

## 재하가열조건을 고려한 온도특성이 합성보에 미치는 영향

김진호<sup>1</sup> · 강철규<sup>2</sup> · 최병정<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>석사, 경기대학교, 일반대학원 건축공학과, <sup>2</sup>부교수, 경기대학교, 건축공학과, <sup>3</sup>교수, 경기대학교, 건축공학과

## The Effect of Temperature Characteristics Toward Composite Beams with Fire Conditions Subjected Vertical Loading

Kim, Jin Ho<sup>1</sup>, Kang, Cheol Kyu<sup>2</sup>, Choi, Byong Jeong<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Master Degree, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Suwon, 16227, Korea

<sup>2</sup>Associate Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Suwon, 16227, Korea

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Suwon, 16227, Korea

**Abstract** - In this study, fire resistance tests and finite element analyses were conducted to consider the fire conditions reflecting convection and radiation conditions of the furnace. The fire resistance tests were conducted under load conditions during the fire, and the three composite beam specimens were classified according to fire protection thickness 0 mm, 10 mm, 20 mm. The finite element analyses were performed using the ANSYS program and, convection and radiation conditions of Eurocode 1 were classified to examine the fire conditions suitable for composite beams in thermal analysis. As a result of the fire resistance tests, the fire resistance according to the fire protection thickness were 20 minutes for UCB\_0, 50 minutes for PCB\_1, and 100 minutes for PCB\_2. As a result of analysis according to the fire conditions, the convection coefficient of the unexposed side to the fire has no significant influence on the temperature change of the steel cross section, and it was confirmed that the temperature change of the steel section appeared according to the application of the emissivity. As a result of comparing the test and analyses, it was confirmed that the expected temperatures of steel sections can be well estimated by the using of both convection and radiation conditions of Eurocode 1.

**Keywords** - Composite beams, Fire condition, Fire resistance test, Eurocode, ANSYS, Fire protection thickness

### 1. 서론

합성보에서 노출되어 있는 강재는 콘크리트에 비하여 상대적으로 열전도율이 높아 화재 발생 시 강재온도는 급격하게 상승하며, 강재 온도가 400 °C 이후로부터 강재의 강도는 감소한다<sup>[1],[2]</sup>. 감소된 강재 강도로 인해 합성보의 내력 또한 감소하므로 강재의 화재피해를 방지하고자 내화피복재를 사용하고 있다<sup>[3]</sup>. 국내기준에 따르면 내화피복재의 두께는 KS F 2848에 따라 요구내화시간 및 강재의 단면형상계수를

통해 산정할 수 있다<sup>[4]</sup>. 다만 내화피복재의 열적 특성은 종류 별로 다르기 때문에 내화피복된 합성보는 실험을 통해 내화 성능을 인정받아야 하며, 재하가열조건인 경우 KS F 2257-1에 따른 변형량 및 변형률의 성능기준과 비재하가열조건인 경우 KS F 2257-6에 따른 강재 단면별 평균온도 및 한계 온도의 성능기준을 고려해야 한다<sup>[5],[6]</sup>. 그러나 국내기준에 만족하는 합성보의 내화성능을 확인하기 위하여 내화실험을 진행해야 하며, 실험을 실시하는 비용과 모든 변수를 고려하기에 한계가 있다<sup>[7],[8]</sup>. 따라서 합성보의 변수를 고려한 수치 해석을 통해 내화성능의 예측이 필요하고, 합성보의 대류 및 복사 조건을 반영하여 적절한 열전달해석이 필요하다<sup>[2],[9]</sup>. 국외기준인 Eurocode(EN 1991-1-2, Section 3)<sup>[10]</sup>의 경우 강재의 온도를 산정하기 위하여 화재조건에 따른 열전달계수가 명시되어 있다. 열전달계수는 화재 노출면에 대류 및 복사 조건을 대입하는 방법이 있으며, 대류 및 복사조건을 해석에 고려하지 않고 온도분포를 예측하는 기법이 있다. 국외연구

Note.-Discussion open until December 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 05, 2020; revised May 15, 2020; approved on May 25, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-249-9702 Fax. +82-31-249-9702

E-mail. bjchoi@kyonggi.ac.kr

에서는 화재조건을 합성보에 대입하여 수치해석적으로 온도분포 및 내화성능에 대한 연구를 진행한 것을 확인하였다. Mäkeläinen and Ma<sup>[11]</sup>는 슬림플로어보의 화재에 노출된 면적과 노출되지 않은 면적을 분류하여 대류 및 복사조건을 대입하였고, 가열시간에 따른 정모멘트와 부모멘트에 대한 영향을 확인하였다. Shallal and Al Musawi<sup>[12]</sup>는 일정한 온도, 선형 온도, 비선형 온도분포를 대입하여 비선형 해석을 실시하였고, 노출형 합성보를 기준으로 가열시간에 대한 처짐과 슬립(slip)에 대하여 비교분석하였다. Ghojel and Wong<sup>[13]</sup>은 해석프로그램인 TAS를 이용하여 3면 가열인 합성보에 Eurocode에 따른 대류계수와 등가 온도에 따른 복사조건을 대입하였고, 실험과 해석에 따른 강재 단면의 온도를 비교하였다. Sandström and Wickström<sup>[14]</sup>은 각형강관과 H형강 합성보를 Eurocode와 유한요소해석을 통해 온도분포를 도출하였고, 자연 화재의 대류조건을 대입하여 음영효과를 변수로 두어 강재온도분포를 비교하였다. Benedetti and Mangoni<sup>[3]</sup>는 노출형 합성보를 기준으로 Eurocode의 대류계수와 상부플랜지와 하부플랜지에 복사조건인 방사율을 다르게 적용한 것이 특징이고, 하부플랜지의 온도에 따른 합성보 처짐을 연구하였다. 앞서 살펴본 국외연구동향의 화재조건을 확인해보면 Mäkeläinen and Ma를 제외하고는 화재에 노출되지 않은 면의 화재조건을 제시하지 않았다. 이에 반해 Eurocode 1(EN 1991-1-2, Section 3)<sup>[10]</sup>에서는 대류 및 복사조건을 고려하거나 대류조건만을 고려할 때 화재에 노출되지 않은 면의 화재조건을 다르게 설정해야한다고 명시한다. 이는 화재 발생 시 모든 구조물의 온도예측에 적용한 연구사례가 많지 않아 Eurocode 1의 기준을 학술적으로 검증할 필요성은 중요하다고 판단된다.

본 연구에서는 Eurocode 1<sup>[10]</sup>의 화재조건을 검증하기 위하여 실험 및 해석에 따른 합성보의 강재온도를 도출하였다. 내화실험은 노출형 합성보의 온도분포를 수치해석의 화재조건과 비교하기 위하여 강재 단면에 열전대를 설치하여 강재 온도를 확인하였다. 수치해석은 유한요소해석 프로

그램인 ANSYS 2019 R2를 사용하였으며, 대류 및 복사조건과 화재온도를 변수로 두어 강재의 온도분포를 확인하였다. 실험 및 해석의 강재온도를 이용하여 Eurocode 4(EN 1994-1-2, Annex E)<sup>[15]</sup>에 따라 가열시간에 따른 휨강도를 산정한 후 비교하여 실험체별 Eurocode 1<sup>[10]</sup>의 열전달계수를 수치해석적으로 검증하는 연구를 시도하였다.

