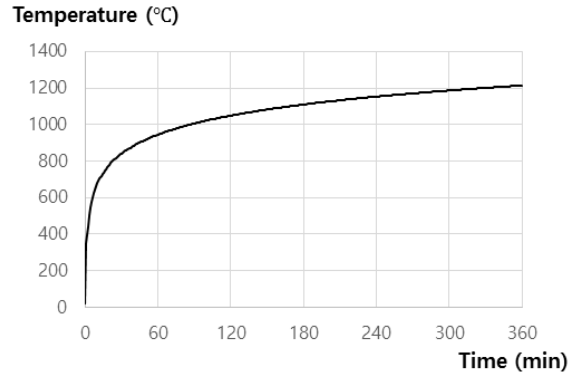
조립식 바닥 시스템으로 스패ن 3.0m를 목표로 하는 iFLASH System의 경우 KS기준의 내화시험 기준에 따라 길이 3.7m, 너비 3.0m 크기의 시험체를 길이 3.0m, 너비 3.0m 크기의 수평 가열로에 단순지지로 설치한다. KS기준의 내화시험 세부 규정에 따라 시험체의 길이는 시험체 스패んの 최대 0.7m를 더해야 하며, <Fig. 4>와 같이 단순지지를 할 경우 시험체의 스패んと 시험체의 가열 길이는 3.0m로 동일하다.



〈Fig. 4〉 Section of fire furnace test setup

iFLASH System과 같이 내화 구조체의 내화시험을 진행하기 위해서는 가열 시작 15분전부터 시험 하중을 서서히 가력하기 시작하며, 이 때 시험 하중은 시험자에 의해 결정된다. 기존에 수행되었던 iFLASH System 내화 시험의 경우, 처짐으로 인한 시험 중단을 최소화하기 위해 2.0kN/m²를 시험하중으로 산정하였다. 하중 가력 15분 후, <Fig. 5>에

나타낸 표준 시간-가열 온도 곡선을 따라 2시간 동안 시험체의 하부를 가열한다.



〈Fig. 5〉 Standard time-heating temperature curve

2시간 가열 후 하중지지력, 차열성, 차염성 3가지 기준으로 내화성능을 평가한다. 하중지지력은 시험체의 처짐과 처짐 변화량이 시험체의 스패ん(L)과 구조 단면의 최대 압축력을 받도록 설계된 위치에서 최대 인장력을 받도록 설계된 위치까지의 거리(d)로 인해 결정되는 처짐과 처짐 변화량 기준을 초과하지 않으면 만족한다.

〈Table 1〉 Criteria of stability and insulation

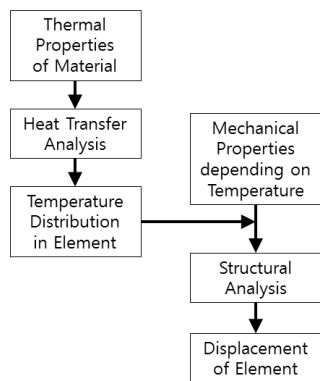
| Criteria | |
|------------|--|
| Stability | • Displacement <math>< \frac{L^2}{400d}</math> (mm) |
| | • The change of displacement <math>< \frac{L^2}{9000d}</math> (mm/min) |
| Insulation | • The average $\Delta T < 140^\circ\text{C}</math>$ |
| | • The maximum $\Delta T < 180^\circ\text{C}</math>$ |

iFLASH System의 경우, 시험체의 두께가 d가 된다. 차열성의 경우, 상부면의 온도 변화량(ΔT)의 최고값과 평균값으로 평가한다. 차염성의 경우, 상부면 화염 및 균열 발생 여부로 평가하며, iFLASH System의 경우 상부면에서 화염 및 균열의 발생 가능성이 적은 강재를 사용하기 때문에 항상 만족하는 것으로 본다. 하중지지력과 차열성에 대한 세부 규정은 <Table 1>에 나타나있다.

