

복합센서를 이용한 화재자현 콘크리트의 개발

Development of Fire-Diagnosis Concrete using Composite Sensors

최영화*
Choi, Young-Wha

김이성**
Kim, Ie-Sung

박강근***
Park, Kang-Geun

요약

콘크리트의 사용은 건축 및 토목분야에서 널리 사용되어 왔으며, 센서는 콘크리트에 기능적 특성을 위해 사용되어 왔다. 손상을 스스로 나타내는 콘크리트는 이미 개발되고 있는 중에 있다. 본 연구에서 온도보상센서는 금속의 선형팽창과 체적변형을 이용한 센서이다. LED는 광센서로 고휘도이며, 이들 센서의 가격은 저가격이다. 화재하중으로 인하여 콘크리트 보의 온도보상센서가 동작하는 동안 가상 보의 LED동작으로 콘크리트 부재의 온도상승을 예측한다. 본 연구에서는 부재의 손상감지를 위해 간단한 계측방법을 이용하여 화재자현을 스스로 나타내는 콘크리트 보를 개발하기 위한 기초적 연구이다.

Abstract

Use of concrete has undoubtedly become widespread in construction and civil engineering. Sensors are used to add functional characteristics to concrete. Self-diagnosis concrete is also being developed. The thermal protector used in the study is a sensor using the linear expansion and cubical expansion of metal. The LED(Light Emitting Diode) is a phototransistor type, and to secure high-sensitivity light, the prices of these sensors are low. Rising temperatures of concrete elements can be predicted from LED of the external virtual beam due to operation of thermal protector sensors of concrete beam caused by fire load on the concrete specimen.

In this study, the development of fire-diagnosis concrete using composite sensors are the fundamental study for damage detection using simply measurements.

키워드 : 광센서, 온도보상센서, 가상 보, 화재하중, 화재자현

Keywords : Phototransistor Sensor, Thermal Protector Sensor, The Virtual Beam, Fire Load, Fire-Diagnosis

1. 서론

센서를 이용한 지능형 콘크리트 개발을 위해 국내외적으로 많은 연구가 이루어지고 있는 중이다.

이에 관련 연구로 기전력형 센서인 압전소자와 광센서의 빛굴절을 이용하는 광섬유 센서(FBG)를 이용하여 콘크리트 구조물과 이를 구성하는 중요부재(Element)에 발생한 손상을 파악하는 연구를 수행 중에 있다. 이들의 연구는 정적 혹은 동적하중에

노출된 주요구조물에 발생한 손상을 파악하고 능동적으로 이를 보수하는 스마트 콘크리트에 대한 연구이다. 그러나, 콘크리트 구조물과 이를 구성하는 중요부재가 화재에 노출되었을 때 이를 스스로 나타내는 스마트 콘크리트에 대한 연구는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 광센서(Light Emitting Diode)와 온도 보상센서(Thermal Protector Sensor)를 콘크리트 구조물의 중요부재인 콘크리트 보표면에 매입하여 단실에서 화재가 발생할 경우, 이를 주요 콘크리트 부재의 표면에 매입된 온도 보상센서가 화재로 발생한 온도로 동작하여 외부에 배치된 가상 보의

* 대구대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 대구대학교 건축공학과 연구교수, 공학박사(교신저자)

Tel: 053-850-6512 Fax: 053-850-6519

E-mail : macgang@daegu.ac.kr

*** 부산대학교 건축학부 교수, 공학박사

광센서가 동작함으로써 화재발생을 자동으로 알려 주고 화재가 소진되어 단실과 콘크리트 부재의 온도가 적정온도로 저하되었을 경우, 광센서가 동작을 정지함으로써 화재의 소진을 알려주는 화재자현 콘크리트 보를 개발하기 위한 기초적 연구이다.