## 2. 실험 및 해석조건

### 2.1 실험방법 및 조건

#### 2.1.1 실험개요

본 연구에서는 내화피복두께에 따른 합성보의 온도분포 및 내화성능을 확인하기 위하여 내화실험을 실시하였다. 내화피복두께( $t$ )는 KS F 2848<sup>[16]</sup>에 따라 식 (1)과 같이 산정할 수 있으며, 실험을 통하여 도출한 내화성능시간( $FR$ )과 단면형상계수( $H_p/A$ )에 따라 내화피복 재료의 종속변수( $k_0, k_1, k_2$ )를 도출할 수 있다. 이는 요구하는 내화성능시간에 대한 내화피복두께를 산정하기 위하여 내화피복재의 종속변수를 파악해야하므로 예비내화성능 실험없이 내화피복두께를 산정하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 내화피복두께를 10 mm, 20 mm로 계획하여 합성보의 1시간, 2시간의 내화성능 여부를 실험적으로 비교하고자 하였다. 또한 내화피복두께에 따른 내화성능을 비교하기 위하여 무피복 합성보를 추가로 고려하여 Table 1과 같이 무피복 합성보(UCB\_0), 10 mm 내화피복된 합성보(PCB\_1), 20 mm 내화피복된 합성보(PCB\_2)로 총 3개의 실험체로 계획하였다.

$$\text{내화성능시간 } FR = k_0 + k_1 t(A/H_p) + k_2 t \quad (1)$$

Fig. 1과 같이 합성보 실험체의 경간은 5 m이며, 합성보 실험체의 양단은 단순지지조건이다. 실험체는 H-300×150×6.5×9의 강재단면을 적용하였고, 내화피복두께는 0 mm,

Table 1. Specimen parameters

Specimen	Protection thickness (mm)	Heating time (min)	Load ratio ( $M_d/M_n$ )	Steel beam (mm)	Shear connector (mm)	Reinforcement (mm)
UCB_0	0	Stop fire test according to strain by KS F 2257-1 <sup>[17]</sup>	0.75 (197.4 kN)	H-300×150×6.5×9 (A36)	Φ13×110	HD10
PCB_1	10					
PCB_2	20					

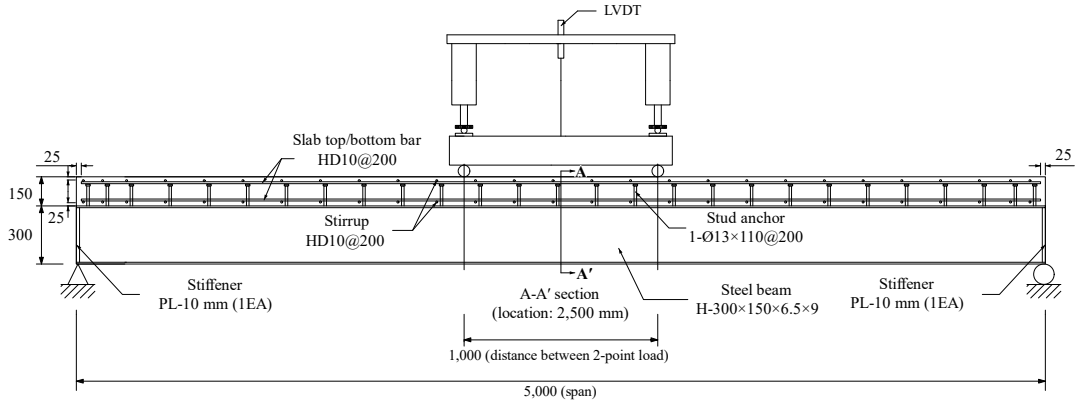


Fig. 1. Section details of specimens

10 mm, 20 mm로 사용하였다. 콘크리트 슬래브의 폭은 1,000 mm이며, 두께는 150 mm인 단면을 갖는다. Fig. 2와 같이 콘크리트 내 보강된 철근의 지름은 D10으로 상하부로 배근하였고, 스티드앵커( $h_s = 110$  mm)의 지름은  $\Phi 13$ 이며, 철근과 동일한 간격인 200 mm 간격으로 실물대 실험을 준비하였다. 노출형 합성보의 경우 웨브가 화재 실험 중 좌굴 현상이 발생할 수 있으므로 Fig. 1과 같이 강재보의 지지단 지점에 스티프너를 추가로 보강하였다<sup>[9]</sup>.

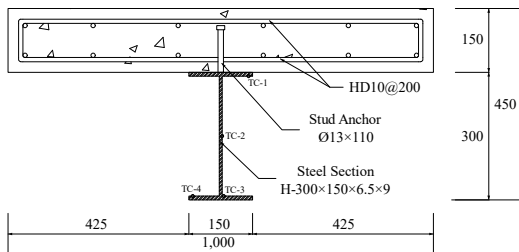


Fig. 2. Section details of specimens (A-A' section)

가열시간에 따라 실험체 중앙부 단면의 강재 온도를 파악하기 위하여 Fig. 1에서 합성보 실험체의 중앙부인 A-A' 단면 (단면의 위치: 2,500 mm)에 열전대를 설치하였다. 열전대는 Fig. 2와 같이 강재 보에 각 4개 설치하여 내화피복두께에 따른 온도분포를 비교하였으며, 실험체별 열전대 위치는 Fig. 2와 동일한 위치에 설치하였다. 단면의 온도측정은 가열시간 동안 1분 단위로 열전대의 온도를 측정하였고, 강재 보의 경우 상부플랜지(TC-1), 웨브(TC-2), 하부플랜지(TC-3 - TC-4)로 나누어 열전대를 설치하여 강재의 온도분포를 확인하였다.

합성보 실험체에 사용된 재료는 내화실험을 진행하기 전에 재료강도시험을 실시하였으며, 강재 보의 경우 A36, 콘크리트의 경우 설계압축강도를 35 MPa, 내화피복재의 경우 Monokote Z-146 NPP제품을 사용하였다. 내화피복재는 종

류에 따라 열적 특성이 다르므로 열전도율, 비열, 열팽창을 도출하였으며, 상온에서 1,000 °C까지 100 °C 단위로 내화피복재의 특성을 측정하였다. 강재의 재료시험은 Table 2와 같이 항복강도, 인장강도, 탄성계수를 측정하였다. 온도에 따른 내화피복재의 재료 특성은 Table 3에 정리하였으며, 유한요소해석에 내화피복재의 재료 특성으로 입력하였다.

Table 2. Result of material test

Material	Result of material test		
	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
Steel A36 (thickness: 8 mm)	288	462	192

Table 3. Material test results of fire protection at elevated temperature

Temperature (°C)	Result of material test		
	Thermal conductivity (W/m·K)	Specific heat (J/g·K)	Thermal expansion (mm/mm)
20	0.261	1.156	0
100	0.262	1.250	-0.0008
200	0.202	1.084	-0.0016
300	0.149	0.903	-0.0026
400	0.195	0.908	-0.0032
500	0.207	0.818	-0.0043
600	0.265	0.714	-0.0052
700	0.307	0.647	-0.0073
800	0.256	0.498	-0.0158
900	0.253	0.510	-0.0454
1,000	0.256	0.536	-0.0678

2.1.2 실험방법

본 실험은 재하가열조건을 만족하기 위하여 수평가열로 위에 실험체를 설치한 후 UTM(universal testing machine)을 이용하여 일정한 하중으로 가력하였고, 목표하중에 도달한 후 Fig. 3과 같이 콘크리트 덮개 및 단열재(cerakwool)를 이용하여 재하가열조건하에 가열로 내 열기가 외부로 유출되지 않도록 실험체와 가열로 사이를 보강하였다. 본 연구의 실험체는 특수구조물의 합성보 단면을 따르며, 통상 사용하는 하중비(0.3 - 0.5)로 실험한 결과 내화성능이 나타나지 않았다. 따라서 본 실험체의 내화성능을 확인하기 위하여 하중비는 0.75로 계획하였으며, 재하하중은 강구조설계법에 따라 노출형 합성보의 최대 휨내력을 계산한 후 최대 휨내력의 75%에 상응하는 하중인 197.4 kN으로 산정하였다. 내화피복두께에 따른 실험체는 동일한 단면형상으로 인해 공칭강도는 같으므로 재하하중은 내화피복두께와 상관없이 동일한 하중으로 가력하였다. 또한 내화실험의 가열조건은 ASTM E119 표준화재곡선을 따르며, 가열로 내부의 온도를 표준화재곡선과 비교하기 위하여 가열로 내 열전대를 설치하였다. 재하가열에 따른 실험체의 중앙부 처짐을 확인하기 위하여 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였다. 합성보 하단에 가열로가 위치함에 따라 변위계 설치가 제한되므로