2. 유한요소 해석

2.1 유한요소 해석 개요

iFLASH System의 내화시험을 범용 유한요소 해석프로그램 ABAQUS/CAE 6.10-1으로 모델링하기 위해서는 <Fig. 6>과 같은 단계를 거쳐야 한다. 하부면 가열로 인한 부재 내부의 온도분포를 파악하기 위해서 열전달 해석을 수행하여야 한다. 열전달 해석을 수행하기 위해 필요한 재료의 열적 특성은 밀도, 열전도율, 비열 3가지이다. 부재 내부의 온도 분포를 파악한 다음, 온도별 재료의 기계적 특성을 이용하여 부재의 응력과 변형률을 계산하여 iFLASH System의 처짐을 계산한다. ABAQUS를 이용한 iFLASH System 내화 해석 모델링은 대칭을 이용하여 1/4 부분만 모델링하였다. 또한 해석의 효율성을 높이기 위해 구조부재가 아닌 폭방향 Wire는 생략하였으며, 고온에서 인장력을 받을 길이방향 Wire는 원형이 아닌 등가면적의 사각형으로 모델링하였다. PCM의 강한 부착력으로 iFLASH System의 단면이 유지되는데, 부착력에 대한 정확한 규명이 없기 때문에 본 논문에서는 재료 사이에 부착면 탈락은 없다고 가정하였다.



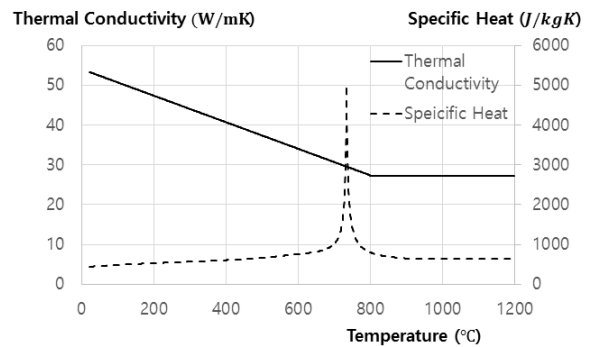
<Fig. 6> Process of FEM analysis

2.2 재료 특성

2.2.1 강재

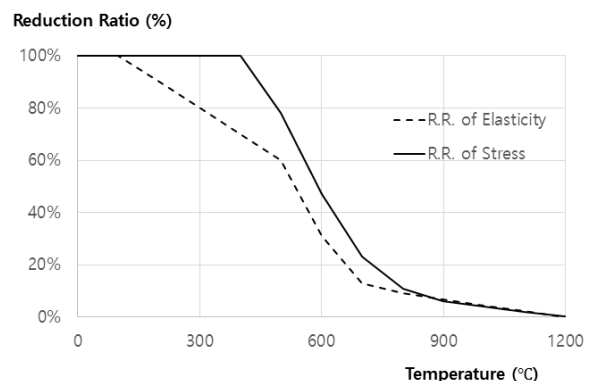
열전달 해석에 사용될 강재의 밀도, 열전도율, 비열과 온도별 기계적 특성은 Eurocode 1993-1-2

(Design of Steel Structure)를 참고하였다. Eurocode는 상온에서의 기계적 특성 대비 감소 비율을 온도별로 나타낸다. 상온에서의 기계적 특성은 초기 iFLASH System의 내화시험체에 사용된 강재의 재료실험 결과를 사용하였다. 강재의 밀도는 $7,850\text{kg/m}^3$ 으로 온도와 관계없는 상수 값이고, 열전도율과 비열은 <Fig. 7>의 그래프와 같다.

