

# ANSYS를 이용한 화재 후 온도에 따른 합성보 성능에 관한 해석적 연구

곽성신, 최병정\*  
경기대학교 일반대학원 건축공학과

## An Analytical Study on Composite Beam Performance with Post-Fire Temperature Using ANSYS Program

Sung-Shin Kwak, Byong-Jeong Choi\*

Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School

요 약 화재발생 시 구조물의 부재는 온도상승에 의하여 본래의 강성을 잃게 되어 하중 지지력이 감소하게 된다. 구조 부재에 급격한 내력 상실은 구조물의 붕괴 및 인명 피해로 이어질 수 있다. 구조물의 화재 시간이 길어지게 되면 구조 부재에 대한 내력 상실은 더욱 증가하게 된다. 건축물의 붕괴를 방지하기 위하여 부재 손상 여부의 파악은 매우 중요한 과제이나 국내에서 부재의 잔존내력을 진단하고 평가하는 지침이 될 만한 자료는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 구조 부재 중 합성구조인 합성보를 유한요소해석을 통하여 내화성능을 분석하고자 한다. 합성보 모델링은 한국전력기술의 협조를 받아 원자력 발전소 보조건물(Electrical Penetration Room, EPR)에 사용되는 도면을 바탕으로 수행하였다. 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 정해석 단계의 열전달 해석과 구조해석을 수행하였다. 열전달 해석 결과로 얻어진 온도분포를 데이터로 확보하여 구조해석에 열전달해석 결과를 반영시켰다. 잔존성능을 분석하기 위하여 합성보의 온도분포와 열 영향을 받은 구조해석의 최대변위 결과를 도출하여 실험 결과 데이터와 구조해석 결과 데이터를 비교분석하였다.

**Abstract** In the case of fire, a structure loses its original stiffness due to the temperature rise, and the load bearing capacity decreases. The loss of structural strength increases with increasing fire time of the structure. To prevent the collapse of buildings, it is very important to understand whether or not the members are damaged. On the other hand, there is insufficient data to be a guideline for diagnosing and evaluating the residual strength of the members in Korea. Therefore, this study examined the resistance performance by Finite-Element-Analysis of composite beams, which are composite structures among structural members. Composite beam modeling was carried out based on the model used in the Electrical Penetration Room (EPR) in cooperation with KEPCO. The heat transfer analysis and structural analysis of the critical phase were performed using ANSYS, a finite element analysis program. ANSYS was used to perform heat transfer analysis and structural analysis at the static analysis. To analyze the residual performance, the temperature distribution of the composite beam and the maximum displacement result of the heat-affected structure analysis were derived and the experimental data and the structural analysis result data were compared and analyzed.

**Keywords** : Composite beam, Heat transfer analysis, Structure analysis, ANSYS, Residual performance

이 논문은 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 20161510400110, 원전 광역화재를 고려한 정량적 화재영향평가 기술개발), 2017년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Byong-Jeong Choi(Kyonggi Univ.)

Tel: +82-31-249-9702 email: bjchoi@kyonggi.ac.kr

Received October 29, 2018

Revised (1st November 20, 2018, 2nd November 21, 2018)

Accepted January 4, 2019

Published January 31, 2019

## 1. 서론

화재발생 시 구조물의 부재는 온도상승에 의하여 본래의 강성을 잃게 되어 하중 지지력이 감소하게 된다. 화재가 발생했을 때 구조 부재의 급격한 내력 상실은 전체 구조물의 큰 피해를 발생시킨다[1-3]. 이에 한국전력기술의 협조를 받아 원자력 발전소 보조건물(Electrical Penetration Room, EPR)에 사용되는 합성부의 내화 성능을 확인하고자 내화피복된 합성부 실험체를 계획하였다. 원자력 발전소 보조건물과 같은 중요구조물에 화재가 발생하면 인명피해가 발생할 수 있는 큰 사고로 이어질 수 있기 때문에 구조 부재의 내화성능을 확인하는 것은 매우 중요하다[4-6]. 국내에서는 2006년에 이르러서야 성능설계에 따라 내화구조의 성능을 검증할 수 있는 제도가 시작되었으나, 성능설계의 바탕이 되는 해석적 방법을 사용한 부재의 내화성능 연구는 미진한 실정이다. 반면, 유럽에서는 1980년대부터 건축부재에 대한 내화성능 및 거동을 해석적 방법을 통하여 연구해왔으며, 그 결과를 성능설계에 적용해 왔다. 상용 유한요소해석 프로그램의 발달로 ABAQUS나 ANSYS를 사용하여 내화성능을 확인하거나 예측하는 연구가 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 상용 유한요소해석 프로그램을 사용한 해석연구들은 내화실험과 비교되어 그 정확성이 검증되었다. 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 활용하여 정적해석 단계에서의 열전달 해석과 구조해석을 수행하였으며, 실제 수행된 화재 실험과 구조실험 결과와 비교 분석하였다. 실제 화재 실험을 위한 가열곡선은 ASTM E119 표준화재곡선에 따라 수행되었으며, 열전달 해석도 마찬가지로 ASTM E119의 가열시간에 따른 가열온도를 추출하여 수행하였다. 실제 실험에서는 화재 실험이 완료된 실험체를 가력하여 실험체의 잔존성능을 분석하였다. 유한요소해석에서는 열전달 해석 결과로 얻어진 온도분포를 실험체에 대입하여 화재해석의 온도분포결과가 적용된 실험체의 구조해석을 진행하였다. 따라서 본 연구에서는 내화피복된 합성부의 화재 시 내화성능을 실제 실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교하여 정해석 단계에서의 해석법을 제시하는 것을 연구의 목적으로 한다.

