

무피복 철골 합성보의 내화성능에 관한 연구

Fire Resistance of Steel Composite Beams without Fire Protection

안재권* · 여인환** · 조규환*** · 황규재****

Ahn, Jaekwon*, Yeo, Inhwan**, Cho, Gyuhan***, and Hwang, Kyujae****

Abstract

In this study, the fire resistance of steel composite beams typically used in building structures was investigated through standard fire and loading tests. For the tests, fire-exposure conditions depending on the steel section shape and load ratio applied to the beams were considered as the test parameters. Based on the test results, the applicability of fire design methods for composite beams recommended in current domestic and overseas fire design codes was analyzed. The results indicate that the current temperature-based design method and reduced flexural capacity method specified by the American Institute of Steel Construction may lead to the conservative fire design of steel composite beams owing to the underestimation of the effects of the fire-exposure conditions and load ratios.

Key words : Steel Composite Beam, Fire Resistance, Section Shape, Load Ratio, Fire Protection

요 지

본 연구에서는 건축물 주요구조부에 일반적으로 활용되는 철골 합성보의 내화성능에 대하여 재하가열실험을 통해 평가하였다. 이를 통해 H 형강 단면형상에 따른 화재노출형태의 변화와 보에 작용하는 하중비의 변화가 합성보의 내화성능에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 실험결과를 바탕으로 국내의 내화설계기준에서 제시하고 있는 합성보 설계법들의 활용성을 분석하였다. 검토결과, 기존의 한계온도 설계법이나 AISC의 휨내력저감법의 경우 합성보의 내화성능을 다소 보수적으로 판단할 여지가 있으며, 단면형상이나 하중비의 영향을 간과하고 있는 점을 확인하였다.

핵심용어 : 철골합성보, 내화성능, 단면형상, 하중비, 내화피복

1. 서 론

건축물의 주요구조부가 철골조인 경우 재료 본연의 화재 취약성으로 인하여 일반적으로 내화피복을 통해 화재 시에도 내하력을 유지하게 한다. 이 경우 건축물의 용도 및 규모에 따라 구조부의 소요내화성능이 시간으로 정해지고, 이를 달성하기 위하여 내화뿔칠, 내화보드, 내화페인트와 같은

내화피복재의 적절한 두께를 확보하도록 하여 철골조의 내화설계가 이루어진다. 이러한 내화피복 중심의 사양적 내화설계에서는 피복재에 의한 강재의 온도 상승 지연 효과를 주로 비재하실험을 통해서 인정받는 것이 국내 관행이다 (KS F 2257-6, 2014; KS F 2257-1, 2019). 다만, 이러한 관행으로 말미암아 건축 구조부가 다양한 설계조건을 지님에도 불구하고 일률적인 내화피복을 유도하게 되어 내화구조에 대한

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(Tel: +82-31-369-0509, Fax: +82-31-369-0670, E-mail: jaekwonahn@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원(E-mail: yeo@kict.re.kr)

Member, Research Fellow, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***정회원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(E-mail: jgh1023@kict.re.kr)

Member, Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****정회원, 한국화학융합시험연구원 방재기술시험센터 선임연구원(E-mail: hkjthink@ktr.or.kr)

Member, Senior Researcher, Fire Protection Research Center, Korea Testing & Research Institute

시공성 및 경제성을 떨어뜨리고, 내화성능에 대한 신뢰성을 저감시키는 단점이 제기되어 왔다.

더구나 순철골부재에 비해 내화성능의 증진이 기대되는 합성기둥이나 합성보의 경우 현행의 사양적 내화설계절차에 대한 보완이 더욱 시급한 것이 자명하다. 실제 대형건축물에 적용할 수 있는 장경간 혹은 휨내력이 큰 합성보의 경우 국내 실험시설의 용량한계(가열로 크기, 가력 용량)로 인하여 내화성능의 인정이 쉽지 않다보니, 현장 적용을 위해서는 부득이하게 순철골보 수준에 해당하는 필요 이상의 내화피복으로 회귀하는 부작용이 있어왔다(Yeo et al., 2012; Kim et al., 2013; Cho et al., 2014; Kim et al., 2020).

이러한 비경제적 설계의 단점을 극복하기 위해서는 강구조 및 합성부재의 내화성능평가시험들에서도 잘 나타났듯이 다양한 설계 변수를 내화구조설계에 반영할 수 있도록 하는 것이 바람직하다(Ellobody, 2011; Piloto et al., 2013; Ahn and Lee, 2015). 특히 H 형강과 콘크리트슬래브로 이루어진 철골합성보의 경우 최대휨내력 대비 소요휨모멘트에 의해 산출되는 하중비와 화재노출조건에 영향을 주는 하부형강재의 단면형상이 가장 중요한 변수라 할 수 있다(EN 1994-1-2, 2005).