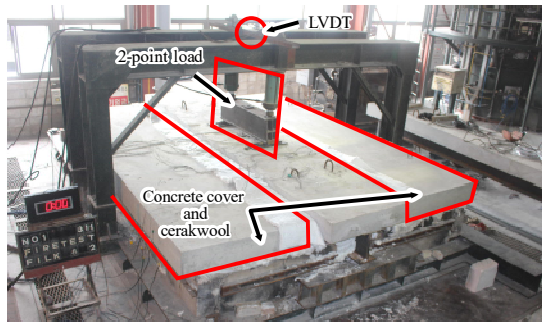


Fig. 3. View of fire test with loading

Table 4. Analysis cases of temperature, convection and radiation

Fire condition (EN 1991-1-2 <sup>[10]</sup> )		Analysis case				
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Temperature (°C)	Exposed side	ASTM E119 fire curve	×	×	×	×
	Unexposed side	14	×	×	×	×
$\alpha_c$	Exposed side	×	25	25	25	25
	Unexposed side	×	9	4	9	4
$\epsilon$		×	×	×	0.7 (internal steel: 0.4)	0.7 (internal steel : 0.4)

Temperature: input fire temperature,  $\alpha_c$ : coefficient of heat transfer by convection,  $\epsilon$ : emissivity

Fig. 3과 같이 가력장치의 고정된 프레임에 변위계를 설치하였으며, 변위 및 변형량은 KS F 2257-1<sup>[17]</sup>의 기준을 따랐다.

2.2 유한요소해석 조건

2.2.1 Eurocode의 화재조건

유한요소해석(finite element analysis, FEA)은 해석 프로그램인 ANSYS 2019 R2를 이용하였으며, 가열로의 조건을 구현하기 위하여 과도열해석(transient thermal analysis)을 실시하였다. 열해석의 화재조건은 Table 4와 같이 5가지 경우로 나누어 Eurocode 1(EN 1991-1-2)<sup>[10]</sup>의 화재조건을 분석하고자 변수를 설정하였다.

- (1) Case 1: 내화피복재 표면과 가열로 내부의 온도가 동일하다는 가정에 따라 ASTM E119 화재곡선의 온도를 대입한 방법이다. 내화피복된 합성보의 경우 내화피복재 표면에 온도를 대입하였으며, 무피복 합성보의 경우 강재 표면에 온도를 대입하였다. Case 1에서 화재에 노출되지 않은 면의 온도를 실측하였고, 14 °C 인 실측값을 화재에 노출되지 않은 면에 적용하였다.
- (2) Case 2·Case 3: Eurocode 1(EN 1991-1-2, Section 3.2)<sup>[10]</sup>에 따라 대류계수만 적용한 경우이며, 유한요소해석에서 식 (2)와 같이 대류계수( $h$ )와 가열로 온도( $T_F$ )를 입력하였다. 합성보의 화재에 노출된 면에 대류계수 25 W/m<sup>2</sup>K와 가열로 온도를 적용하였고, 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수는 4 W/m<sup>2</sup>K, 9 W/m<sup>2</sup>K로 분류하여 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수에 대한 영향을 비교하였다.
- (3) Case 4·Case 5: Eurocode 1(EN 1991-1-2, Section 3.1)<sup>[10]</sup>의 무피복 강재의 온도식인 식 (3)과 동일하게 대류계수와 방사율을 적용한 경우이며, 유한요소해석에 식 (2)의 대류계수( $\alpha_c$ ) 및 가열로 온도( $T_{Ambient}$ )

와 식 (4)의 방사율( $\epsilon$ ) 및 가열로 온도( $T_{Ambient}$ )를 입력하였다. 합성보의 화재에 노출된 면에 대류계수  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 입력하였으며, 방사율은 0.7로 입력하였다. 또한 강재 보 내부(internal steel)의 음영효과( $k_{shadow}$ )를 고려하기 위하여 식 (5)에 따라 산정한 계수만큼 강재의 방사율을 저감시켜 0.4로 입력하였다<sup>[18]</sup>. 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수는  $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 분류하여 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수에 대한 영향을 비교하였다.

$$h_{net,c} = \alpha_c (T_{Surface} - T_{Ambient}) \quad (2)$$

$$\Delta\theta_{a,t} = \left[ k_{shadow} \left( \frac{1}{c_a \rho_a} \right) \left( \frac{A_{p,i}}{V_i} \right) h_{net} \Delta t \right] \quad (3)$$

$(h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r})$

$$h_{net,r} = \sigma \epsilon (T_{Surface}^4 - T_{Ambient}^4) \quad (4)$$

$$k_{shadow} = 0.9 \left( \frac{e_1 + e_2 + 0.5b_1 + \sqrt{h_w^2 + 0.25(b_1 - b_2)^2}}{h_w + b_1 + 0.5b_2 + e_1 + e_2 - e_w} \right) \quad (5)$$

### 2.2.2 합성보 해석 모델

본 연구는 열전달계수를 변수로 두어 합성보의 해석 모델을 Fig. 4의 순서대로 수행하였다. 해석 모델의 열해석을 수행하기 위하여 합성보에서 사용된 강재 및 콘크리트의 재료 물성을 적용해야 한다. 강재 및 콘크리트는 온도에 따라 재료의 특성이 달라지므로 수치해석상 재료의 열적 특성을 대입해야 한다. 본 논문에서는 각 재료의 온도상승에 따른 특성을 자세히 명시한 Eurocode를 참고하였으며, 콘크리트의 열적 특성은 Eurocode 2(EN 1992-1-2, Section 3)<sup>[19]</sup>, 강재의 열적 특성은 Eurocode 3(EN 1993-1-2, Section 3)<sup>[20]</sup>에 따랐다. 내화피복재의 경우 종류별로 열적 특성이 다르므로 재료

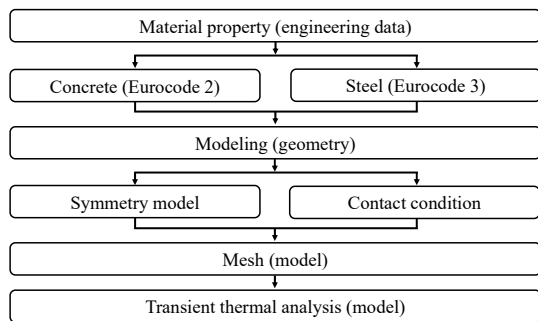
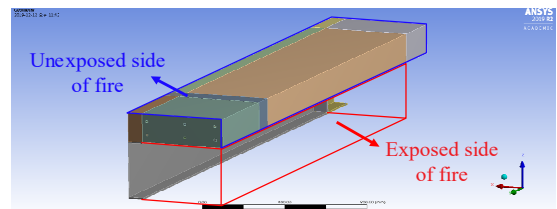


Fig. 4. Flowchart of thermal analysis (ANSYS)

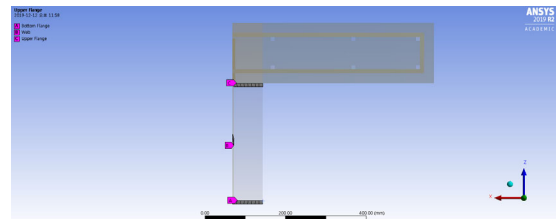
시험을 통해 도출해야 하며, 본 연구에서는 재료시험을 통해 얻은 내화피복재의 열적 특성을 반영하였다(Table 3). 내화피복재의 온도에 따른 밀도 실험은 별도로 수행하지 않아 온도에 따른 밀도를 반영하지 않았고, 상온의 밀도로 대입하여 수치해석을 제한적으로 수행하였다.