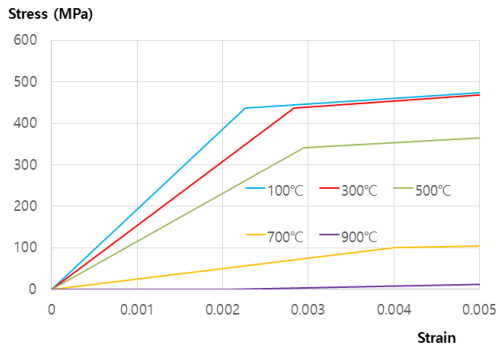


<Fig. 7> Thermal conductivity and specific heat of steel

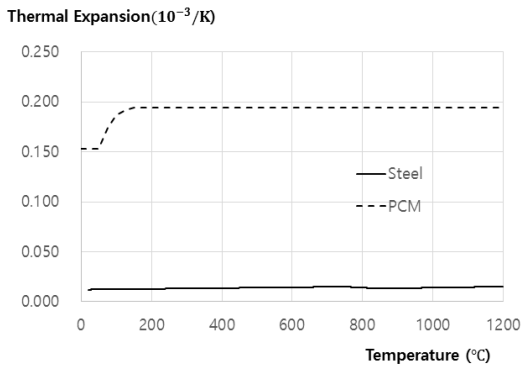
온도별 기계적 특성 감소 비율은 <Fig. 8>의 그래프와 같으며, 이를 바탕으로 한 온도별 재료의 응력-변형률 곡선은 <Fig. 9>와 같다. 응력-변형률 곡선에 따르면 강재는 500~700°C에서 급격한 내력저하가 나타나는 것을 확인할 수 있다. <Fig. 10>은 Eurocode에서 제시하는 강재의 온도별 열팽창계수를 나타낸다.



<Fig. 8> Reduction ratio of steel depending on temperature



〈Fig. 9〉 Stress-strain curve of steel depending on temperature



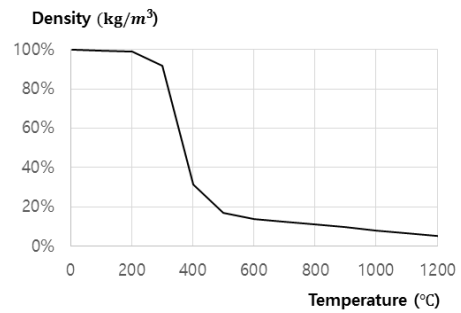
〈Fig. 10〉 Thermal expansion of steel depending on temperature

2.2.2 PCM

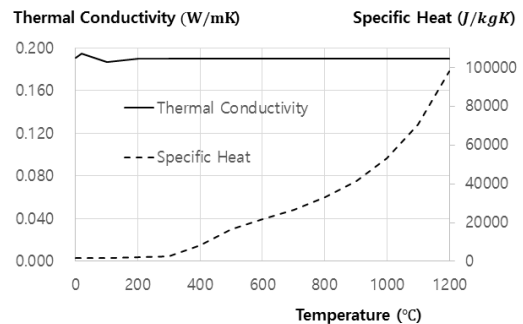
본 연구에서 사용된 PCM은 상용화되지 않은 폴리머계열의 고분자소재로, 재료의 열특성 및 기계적 특성을 파악하기 위해 KS기준에 의거한 시험을 실시하였다. PCM의 밀도와 비열, 열전도율은 TGA-DSC 시험을 토대로 확보하였으며, 비열과 열전도율은 밀도와 다르게 기계의 한계로 200°C까지만 확보하였다. 200°C 이상의 값은 밀도와 비열에 비례하고 열전도율에 반비례하는 열확산도를 지수함수로 가정하여 예측하였다. 〈Fig. 11〉은 온도별 PCM의 밀도를, 〈Fig. 12〉는 온도별 PCM의 열전도율과 비열을 보여준다.

PCM의 기계적 특성은 KS기준에 의거한 시험을 통해 확인하였으며⁹⁾, 온도별 감소 비율은 〈Fig. 11〉

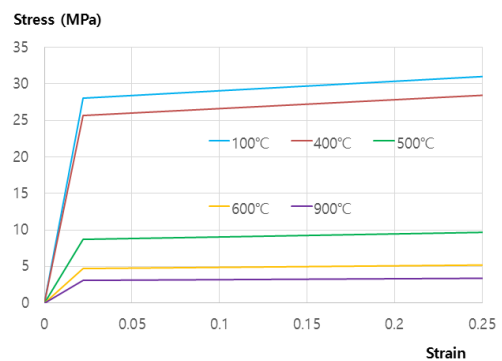
의 잔류밀도 비율과 동일하다고 가정하였다. 온도별 응력-변형률 곡선은 〈Fig. 13〉과 같으며, 온도별 열팽창계수는 〈Fig. 10〉과 같다. PCM은 강재의 경우보다 낮은 400~500°C에서 내력저하가 급격하게 일어나는 것을 확인할 수 있다.



