

무피복 합성보의 내화성능에 대한 실험 및 해석적 연구

안재권¹ · 이철호^{2*}

¹박사과정, 서울대학교, 건축학과, ²교수, 서울대학교, 건축학과

Experimental and Numerical Study of Fire Resistance of Composite Beams

Ahn, Jae Kwon¹, Lee, Cheol Ho^{2*}

¹Ph.D, candidate, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²Professor, Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

Abstract - In this paper, the standard fire resistance test under load and associated numerical study were carried out to evaluate the fire resistance of unprotected partially encased beams and slimfloor beams. The temperature evolution and the deflection increase of the composite beam specimens were investigated and the effects of the key behavioral parameters including the load ratio, the reinforcement, and the fire exposure were analyzed. The test results showed that the temperature rise of the partially encased beams and slimfloor beams is considerably slow compared to the conventional H-shape composite beams. Up to at least 90 minutes, the reinforcements in the partially encased composite beams maintained below the temperature at which the cold steel strength is sustained. Unprotected partially encased beams and slimfloor beams in the experimental program achieved the fire resistance more than 2 hours according to the limiting deflection criteria. This implies that unprotected partially encased beams and slimfloor beams can be very promising alternatives to enhancing the fire resistance of steel beams. This study also conducted the fully coupled thermal-stress analysis by using the commercial code ABAQUS to the thermal and structural behaviour of composite beams in fire. The numerical predictions provide acceptable correlations with the experimental results.

Keywords - Partially encased beam, Slimfloor beam, Fire resistance test under load, Coupled thermal-stress analysis, Fire resistance

1. 서론

강구조 건축물의 경우 강재 본연의 화재취약성으로 인하여 보 및 기둥과 같은 주요 부재는 내화피복을 통해 화재 시에도 내하력을 유지하도록 하는 것이 일반적 관행이었다. 이 경우 강재의 대표적인 내화피복방법은 내화뿔칠, 내화보드, 내화페인트의 활용이다. 하지만 내화피복을 이용한 강구조물의 사양적 내화설계는 화재 시 건축물의 실제 거동을 반영하지 못한 채 일반적으로 화재에 노출되는 모든 강재면을 피

복하게 하여 시공성, 경제성, 내화성능에 대한 신뢰성 등을 저감시키는 단점을 지적받아 왔다.

내화피복재를 사용하지 않고 내화성능을 개선하는 다른 방법은 강재에 비해 열전도도가 낮은 콘크리트를 강재에 채우거나 화재노출면 일부에 매립 혹은 피복하는 합성구조를 활용하는 것으로 CFT(concrete filled steel tube) 기둥, 매립형(partially encased) 합성보, 슬림플로어(slimfloor) 보 등이 대표적이다. 이러한 합성구조의 내화성능은 초고층, 장기간을 요구하는 건축물이 증가하고 시공성과 경제성을 향상시키기 위한 복합구조시스템의 개발 및 적용이 활발한 최근 상황에서 더욱 주목받고 있다. 다만 이러한 합성구조에 대한 수요 확대에도 불구하고 아직 국내에서 이들의 내화성능에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

유럽의 경우 Eurocode 4^[1]에서 콘크리트를 매립하지 않은 전통적 H형강 합성보 뿐만 아니라 강재 단면의 웹과 플

Note.-Discussion open until October 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 18, 2014; revised November 16, 2014; approved on November 17, 2014.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-871-5518

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

랜지 사이 공간을 콘크리트로 채우고 철근을 보강한 매립형 합성보에 대한 내화설계방안 역시 비교적 상세히 다루고 있다. 합성보의 내화성능과 관련한 연구도 꾸준히 이어져 왔으며, 최근 Piloto 등^[2]은 매립형 합성보의 상온 휨성능 및 고온에서 다양한 하중비에 대한 내화성능을 연구한 바 있다. Ellobody^[3]는 화재노출면을 내화피복하지 않은 슬림플로어보의 내화성능에 대하여 다양한 화재조건을 고려한 해석적 연구를 통해 접근하였다.

국내 합성보의 경우 U형 강관에 콘크리트를 채운 형태의 TSC보^[4], 일반 H형강을 허니콤보 절단법으로 절단, 제작하여 플랜지를 제외한 강재단면을 콘크리트로 피복한 iTECH보^[5], 강도가 상이한 측강관과 하부강관, 철근을 조합한 하이브리드 성형보^[6] 등의 내화성능에 대한 연구가 대표적 사례이다.

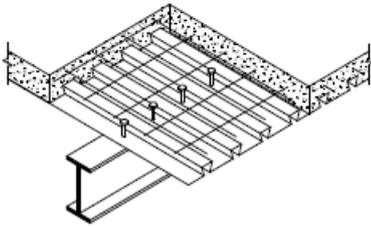


Fig. 1. Conventional H-shape composite beam

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 H형 강재보와 콘크리트 슬래브로 이루어진 일반 합성보, 웨브와 플랜지 사이 공간을 콘크리트로 채운 매립형 합성보, 춤이 깊은 데크와 비대칭 H형강을 이용한 슬림플로어보 등 다양한 합성보에 대한 내화성능평가실험을 수행하여 화재 시 이들의 거동 특성 및 내화성능을 비교, 분석하였다. 화재실험에서는 합성보의 단면 형상, 콘크리트 피복면의 수, 철근의 보강 유무, 하중비를 변수로 고려하였고, 표준화재곡선에 의거하여 실험을 수행하였다. 그리고 수행한 화재실험에 대하여 유한요소해석 모델링을 수행하여 수치해석에 의한 내화성능 예측 결과를 실제 실험결과와 비교하였다.

2. 합성보의 내화성능평가실험

2.1 실험 계획

본 실험에서는 Table 1과 같이 총 8개의 실험체를 계획하

였다. 일반 합성보 및 슬림플로어보 모두 기본적으로 철근의 유무, 하중비를 변수로 고려하였으며, H형강을 이용한 일반 합성보의 경우 화재에 노출된 강재의 웨브 및 하부플랜지에 대한 콘크리트 매립 혹은 피복 유무를 추가적으로 고려하였다. 강재 단면의 경우 어떠한 형태의 내화피복재도 추가하지 않았다.

일반 합성보와 매립형 합성보에는 H-294×200×8×12 단면을 동일하게 적용하였고(이하 HB 계열), 슬림플로어보의 경우 H-350×350×12×19 단면의 상부플랜지 양단을 60mm씩 절단한 비대칭형강(이하 AH-350×230×350×12×19)을 제작하여 실험체에 적용하였다(이하 SB계열). HB-UP-L3는 강재의 3면이 화재노출, HB-FE-L6는 화재노출된 강재면이 없고, 나머지 실험체는 하부플랜지 바닥면만 화재에 노출되도록 하였다. HB-PE-R-L4와 HB-PE-R-L6는 HB-PE-L3와 같은 형상이지만 매립된 콘크리트 내부에 철근을 보강(4×D25)하여 휨내력을 증진한 실험체이다.