2. 연구 동향

화재에 노출된 콘크리트 보부재에 대한 국외연구로는 Sara Cattaneo(2008)가 높은 온도로 손상된 콘크리트의 잔류응력 특성평가에 대하여 연구를 하였다. 온도 사이클에 각각 노출된 콘크리트 부재의 파괴형상에 대해 분석하고 휨시험과 압축시험을 통하여 온도 사이클에 노출된 콘크리트 부재의 내력을 비교 평가한 연구였다.¹⁾

M. Dwaikat(2008)는 철근 콘크리트 보의 화재저항을 위한 수치적 모델에 대해 연구를 하였다. 고온에서 콘크리트의 재료적 특성을 파악하고 이를 수치해석 모델로 온도해석 평가를 하였으며, 이들 모델에 대한 강도 평가를 통하여 고온시 발생하는 보의 처짐을 비교분석하였다.²⁾

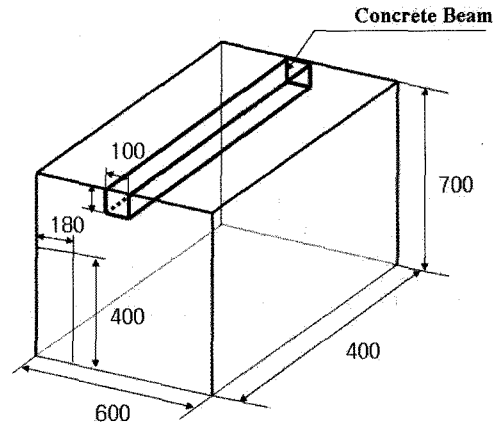
화재에 노출된 콘크리트 보부재에 대한 국내연구로 이상호(2004)는 고온을 받는 철근콘크리트 보 및 기둥 부재의 강도저하에 관한 실험적 연구를 하였다. 철근 콘크리트 구조를 대상으로 철근비와 가열온도 등을 주요 변수로 하여 재하하중의 유무에 따른 고온시의 부재강도를 파악하고 이들 변수들이 부재의 강도저하에 주는 영향을 파악하는 연구였다.³⁾

화재에 노출된 콘크리트 보 부재에 대한 국내의 연구 대부분은 고온에 부재가 노출되었을 때, 재료적 거동 비교와 강도저하 요인에 대한 비교 분석에 관한 연구가 대부분이었다.

3. 해석 및 실험모델

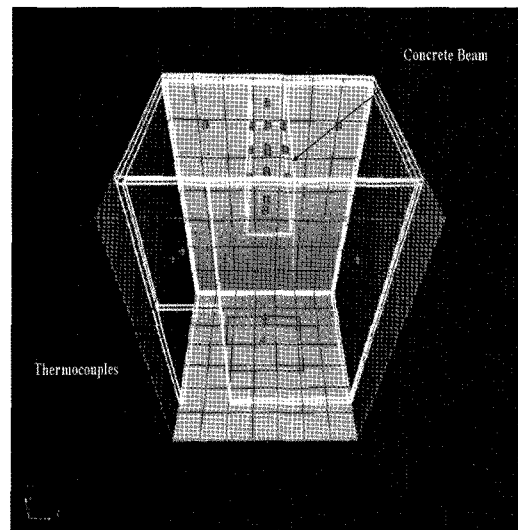
화재자현형 콘크리트 보의 실험을 위하여 단실의 단부에 개구부 크기가 180×400mm이고 실의 크기가 600×400×700mm인 석고 보드 재료의 단실 시험체를 구상하였다. 이 시험체의 중앙부 윗면에 크기

가 100×100×400mm이고 압축강도가 20.6MPa인 무근 콘크리트 보를 정치하였다.