본 연구에서는 무피복 H 형강과 상부콘크리트슬래브로 이루어진 철골합성보의 표준화재조건 내화성능평가를 통하여 하중비와 단면형상이 합성보의 내화성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 그리고 실험결과를 현행의 국내의 합성보 내화설계기법들과 비교하여 활용성을 검토하였다.

2. 합성보의 내화성능평가절차

2.1 실험체

보에 대한 재하가열실험의 경우 ISO 834-6 (2000)에서는 상부콘크리트의 설치와 함께 두께는 최소 150 mm, 폭은 최소 600 mm를 권장한다. 본 연구의 경우 Fig. 1과 같이 상부콘크리트를 ISO 834-6의 최소 크기 단면으로 설계하고, 하부 H 형강의 경우 2종류의 단면형상을 적용하였다(H-400 × 200 × 8 × 13, H-300 × 300 × 10 × 15). 실험체는 Fig. 2와 같이 순경간길이가 4,200 mm이고 단순지지조건이며 양단부에서 250 mm씩 가열로 외부로 돌출되도록 제작되었다.

상부슬래브 내부에는 콘크리트의 타설 및 합성보 거동을 위한 최소한의 와이어메쉬, 스티럽, 스티드를 설치하였고, 가력용량을 고려하여 슬래브 내에는 압축력을 분담할 수 있는 철근을 보강하지 않았다. 온도변화의 관측을 위한 열전대는 각 실험체마다 경간중앙부 강재 단면의 상하부 플랜지 및 웹에 4개소씩 설치하였다.

실험체 제작에 쓰인 H 형강(SS400)의 공칭항복강도는 275 MPa, 실제 인장시험을 통해 계측한 항복강도는 각각 318 MPa (H-400 × 200 × 8 × 13), 317 MPa (H-300 × 300 ×

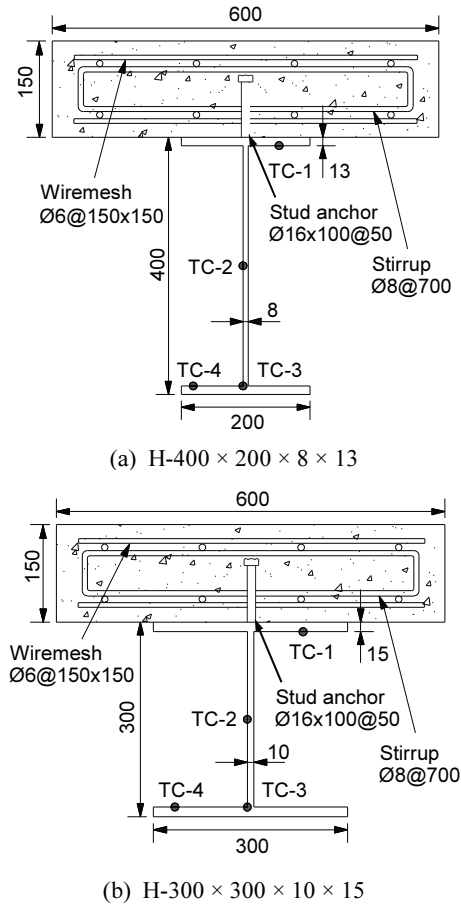


Fig. 1. Section Details of H-steel Composite Beams

10 × 15)였으며, 콘크리트의 설계압축강도는 24 MPa, 28일 재령 압축강도는 35.1 MPa였다. Table 1의 설계소성휨모멘트(Design Plastic Moment) 및 예측소성휨모멘트(Expected Plastic Moment)는 강재와 콘크리트의 설계강도와 계측강도를 기반으로 각각 산정한 것이며, 대상 실험체의 경우 완전합성조건인 합성보를 전제로 하여 산정하였다.

2.2 단면형상계수

본 연구의 실험대상으로 H-400 × 200 × 8 × 13과 H-300 × 300 × 10 × 15를 선택한 이유는 플랜지 폭(Width) 대비 춤(Depth)이 더 깊은 보다 일반적인 형태의 철골보와 춤이 낮은 철골보의 내화성능 비교를 통해 단면형상에 따른 화재노출조건이 합성보의 내화성능에 미치는 영향을 살펴 보고자 함이다.