## 2. 해석방법

유한요소해석 프로그램 ANSYS 19.2를 이용한 해석 방법의 절차는 Fig. 1과 같다. Engineering Data 창에 모델링에 사용될 재료의 물성치를 입력하였다. 합성부 도면에 맞게 모델링을 진행한 뒤, 정상상태 열해석(Steady-State Thermal)을 수행하였다. 하지만 유한요소해석에서 화재피해를 입은 실험체를 구현하기 위해서는 열전달 해석 결과로 얻어진 온도분포를 구조해석 모델링에 적용시켜야한다. 이와 같은 작업을 수행하기 위하여 Fig. 2와 같이 열전달해석 결과를 구조해석결과에 IMPORT 시켜 구조해석에서 사용되는 모델링 표면에 온도 분포 값을 적용하였다. Engineering Data에 적용된 물성치들은 온도에 따른 값이므로 적용된 온도분포에 따라 물성치가 변하게 된다. 열전달해석 결과를 반영시키고 정역학 범위에서의 구조해석(Static Structural) 결과 값을 도출한다. 잔존성능을 분석하기 위하여 합성부의 온도분포와 열 영향을 받은 구조해석의 최대변위결과를 도출하여 실험결과 데이터와 구조해석결과 데이터를 비교분석한다.

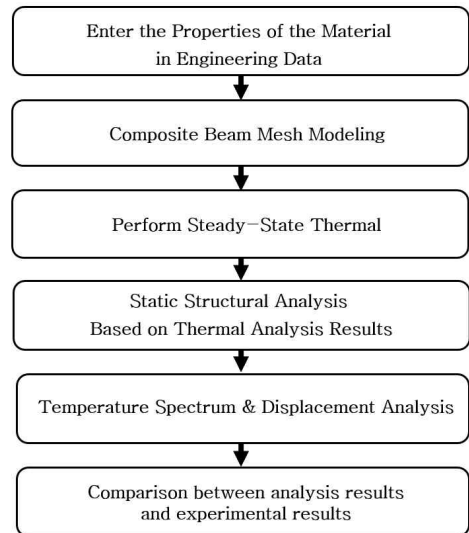


Fig. 1. Analysis procedure using ANSYS 19.2



Fig. 2. Analysis process for the interpretation of results

### 3. 해석 변수 및 합성보 모델링

해석 모델링은 실제 실험에서 수행한 실험체를 바탕으로 가열시간과 내화피복여부에 따라 Table 1과 같이 선정하였다. 내화피복된 합성보의 치수는 실제 원자력발전소 보조건물에 적용되는 합성보를 기준으로 모델링 하였으며 Fig. 3와 같이 나타내었다. 모델링은 사용부재의 어떤 요소를 사용하는지에 따라서 메쉬 컨트롤 값이 결정된다. 복잡한 부재나 구조물의 경우 적절한 요소를 사용하지 않을 경우, 해석 결과의 오차가 크거나 해석 프로세스가 진행되지 않을 수 있다. 이러한 요소와 노드 설정의 오차를 감소시키기 위해 메쉬컨트롤(Mesh control) 기능을 필요하다. 메쉬 컨트롤은 요소 간격(Element metrics)이 1.0에 가까워질수록 해석의 품질(Quality)이 향상된다. 본 해석의 정확성을 높이기 위해 메쉬 컨트롤을 진행하였으며, 해석 요소는 6면체 8절점 Hex8(Hexahedron Node 8)과 5면체 6절점 Wed6(Wedge Node 6)으로 설정하였다. 수행한 모델링에 대해 메쉬 품질을 검토한 결과, Fig. 4와 같이 대부분의 요소들이 0.97이상이었으며, 강재 웨브 부분은 0.76으로 약간 낮게 설정이 되었다. 강재 웨브의 경우, 내화피복재로부터 열이 전달되기 위하여 서로 절점을 공유하면서 메쉬 품질이 낮아진 것으로 판단된다. 메쉬 품질의 대부분이 0.97으로 나타났으므로 모델링의 메쉬가 잘 나뉘었다고 할 수 있다.

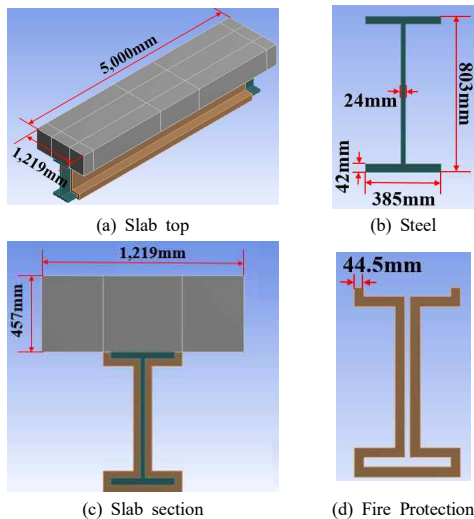


Fig. 3. Dimensions of Composite Beam Modeling

Table 1. Variable Condition of Composite Modeling

Modeling Name	Fire Protection	Heating Time (hour)	Heat Temperature (°C)
PCB_1H	O	1	916
PCB_2H	O	2	1006
UPCB_1H	X	1	916
UPCB_0H	X	0	0