〈Fig. 11〉 Density of PCM depending on temperature



〈Fig. 12〉 Thermal conductivity and specific heat of PCM depending on temperature



〈Fig. 13〉 Stress-strain curve of PCM depending on temperature

2.3 해석 변수

Wire-mesh 간격은 초기 내화실험 당시 사용하였던 150mm으로 설정하였다. 해석 모델은 Wire-mesh가 설치되지 않은 모델 1가지와 Wire의 직경을 다르게 하여 총 5가지를 수행하였고, 길이방향 Wire의 중심위치는 하부 강판에서부터 폭방향 Wire의 지름과 길이방향 Wire의 반지름의 합만큼 떨어진 곳에 있다. 각 해석 모델의 명칭과 특징은 <Table 2>와 같다.

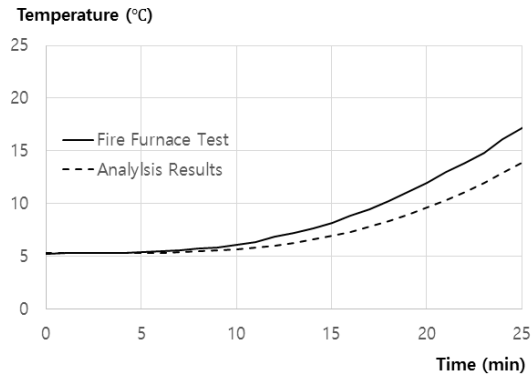
<Table 2> Variable : Wire-mesh

| Name | Steel (mm) | PCM (mm) | Diameter of wire (mm) | Location of wire (mm) |
|----------|------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| T41 | | | - | - |
| T41w4.8 | | | 4.8 | 7.2 |
| T41w7 | 3 | 35 | 7 | 10.5 |
| T41w9 | | | 9 | 13.5 |
| T41w11.3 | | | 11.3 | 16.95 |

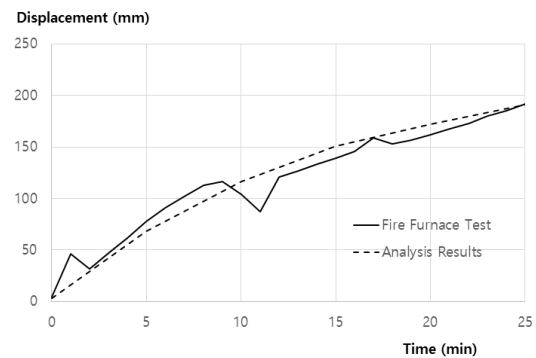
3. 유한요소 해석 결과

3.1 해석 모델링 검증

본 논문에서는 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 기존에 수행되었던 초기 iFLASH System의 내화 시험과 해석 결과를 비교하였다. <Fig. 14>는 시험과 해석의 상부면의 평균온도 변화량을 비교한 그래프이다. <Fig. 15>는 시험과 해석의 처짐량을 비교한 그래프이다. 실제 시험은 15분 가력 후, 25분 동안 가열하였으며 T41w4.8 모델과 같은 두께와 Wire 직경으로 제작되었다. 실제 시험체와 해석 모델의 차이는 상하부 강판을 연결해주는 원형 스페이서의 설치 유무이다. 실제 시험체에서는 원형 스페이서가 설치되어 해석의 온도 변화량보다 더 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 처짐의 경우, 실제 시험체에서는 부착면 탈락, 스페이서 용접부위 균열로 2분, 12분에 불규칙한 변화가 발생하였다. 하지만 해석과 시험 결과는 전체적인 처짐이 유사하며, 해석의 신뢰성을 확보하였다.