Table 1에서 N_{app} 는 실험 시 보에 재하된 총하중, M_{max} 는 재하된 하중으로 인하여 보의 경간중앙부에서 발생하는 최대휨모멘트, M_p 는 상온에서 합성보 단면의 소성휨모멘트이다. 보의 경우 하중비는 Table 1과 같이 재하된 하중에 의한 최대휨모멘트와 상온에서의 소성휨모멘트의 비로 정의된다.

Fig. 2와 같이 모든 보의 경간은 7.7m, 보 상부의 슬래브 폭은 800mm이고, 양단 단순지지조건이다. 일반 합성보의 경우 웨브의 콘크리트 채움이 없으므로 보의 양단지점에서 웨브와 플랜지 사이를 스티프너로 보강하였다. 슬래브의 깊이(데크의 전체 깊이 포함)는 춤이 얇은 데크를 적용한 일반 및 매립형 합성보의 경우 160mm, 춤이 깊은 데크를 적용한 슬림플로어보의 경우 411mm이다. 또한 경간중앙부의 처짐을 측정할 수 있도록 가력장치를 고정된 프레임 상단에 변위계를 설치하여 슬래브 상단과 연결하였다.

Fig. 3은 실험체 단면 및 열전대의 설치위치를 나타낸다. 각 실험체별로 경간중앙부 단면에서 강재보, 매립 콘크리트, 철근, 슬래브의 온도를 측정하였다. 강재보의 경우 하부플랜지, 웨브, 상부플랜지를 구분하여 열전대를 설치(TS-1~3)하였고, 철근은 2열로 배근한 상하부 철근에 1개소씩 설치(TR-1~4)하였다. 매립 콘크리트의 경우 하부플랜지면에서부터 50mm 간격으로 설치(TC-1~3)하였다. 슬래브의 경우 HB-UP-L3와 HB-PE-L3에는 데크의 하부블록면에서 30mm씩 떨어진 거리에 설치하였고, 나머지 실험체에는 데크의 상부블록면에서 30mm씩 떨어진 거리에 설치(TF-

Table 1. Summary of test specimen information

Specimen	Steel section (mm)	Span (mm)	Fire exposed steel surface	Reinforcement	N_{app} (kN)	M_{max} (kNm)	M_p (kNm)	Load ratio (M_{max}/M_p)
HB-UP-L3	H-294×200×8×12	7700	3 sides	-	122.4	126.3	503.8	0.25
HB-PE-L3	H-294×200×8×12	7700	1 side	-	122.4	126.3	503.8	0.25
HB-PE-R-L4	H-294×200×8×12	7700	1 side	4-D25	221.9	228.9	695.9	0.33
HB-PE-R-L6	H-294×200×8×12	7700	1 side	4-D25	332.8	343.3	695.9	0.49
HB-FE-L6	H-294×200×8×12	7700	-	-	244.9	252.6	503.8	0.50
SB-L4	AH-350×230×350×12×19	7700	1 side	-	287.4	296.5	881.0	0.34
SB-R-L4	AH-350×230×350×12×19	7700	1 side	4-D25	352.7	363.8	1080.5	0.34
SB-R-L6	AH-350×230×350×12×19	7700	1 side	4-D25	529.1	545.7	1080.5	0.51

HB: H-section composite beam, SB: slimfloor beam, AH: asymmetric H-section
 UP: unprotected, PE: partially encased, FE: fully encased, R: reinforcement, L: load ratio

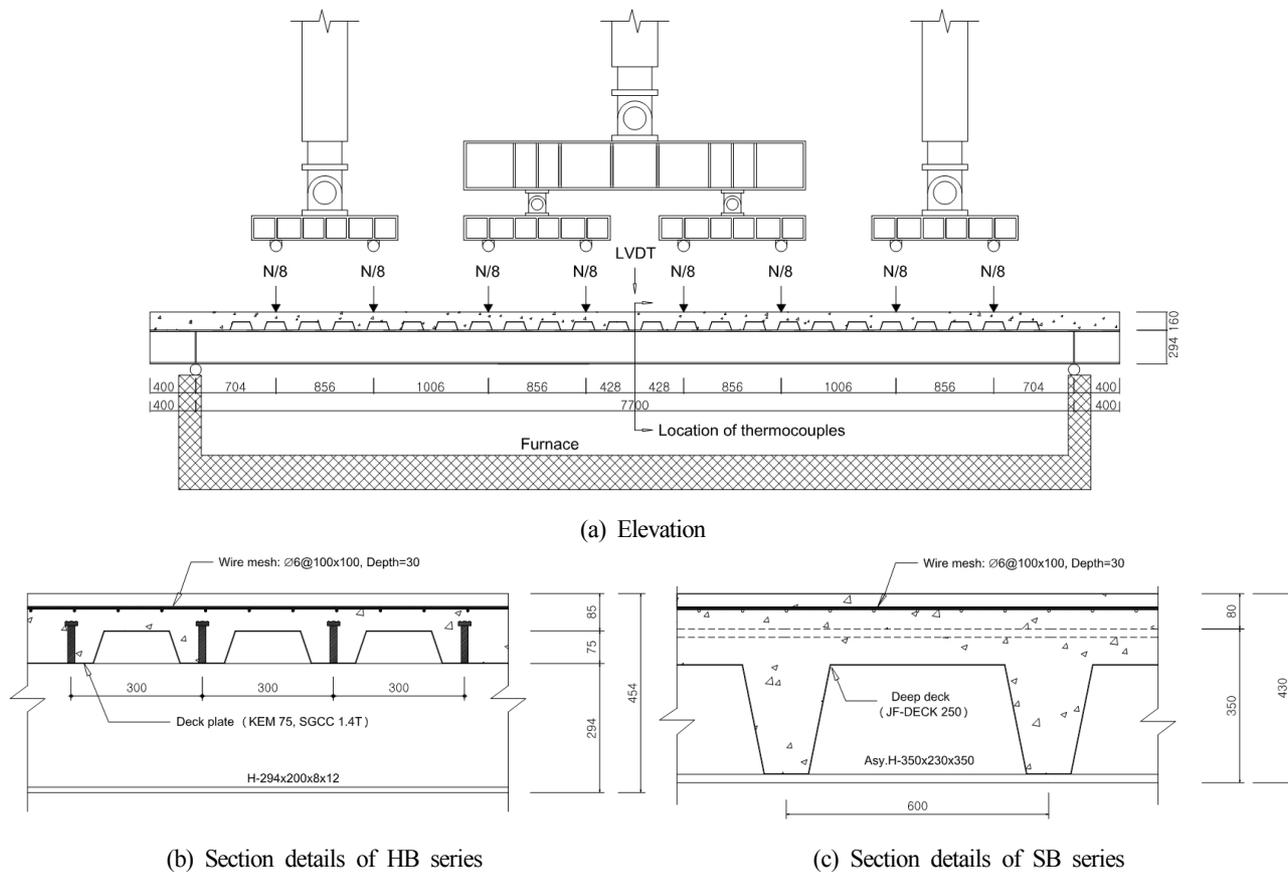


Fig. 2. Elevation and section

1~3)하였다. 그리고 상부플랜지에 설치한 전단스터드에도 열전대를 설치(TS-4)하여 온도변화를 확인하고자 하였다. 매립형 합성보의 경우 웨브의 중앙부에 양쪽으로 스테드를 용접하여 매립된 콘크리트를 구속하도록 하였다^[1].