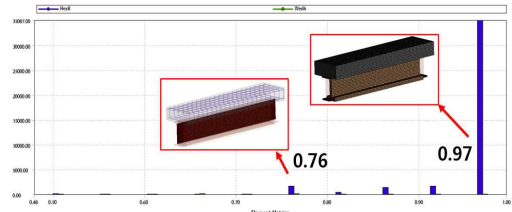
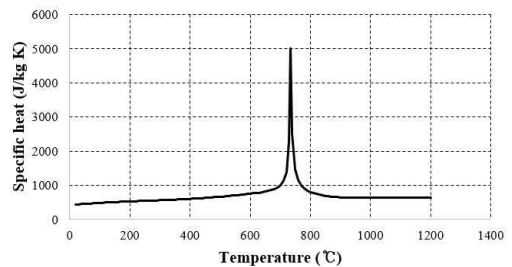


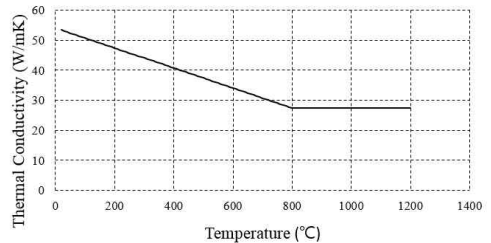
Fig. 4. Mesh Quality of Composite Modeling

#### 3.1 강재 모델링

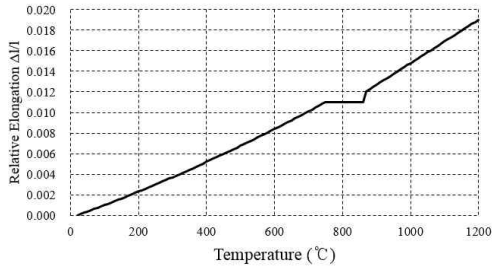
국내에는 아직 구조물의 내화성능에 관한 연구가 미진하며, 별도로 물성치의 기계적, 열적 특성을 명시하고 있지 않다. 그러나 유럽, 미국 등 외국에서는 광범위한 실험 및 해석적 연구를 통하여 내화성능에 영향을 미치는 재료의 물성치를 규명하고 성능을 평가하고 있다[7-8]. 따라서 강재의 모델링에는 기계적·열적 물성치를 Eurocode 3(EN1993-1-3)[9]에 따라 적용했으며, 온도에 따른 물성치는 Fig. 5, 상온에서의 물성치는 Table 2에 나타내었다.



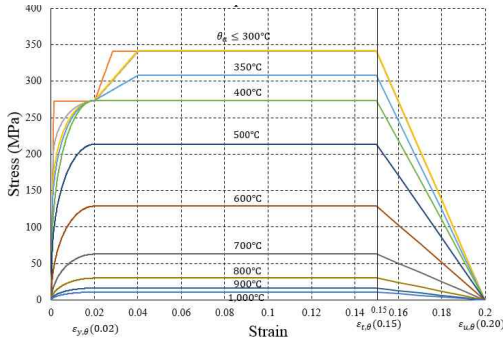
(a) Specific Heat of steel at elevated Temperatures



(b) Thermal Conductivity of steel at elevated Temperatures



(c) Thermal Elongation of steel at elevated Temperatures



(d) Stress-Strain relationship of Steel at elevated Temperatures

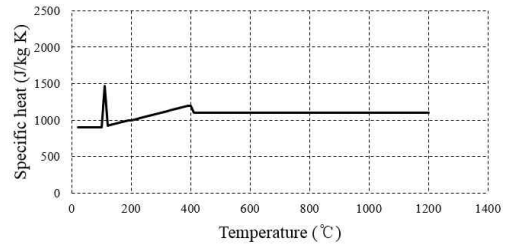
Fig. 5. Mechanical and thermal properties of Steel

Table 2. Mechanical and thermal properties of steel applied to Engineering Data at room temperature

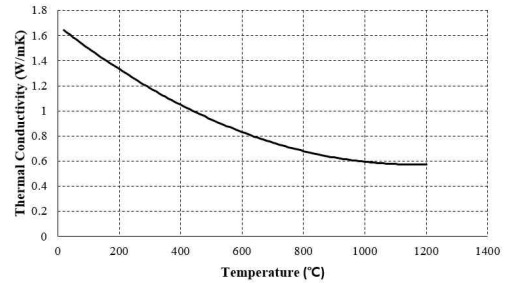
Property	Value (Heating time)		Unit
	1 hour	2 hour	
Density	7,850		$kg \cdot m^3$
Young's Modulus	20,000		$MPa$
Poisson's Ratio	0.30		-
Bulk Modulus	166,700		$MPa$
Shear Modulus	76,923		$MPa$
Yield Strength	250		$MPa$
Ultimate Strength	400		$MPa$
Thermal Conductivity	27.3		$W/m \cdot K$
Specific Heat	650		$J/kg \cdot K$

### 3.2 콘크리트 슬래브 모델링

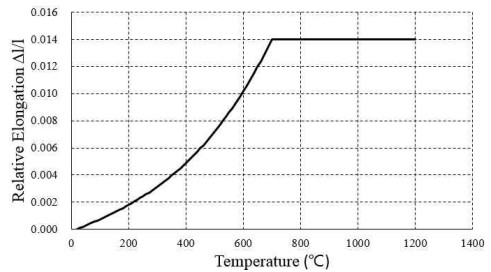
콘크리트의 기계적·열적 물성치는 Eurocode 2(EN1992-1-2)[10]에 따라 Engineering Data에 적용했으며, 온도에 따른 물성치는 Fig. 6, 상온에서의 물성치는 Table 3에 나타내었다.