실험체에 사용된 재료 특성을 기반으로 유한요소해석 모델링을 실시하였고, 모델링은 대칭 모델(symmetry model), 접촉조건(contact condition)을 고려하였다. 본 실험체의 경간은 5 m이므로 해석의 효율성을 위하여 1/4 크기의 대칭 모델을 사용하였다. 합성보의 부재 사이의 접촉조건을 고려하기 위하여 강재 보 및 스티드 앵커는 콘크리트 슬래브와 미끄러짐이 발생한다고 가정하였으며, 마찰계수를 적용할 수 있는 접촉조건(frictional)을 강재 보 및 스티드 앵커와 적용하였다. 이 때 강재 보와 콘크리트 슬래브 사이의 마찰계수는 0.3으로, 스티드 앵커와 콘크리트 슬래브 사이의 마찰계수는 0.2로 입력하였다<sup>[21]</sup>. 본 해석 모델의 강재 보에 내화피복재를 추가로 적용하여 PCB\_1와 PCB\_2를 모델링하였다.

유한요소해석에서 합성보의 3면 가열을 가정하기 위하여 Fig. 5(a)와 같이 화재에 노출된 면(exposed side of fire)과 화재에 노출되지 않은 면(unexposed side of fire)으로 구분하였다. 합성보의 화재에 노출된 면은 강재 보와 콘크리트 슬래브 하부이며, 화재에 노출되지 않은 면은 콘크리트 슬래브 상부이고, 화재에 노출된 면과 노출되지 않은 면으로 나누어 화재조건인 Case 1 - Case 5를 적용하였다. 해석과 실험의 강재온도와 비교하기 위하여 Fig. 5(b)처럼 상부플랜지, 웹, 하부플랜지에 설치된 열전대 위치에 노드(node)를 지정하여 온도를 측정하였다.



(a) Modeling for composite beam (UCB\_0)



(b) Nodes for measuring temperature of steel section

Fig. 5. FEA modeling for transient thermal analysis

### 3. 분석결과

#### 3.1 내화실험 결과

내화피복두께에 따른 강재단면의 온도분포는 내화피복 두께에 따른 각 실험체의 내화성능시간 동안 측정하였으며, 내화실험에서 가열로 내부의 온도는 Fig. 6과 같이 ASTM E119 표준화재곡선과 일치하도록 진행하였다. 각 실험체의 내화성능은 UCB\_0의 경우 가열시간 20분, PCB\_1의 경우 가열시간 50분, PCB\_2의 경우 가열시간 100분으로 나타났으며, 내화피복두께가 두꺼워질수록 합성보의 내화성능이 증가하는 것으로 확인하였다(Table 5). Fig. 7은 내화피복두께별(0 mm, 10 mm, 20 mm) 실험체의 내화실험 종료 후 모습이며, 세 실험체 모두 콘크리트 폭열 및 강재 보의 좌굴은 발생하지 않았다. 내화피복두께에 따른 실험체의 강재단면의 온도분포는 Fig. 8과 같으며, 내화성능시간에서 각 실험체의 강재단면의 온도는 Table 6과 같다. UCB\_0의 경우 내화성능시간에서의 상부플랜지 온도는 467 °C, 웨브는 698 °C, 하부플랜지는 701 °C로 나타났다. PCB\_1의 경우 상부플랜지의 온도는 330 °C, 웨브는 620 °C, 하부플랜지는 631 °C로 나타났다. PCB\_2의 경우 상부플랜지의 온도는 371 °C, 웨브는 635 °C, 하부플랜지는 638 °C로 나타났다. 각 실험체 내화성



(a) UCB\_0 (non-protection composite beam)



(b) PCB\_1 (10 mm protection composite beam)



(c) PCB\_2 (20 mm protection composite beam)

Fig. 7. After fire test of specimen

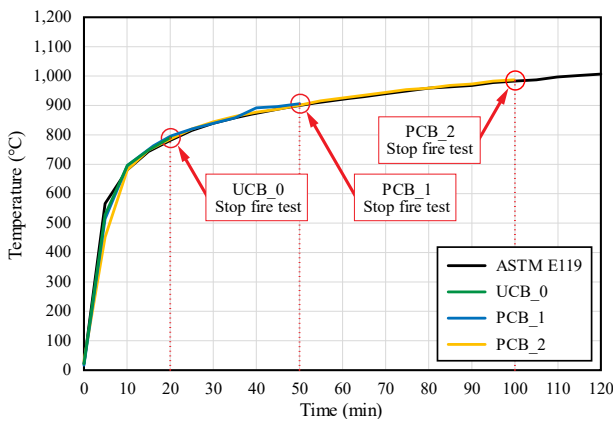


Fig. 6. Comparison of furnace temperature with ASTM E119

Table 5. Fire test results of strain and deformation

Specimen	Applied heating time (min)	Fire test result		KS F 2257-1 <sup>[17]</sup> Standard	
		Def. (mm)	Strain (mm/min)	Def. (mm)	Strain (mm/min)
UCB_0	20	130.0	15.3	239	10.6
PCB_1	50	151.3	12.6		
PCB_2	100	156.9	10.6		

Def.: deformation

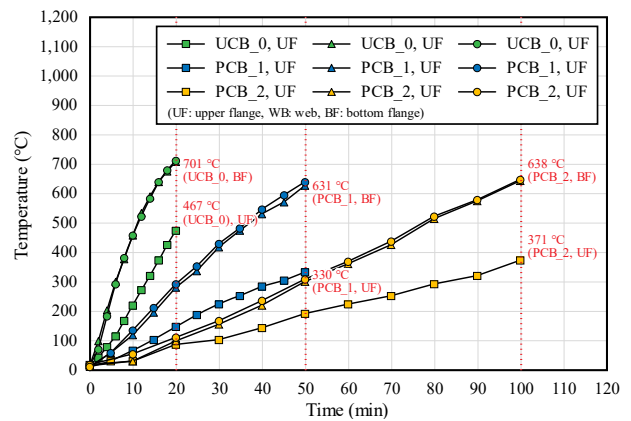


Fig. 8. Steel section temperature of specimen

Table 6. Steel section temperatures in fire resistance time

Specimen	Applied heating time (min)	Steel section temperature (°C)		
		Upper flange	Web	Bottom flange
UCB_0	20	467	698	701
PCB_1	50	330	620	631
PCB_2	100	371	635	638

능시간의 온도분포를 비교해보면 웨브 및 하부플랜지의 온도는 약 600 °C - 700 °C 사이에 위치하였으며, 가열시간 동안 웨브 및 하부플랜지의 온도분포는 유사하게 나타남을 알 수가 있다(Fig. 8).

PCB\_1 및 PCB\_2에 비하여 UCB\_0은 강재단면의 온도가 급격하게 상승하였으며, 강재단면의 급격한 온도상승으로 인하여 낮은 변형률에서도 높은 변형률이 나타남을 확인하였다. 위와 같이 내화피복재의 열전도율이 강재의 열전도율보다 낮으므로 내화피복두께가 두꺼워질수록 합성보의 내화성능이 증가함을 확인하였다. 또한 강재단면의 온도는 하부플랜지에서 가장 높게 나타남으로 유한요소해석에서 이론의 열전달계수 효과를 비교하기 위하여 하부플랜지의 온도를 활용하였다.