시험체에 사용된 재료는 강재보의 경우 SS400, 철근의

경우 SD400, 콘크리트의 경우 설계압축강도를 24MPa로 계획하였다. H형강의 강재 및 철근의 재료인장시험결과는 Table 2와 같고, 콘크리트 공시체의 압축강도 측정결과는 Table 3과 같다.

Table 2. Mechanical properties of steel

Steel section (mm)	Steel thickness (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
H-294×200×8×12	8	307.8	450.6
	12	315.7	458.2
AH-350×230×350×12×19	12	311.1	465.0
	19	285.0	457.8
Reinforcement (D25)		515.9	708.5

Table 3. Mechanical properties of concrete

Design compressive strength (MPa)	Average cylinder strength (MPa)
24	24.2

2.2 실험 방법

Fig. 4와 같이 가열로 위에 실험체를 설치하고 재하가열 중에 열이 외부로 유출되지 않도록 실험체와 가열로 사이를 단열재로 보강하였다. 하중조건은 Table 1에 나타난 바와 같

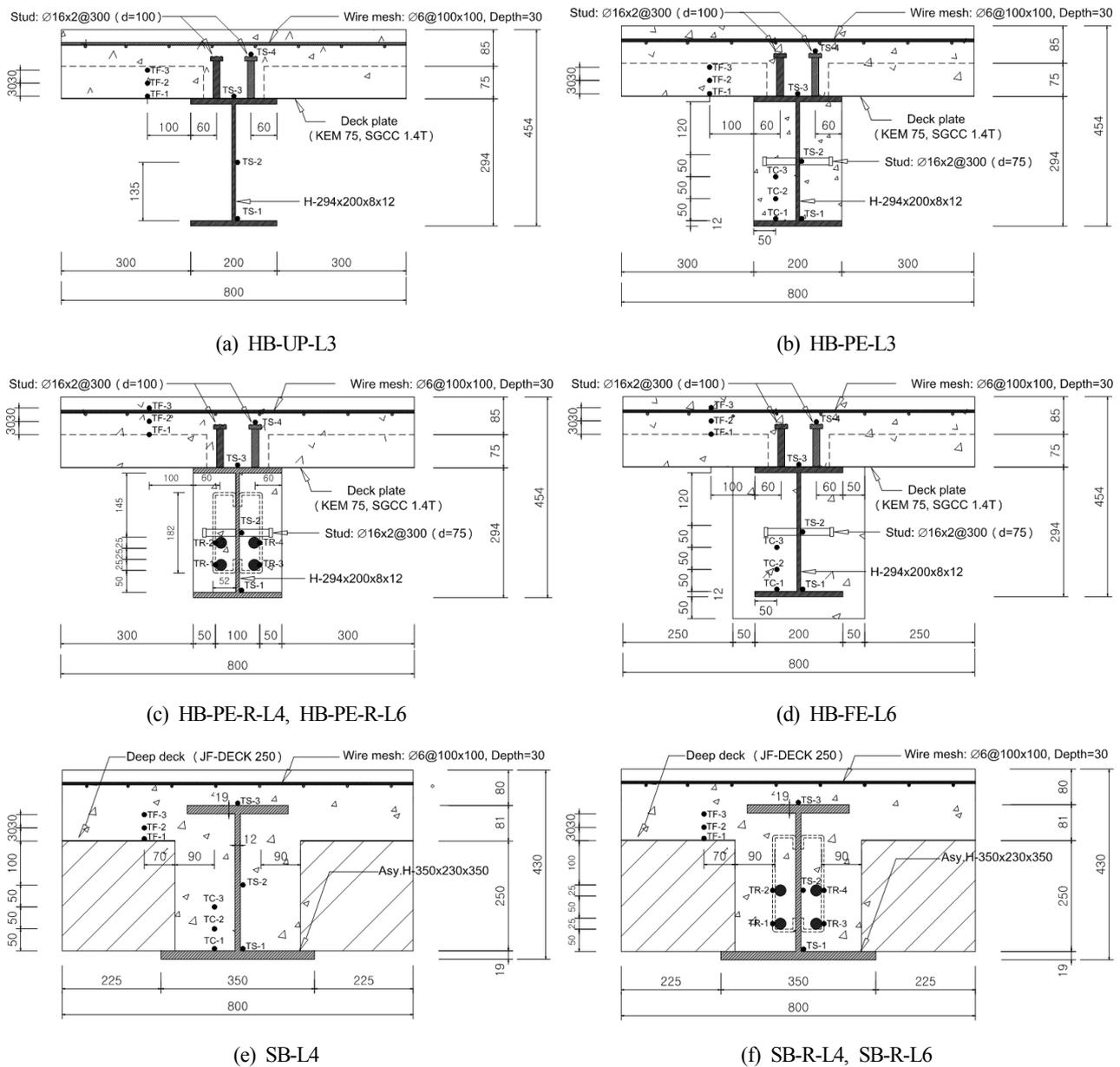


Fig. 3. Section details and location of thermocouples

이 실험체별 소성휨모멘트와 하중비를 고려한 최대휨모멘트가 경간중양부에 발생하도록 산정되었으며, Fig. 2(a)와 같이 슬래브 위를 8점 가력하도록 하였다. 이후 재하량을 유지하면서 KS F 2257-1의 표준화재곡선(식 (1))을 따라 보를 가열하였다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

여기서 T 는 가열로의 온도, t 는 시간(분)이다.