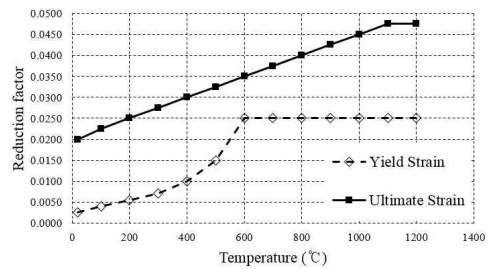
(a) Specific Heat of Concrete at elevated Temperatures



(b) Thermal Conductivity of Concrete at elevated Temperatures



(c) Thermal Elongation of Concrete at elevated Temperatures



(d) Stress-Strain relationship of Concrete at elevated Temperatures

Fig. 6. Mechanical and thermal properties of Concrete

Table 3. Mechanical and thermal properties of Concrete applied to Engineering Data at room temperature

Property	Value (Heating time)		Unit
	1 hour	2 hour	
Density	2,300		$kg \cdot m^3$
Young's Modulus	30,000		$MPa$
Poisson's Ratio	0.18		-
Bulk Modulus	15,625		$MPa$
Shear Modulus	12,712		$MPa$
Yield Strength	35		$MPa$
Thermal Conductivity	0.6209	0.5945	$W/m \cdot K$
Specific Heat	1100		$J/kg \cdot K$

### 3.3 내화피복재 모델링

내화피복재의 기계적·열적 물성치는 EN 13381-4 2013[11]에서 제시하고 있는 온도에 따른 물성치를 적용했다. 기준에서 가정해야하는 물성치의 경우 실제 제작한 실험체에서 사용한 내화피복재의 물성치를 사용했으며, 온도에 따른 물성치는 Fig. 7, 상온에서의 물성치는 Table 4에 나타내었다.

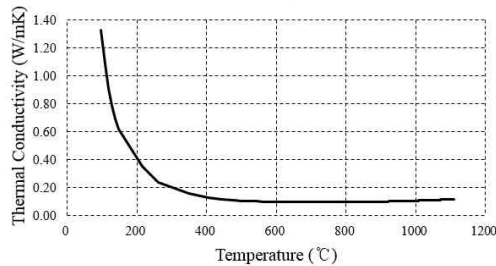


Fig. 7. Thermal Conductivity of Fire Protection at elevated Temperatures

Table 4. Mechanical and thermal properties of Fire Protection applied to Engineering Data at room temperature

Property	Value (Heating time)		Unit
	1 hour	2 hour	
Density	720		$kg \cdot m^3$
Young's Modulus	30,000		$MPa$
Poisson's Ratio	0.30		-
Bulk Modulus	25,000		$MPa$
Shear Modulus	11,538		$MPa$
Yield Strength	3.45		$MPa$
Thermal Conductivity	0.12		$W/m \cdot K$
Specific Heat	1100		$J/kg \cdot K$

## 4. 열전달 해석

### 4.1 열전달 해석 개요

본 연구에서 수행한 합성보의 열전달 해석은 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 19.2를 이용하였다. 열전달 해석은 ANSYS의 Mechanical 환경에서 Steady-State Thermal Analysis를 이용 하여 수행했다. Steady-State Thermal은 정상상태 열해석으로 식 1과 같이 시간에 대한 영향(Transient effect)을 받지 않는다. 여기서,  $[K]$ 와  $\{Q\}$ 는 상수이거나 온도의 함수, 고정된 온도  $\{T\}$ 는 시스템(구조해석에서 고정된 변위)에 구속을 나타낸다.

$$[K(T)]T = Q(T) \quad (1)$$

열전달해석에서 가장 중요한 물성치 값은 열전도율(Thermal Conductivity)인데, 이질재료간의 접촉으로 인한 열 유동의 양을 고려해야하기 때문이다. 열 유동량은 식 2와 같이 표현할 수 있다.

$$Q = TC \times (T_{target} - T_{contact}) \quad (2)$$

$Q$  : 열 유동량(Contact heat Flux)

$TC$  : 열전도율(Thermal Conductivity)

$T_{contact}$  : 접촉하는 표면의 온도

$T_{target}$  : 접촉을 받는 표면의 온도

열전달해석이 완료된 다음, 타당성을 확인하기 위해서는 열역학 제 1법칙에서, 정상상태의 열 평형상태(Thermal Equilibrium)를 만족해야한다. 열 평형상태를 확인하기 위하여 다음 식 3에 따른 식 4를 만족해야한다.

$$E_{in} - E_{out} = 0 \quad (3)$$

$$H_{gen} - R_{temp} - R_{conv} = 0 \quad (4)$$

$E_{in}$  : 부재에 가한 열량

$E_{out}$  : 부재로부터 나오는 열량

$H_{gen}$  : 발생되는 전체 열량

$R_{temp}$  : 대류경계 조건에 대한 발생 열량

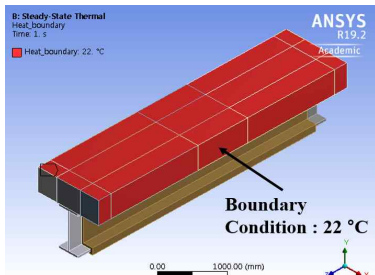
$R_{conv}$  : 온도 하중에 대한 발생 열량

실제 가열실험에서는 Fig. 8와 같이 수평가열로에 실험체를 설치하고 가열로의 기밀성을 확보하기 위해서 주

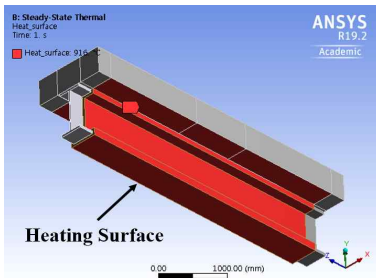
변벽체 및 덮개를 설치하였다. 해석 시 이와 같은 환경을 설정하기 위하여 Fig. 9(a)와 같이 비가열면은 Boundary condition을 설정하여 22 °C의 상온 조건을 유지하도록 설정하였다. 가열면은 Fig. 9(b)와 같이 설정하였으며, 가열면에는 표준화재곡선에서 추출한 가열온도를 적용하였다. 가열온도는 PCB\_1H와 UPCB\_1H는 916 °C, PCB\_2H는 1006 °C으로 설정하였다. UPCB\_0H는 비가열 실험체로 구조해석만을 수행하였다.