### 3.2 가열로 열전달계수가 미치는 영향

#### 3.2.1 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수

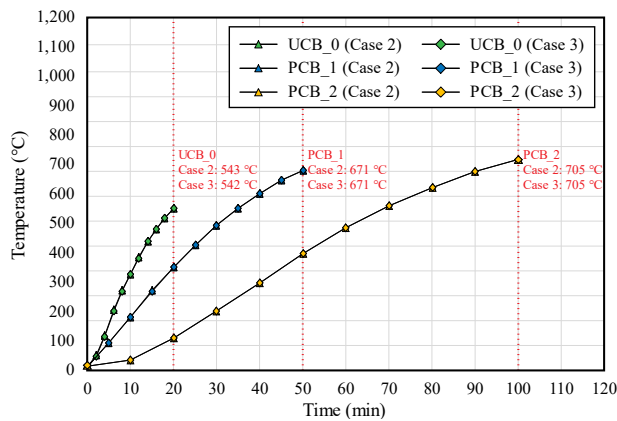
합성보와 같이 3면 가열인 경우 화재에 노출되지 않은 면의 화재조건을 적용해야 하며, Eurocode 1(EN 1991-1-2, Section 3.1)<sup>[10]</sup>에서도 노출되지 않은 면을 고려하는 규정이 있다. 이에 따라 노출되지 않은 면의 대류계수가 강재단면의 온도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Fig. 9와 같이 내화피복두께에 따라 하부플랜지의 온도를 정리하였다. Fig. 9(a)에 따르면 UCB\_0 뿐만 아니라 PCB\_1 및 PCB\_2에서도 Case 2와 Case 3의 하부플랜지 온도는 동일하게 상승하였다. 이에 따라 대류조건을 적용한 화재조건에서는 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수에 따라 하부플랜지의 온도변화가 발생하지 않음을 확인하였다.

또한 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수에 대한 효과

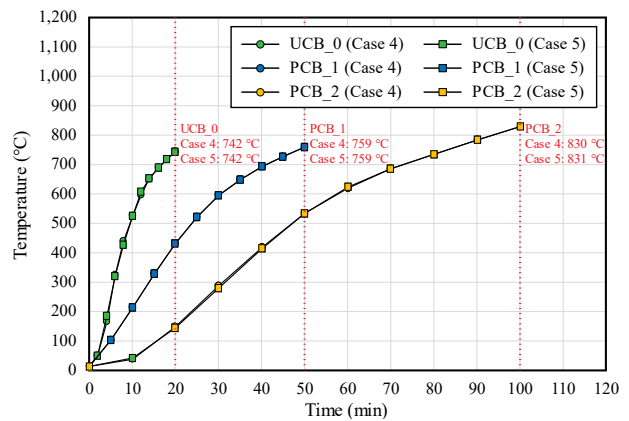
를 추가적으로 검토하기 위하여 다른 화재조건인 대류 및 복사조건을 적용한 Case 4·Case 5를 비교하였다. Case 4·Case 5에서도 Case 2·Case 3와 동일하게 가열시간 동안 하부플랜지 온도는 동일하게 상승하고 있음을 확인하였다(Fig. 9(b)). 이에 따라 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수 변수인 4 W/m<sup>2</sup>K, 9 W/m<sup>2</sup>K에 대한 각 화재조건 하부플랜지 온도는 동일하게 나타났으며, 이는 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수가 합성보의 강재 단면의 온도에 영향을 주지 않음을 확인하였다.

#### 3.2.2 강재 보의 방사율

Eurocode 1(EN 1991-1-2, Section 3.1)<sup>[10]</sup>에서는 대류 및 복사조건에 대한 가열로의 열전달계수를 제시하고 있으며, 내화피복두께에 따라 대류조건과 대류 및 복사조건을 비교한 해석 검증이 부족하기 때문에 유한요소해석에서 대류조건만 적용한 화재조건과 대류 및 복사조건을 적용한 화재조건의 온도분포를 비교하였다. 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수는 하부플랜지의 온도변화를 주지 않으므로 대류조건을 적용한 Case 2·Case 3 중 보수적으로 나타난 Case 2와 대류 및 복사조건을 적용한 Case 4·Case 5 중 보수적으로 나타난 Case 5를 비교하였다. Fig. 10은 내화피복두께에 따라 Case 2 및 Case 5의 하부플랜지 온도를 비교하였으며, UCB\_0, PCB\_1 및 PCB\_2에서 방사율을 추가로 적용한 Case 5의 온도가 Case 2보다 높게 나타났다. UCB\_0에서는 하부플랜지의 온도가 약 200 °C 차이가 나며, PCB\_1 및 PCB\_2에서도 약 100 °C 차이가 나는 것을 확인하였다. 이와 같이 Case 5의 온도가 Case 2에 비하여 높게 분포한 것으로 보아 유한요소해석에서 방사율을 적용하는 것은 의미가 있다고 판단된다.



(a) Comparison of Case 2 and Case 3



(b) Comparison of Case 4 and Case 5

Fig. 9. Comparison of bottom flange temperature for convection coefficients in unexposed side to fire

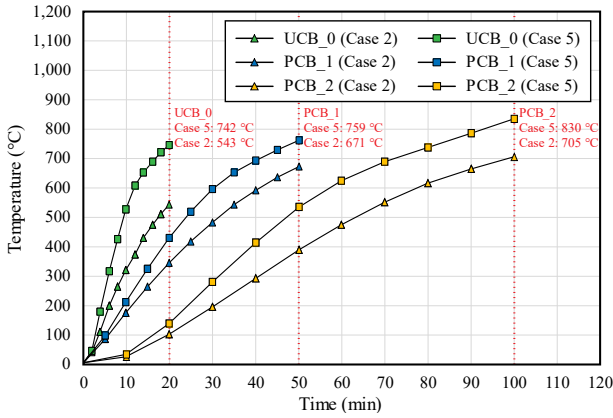


Fig. 10. Comparison of bottom flange temperature of Case 2 and Case 5

3.2.3 실험 및 해석에 따른 강재단면 온도 비교

내화피복두께에 따른 합성보의 화재조건이 정확히 명시되어 있지 않으므로 Eurocode 1의 열전달계수에 따른 해석결과와 실험결과에 따른 온도분포차이를 비교하고자 실험(specimen) 및 해석(Case 1 - Case 5)에 따라 상부플랜지(upper flange, UF), 웨브(web, WB), 하부플랜지(bottom flange, BF)로 나누어 확인하였다. 내화피복두께에 따른 각 실험체의 강재단면의 온도는 Table 7 및 Fig. 11과 같다.

화재온도를 입력한 Case 1의 강재단면 온도는 내화피복두께와 상관없이 다른 화재조건에 비하여 강재단면의 온도가 가장 높으며, 대류조건만 적용한 Case 2·Case 3의 강재단면 온도는 다른 해석조건에 비하여 상대적으로 낮았다. 화재온도를 직접적으로 대입한 Case 1의 경우 무피복 합성보에서 상부플랜지와 웨브 및 하부플랜지의 온도는 비슷하였으며, 이는 강재 표면에 화재온도를 대입했기 때문에 강재단면의 온도가 전체적으로 비슷하게 나타났다. 이에 반해 내화피복된 합성보의 경우 상부플랜지에서 웨브 및 하부플랜지의 온도차가 발생하여 3면 가열인 가열로의 열전달조건으로 가정할 수 있으나, 다른 해석조건에 비하여 온도가 높게 나타나 보수적인 결과로 나타날 수 있다.

해석 모델의 강재단면온도는 노출된 면의 열전달계수에 따라 달라졌으며, Eurocode 1의 열전달계수를 이용하여 해석을 통해 강재단면의 온도를 확인하였다. 각 화재조건에 대한 해석결과와 열전달에 따른 실험결과를 비교해보면 무피복 합성보의 경우 대류 및 복사조건을 고려한 Case 4·Case 5와 유사하였고, 내화피복된 합성보의 경우 대류조건을 고려한 Case 2·Case 3와 유사하나 웨브와 하부플랜지의 온도차가 다르게 나타났다. Eurocode 4에 따르면 강재 보의 춤이 500 mm

Table 7. Thermal analysis results of steel section temperature

Analysis cases		Steel section temperature (°C)		
		UF	WB	BF
UCB_0 (heating time: 20 min)	Case 1	774	784	784
	Case 2	278	550	543
	Case 3	275	549	542
	Case 4	484	739	742
	Case 5	483	739	742
	Specimen	467	698	701
PCB_1 (heating time: 50 min)	Case 1	573	796	808
	Case 2	324	620	671
	Case 3	324	620	671
	Case 4	481	757	759
	Case 5	482	757	759
	Specimen	330	620	631
PCB_2 (heating time: 100 min)	Case 1	550	835	881
	Case 2	372	656	705
	Case 3	372	656	705
	Case 4	495	775	830
	Case 5	504	777	831
	Specimen	371	635	638

미만인 경우 웨브와 하부플랜지의 온도는 동일하게 보는 것으로 가정하고 있으며<sup>[15]</sup>, 실험결과에서도 모든 실험체 강재보의 웨브와 하부플랜지의 온도차는 10 °C 내로 유사하게 나타났다. 반면에 해석결과에 따르면 웨브와 하부플랜지의 온도차는 PCB\_1에서 Case 4·Case 5에 비하여 Case 2·Case 3의 온도차가 크고, PCB\_2에서 Case 2·Case 3과 Case 4·Case 5의 온도차가 유사하게 발생함을 알 수 있다. 따라서 내화피복된 합성보의 화재조건은 Case 4·Case 5가 보다 적합하며, 실험결과와 Case 4·Case 5에서 발생한 온도차는 내화피복재의 방사율 고려와 내화피복재를 적용한 열해석기법이 더욱 보완될 필요가 있음을 확인하였다.