재하가열실험 중에는 보 단면에 설치한 열전대의 온도 측정과 함께 보의 경간중양부 처짐을 변위계를 이용하여 측정하였다. 실험은 KS F 2257-1^[7]의 내화성능기준(ISO 834^[8]와 동일)에서 제시한 하중지지력 판정기준에 의거하여 경간중양부의 처짐량과 처짐속도가 허용값을 초과할 때까지 진행되었다. 식 (2a)와 (2b)는 각각 처짐량과 처짐속도에 대한 제한값을 구하는 식이다. 내화성능기준에서는 2가지 기준을 모두 초과하였을 때 하중지지력을 상실한 것으로 간주한다.

$$D = \frac{L^2}{400d} (mm) \quad (2a)$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d} (mm/min) \quad (2b)$$

여기서 D 는 실험체의 처짐, L 은 실험체의 경간(mm), d 는 보의 깊이이다.



Fig. 4. Overall view of test setup

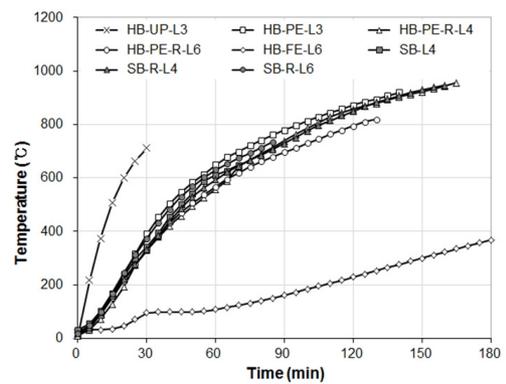
3. 실험결과 및 분석

3.1 온도변화

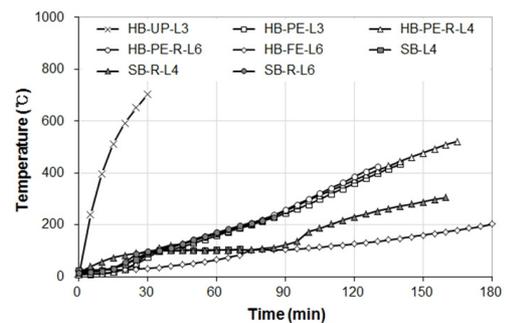
3.1.1 강재의 온도변화

Fig. 5는 합성보 단면 중 H형강의 하부플랜지(TS-1), 웨브(TS-2), 상부플랜지(TS-3)의 온도변화를 나타낸 것이다.

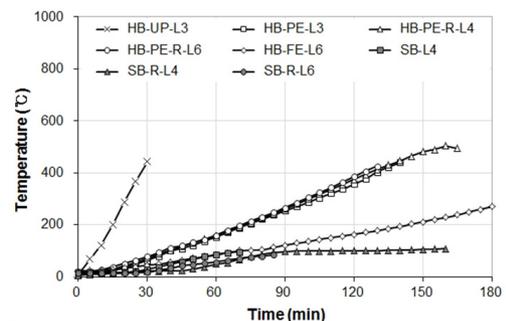
콘크리트를 매립하지 않은 HB-UP-L3의 하부플랜지는 온도상승이 표준화재곡선에 근접할 정도로 빨랐다. 그리고 하부플랜지를 콘크리트로 피복한 HB-FE-L6의 경우에는 3



(a) TS-1 (bottom flange)



(b) TS-2 (web)



(c) TS-3 (top flange)

Fig. 5. Temperature evolution in steel

시간 경과한 이후에야 400°C에 도달하였다. 나머지 실험체의 경우(HB-PE 계열, SB 계열) 플랜지와 웨브 사이가 콘크리트로 매립되어 있기 때문에 온도상승속도가 유사하였다. 웨브와 상부플랜지의 온도변화도 하부플랜지와 비슷한 양상을 나타내었다. 다만 슬림플로어보의 경우 매립형 합성보와 달리 상부플랜지가 슬래브 안으로 완전히 매립되어 있기 때문에 상부플랜지의 온도상승속도는 HB-FE-L6와 유사할 정도로 현저히 낮았다. 전단스터드의 경우 2시간 경과 후에도 200°C 이하의 온도를 유지하는 것으로 보아 상온수준의 강도를 유지하는 것으로 확인되었다.

Table 4는 비재해내화성평가에서 적용되는 강재의 평균온도 제한값(538°C)와 최대온도 제한값(649°C)에 근거^[9]한 실험체별 내화성능이다. 하부플랜지 바닥면만 화재에 직접 노출된 실험체들의 경우 강재 단면내의 온도편차가 크기 때문에 실험 중 평균온도 제한기준보다 최대온도 제한기준에 먼저 도달하게 되어 실제 내화성능을 상당히 저평가하게 됨을 알 수 있다. 일부 실험체(HB-FE-L6 및 SB 계열)의 경우 처짐량 제한에 의해 하중지지력을 상실하는 시간까지도 강재평균온도가 제한기준에 도달하지 않았다. 이는 합성부재의 경우 비재해실험의 온도기준에 의한 내화성능평가가

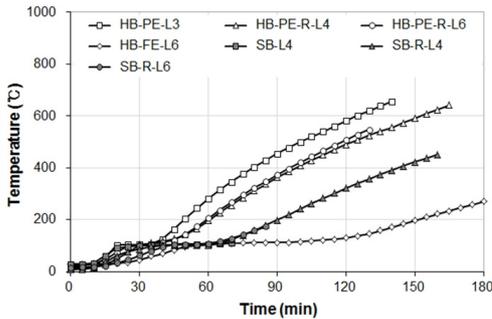
Table 4. Fire resistance by current limiting temperature criteria

Specimen	Fire resistance(min)	
	Average temperature(538°C)	Maximum temperature(649°C)
HB-UP-L3	23	23
HB-PE-L3	122	59(governs)
HB-PE-R-L4	120	71(governs)
HB-PE-R-L6	124	76(governs)
HB-FE-L6	>180	>180
SB-L4	>70	70(governs)
SB-R-L4	>161	70(governs)
SB-R-L6	>87	64(governs)

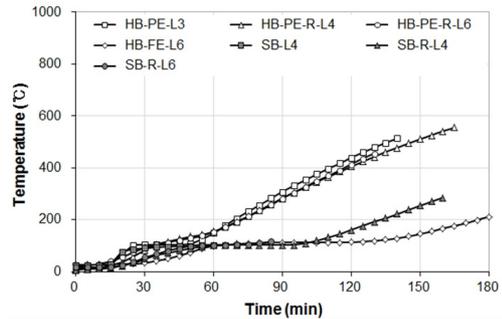
실제 내화성능을 일부 왜곡할 수 있음을 분명히 보여준다.