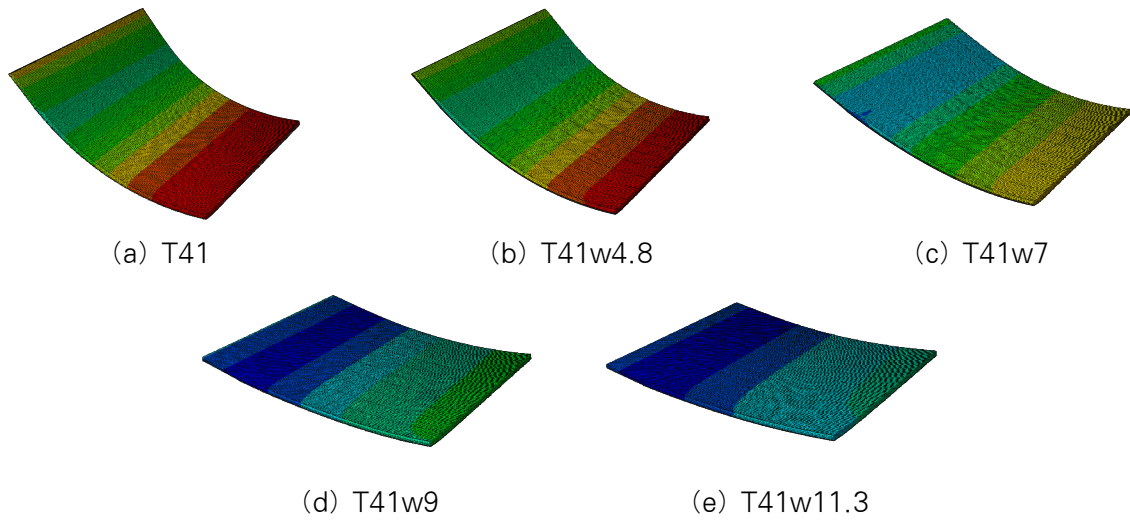
<Fig. 14> Average temperature of results



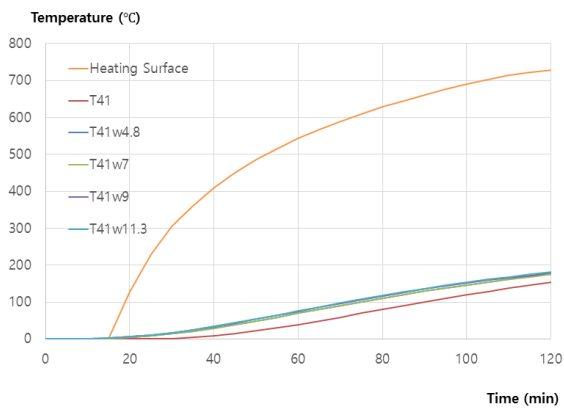
<Fig. 15> Displacement of results

3.2 Wire mesh 효과

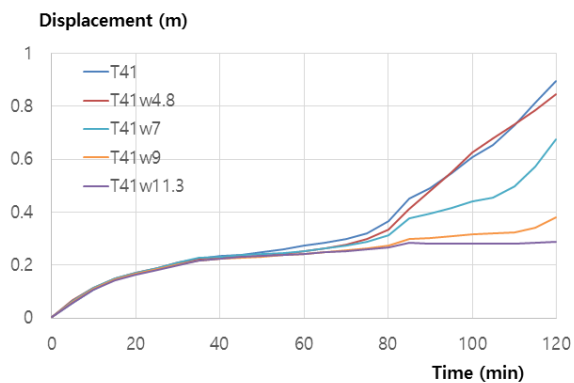
<Fig. 17>은 각 모델별 시간에 따른 상부면의 온도 분포를 나타낸 것이다. Heating surface 곡선은 하부면(가열면)의 온도를 나타낸 것이며 2시간 동안 약 760°C까지 상승하여 하부 강판의 내력은 상온 값의 약 10% 정도 남아있는 상태이다. Wire-mesh 직경에 따른 상부면의 온도 변화는 크지 않아 Wire의 직경에 따른 상부면의 온도 변화는 무시할 수 있다. <Fig. 16>은 최종 FEM 해석 결과 처짐 양상을 <Fig. 18>은 각 모델별 시간에 따른 처짐 값을 보여 준다. T41과 T41w4.8의 경우 뚜렷하게 나타나지 않지만, 크게 2번의 변화율 양상이 보인다. 이는 Wire-mesh를 설치한 iFLASH System의 내화시험을 진행할 경우 <Fig. 19>와 같이 총 3단계에 걸쳐 변화한 단면이 휨에 저항한다는 것을 알 수 있다.