3.3 5가지 화재조건에 따른 합성보의 휨강도

화재조건에 따른 휨강도를 비교하기 위하여 실험 및 해석의 강재온도로 화재 시 공칭휨강도를 Eurocode 4<sup>[15]</sup>에 따라 계산하였다. 강재단면의 인장력은 식 (6)에 따라 강재온도를 대입하여 산정하였으며, 각 실험체의 해석조건에 따른 인장력은 Fig. 11과 같다. 강재단면의 인장력 위치는 식 (7)에 따라 구하며, 인장력에 따른 등가응력블럭의 깊이는 식 (8)에



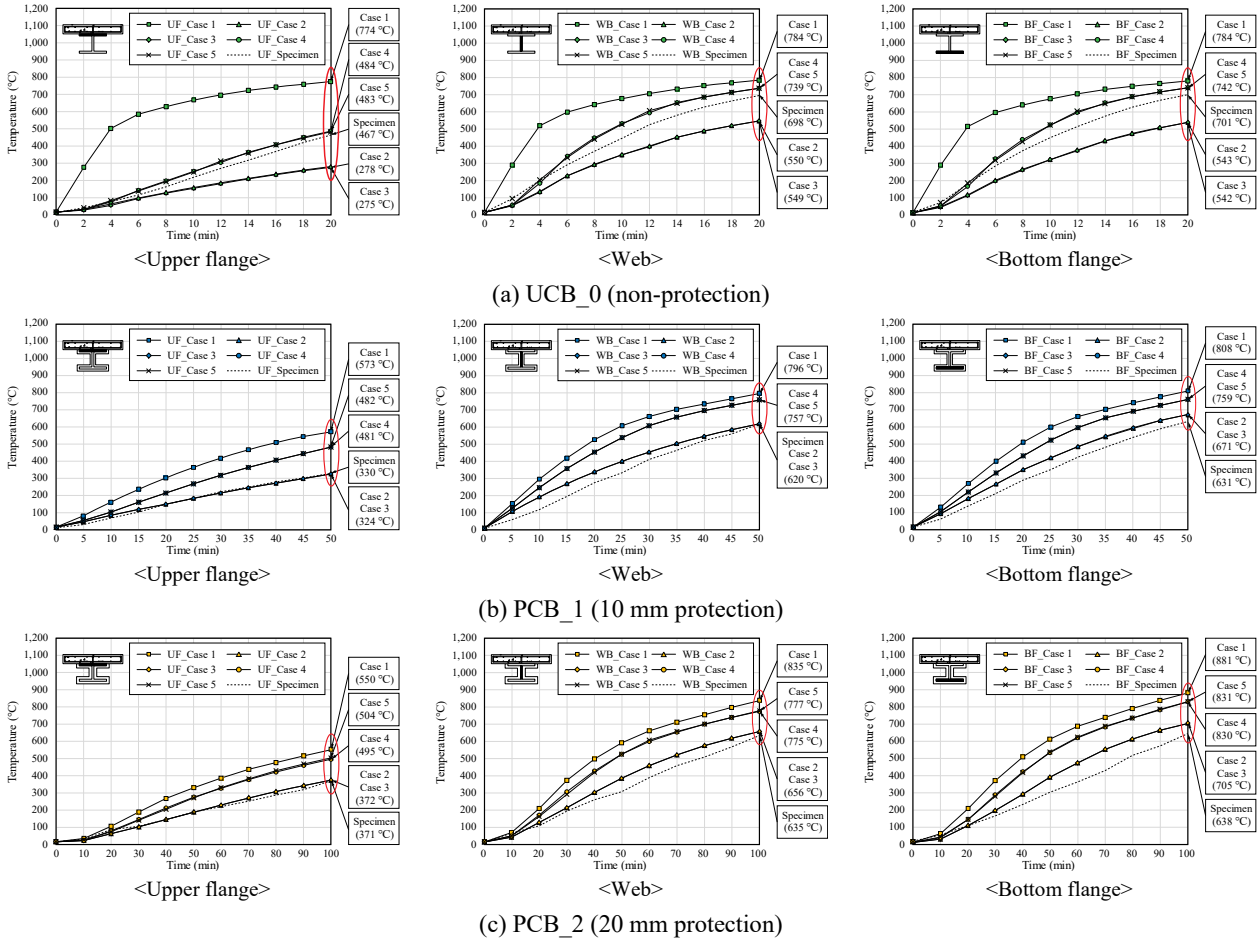


Fig. 11. Steel section temperature of composite beams

따라 산정하였다. 화재 시 합성보의 휨강도는 식 (9)와 같이 감소된 인장력과 인장력 및 압축력 사이의 길이를 곱하여 구하며, 각 변수의 휨강도는 Fig. 12와 같다.

$$T = \frac{(f_{y,lf}be + f_{y,w}h_w e_w + f_{y,uf}be)}{\gamma_{M,fi,a}} \quad (6)$$

$$y_T = \frac{be \left( f_{y,uf} \frac{e}{2} + f_{y,lf} \left( h - \frac{e}{2} \right) \right) + f_{y,w} (h_w e_w) \left( e + \frac{h_w}{2} \right)}{T \gamma_{M,fi,a}} \quad (7)$$

$$h_u = \frac{T}{b_{eff} \times f_c} \quad (8)$$

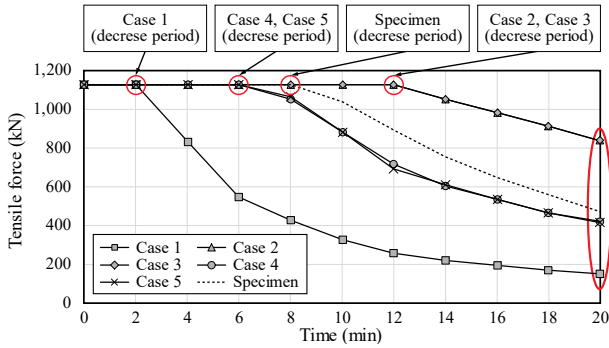
$$M_n = T \left( h - \frac{h_u}{2} - y_T \right) \quad (9)$$

화재 온도를 적용한 Case 1의 휨강도는 내화피복두께와 상관없이 다른 화재조건에 비하여 보수적으로 나타나며, 이는 Fig. 12와 같이 이른 시간에 강재단면의 인장력이 감소하기 때문이다. UCB\_0의 경우 강재표면에 화재온도를 입력하기 때문에 PCB\_1 및 PCB\_2에 비하여 내화성능시간에서

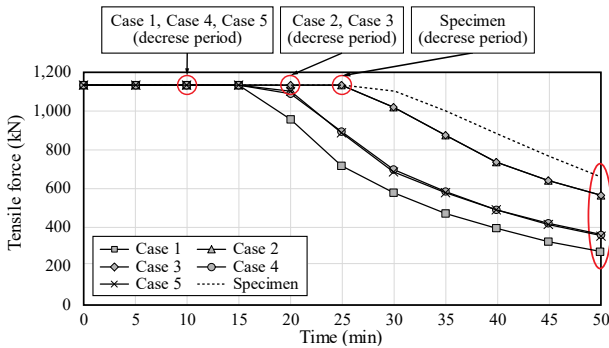
의 휨강도가 크게 감소됨을 확인하였다(Fig. 13).