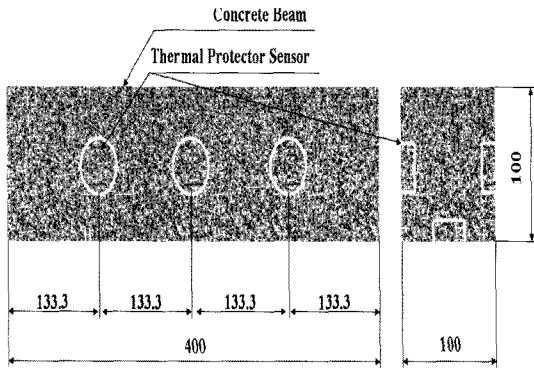


〈그림 1〉 단실의 개요

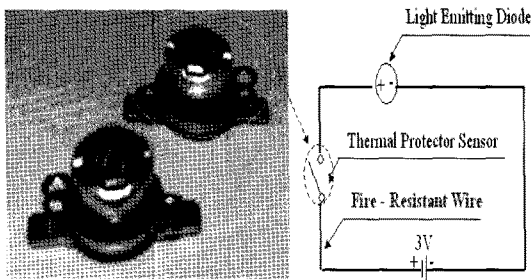
〈그림 2〉는 화재실험 전에 화재하중으로 인하여 발생하는 단실의 온도이동과 콘크리트 보에서의 고온 전달을 예측하기 위해서 화재해석시 콘크리트 보와 단실에 매입된 열전대의 위치를 나타내고 있다. 해석시 화재하중은 실험조건과 동일하게 섬유로 치환하여 적용하였다.〈그림 3〉은 콘크리트 보에서 화재발생 시 70°C 이상이 되면 동작하는 지름이 $\phi 20$ 인 바이메탈형(Type of Bimetal) 온도보상센서의 배치를 나타내고 있다. 이러한 센서의 동작온도는 폐쇄형 스프링클러 헤드의 동작온도 조건을 기준으로 적용하였다.



〈그림 2〉 FDS 해석모델의 개요

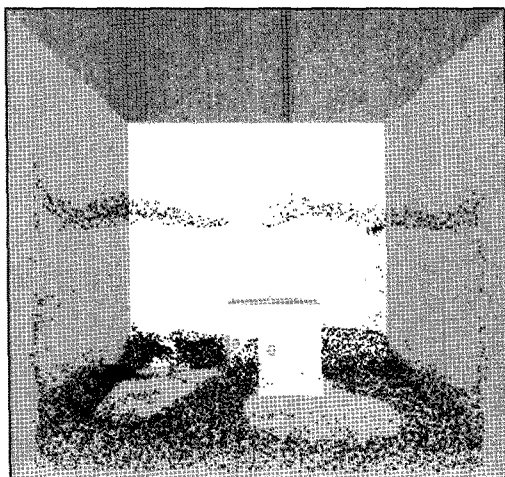


〈그림 3〉 콘크리트 보에서의 온도보상센서 위치



〈그림 4〉 온도보상센서와 LED를 이용한 손상자현 회로의 개념

〈그림 4〉는 화재발생시 적정온도에 도달하면 온도 보상센서가 스위치 역할을 하는 개념도를 나타내고 있다. 단실에서 화재가 발생하면 단실의 내부가 고온상태가 되기 때문에 광센서와 온도센서 그리고 구동전원을 연결한 전선의 단락을 방지하기 위해 내화전선을 이용하였다.



〈그림 5〉 단실 내부의 화재하중에 의한 기류변화

화재해석에서 일반 가정사항은 화재실험시에 대 기상의 기류변화를 적용하기가 어려움으로 개구부의 위치에 따른 단실내부의 기류변화에 따른 콘크리트 보의 온도변화를 예측하기 위해 단실외부에서 발생하는 바람의 유동에 의한 기류변화나 온도변화가 발생하지 않는다고 가정하였다.

적용된 화재하중은 다음 표와 같다.

〈표 1〉 가연물질의 제원

Combustible Materials	The Total Weight (kg)	The Effective Calorific Value (MJ/kg)
Fiber	1.8	26.9
Gasoline	0.6	43.1

화재하중의 계산을 위하여 다음과 같은 식을 이용하였다.^{4), 5)}

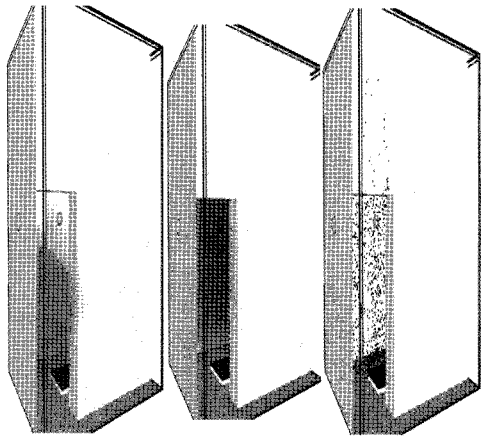
$$q = \frac{\sum m_v H_v}{A_t} [MJ/m^2] \quad (\text{eq 1.})$$

q: Calculation of Total Fire Load, m_v: the Total Weight of Each Individual Combustible Material Constituent v(kg), H_v: the Effective Calorific Value of Each Individual Combustible Material Constituent v(MJ/kg), A_t: the Total Area