3.1.2 철근과 매립 콘크리트의 온도변화

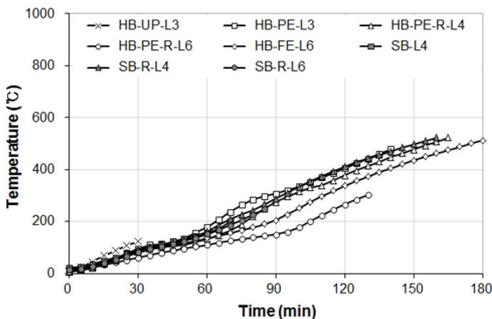
Fig. 6(a~b)에는 매립형 합성보와 슬림플로어보에 보강된 철근의 온도변화를 나타내었다. 그리고 철근을 보강하지 않은 실험체의 경우에는 매립 콘크리트 내부의 같은 위치 온도변화를 함께 나타내었다. 철근을 배근하지 않은 HB-PE-L3와 배근한 HB-PE-R-L4, HB-PE-R-L6의 온도를 비



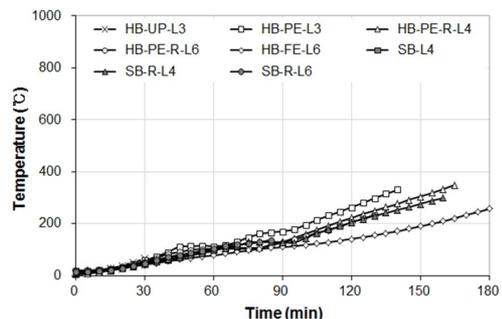
(a) TR-1(HB-PE-R-L4, HB-PE-R-L6, SB-R-L4, SB-R-L6) and TR-2(HB-PE-L3, HB-FE-L6, SB-L4)



(b) TR-2(HB-PE-R-L4, HB-PE-R-L6, SB-R-L4, SB-R-L6) and TR-3(HB-PE-L3, HB-FE-L6, SB-L4)



(c) TF-2



(d) TF-3

Fig. 6. Temperature evolution in encasing concrete, reinforcement and slab

교해보면 배근유무에 큰 온도 차이는 없는 것으로 확인된다.

매립된 콘크리트의 수평방향 피복이 40mm 더 두꺼운 슬림플로어보의 경우 철근의 온도상승이 매립형 합성보에 비해 상당히 지연됨을 알 수 있다. 실험을 통해 철근에 피복두께 50mm를 확보할 경우 표준화재노출 최소 90분까지는 400°C (일반적으로 상온 수준의 강도를 발휘하는 한계온도) 이하를 유지하는 것을 확인하였다. 상부철근의 경우 하부철근에 비해 100°C 가량 낮은 온도를 유지하였다. 3면을 모두 피복한 HB-FE-L6의 경우 3시간이 경과할 때까지 300°C 이하의 온도를 유지하였다.

3.1.3 슬래브의 온도변화

Fig. 6(c~d)는 슬래브 내의 콘크리트 온도를 비교한 것이다. 슬래브의 경우 HB-UP-L3와 HB-PE-L3에는 데크의 하부블록면 내부, 나머지 실험체에는 데크의 상부블록면 내부에 경계면(TF-1), 30mm(TF-2), 60mm(TF-3) 깊이 설치하였다. 그림에서 보는 바와 같이 열전대 설치면과 거의 무관하게 30mm 깊이에서는 2시간 경과 후 약 400°C, 60mm 깊이에서는 2시간 경과 후 약 200°C에 도달함을 확인할 수 있다. 데크플레이트와 콘크리트 경계면의 경우 1시간 이후 이미 400°C 이상 온도가 상승하면서 내력을 상당 부분 상실함을 확인하였다.

3.2 처짐

Fig. 7은 실험 종료 후 실험체의 형상이다. 대부분의 실험체는 매립된 콘크리트 및 슬래브의 탈락 없이 실험이 종료되었으나, 하부플랜지를 콘크리트로 피복한 HB-FE-L6의 경우 경간 중앙부의 하부콘크리트가 탈락하는 현상이 나타났다.

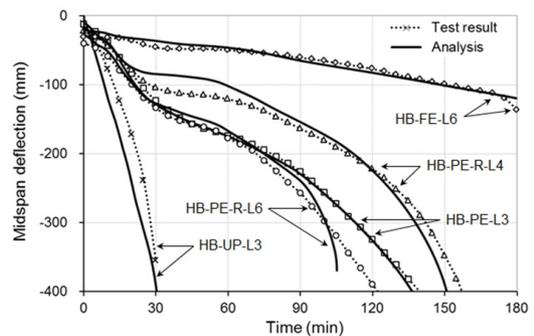
Fig. 8(a)는 HB 계열인 일반 합성보와 매립형 합성보 실험체의 시간에 따른 경간중앙의 처짐량의 변화를 나타낸 것



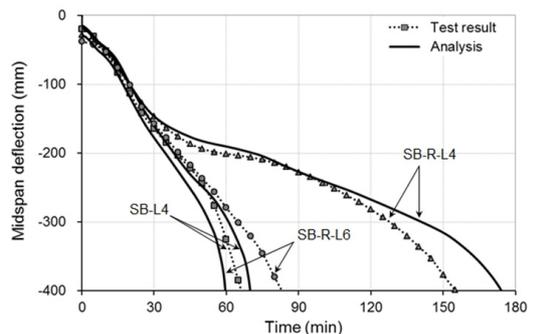
Fig. 7. Specimen after fire test

이다. 전체적인 처짐 양상은 콘크리트의 매립 및 철근 보강 유무에 따라 달라졌다. HB-UP-L3 실험체의 경우 H형강의 웹브와 하부플랜지가 모두 노출되어 있기 때문에 표준화재 초기 급속도로 상승한 온도에 따라 하중지지력을 상실(28분)하고 급격한 처짐을 나타내었다. 이에 비해 철근 보강 없이 콘크리트만 매립한 HB-PE-L3의 경우 상온에서의 소성 휨모멘트내력이 HB-UP-L3과 동일하나 같은 하중이 재하된 표준화재 하에서 2시간 이상의 내화성능을 발휘하였다. 철근을 보강한 HB-PE-R-L4의 경우 HB-PE-L3에 비해 높은 하중비에서 실험을 수행했음에도 불구하고 매립된 콘크리트에 의해 상당한 시간이 흐른 뒤에도 철근이 강도를 유지하였다. 이로 인해 고온의 하부플랜지는 내력이 크게 저감되었음에도 불구하고 철근이 인장력을 유지하면서 약 2시간 30분의 내화성능을 발휘하였다. HB-PE-R-L4에 비해 하중비만 1.5배로 늘린 HB-PE-R-L6의 경우에도 106분(ISO의 처짐량 기준)의 내화성능을 발휘하였다.