Fig. 8. Experimental heating furnace appearance



(a) Boundary condition of non heating surface



(b) Setting heating temperature on heating surface

Fig. 9. ANSYS Program heat transfer analysis condition

#### 4.2 열전달 해석 결과

Fig. 10은 PCB\_1H의 열전달 해석 결과 온도 스펙트럼이다. Fig. 10(b)와 같이 실제 실험에서 설치한 열전대의 위치와 동일한 30, 30, 30, 50, 50, 50, 100 mm 슬래

브 지점의 온도 값을 추출하였다. 각 열전달해석 결과를 Table 5와 Fig. 12에 정리하였다. PCB\_1H, PCB\_2H와 같이 내화피복이된 합성보의 경우, 내화피복체의 역할로 강재에 온도영향을 크게 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 11과 같이 UPCB\_1H의 경우 PCB\_1H과 같은 온도(916 °C)로 가열했지만 내화피복이 되어있지 않기 때문에 가열온도가 강재보에 직접적인 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 콘크리트 슬래브의 온도분포 결과, PCB\_2H가 PCB\_1H의 결과보다 온도가 약간 높고, 비슷한 형태의 곡선을 보인다. UPCB\_1H의 경우 강재에 직접적으로 받은 열 효과가 콘크리트의 전달되어 PCB\_1H의 온도보다 더 높다.

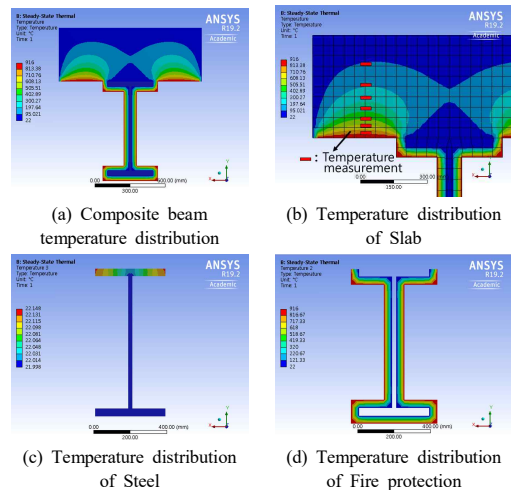


Fig. 10. Thermal analysis results Protected Composite beam

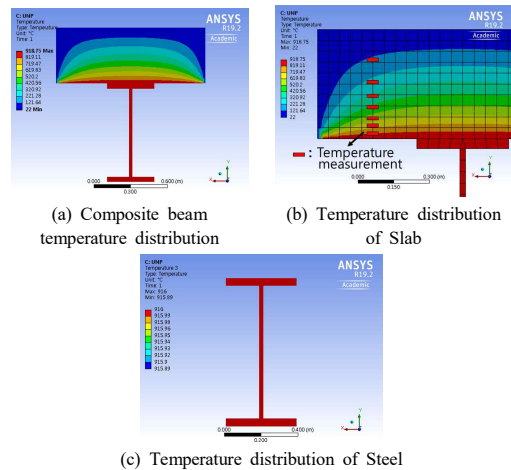


Fig. 11. Thermal analysis results Unprotected Composite beam

Table 5. Slab temperature for each specimen

Modeling	Length from slab bottom (mm)						
	30	60	90	140	190	240	340
PCB_1H	598.6	479.7	384.9	196.3	196.3	142.3	72.1
PCB_2H	752.1	605	499	367.9	276.1	199.1	112.5
UPCB_1H	814.6	720.3	642.6	538.3	436.7	342.1	194

The unit of temperature is  $^{\circ}\text{C}$

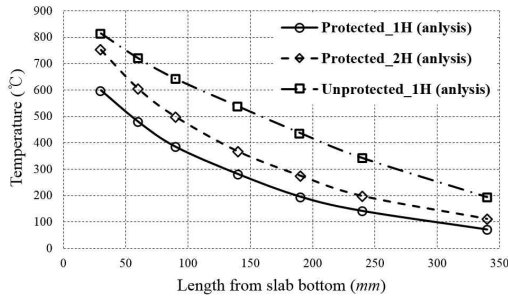


Fig. 12. Slab temperature for each specimen according to position

### 4.3 해석결과와 실험결과의 비교

열전달 해석방법의 적절성을 검증하기 위하여 같은 원전구조물 도면으로 제작된 합성보 연구결과와 비교하였다. Fig. 13에서 실험결과와 해석결과를 비교해보면 슬래브 바닥으로부터 30mm에 해당하는 온도는 1시간 가열 실험체의 경우 494 $^{\circ}\text{C}$ , 598.6 $^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 오차는 17.5%이다. 2시간 가열 실험체의 경우 704 $^{\circ}\text{C}$ , 605 $^{\circ}\text{C}$ 이고 오차는 6.4%로 나타났다. 이러한 차이는 실험의 경우 가열로 내부의 온도가 높아짐에 따라 실험체에 열이 전달되지만 해석의 경우 가열면에 직접적으로 온도를 가하기 때문이다. 슬래브 바닥으로부터 60mm 위치에서 부터는 실험결과와 해석결과와의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 해석의 경우 모델링에 대입한 물성치로 인하여 모든 재료가 균일하게 부재에 적용된다. 따라서 가열면에 온도를 적용했을 때 열전도도에 의하여 길이에 따라 열이 점차 전달되므로 측정 온도의 차이가 발생한 것으로 보인다.