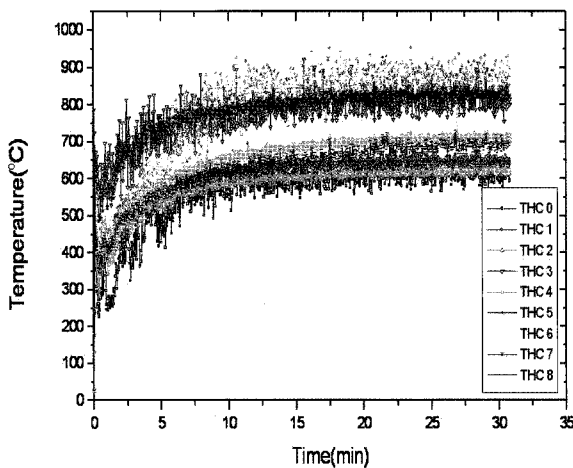
단실에서 발생한 화재하중이 무근콘크리트 보 부재에 작용되는 영향을 분석하기 위해 NIST의 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 이용하였다. 또한, 화재하중의 연산과 바이메탈형 온도센서의 작동위치에 따른 콘크리트 보의 열유동을 파악하기 위해 Mathwork사의 수치해석 프로그램인 MATLAB ver. 6을 이용하였다.^{6), 7)}

3.1 FDS를 이용한 분석

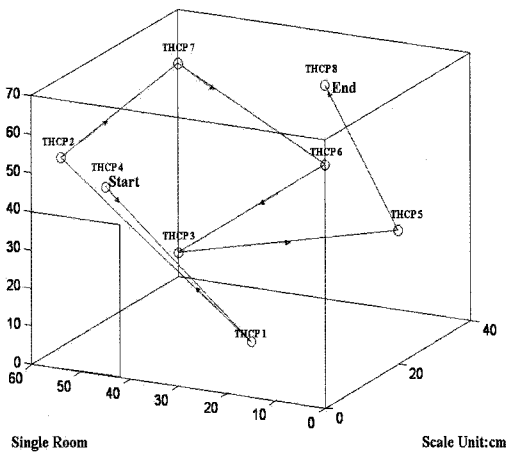
7,255.3 MJ/m²의 화재하중이 35분간 600×400×700mm의 크기인 석고보드 재질의 단실에 작용하였을 때의 온도분포를 화재해석 프로그램인 FDS를 이용하여 예측하였다.



〈그림 6〉 FDS 해석 모델

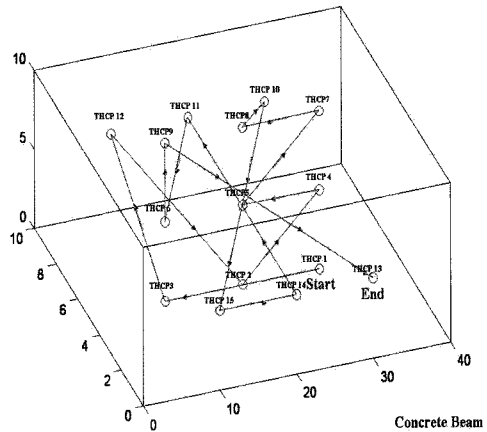


〈그림 7〉 FDS 해석시 단실내부의 온도변화



〈그림 8〉 단실내부의 화재하중으로 인한 고온 이동경로

화재해석 프로그램을 이용하여 해석한 결과, 그림 8과 같이 단실외부에 바람의 유동에 따른 기류변화와 온도변화가 발생되지 않는 조건에서 단실내부에서의 고온의 흐름은 외부의 공기가 유입되는 개구부에서부터 증가하여 가연물이 있는 단실의 바닥을 거쳐 개구부 반대편으로 유동되는 것으로 나타났다.



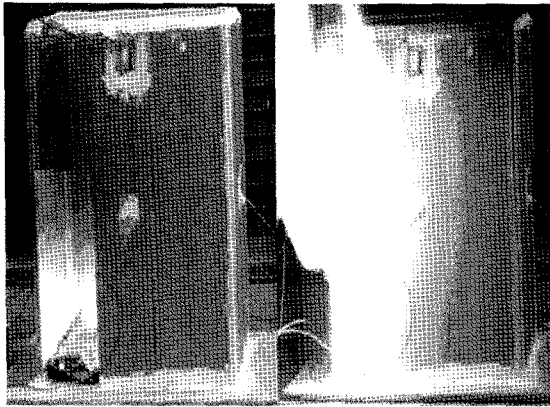
〈그림 9〉 단실내부의 상부에 설치된 콘크리트 보의 고온 이동경로

〈그림 9〉는 단실의 중앙부 상단에 설치된 콘크리트 보에서의 열전달을 나타내고 있다. 화재하중에 따른 열전달은 콘크리트 보의 하단부에서부터 개구부에서 가까운 콘크리트 보의 왼쪽과 중앙부를 거쳐 단실의 안쪽부분에 위치한 콘크리트 보의 오른쪽 면으로 고온이 전달되는 것으로 나타났다.