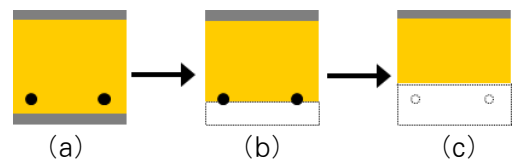
〈Fig. 16〉 Results of FEM analysis



〈Fig. 17〉 Temperature results of analysis



〈Fig. 18〉 Displacement results of analysis



〈Fig. 19〉 Section of each stage

〈Table 3〉 Time of each stage

| | (b) Lower steel failure(min) | (c) Wire-mesh failure(min) | (c)-(b) (min) |
|----------|------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| T41 | 85 | - | - |
| T41w4.8 | 85 | 100 | 15 |
| T41w7 | 85 | 105 | 20 |
| T41w9 | 85 | 110 | 25 |
| T41w11.3 | 85 | - | - |

〈Table 3〉은 각 단계별 해당 시간을 나타낸 표이다. T41의 경우 Wire-mesh가 설치되지 않았기 때문에 하부 강판의 내력이 상실되는 시간만 분석한다. T41w11.3도 하부 강판 내력상실 시간만 나온 이유는 2시간 동안 Wire-mesh의 내력 상실이 나타나지 않았기 때문이다. 모든 해석 모델의 하부 강판 내력 상실 시간은 가열 시작하고 85분이 지난 후이다. 또한 Wire-mesh가 단면의 최대 인장부가 되는 시간

은 각각 T41w4.8은 100분, T41w7은 105분, T41w9는 110분이다. 하부 강판의 내력 상실 후 Wire-mesh의 내력 상실까지의 시간은 각각 T41w4.8은 15분, T41w7은 20분, T41w9는 30분이다. 이는 해석 모델의 Wire 직경의 크기에 비례한다. 이는 하부 강판으로부터 길이방향 Wire가 위치한 길이가 폭방향 Wire의 직경과 같기 때문이다. 최종 처짐 값은 단면 내 Wire-mesh의 강성보다 Wire의 직경 크기에 따라 Wire 내력 상실 시간이 지배적인 영향을 미쳤다. T41과 T41w4.8은 95~110분 사이에 처짐이 역전하는 구간이 있다. 이 구간에서 온도 상승으로 인한 내력 저하가 발생한 길이방향 Wire-mesh가 Wire-mesh를 설치하지 않은 단면보다 강성이 작아져서 발생한 현상이다. 이는 단면 하부에 위치한 Wire-mesh를 통한 온도분포가 집중되어 하부의 내력 저하가 Wire-mesh를 설치하지 않은 단면보다 크게 작용했기 때문이다.

4. 결론

PCM 충전형 바닥 시스템의 고온에서의 거동 특성을 분석하였다. KS기준에 따라 내화시험 방법을 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS/CAE 6.10-1로 모델링하였다. 부재 내부의 온도분포를 파악하는 열전달 해석을 수행한 후, 부재 내부의 온도 분포와 온도별 재료의 기계적 특성을 이용하여 응력-변형을 해석을 수행하였다. 해석 모델은 대칭을 이용하여 1/4부분만 사용하였다. 해석 모델 개수는 총 5가지로 서로 다른 Wire 직경을 사용한 4가지와 Wire-mesh를 설치하지 않은 1가지로 구성된다. 2시간 상부면(비가열면)의 온도 변화량과 모델의 처짐을 계산한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) Wire-mesh를 설치한 PCM 충전형 바닥 시스템은 하부 강판의 내력 상실, 길이방향 Wire의 내력 상실을 기점으로 3단계 다른 거동 특성을 보인다. 시스템의 내화성능에 영향을 미치는 구간은 길이방향 Wire의 내력상실 구간이다. 이 구간은 고온에서 시스템의 휨인장에 거동하는 요소가 없어 처짐이 급격하게 변하는 구간이다.