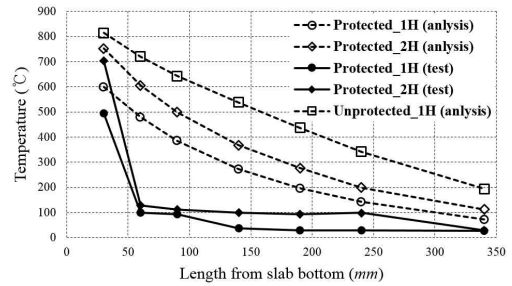


Fig. 13. Comparison of Heat Transfer Analysis Results and Experimental Results

## 5. 구조 해석

### 5.1 구조 해석 개요

화재 후 구조물의 잔존성능을 분석하기 위하여 열전달 해석 결과를 구조해석 모델링에 적용시켜야한다. 이와 같은 작업을 수행하기 위하여 Fig. 14와 같이 구조해석에서 사용되는 모델링 표면에 온도 분포 값을 적용하였다. Fig. 15(a)와 같이 실제 실험과 유사한 측정조건을 형성하기 위하여 재하방식과 LVDT 측정 위치를 나타내었다. 열전달 해석이 적용된 모델링을 Fig. 15(b)과 같이 2점 재하방식으로 하중을 입력하였다. 재하 위치는 중심부에서 좌우로 500mm 씩 떨어진 지점으로 설정하였다. 구조해석에 적용한 하중은 실제 실험에서 각 실험체가 받은 최대하중으로 설정하였다. 또한 변위측정을 위하여 Fig. 15(b)와 같이 국부좌표를 설정하여 변위 결과 값을 확인하였다.

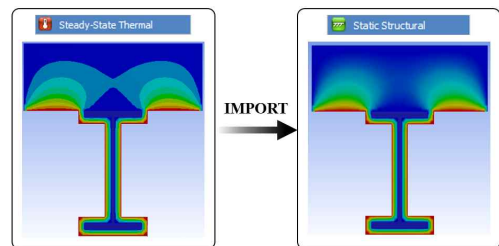
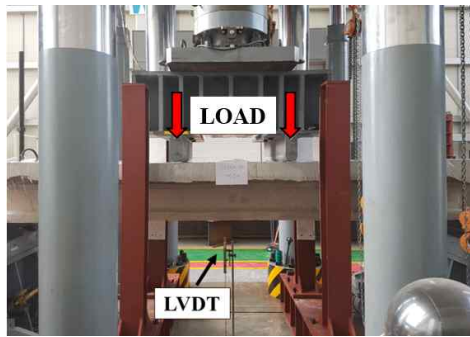


Fig. 14. Importing thermal analysis to structural analysis



(a) Experimental environment and displacement measurement position

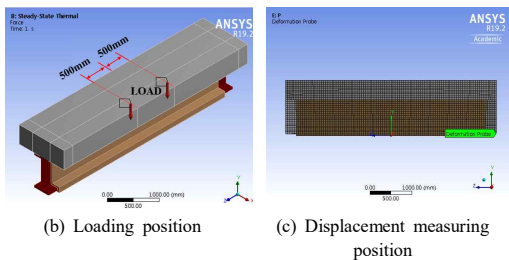


Fig. 15. Position of load and displacement measurement

### 5.2 구조 해석 결과

구조해석 결과는 각 실험체 별 하중방향의 변위를 측정하였으며, Table 6과 Fig. 16와 같이 나타내었다. 내화피복된 실험체인 PCB\_1H의 경우 4,400 kN 재하 시 12.16 mm, PCB\_2H의 경우 4,000 kN 재하 시 10.8 mm가 발생했다. 내화피복이 되지 않은 실험체인 UPCB\_1H의 경우 4,500 kN 재하 시 23.76 mm, UPCB\_0H의 경우 5,800 kN 재하 시 13.45 mm가 발생했다.

Table 5. Maximum displacement according to maximum load

Modeling	Maximum load in the experiment (kN)	Maximum Load (kN)	Maximum Displacement (mm)
PCB_1H	4,335	4,400	12.15
PCB_2H	3,989	4,000	10.8
UPCB_1H	4,474	4,500	23.76
UPCB_0H	5,735	5,800	13.45