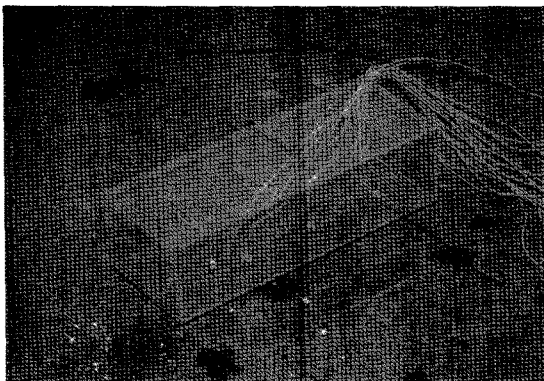
3.2 화재실험을 이용한 결과분석

화재해석 모델과 동일한 화재하중을 적용하고 화재하중이 내부에서 작용하고 있는 단실이 외기에 노출되어 외기의 기류변화를 받을 때, 단실내부와 콘크리트 보의 열 이동에 대하여 측정하였다. 열전대(Thermocouple)를 단실내부의 각각 면 중앙부에 한개씩 부착하여 단실내부 하단 중앙부에 화재하중을 섬유와 기름으로 치환하여 작용시켰다. 단실내부의 상단 중앙부에 온도보상센서가 콘크리트 보에서 화재하중이 작용할 보의 표면에 3등분하여 매입하였고, 단실내부에 설치되어 있는 콘크리트 보표면에 매입된 센서의 동작을 나타내는 광센서가 장착된

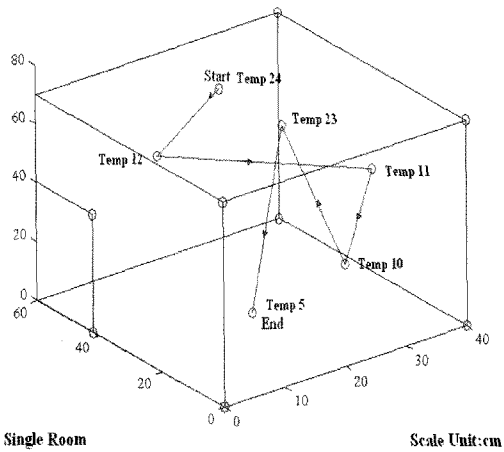
가상 보를 고온에 견디는 내화전선을 이용하여 연결하였고, 공급전력으로 3V를 공급하였다.