철골 및 합성구조의 내화설계에서 단면형상계수(A_f/V)는 강재 영역의 단위길이당 부피(V) 대비 화재노출면적의 비(A_f)를 의미하며, 이는 강재 단면의 단면적 대비 화재노출부분 길이의 비와 동일하다. 본 연구의 실험체의 경우에는 강재의 상부플랜지와 콘크리트슬래브와의 접촉면을 제외한 3면이 화재노출영역에 해당한다. Table 1에서 정리한 바와 같이 폭이 좁은 H-400 × 200 × 8 × 13의 단면형상계수

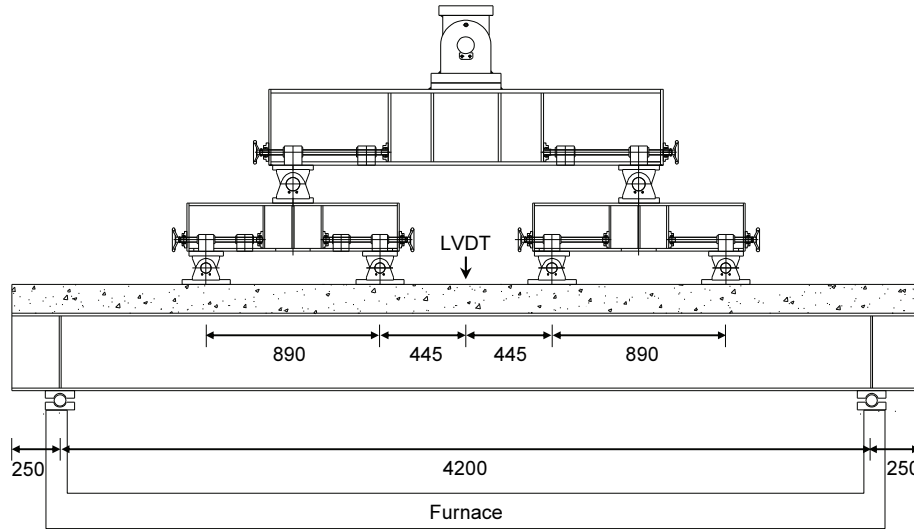


Fig. 2. Elevation of Test Setup

Table 1. Details of Specimens

Specimen	Steel Section (H shape)	Section Factor (A_f/V)	Plastic Moment Capacity		Applied Mid-span Moment (M_{app} , kN·m)	Load Ratio	
			Design Plastic Moment (M_{pd} , kN·m)	Expected Plastic Moment (M_{pe} , kN·m)		M_{app}/M_{pd}	M_{app}/M_{pe}
B400-LR30	H-400 × 200 × 8 × 13	0.169	587.5	733.9	176.3	0.30	0.24
B400-LR40	H-400 × 200 × 8 × 13				235.0	0.40	0.32
B400-LR50	H-400 × 200 × 8 × 13				293.8	0.50	0.40
B300-LR30	H-300 × 300 × 10 × 15	0.126	614.5	755.0	184.4	0.30	0.24
B300-LR40	H-300 × 300 × 10 × 15				245.8	0.40	0.33
B300-LR50	H-300 × 300 × 10 × 15				307.3	0.50	0.41

(0.169)가 H-300 × 300 × 10 × 15(0.126)에 비해 더 크다. 즉, H-400 × 200 × 8 × 13이 합성보의 화재노출조건에 있어서는 좀 더 취약함을 의미한다.

2.3 하중비

실험체의 H 형강 깊이별로 하중비 0.3, 0.4, 0.5의 3가지 하중조건을 고려하였다. 여기서 하중비는 합성보 단면의 상온 소성모멘트 대비 재하하중에 의해 보 경간 중앙부에 작용하는 휨모멘트의 비를 말한다. 다만, 위의 하중비(0.3, 0.4, 0.5)는 설계소성휨모멘트를 전제로 고려한 것이며, 실제 재료강도를 기반으로 산정한 예측소성휨모멘트와 비교할 경우 Table 1에서와 같이 그에 비해 다소 낮아짐을 확인할 수 있다(H-400 × 200 × 8 × 13: 0.24/0.32/0.40, H-300 × 300 × 10 × 15: 0.24/0.33/0.41).

2.4 실험방법

Fig. 3과 같이 보의 내화성능평가를 위한 수평가열로에 실험체를 설치한 다음, 재하가열 중 실험체와 가열로 사이

로 열이 유출되지 않도록 단열재를 보강하였다. 하중조건은 Table 1에 나타난 바와 같이 실험체별 하중비를 고려한 최대휨모멘트가 경간중앙부에 발생하도록 재하량이 산정되었으며, 상부콘크리트슬래브 위를 4점 가력하였다. 이후 목표재하량을 유지하면서 Eq. (1)의 KS F 2257-1 (2019)의 표준화재곡선을 따라 보가 가열되도록 하였다.