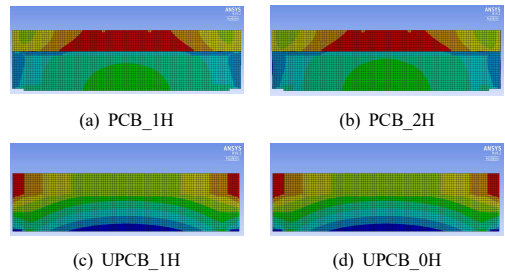


Fig. 16. Load direction displacement contour

### 5.3 해석결과와 실험결과의 비교

합성보의 중립축이 강재에 위치하여 콘크리트는 압축 영역, 강재는 인장영역에 속하며, 하중 가력 시 인장력은 주로 강재가 부담하게 된다. 실험연구에서는 실험체의 인장력의 대부분을 강재가 부담한다는 전제하에 Fig. 17와 같이 실험결과에 대한 하중과 변위의 상관관계 즉 강성(그래프의 기울기)의 차이에 대하여 검토를 진행하였다. 강성은 강재가 고온에 노출될 경우 감소하게 되는데 이는 그래프 초기의 기울기로 확인 할 수 있다. 따라서 본 해석에서는 Fig. 18과 같이 실제실험의 초기강성과 해석 결과 값의 강성을 비교하였다. 실험결과와 해석결과를 비교해 보았을 때 PCB\_1H와 PCB\_2H의 경우 비슷한 강성을 확인할 수 있다. 하지만 UPCB\_1H의 경우 실험결과와 해석결과를 비교했을 때 급격한 기울기 감소 현상이 나타났다. 이는 내화피복이 되어있지 않은 실험체이기 때문에 강재가 고온에 직접적으로 노출되어 내력이 급격히 저하되어 나타난 현상으로 판단된다. UPCB\_0H의 경우 내화피복된 실험체와 마찬가지로 비슷한 강성을 보인다. 모든 실험체의 강성이 해석결과에서 약간 더 높게 측정되었다. 실제 실험에서 모든 실험체는 가열로에서

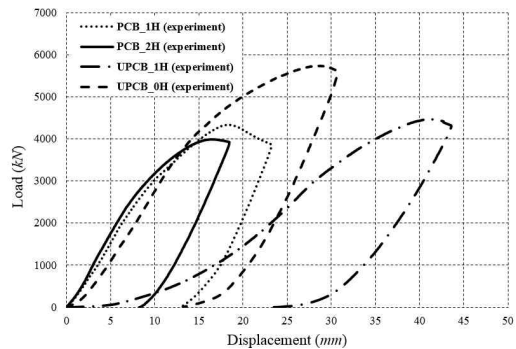
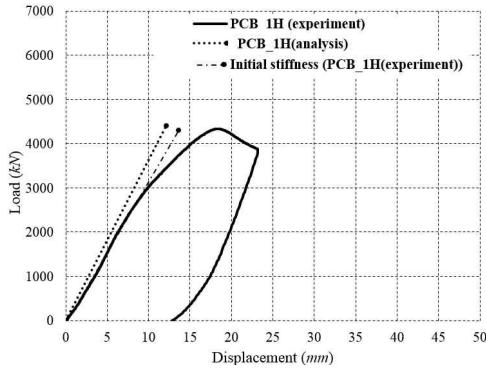


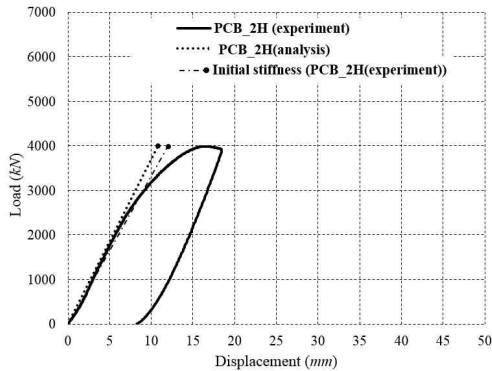
Fig. 17. Load-displacement curve of actual experiment



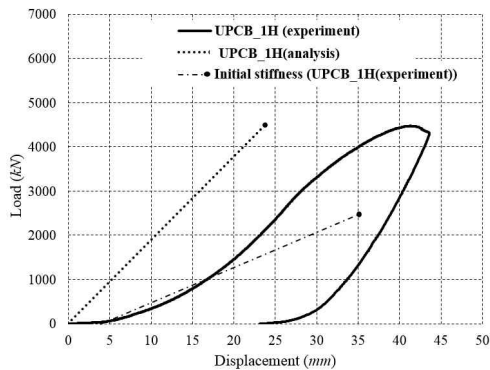
가열 후 1개월 후 구조실험이 진행되었다. 해석의 경우 시간의 경과를 고려하지 않기 때문에 실제 실험체 재료의 특성변화에 기인한 것으로 사료된다.



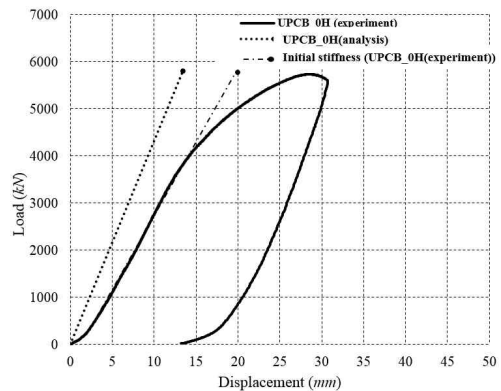
(a) PCB\_1H specimen



(b) PCB\_2H specimen



(c) UPCB\_1H specimen



(d) UPCB\_0H specimen

Fig. 18. Comparison of initial stiffness between analysis results and experimental results