〈그림 10〉 화재하중 실험

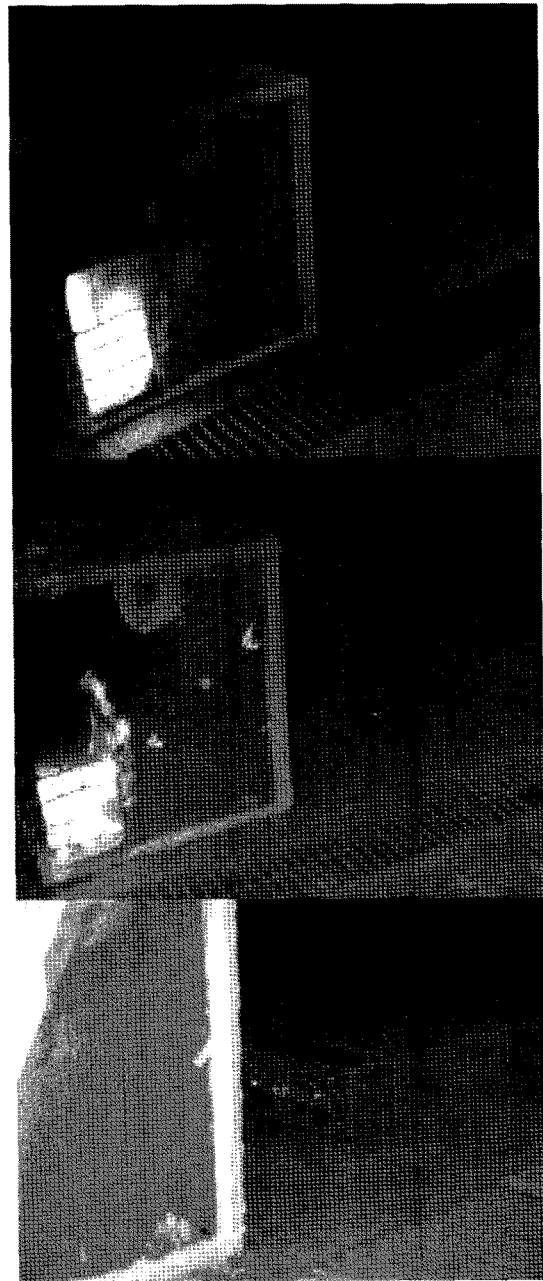


〈그림 11〉 단실 외부에 위치한 화재의 작용을 알려주는 가상 보



〈그림 12〉 화재실험시 단실내부의 화재하중으로 인한 고온 이동경로

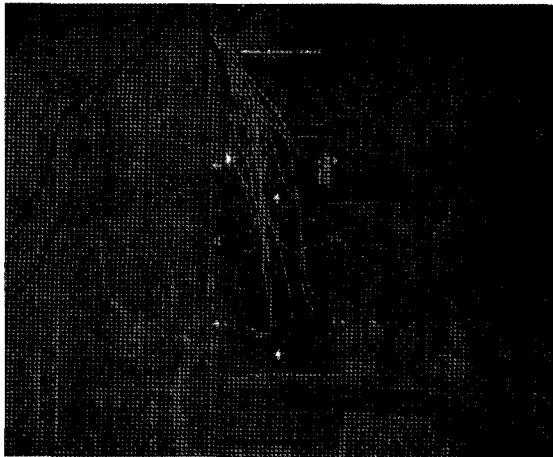
화재 실험결과, 단실내부에서 고온의 이동은 개구부에 면한 부분에서부터 온도가 증가하여 개구부와 면하지 않은 부분으로 이동되는 것으로 나타났다. 단실내부의 화재하중 작용에 따른 가상 보에 정지된 광센서의 동작은 다음과 같다.



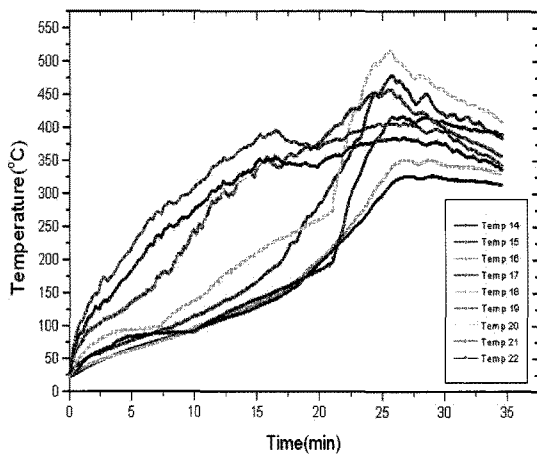
〈그림 13〉 단실내부의 화재하중에 의한 가상 보의 광센서 동작

그림 13은 단실내부에 화재하중이 작용하여 발생된 고온의 열이 단실내부 면과 접해 있는 콘크리트

3면의 보 표면에 매입된 온도보상센서가 동작함으로써 보 표면에 발생되는 고온의 전달을 광센서의 동작과 색으로 온도유동을 전달하고, 이를 외부에 단순한 시각적인 방법으로 전달함과 동시에 단실내부에 화재가 발생하였음을 동시에 나타내는 것으로 나타났다.