Fig. 8(b)는 슬림플로어보 실험체의 시간에 따른 경간중앙의 처짐량의 변화를 나타낸 것이다. 철근을 보강하지 않은 SB-L4 실험체의 경우 1시간 정도의 내화성능을 발휘하였다. 무보강 슬림플로어보의 이러한 내화성능은 유사한 조건



(a) HB series



(b) SB series

Fig. 8. Comparison of predicted and measured midspan deflections

의 HB-PE-L3와 비교해볼 때 서로 다른 하중비를 고려하더라도 상당히 짧은 점을 알 수 있다. 이는 비대칭형강을 이용하는 슬림플로어보의 특성상 매립형 합성보에 비해 하부플랜지가 휨내력에 기여하는 비중이 크기 때문이다. 이로 인해 피복하지 않은 하부플랜지가 고온에 노출될 경우 매립형합성보에 비해 휨내력의 저감이 보다 빠르다.

Fig. 8(b)에서는 철근을 보강한 SB-R-L4의 경우에는 SB-L4에 비해 상당히 내화성능이 증진되었음을 알 수 있다. 같은 하중비로 실험을 수행한 HB-PE-R-L4과 내화성능이 거의 비슷한 것으로 보아 철근을 보강한 실험체의 경우 화재 시 H형강에 비해 철근의 휨내력에 대한 기여도가 더 크다는 것을 확인하였다. 하중비가 큰 SB-R-L6의 경우 SB-R-L4에 비해 내화시간이 1/2 정도로 단축되었다.

3.3 내화성능평가방안에 따른 내화성능 비교

Table 5는 각 실험체가 보 재하가열시험의 하중지지력 성능기준인 처짐량과 처짐속도의 제한값에 도달한 시간을 정리한 것이다. 2.2절에서 언급한 바와 같이 ISO 834(혹은 KS F 2257-1)에 의하면 하중지지력에 의한 내화성능판정의 경우 위의 두 제한값을 모두 초과하는 시점을 기준으로 한다. 그러나 본 연구의 실험에서는 대부분의 경우 보의 처짐속도가 제한값 이하인데도 불구하고 처짐이 보 전체 깊이에 가까워지면(대부분 보의 처짐량 제한값 이상) 가열로의 실험여건 등으로 인하여 지속적인 실험진행이 힘들었다. 이로 인해 실험체의 처짐속도가 제한값에 도달하지 않더라도 ISO 834에서 제시한 처짐량 제한에 비해 덜 보수적인 BS 476^[10]의 처짐량 제한값(경간길이/20)까지만 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 실험체들의 한계온도에 근거한 내화시간(Table 4)을 하중지지력에 의한 내화시간(Table 5)과 비교한 것이다. BS 476의 처짐량 제한값까지만 실험을 수행함으로써 인하여 일부 실험체들(SB 계열 전체)의 경우 강재의 평균온도기준에 의한 내화시간을 정확히 판정할 수 없었지만 하중지지력에 의한 실제 내화성능을 과대평가(Table 4의 평균온도기준에 의한 SB-L4, SB-R-L4, SB-R-L6의 내화시간 참조)하거나 과소평가(HB-PE-R-L4)함을 알 수 있다. 그리고 최대온도기준에 의하면 실제 내화성능을 상당히 과소평가할 우려가 있음을 확인하였다. 즉, 한계온도기준에 의한 내화시간은 실제의 합성보 내화성능을 반영하기 힘들며 합성부재의 비재하가열시험을 통한 내화성능판정은 보수적인 설계를 유도하는 결과를 보인다.

Table 5. Fire resistance by loadbearing capacity criteria

Specimen	Fire resistance by loadbearing capacity criteria (min)		
	Limiting rate of deflection in ISO 834	Limiting deflection in ISO 834	Limiting deflection in BS 476
HB-UP-L3	25	28	30
HB-PE-L3	-	120	135
HB-PE-R-L4	-	146	155
HB-PE-R-L6	-	106	119
HB-FE-L6	-	>180	>180
SB-L4	-	61	64
SB-R-L4	-	142	151
SB-R-L6	-	74	80

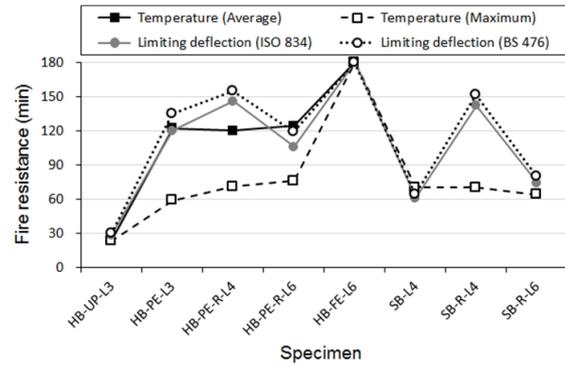


Fig. 9. Comparison of fire resistance by temperature and limiting deflection failure criteria

4. 수치해석을 이용한 합성보의 내화성능 예측

Table 5에 의하면 철골보와 달리 매립형 합성보 및 슬림플로어보의 경우 상당한 내화성능의 증진을 기대할 수 있지만 현행의 하중지지력에 의한 내화판정기준을 그대로 적용할 경우 실험 여건상 개별 합성보의 정확한 내화성능을 판단하기 곤란하였다. 이러한 실물대 화재실험에 대한 실험조건 제약과 고비용이라는 단점을 보완하기 위하여 최근에는 수치해석을 통한 내화성능분석이 점차 요구되고 있다. 이를 고려하여 본 연구에서는 앞서 수행한 화재실험에 대한 유한요소해석 모델링을 통해 합성보의 화재 시 거동을 모사하였다. 그리고 실험 및 해석에 의한 내화성능을 비교하여 수치해석에 의한 합성보 내화성능 예측에 대한 신뢰성을 검증하고자 하였다.

4.1 합성보의 내화성능예측을 위한 유한요소해석 모델링

본 연구에서는 수치해석을 통해 앞서 수행한 실물대 화재 실험을 모사하기 위하여 범용 유한요소해석프로그램인 ABAQUS^[11]의 열-구조 연성해석(fully coupled thermal-stress analysis)을 활용하였다. 강재면은 셸(shell), 콘크리트와 철근은 솔리드(solid)로 모델링하였고, 와이어메쉬는 트러스(truss)로 모델링하여 슬래브에 매립(embedded option)하였다. 이들은 각각 Coupled temperature-displacement 요소인 S4RT, C3D8RT, T3D2T를 사용하여 분할하였다. 데크플레이트의 경우 두께가 얇고 고온에 직접적으로 노출되어 내력의 대부분을 실험초기에 상실하기 때문에 본 해석모델에서는 모델링하지 않았다. 강관과 콘크리트 경계면은 constraint 조건을 적용하여 구속하였고, 전체 모델은 실험체의 형상 및 변형의 대칭성을 고려하여 1/4만 모델링하였다. 슬립플로어보의 경우 상부플랜지의 전단스터트 미부착으로 인하여 해석시 완전합성의 구속조건을 적용하기 곤란할 수 있으나, 합성보의 전단합성도가 내화성능에 영향을 미치는 정도가 미미하다는 기존 연구결과^[12]를 참조하여 해석시 매립형 합성보와 동일하게 구속조건을 반영하였다.