대류조건만 적용한 Case 2·Case 3의 휨강도는 다른 화재 조건에 비하여 높게 계산되었으며, 이는 강재단면의 온도가 다른 화재조건에 비하여 상대적으로 낮게 측정되어 인장력의 감소하는 시간이 늦기 때문이다(Fig. 12). Case 2·Case 3을 적용한 휨강도는 실험 온도에 따른 UCB\_0의 휨강도 감소율보다 낮게 계산되었으나, PCB\_1 및 PCB\_2에서 다른 화재조건에 비하여 실험 온도에 따른 휨강도 감소율이 가장 유사하게 나타났다(Fig. 13).

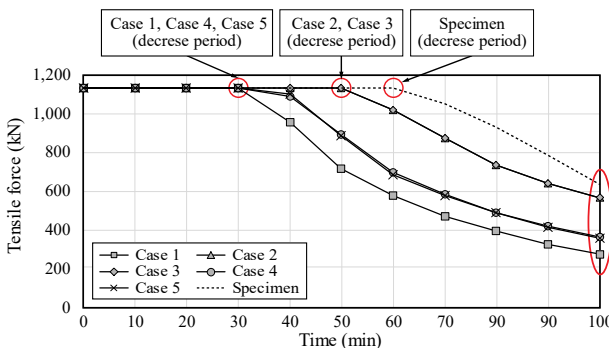
대류 및 복사조건을 적용한 Case 4·Case 5의 내화성능시간에서의 휨강도는 강재단면의 온도와 동일하게 Case 1과 Case 2·Case 3 사이에 위치한다(Fig. 13). Case 4·Case 5를 적용한 휨강도감소율은 다른 화재조건에 비하여 실험온도에 따른 무피복 합성보의 휨강도 감소율과 유사하였다. 또한 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수를 변수로 둔 Case 4·Case 5는 강재온도분포가 유사하여 내화성능시간에서의 휨강도가 동일하게 나타났다(Fig. 13).



(a) UCB\_0 (non-protection)



(b) PCB\_1 (10 mm protection)

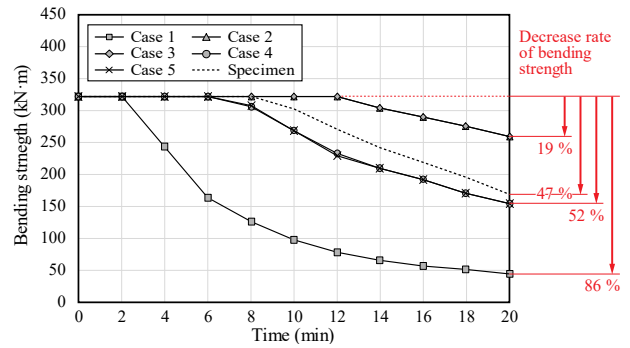


(c) PCB\_2 (20 mm protection)

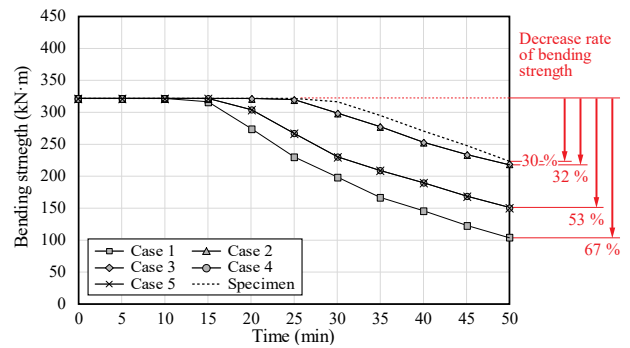
Fig. 12. Tensile force of composite beams using EN 1994-1-2

#### 4. 결론

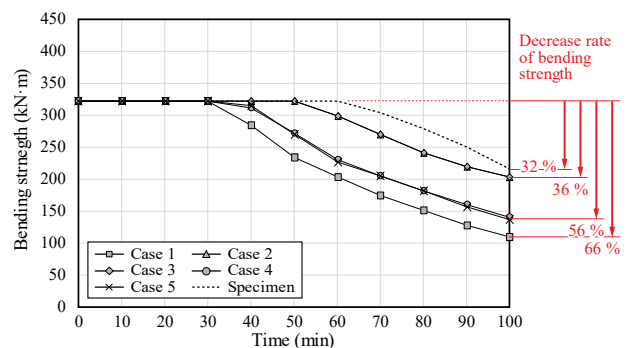
본 연구는 노출형 합성보를 대상으로 하였고, 현재 일반적으로 시행하고 있는 내화실험 검증 결과를 기술한 것이다. 내화실험은 내화피복두께 0 mm, 10 mm, 20 mm에 대해서 각각 내화성능을 검증한 결과이다. 내화실험의 결과를 화재 온도 대입한 해석기법(Case 1)에 의한 결과와 비교 검증하였다. 화재 해석 수행 시 Eurocode 1(Section 3.2)의 기준에 따른 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수를 변수로 두어 이에 대한 차이를 비교분석하였다. 또한 Eurocode 1(Section 3.1)에서 설명한 방사율에 대해서 해석 시 적용되어야 하는지의 여



(a) UCB\_0 (non-protection)



(b) PCB\_1 (10 mm protection)



(c) PCB\_2 (20 mm protection)

Fig. 13. Bending strength of composite beams using EN 1994-1-2

부와 그 중요성을 파악하기 위해 방사율을 적용한 화재 해석을 수행한 결과를 기술하였다. 위의 내화실험 결과 및 대류, 방사조건을 적용한 해석을 통해 다음의 결론에 도달하였다.

- (1) 내화피복두께별 합성보 실험체의 내화성능은 UCB\_0의 경우 20분, PCB\_1의 경우 50분, PCB\_2의 경우 100분으로 나타났으며, 무피복 및 내화피복된 합성보에서 웹 및 하부플랜지의 온도가 유사한 것으로 보아 Eurocode 4(EN 1994-1-2, Section 4.3.4.2.2 (10))의 명시와 일치함을 확인하였다.
- (2) 화재에 노출되지 않은 면에서 대류계수의 영향을

검증하기 위하여 화재에 노출된 면의 대류계수는  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수는  $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 변수를 둔 Case 2·Case 3의 화재조건을 비교하였고, 강재단면 중 온도가 가장 높은 하부플랜지 온도로 비교하였다. 이때, Case 2·Case 3의 하부플랜지 온도는 모두 UCB\_0에서  $543 \text{ }^\circ\text{C}$ , PCB\_1에서  $671 \text{ }^\circ\text{C}$ , PCB\_2에서  $705 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 동일하게 나타나 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수는 해석 시 합성보 강재단면의 온도에 영향을 주지 않음을 확인하였다.