2) Wire-mesh는 상부면의 온도 변화량에 큰 역할을 미치지 않지만, 처짐 값에 상당한 영향을 미친다.

3) 단면 내 Wire-mesh의 강성이 아닌 Wire 직경의 크기가 Wire의 내력 상실 시간을 늦추어 2시간 후 처짐의 결정한다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2013R1A2A2A01067872)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. J.M. Ahn, S.W. Shin, "New Trend of Architectural Reinforced Concrete Structures", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.13, No.5, pp.32-39, 2001
2. S.G. Hong, S.H. Kang, N.H. Kim, "The Development of New Concrete and the Freedom of Forms", Review of Architecture and Building Science, Vol.59, No.7, pp.30-34, 2015
3. M.K. Ju, C.W. Park, "Characteristic Flexural Strength according to FRP Reinforced Sheet", Proceedings of the Korea Concrete Institute, Vol.28, No.1, pp.245-246, 2016
4. J.H. Kim, "State-of-the-Art in Science and Technology of Advanced Cement-Based Materials", Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol.21, No.3, pp.94-95, 2009
5. T.S. Eom, S.W. Im, "Characteristics and Applicability of SM570TMC Steel for Building Structures", Review of Architecture and Building Sciences, Vol.50, No.12, pp.23-27, 2006
6. E.T. Lee, "Present and Future of High Performance Structural Steel(SN)", Review of Architecture and Building Sciences, Vol.50,

- No.12, pp.18-22, 2006
7. S.J. Kim, H.C. Jeong, "Development of Structural Steel and Trend of Welding Technology", Journal of Welding and Joining, Vol.34, No.1, pp.7-20, 2016
 8. T. Kamo, R. Ando, M. Sasaki, T. Suzuki, Y. Watanabe, "Ultra High Strength Steel for Sustainable Building Structures", NSSMC Technical Report, No. 10, pp.65-69, 2015
 9. Y.Y. Kim, J.H. Ryu, J.T. Oh, S.W. Yoon, Y.K. Ju, "Flexural Behavior of iFLASH System with No Blast Metal Cleaned Steel Plates", Vol.6, No.4, pp.30-37
 10. M.J. Park, "Blast Resistance of a Composite Panel with infilled Nano-Composite", Proceedings of 2nd World Congress and Exhibition on Construction & Steel Structure, 2016
 11. J.H. Lee, D.S. Lim, Y.K. Ju, S.W. Yoon, "Vibration Characteristics of iFLASH System", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.3, pp.89-97.
 12. M.J. Park, M.W. Park, Y.K. Ju, S.W. Yoon, "Numerical Prediction of Composite Slim Floor System infilled with Nano-Composite at Elevated Temperature", The 2nd International Symposium on Engineering and Applied Science, 2016
 13. M.J. Park, B.H. Do, S.W. Yoon, and Y.K. Ju, "Thermal Insulation Performance of Prefabricated Composite Slim floor System Infilled with Nano-Composite Using Heat Transfer Analysis", The 2nd International Symposium on Engineering and Applied Science, 2016
 14. M.J. Park, Y.Y. Kim, J.H. Ryu, J.S. Kim, B.H. Do, Y.K. Ju, "Application of iFLASH System for Nambuk Church", Proceedings of the Architectural Institute of Korea Symposium, Vol.35, No.2, pp.389-390, 2015
 15. KS F 2257-1, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction : General Requirements", Korea Agency for Technology and Standards ☎, 2014
 16. KS F 2257-5, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction : Specific Requirements for Loadbearing Horizontal Separating Elements", Korea Agency for Technology and Standards ☎, 2014
- Received : November 30, 2016
 - Revised : January 31, 2017
 - Accepted : January 31, 2017