온도변화에 따른 콘크리트와 강재의 물성치 변화는 Table 2와 Table 3의 상온재료시험에 의한 강도 및 Eurocode 4^[1]의 고온재료모델을 따랐다. 화재해석에서 경계면의 가열조건은 Eurocode 4의 권장값을 적용하였다. 대류열전달계수는 25(W/m²K), 복사 경계조건으로 방사율 0.7, 스테판-볼츠만 상수(σ)는 5.67×10^{-8} W/m²K⁴로 적용하였다. Fig. 10은 유한요소 모델링의 예시로써 HB-PE-L3에 대한 모델이다. 모든 합성보의 화재노출면 가열온도는 표준화재곡선을 따르며 노출된 모든 방향에서 균일하다고 가정하였다. 단, H형강의 웹 및 하부플랜지가 모두 노출된 HB-UP-L3의 경우 Fig. 11과 같이 형상계수(view factor)를 해석시 고려하여 음영효과(shadow effect)가 반영되도록 하였다^[13].

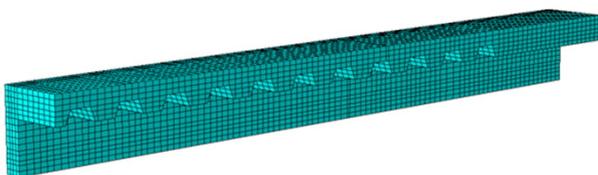


Fig. 10. Finite element model for the thermal-stress analysis (HB-PE-L3, 1/4 model)

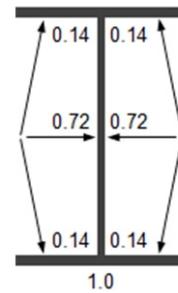
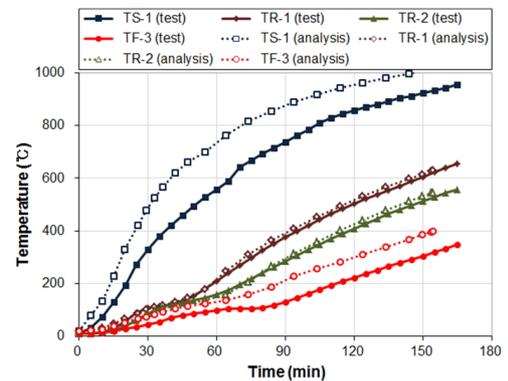


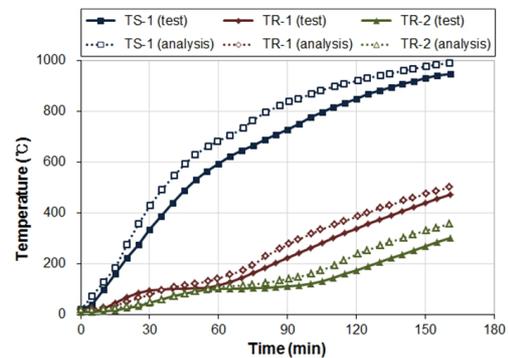
Fig. 11. View factor to consider the shadow effect of H section in the numerical analysis

4.2 실험결과와 해석결과의 비교

Fig. 12는 HB-PE-R-L4와 SB-R-L4 실험체의 유한요소해석에 의한 온도예측결과를 나타낸 것이다. 해석결과는 단면내의 주요 열전대 위치(플랜지, 철근, 슬래브)에서 실험에서의 온도변화를 시간에 따라 신뢰성 있게 구현하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) HB-PE-R-L4



(b) SB-R-L4

Fig. 12. Comparison of temperature evolution between test and analysis

Fig. 13은 유한요소해석을 통한 해석모델의 변형 및 온도 변화를 나타낸 예시이다. 그리고 Fig. 8에서는 유한요소해석에 의한 합성보 실험체의 시간에 따른 처짐량을 실험결과와 함께 나타내었다. 모든 실험체의 해석 시 처짐변화가 전체적으로 신뢰성 있게 실험결과를 구현하고 있음을 알 수 있다. 그리고 실험에서 보의 처짐속도 제한값에 도달하지 않았던 실험체들의 경우 해석결과에서도 처짐량 제한을 초과한 처짐(경간길이/20 이상)이 발생한 이후에서야 처짐속도가 제한값을 초과함을 확인하였다.

Fig. 14는 본 연구의 실험 및 해석에 의한 내화성능결과를 식 (2a)의 처짐량 제한을 기준으로 비교한 것이다. 해석결과는 $\pm 20\%$ 내외에서 실험결과에 잘 부합하고 있음을 확인하였다. 매립형 합성보가 슬림플로어보에 비해 좀 더 정확한 예측을 하고 있는데, 이것은 매립형 합성보 실험체의 전단스터드를 통한 완전합성조건이 수치해석에서도 경계면 조건을 통해 잘 반영되었기 때문인 것으로 사료된다. 슬림플로어보의 경우에도 전체적인 거동 구현 및 내화시간 예측의 신뢰성을 고려해 볼 때 고비용의 실물대 실험을 대체할만한 충분한 활용가치가 있다고 할 수 있다. 그리고 이상 본 연구의 화재 실험결과 및 관련한 수치해석기법은 후속 연구를 통해 합성보의 해석적 내화설계법 개발에 활용할 계획이다.

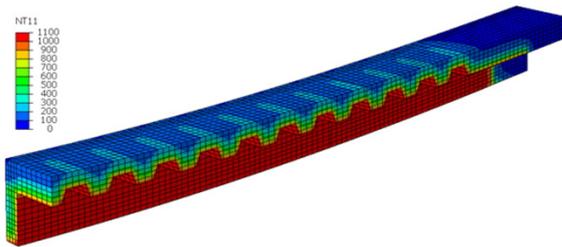


Fig. 13. Example of numerical simulation result of the partially encased beam (HB-PE-L3, 1/4 model)

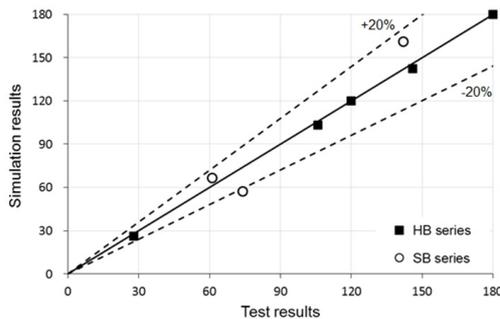


Fig. 14. Comparison of fire resistance between simulation and test results based on the limiting deflection criteria