〈그림 14〉 단실내부가 Flashover시 가상 보의 광센서 동작



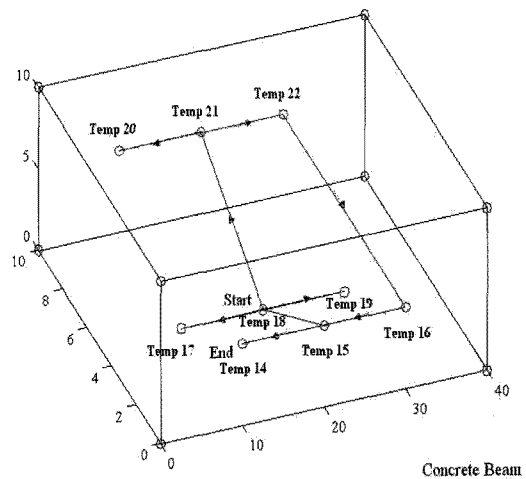
〈그림 15〉 단실내부에 설치된 콘크리트 보의 온도

단실 내부에 설치되어 있는 콘크리트 보에 매입된 온도보상센서가 화재하중의 작용으로 동작하는 것을 보여주는 가상보의 광센서 동작과 온도보상센서와 동일한 위치에 매입되어 있는 열전대의 고온이동을 비교하였다.

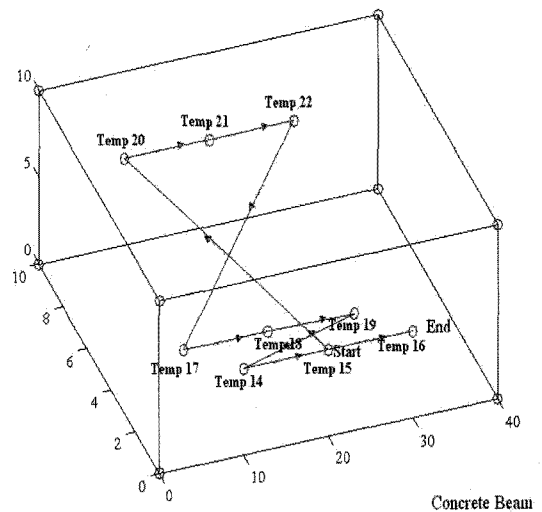
열전대의 온도전달을 분석한 결과, 최대온도는 단실내부 상단 중앙부에 설치된 콘크리트 보의 하단

부에서 단실의 개구부에 가까운 콘크리트 보 표면에서 개구부 반대쪽 측면에 가까운 콘크리트 보 표면으로 전달되는 것으로 나타났다.

광센서의 동작으로 콘크리트 보 표면의 온도전달을 분석한 결과, 온도보상센서의 동작은 단실의 개구부 쪽 콘크리트 보 중앙측면에서 콘크리트 보의 하단부 그리고 개구부 반대쪽 측면의 콘크리트 표면에 매입된 온도보상센서가 동작하여 가상 보의 광센서가 동작하는 것으로 나타났다.