## 6. 결론

합성보의 화재 시 내화성능과 화재 후 잔존성능 분석을 유한요소해석프로그램 ANSYS 19.2을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열전달 해석 결과, PCB\_1H, PCB\_2H 와 같이 내화 피복이된 합성보의 경우, 내화피복재의 역할로 강재에 온도영향을 크게 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 UPCB\_1H 의 경우 PCB\_1H 과 같은 온도 (916 °C)로 가열했지만 내화피복이 되어있지 않기 때문에 가열온도가 강재보에 직접적인 영향을 준다. 콘크리트 슬래브의 온도분포 결과, PCB\_2H가 PCB\_1H의 결과보다 온도가 약간 높고, 비슷한 형태의 곡선을 보인다. UPCB\_1H의 경우 강재에 직접적으로 받은 열 효과가 콘크리트의 전달되어 PCB\_1H의 온도보다 더 높다.
2. 실험결과와 해석결과를 비교해보면 슬래브 바닥으로부터 30mm에 해당하는 온도는 1시간 가열 실험체의 경우 온도의 오차는 17.5%이다. 2시간 가열 실험체의 경우 오차는 6.4%로 나타났다. 슬래브 바닥으로부터 60mm 위치에서부터는 실험결과와 해석결과와의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다.
3. 구조해석 결과, 내화피복된 실험체인 PCB\_1H의 경우 4,400 kN 이하 시 12.16 mm, PCB\_2H의 경우 4,000 kN 이하 시 10.8 mm가 발생했다. 내화피복이 되지 않은 실험체인 UPCB\_1H의 경우 4,500 kN 이하 시 23.76 mm, UPCB\_0H의 경우 5,800 kN 이하 시 23.76 mm, UPCB\_0H의 경우 5,800 kN 이하 시 23.76 mm가 발생했다.

하 시 13.45 mm가 발생했다.

4. 실험결과와 해석결과를 비교해 보았을 때 PCB\_1H와 PCB\_2H의 경우 비슷한 강성을 확인할 수 있다. 하지만 UPCB\_1H의 경우 급격한 기울기 감소현상이 나타났다. 이는 내화피복이 되어있지 않은 실험체이기 때문에 강재가 고온에 직접적으로 노출되어 내력이 급격히 저하되어 나타난 현상으로 판단된다. UPCB\_0H의 경우 내화피복된 실험체와 마찬가지로 비슷한 강성을 보인다. 모든 실험체의 강성이 해석결과에서 약간 더 높게 측정되었다. 실제 실험에서 모든 실험체는 가열로에서 가열 후 1개월 후 구조실험이 진행되었다. 해석의 경우 시간의 경과를 고려하지 않기 때문에 실제 실험체 재료의 특성변화에 기인한 것으로 사료된다.

추후 연구에서는 실제 가열로에서 수행하는 것 같은 해석환경을 위하여 대류조건 Convection, Radiation을 고려하고, Transient Thermal와 Explicit Dynamics을 이용하여 시간이력해석을 진행하고자한다.

## References

- [1] Soo-Young Park, Won-Sup Park, Heung-Youl Kim, Gap-Pyo Hong, "A Study on the Analytical Method for Fire Resistance Calculation of Asymmetric Slimfloor Beam", KOREAN INSTITUTE OF FIRE SCIENCE & ENGINEERING, FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, Vol.24, No.2, pp.31-37, April, 2014.
- [2] Jae-Kwon Ahn, Cheol-Ho Lee, "Experimental and Numerical Study of Fire Resistance of Composite Beams", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.27, No.2, pp.143-153, April, 2015. DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2015.27.2.143>
- [3] Hyung-Jun Kim, Heung-Youl Kim, Byung-Youl Min, Jae-Sung Lee, Soo-Yong Park, "An Experimental Study on Structural Behaviour of Asymmetric H Beam Slimfloor under Load Condition in Fire", KOREAN INSTITUTE OF FIRE SCIENCE & ENGINEERING, FIRE SCIENCE AND ENGINEERING Vol.25, No.1, pp. 63-71, February, 2011.
- [4] Kyu-Jae Hwang, Chy-Hyoung Lee, Hae-Soo Kim, Sung-Kee Yoon, "An Analytical Study on the Fire Resistance Performance of CFT Column using ABAQUS Program" JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction Vol.12, No.4, pp.303-310, December, 2010.
- [5] Heung-Suk Chae, Jae-Yong Ryoo, Kyung-Soo Chung, Young-Min Moon, Sung-Mo Choi, "An Analytical Study on Hysteresis Behavior of End-reinforced Steel-beam system(Eco-girder)" Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.22, No.6, pp.543-551, December, 2010.
- [6] Heung-Suk Chae, Jae-Yong Ryoo, Kyung-Soo Chung, Young-Min Moon, Sung-Mo Choi, "Experimental Study on Structural Performance of End-reinforced Steel-beam system(Eco-girder)", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.22, No.6, pp.533-541, December, 2010.
- [7] Sung-Bae Kim, Seong-Hyun Cho, Jae-Yeong Lee, Sang Seup Kim, "Bending Performance Evaluation of Hybrid Forming Composite Beam with High Depth", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.28, No.6, pp.403-414, December, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2016.28.6.403>
- [8] Kyu-Jae Hwang, Sung-Kee Yoon, "Determination of the Fire Protection Thickness of CFT Column Using Heat Transfer Analysis" JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction Vol.29, No.6, pp.65-72, June, 2013.
- [9] Eurocode3, Design of steel structures.
- [10] Eurocode2, Design of Concrete Structures.
- [11] EN 13381-4 2013, Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied passive protection products to steel members.

곽 성 신(Sung-Shin Kwak)

[준회원]



- 2008년 3월 ~ 2011년 2월 : 명덕 고등학교 졸업
- 2012년 3월 ~ 2017년 2월 : 경기대학교 플랜트·건축공학과(학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 일반대학원 건축공학과(석사과정)

<관심분야>

건축, 건축구조

최 병 정(Byong-Jeong Choi)

[정회원]



- 1999년 1월 ~ 1999년 3월 : (미)BSW ARCHITECT (Enginnering Specialist)
- 1999년 4월 ~ 2000년 12월 : (미)HARZA ENGINEERING COMPANY (구조설계부)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 (정교수)

- 2016년 10월 ~ 현재 : 경기대학교 공학대학원(공학대학원장)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 창의공과대학(이공대학장)

<관심분야>

건축, 토목