5. 결론

본 연구에서는 부분매립형 합성보와 슬림플로어보의 내화성능평가를 위한 표준화재실험 및 수치해석연구를 수행하였다. 이를 통해 화재 시 합성보의 온도 및 처짐 변화를 분석하고 하중비, 철근 등의 합성보 설계변수들이 내화성능에 미치는 영향을 비교하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 화재실험결과 매립형 합성보는 웹브와 플랜지 사이에 매립된 콘크리트로 인하여 강재단면의 온도상승이 일반 H형강 합성보에 비해 상당히 지연되었다(화재노출 30분 이후 HB-UP-L3 실험체의 하부플랜지 온도는 712°C , HB-PE 계열 실험체의 하부플랜지 평균온도는 350°C). 슬림플로어보의 경우 하부플랜지는 부분매립형 합성보와 온도상승이 유사하나 상부플랜지 및 웹브의 온도상승은 부분매립형 합성보에 비해 더디었다(화재노출 60분 이후 HB-PE 계열 실험체의 상부플랜지 평균온도는 158°C , SB 계열 실험체의 하부플랜지 평균온도는 65°C). 그리고 보강된 철근은 매립형 합성보의 경우 최소 90분, 슬림플로어보의 경우 최소 120분까지는 상온강도를 발휘할 수 있는 400°C 이하를 유지하였다.
- (2) 무보강 부분매립형 합성보, 철근을 보강한 매립형 합성보와 슬림플로어보의 경우 각각 하중비 0.25, 0.33, 0.34 하에서 처짐량 제한 기준만으로도 2시간 이상의 내화성능을 달성하였다. 이는 내화피복재를 통한 H형강 합성보의 일반적 내화성능 증진방안과 비교하여 무피복 매립형 합성보와 슬림플로어보가 합리적인 대안이 될 수 있음을 시사한다.
- (3) 합성보의 경우 강재의 최대온도 제한기준을 적용하면 실제 내화성능을 과소평가하여 보수적인 설계로 오도될 수 있음을 확인하였다. 그리고 매립형 합성보 및 슬림플로어보의 경우 현행의 하중지지력에 의한 내화판정기준을 그대로 적용할 경우 가열로 실험 여건 등을 고려해볼 때 정확한 내화성능을 판정하기 곤란하였다.
- (4) 합성보 재하가열실험에 대하여 유한요소해석을 수행한 결과 전체적인 처짐 양상 및 내화시간의 예측에 있어서 해석결과가 실제 실험결과를 신뢰성 있게 구현하고 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부) 재원에 의한 한국연구재단의 지원(NRF-2009-0080187)을 통해 수행된 연구입니다.

참고문헌(References)

- [1] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.2: General Rules-Structural Fire Design*, BSI, London.
- [2] Piloto, P., Gavilan, A., Zipponi, M., Marini, A., Mesquita, L., and Plizzari, G. (2013) Experimental Investigation of the Fire Resistance of Partially Encased Beams, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.80, pp.121-137.
- [3] Ellobody, E. (2011) Nonlinear Behaviour of Unprotected Composite Slimfloor Steel Beams Exposed to Different Fire Conditions, *Thin-Walled Structures*, Vol.49, pp.762-771.
- [4] 김성배, 최승관, 이창남, 김상섭(2006) TSC 합성보의 내화 성능에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 제18권, 제1호, pp.113-122.
Kim, S.B. Choi, S.K., Lee, C.N., and Kim, S.S. (2006) Study on the Fire Resistance Performance of the TSC Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.1, pp.113-122 (in Korean).
- [5] 이승재, 강성덕, 최승관, 김명환, 김상대(2006) iTech 합성보의 내화성능에 대한 실험연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제5호, pp.643-653.
Lee, S.J. Kang, S.D., Choi, S.K., Kim, M.H., and Kim, S.D. (2006) Experimental Study on the Fire Resistance of the iTech Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.5, pp.643-653 (in Korean).
- [6] 김성배, 김상섭, 유덕수, 최승관(2013) 신형상 U형 하이브리드 합성보의 내화성능에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.379-388.
Kim, S.B. Kim, S.S., Ryu, D.S., and Choi, S.K. (2013) Fire Resistance of U-shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.379-388 (in Korean).
- [7] 한국표준협회(2005) KS F 2257-1: 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-일반요구사항, 한국표준협회.
Korea Standard Association (2005) *KS F 2257-1: Methods Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-General Requirements*, KSA (in Korean).
- [8] International Standards Organization (1999) *ISO 834-1: Fire Resistance Test-Elements of Building Construction*, ISO, Geneva.
- [9] 한국표준협회(2006) KS F 2257-6: 건축 구조 부재의 내화 시험 방법-보의 성능조건, 한국표준협회.
Korea Standard Association (2006) *KS F 2257-6: Methods Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-Specific Requirements for Beams*, KSA (in Korean).
- [10] British Standard Institution (1987) *BS 476: Fire Tests on Building Materials and Structures, Part 20: Method for Determination of the Fire Resistance of Elements of Construction (General Principles)*, BSI, London.
- [11] ABAQUS (2010) *ABAQUS Analysis User's Manual*, SIMULIA.
- [12] Bailey, C.G., Newman, G.M., and Simms, W.I. (1999) *Design of Steel Framed Buildings without Applied Fire Protection*, The Steel Construction Institute, UK.
- [13] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P. (2002) *Fundamental of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, USA.

요 약 : 본 연구에서는 매립형 합성보와 슬림플로어보의 내화성능평가를 위한 재하가열실험 및 수치해석연구를 수행하였다. 이를 통해 화재 시 합성보의 온도 및 처짐 변화를 분석하고 하중비, 철근, 화재노출면 등의 합성보 설계변수들이 내화성능에 미치는 영향을 비교하였다. 화재실험결과 매립형 합성보와 슬림플로어보의 경우 강재의 온도상승이 일반형 합성보에 비해 상당히 지연됨을 확인하였다. 그리고 매립콘크리트 내에 보강된 철근은 최소 90분까지는 상온강도를 발휘할 수 있는 온도이하를 유지하였다. 무보강 매립형 합성보, 철근을 보강한 매립형 합성보와 슬림플로어보의 경우 처짐량 제한 기준만으로도 2시간 이상의 내화성능을 달성하였다. 이는 무피복 매립형 합성보와 슬림플로어보가 강재보의 내화성능을 증진하는 합리적인 대안이 될 수 있음을 시사한다. 합성보 재하가열실험에 대하여 ABAQUS를 활용한 유한요소해석을 수행한 결과 전체적인 처짐 양상 및 내화시간의 예측에 있어서 해석결과가 실제 실험결과를 신뢰성 있게 구현하고 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 매립형 합성보, 슬림플로어보, 재하가열실험, 열-구조 연성해석, 내화성능