〈그림 16〉 콘크리트 보 표면에 매입된 열전대의 온도전달

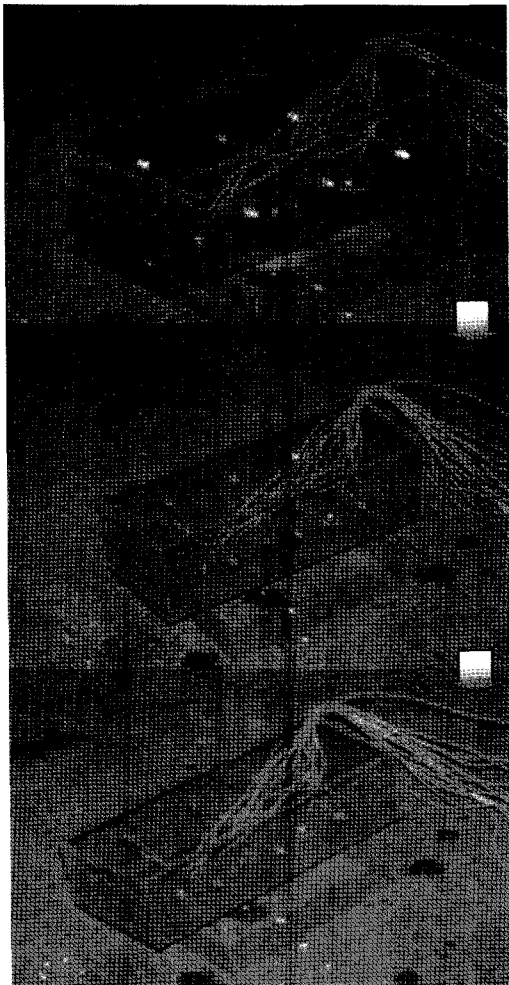


〈그림 17〉 가상 보의 광센서 동작

단실 내부의 중앙부 상단에 설치된 콘크리트 보

표면에 매입된 열전대의 온도전달과 가상 보의 광센서 동작을 비교한 결과, 단실내부의 화재하중 작용으로 발생된 고온이 단실의 중앙부 상단에 설치된 콘크리트 보의 표면에 전달될 때의 고온의 전달은 비교적 유사하게 나타나 단실내부의 온도가 70°C이상에서 동작하는 온도보상센서와 이를 나타내어주는 광센서를 이용한 간단하게 화재가 발생한 단실 외부에서도 단실내부의 화재 발생과 건축구조물의 주요부재 표면에 작용하는 고온의 이동을 파악할 수 있을 것으로 사료된다.

온도보상센서의 동작특성을 이용하여 단실내부에 화재하중이 소진되었을 때 단실외부의 가상 보 동작을 분석하였다. 그림 18는 단실내부에 화재하중이 소진하면 단실의 중앙부 상단에 설치된 콘크리트 보의 표면이 냉각되면서 광센서의 동작이 정지하는 것을 나타낸다.



〈그림 18〉 단실내부의 화재소진 후 가상 보의 동작

단실내부에 화재하중이 소진되었을 때 단실외부의 가상 보 동작을 분석한 결과, 단실외부의 기류가 개구부를 통하여 고온이 전달된 콘크리트 보를 생각함으로써 콘크리트 보의 표면이 70°C이하가 되면 가상 보의 광센서 동작이 정지되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

복합센서를 이용한 화재자현 콘크리트의 개발에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 복합센서가 표면에 매입된 콘크리트 보는 단실내부의 화재 발생과 보 표면의 온도전달, 화재의 소진을 외부 가상 보의 광센서로 예측할 수 있다.
- 2) 단실 내부의 중앙부 상단에 설치된 콘크리트 보 표면에 매입된 열전대(Thermocouple)의 온도전달과 가상 보의 광센서 동작을 비교한 결과, 단실내부의 화재하중 작용으로 발생된 고온이 단실의 중앙부 상단에 설치된 콘크리트 보의 표면에 전달될 때 고온의 전달은 비교적 유사한 것으로 나타났다.
- 3) 단실내부의 상단 중앙부에 설치된 화재자현 콘크리트 보와 연결된 가상 보의 동작은 단실내부의 화재의 발생을 나타내어 줄뿐만 아니라 단실내부에 화재가 소진된 경우에도 이를 시각적으로 나타내어 주는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Luigi Biolzi, Sara Cattaneo, Gianpaolo Rosati, "Evaluating residual properties of thermally damaged concrete", *Journal of Cement & Concrete Composites*, 30, 2008, pp.907-916.
2. V.K.R. Kodur, M. Dwaikat, "A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams", *Cement & Concrete Composites*, 30, 2008, pp.431-443.
3. 한상훈, 이상호, "고온을 받는 철근콘크리트 보 및 기둥 부재의 강도저하에 관한 실험적 연구", *대한건축학회 구조계논문집*, 20권, 7호, 2004, pp.3-12.
4. Dougal Drysdale, "An Introduction to Fire

- Dynamics", *JOHN WILEY & SONS*, 1998, pp.31-157.
5. Andrew H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", *JOHN WILEY & SONS*, 2000, pp.1-82.
 6. FDS(Version 5.4.3) Users Manual. *National Institute of Standards and Technology*, 2006.
 7. MATLAB(Version 6) Users Manual. *The Mathworks*, 2006.
 8. Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis, "Digital Signal Processing", *Prentice Hall*, 2002, pp.317-341.
 9. H.L.KWOK, "Electronic Materials", *THOMSON*, 1997, pp.158-173.
 10. Vinay K. Ingle, John G. Proakis, "Digital Signal Processing using MATLAB", *Brooks/Cole Thomson Learning*, 2000, pp.183-208.
 11. Ove Pettersson, Sven-Erik Magnusson, "Fire Engineering Design of Steel Structures", *Swedish Institute of Steel Construction*, 1979, pp.33-85.

- ▶ 접수일자 : 2010년 4월 1일
- ▶ 심사 완료일자 : 2010년 10월 15일
- ▶ 게재 확정일자 : 2010년 10월 30일