- (3) 합성보의 화재해석 시 강재 보에 적용한 방사율의 영향을 확인하기 위하여 대류조건(Case 2)과 대류 및 복사조건(Case 5)의 하부플랜지의 온도를 비교하였으며, 두 화재조건의 하부플랜지 온도차는 UCB\_0의 경우 약  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , PCB\_1 및 PCB\_2의 경우 약  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  차이가 발생하였다. 복사조건을 추가로 고려한 화재조건(Case 5)에서 대류조건만 고려한 화재조건(Case 2)보다 보수적인 온도로 나타나며, 이는 화재해석 시 방사율의 적용은 부재의 온도분포예측에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (4) 대류 및 복사조건을 고려하지 않고 화재온도(Case 1)를 적용한 화재조건은 가열시간동안 다른 화재조건에 비하여 높은 강재단면 온도와 낮은 휨강도를 나타내는 결과를 보였다. 따라서 내화실험의 결과를 검증하기 위해서 화재해석 시에는 대류 및 복사조건을 적용한 열전달계수를 사용하는 것이 안정적인 내화성능의 예측이 될 수 있다고 사료된다.
- (5) 본 연구는 Eurocode 1의 화재조건을 기반으로 유한요소해석을 실시하였고, 무피복 및 내화피복된 합성보의 해석모델에서 웹브와 하부플랜지의 온도차가 적게 나타난 대류 및 복사조건이 합성보의 화재조건으로서 적합하며, 본 논문에서 발생한 내화피복된 합성보의 실험 및 해석의 온도차는 추후 내화피복재의 방사율을 적용한 해석적 연구가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 산업통상자원부의 재원에 의한 한국에너지기술평가원의 지원(No. 20161510400110, 원전광역화재를 고려한 정략적 화재영향 평가 기술개발)을 통해 수행된 연구입니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Lim, O.K., and Choi, S.K. (2018) Finite Element Analysis of Shear Connection in Composite Beams Exposed to Fire, *Journal of Advanced Engineering and Technology*, The Research Institute of Advanced Engineering Technology (Chosun University), Vol.11, No.4, pp.279-285 (in Korean).
- [2] Staggs, J.E.J., and Phylaktou, H.N. (2008) The Effects of Emissivity on the Performance of Steel in Furnace Tests, *Fire Safety Journal*, Elsevier, Vol.43, No.1, pp. 1-10.
- [3] Benedetti, A., and Mangoni, E. (2007) Analytical Prediction of Composite Beams Response in Fire Situation, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol. 63, No.2, pp.221-228.
- [4] Kim, H.-S., and Kang, J. (2011) A Study on the Determination of Required Fire Protection Thickness Considering Steel Section Shape, *Journal of the Korea Academia Industrial Cooperation Society*, KAIS, Vol. 12, No.12, pp.5910-5916 (in Korean).
- [5] Yeo, I.-H., Cho, K.-S., and Cho, B.-Y. (2012) A Study on Relations Between Shape Factor and Temperature History of Steel of Composite Beam in Standard Fire Under Same Thickness Condition of Spray-Type Fire Resistance Materials, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, KIFSE, Vol.26, No.6, pp.72-77 (in Korean).
- [6] Yoon, S.K., Lee, C.H., and Koo, B.H. (2015) Calculation of Limit Temperature on H-Beam Flexural Member Through the Thermal Stress Analysis Under the Lateral Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.4, pp.387-397 (in Korean).
- [7] Park, S.-Y., Kim, H.-J., and Hong, K.-P. (2011) Analytical Study for Improving the Fire Resistance of Composite Beam Depend on Section Change, *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, KIFSE, Vol.25, No.2, pp.80-87 (in Korean).
- [8] Selden, K.L., and Varma, A.H. (2016) Composite Beams Under Fire Loading: Numerical Modeling of Behavior, *Journal of Structural Fire Engineering*, Emerald Publishing, Vol.7, No.2, pp.142-157.
- [9] Ahn, J.K., and Lee, C.H. (2015) Experimental and Numerical Study of Fire Resistance of Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.2, pp.143-153 (in Korean).

- [10] European Committee for Standardization (2002) *Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire* (EN 1991-1-2), Belgium, pp.23-25.
- [11] Mäkeläinen, P., and Ma, Z. (2000) Fire Resistance of Composite Slim Floor Beams, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.54, No.3, pp.345-363.
- [12] Shallal, M.A. and Al Musawi, A.M.K. (2018) Non-Linear Analysis of Composite Beam Subjected to Fire, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Medwell Publications, Vol.13, No.22, pp.9643-9650.
- [13] Ghojel, J.I., and Wong, M.B. (2005) Three-Sided Heating of I-Beams in Composite Construction Exposed to Fire, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.61, No.6, pp.834-844.
- [14] Sandström, J., and Wickström, U. (2013) Steel Temperature Calculations in Performance Based Design Advanced Techniques for Thermal Response Calculations with FE-Analysis, *Proceedings of International Conference: Application of Structural Fire Engineering*, (CTU Publishing House, Czech Technical University in Prague), Czech, pp.153-159.
- [15] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design* (EN 1994-1-2), Belgium, pp.86-89.
- [16] Korean Agency for Technology and Standards (2010) *Method for Calculating Fire Protective Thickness of Structural Steel According to Section Factor* (KS F 2848: 2010), Korea (in Korean).
- [17] Korean Agency for Technology and Standards (2005) *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - General Requirements* (KS F 2257-1: 2005), Korea (in Korean).
- [18] Dwaikat, M.M.S., and Kodur, V.K.R. (2012) A Simplified Approach for Predicting Temperature Profile in Steel Members with Locally Damaged Fire Protection, *Fire Technology*, Springer, Vol.48, pp.493-512.
- [19] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design* (EN 1992-1-2: 2004), Belgium, pp.19-29.
- [20] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design* (EN 1993-1-2: 2005), Belgium, pp.20-26.
- [21] Guezouli, S., and Lachal, A. (2012) Numerical Analysis of Frictional Contact Effects in Push-out Tests, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.40, pp.39-50.

### 기 호(Notation)

$A_{p,i}/V_i, H_p/A$	: 강재의 단면형상계수
$M_n$	: 화재피해를 받은 합성보의 공칭휨강도
$T$	: 화재피해를 받은 강재단면의 인장력
$T_{Ambient}$	: 가열로 내 화재온도
$b, b_1, b_2$	: 강재 보에서 하부, 상부플랜지의 폭
$b_{eff}$	: 콘크리트 슬래브의 유효폭
$e, e_1, e_2$	: 강재 보에서 하부, 상부플랜지의 두께
$f_c$	: 콘크리트 슬래브의 압축강도
$f_{y,uf}, f_{y,w}, f_{y,lf}$	: 화재피해를 받은 상부플랜지, 웨브, 하부플랜지의 감소된 항복강도
$h_{net,c}, h_{net,r}$	: 대류 및 복사조건에 따른 열유속
$h_u$	: 화재 피해를 받은 콘크리트 슬래브의 등가응력블럭의 깊이
$h_w, e_w$	: 강재 보에서 웨브의 춤 및 두께
$k_0, k_1, k_2$	: KS F 2848에 따른 내화피복재 종속변수
$k_{shadow}$	: 강재 보의 음영효과(shadow effect)
$\gamma_T$	: 화재피해를 받은 강재 보 단면의 인장력 위치
$\alpha_c$	: 화재 종류에 따른 대류계수
$\epsilon$	: 강재의 방사율
$\sigma$	: 스테판-볼츠만 상수( $= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

**요 약**: 본 연구에서는 대류 및 복사 조건을 반영한 합성보의 화재조건을 고려하기 위하여 내화실험과 유한요소해석을 수행하였다. 내화실험은 재하가열조건으로 실시하였으며, 내화피복두께 0 mm, 10 mm, 20mm로 나누어 3개의 실험체로 계획하였다. 유한요소해석은 ANSYS 해석프로그램을 이용하였고, Eurocode 1의 대류 및 복사조건을 분류하여 합성보에 적합한 화재조건을 검토하였다. 내화 실험 결과, 내화피복두께에 따른 내화성능은 UCB\_0의 경우 20분, PCB\_1의 경우 50분, PCB\_2의 경우 100분으로 나타났다. 화재조건에 따른 해석결과, 화재에 노출되지 않은 면의 대류계수는 강재단면의 온도변화에 영향을 미치지 않았고, 방사율 적용에 따라 강재단면의 온도변화가 나타나는 것으로 확인하였다. 실험과 해석을 비교한 결과, Eurocode 1의 대류 및 복사조건을 이용하여 합성보 강재단면의 온도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어**: 합성보, 화재 조건, 내화실험, 유로코드, ANSYS, 내화피복두께