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

여기서, T 는 가열로의 온도(°C), t 는 시간(분)이다. 재하가열실험 중에는 보 단면에 설치한 열전대를 통해 온도를 측정하고(Fig. 1), 동시에 보의 경간중앙부에 연결시킨 변위계(LVDT)를 이용하여 처짐을 측정하였다(Fig. 2). 실험은 KS F 2257-1에 제시된 하중지지력 판정기준에 의거하여 경간중앙부의 처짐량과 처짐속도가 제한값을 초과할 때까지 진행되었다. Eqs. (2a)와 (2b)는 각각 처짐량과 처짐속도에 대한 제한값을 구하는 식이다. 보부재의 경우 이 기준값을 모두 초과하였을 때 하중지지력을 상실한 것으로 간주한다.



(a) Test setup



(b) Example of specimen after test (B400-LR30)

Fig. 3. Overall View of Test

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

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9,000d} \text{ (mm/min)} \quad (2b)$$

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

3. 실험결과 및 분석

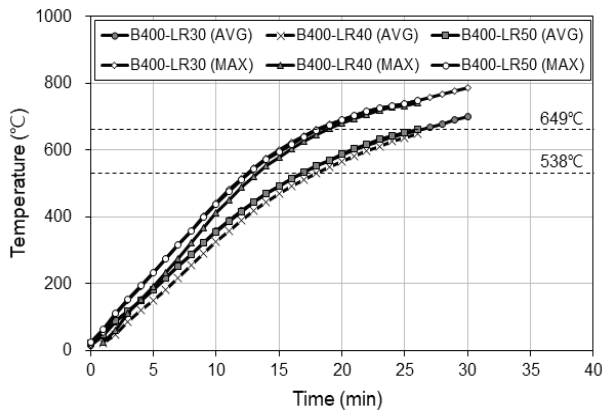
3.1 온도

Fig. 4는 실험 진행 중 합성보의 강재와 콘크리트 온도변화를 나타낸 것이다. 화재에 직접적으로 노출된 강재의 경우 가열로의 온도 증가에 따라 빠른 속도로 온도 증가가 이루어지는 것을 알 수 있다. 초기 15분정도까지는 비교적 선형적으로 온도가 증가하다가 가열로 온도의 상승속도가 줄어들면 강재의 온도 상승도 함께 더디어지는 일반적인

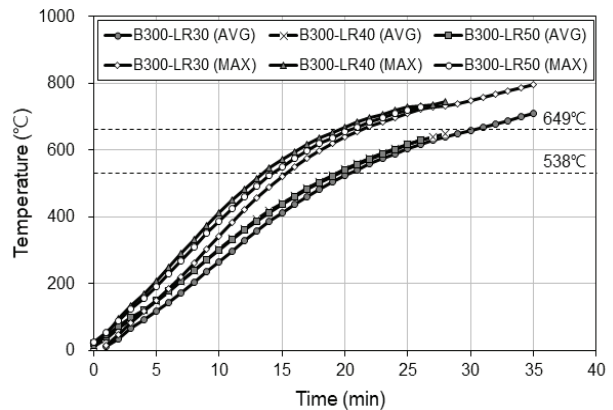
추세를 잘 보이고 있다.

Table 2는 온도와 변형 기준에 따른 실험체들의 내화성능 결과를 정리한 것이다. 온도 기준의 경우 평균온도와 최대 온도를 기준으로 성능결과를 판별하였다. B300 실험체 ($A/V=0.126$)에 비해 B400 실험체($A/V=0.169$)가 체적 대비 화재노출면적이 크기 때문에 온도 상승이 다소 더 빨랐고, 그로 인해 내화시간도 2분 가량 짧았다. 단, 하중비의 차이는 한계온도 기준의 내화성능에 있어서는 영향이 거의 없었다.

Table 3은 합성보의 실제적인 성능한계라고 할 수 있는 변형 한계점에 도달했을 때 강재의 평균온도와 최대온도를 정리한 것이다. 실험이 종료되는 한계시점에서는 현행의 확립적 온도기준인 평균온도 538°C 나 최고온도 649°C 를 훨씬 상회하는 온도에 도달함을 확인할 수 있다. 오히려 이러한 중국시점에서의 강재 평균온도는 BS 5950-8 (1990)에 제시되었던 하중비 영향이 반영된 한계온도기준에 보다 근접함을 확인하였다.



(a) B400 (LR30, LR40, LR50)



(b) B300 (LR30, LR40, LR50)

Fig. 4. Temperature Evolution of Specimens (B300/400-LR30/40/50)

Table 2. Failure Criteria and Test Result

Specimen	Failure criteria - temperature			Failure criteria - deflection		
	Average temperature (°C)	Maximum temperature (°C)	Fire resistance time (min)	Limiting deflection (mm)	Limiting rate of deflection (mm/min)	Fire resistance time (min)
B400-LR30	538	649	18	110.3	4.9	30
B400-LR40			18			25
B400-LR50			18			26
B300-LR30			20	147.0	6.5	34
B300-LR40			19			28
B300-LR50			20			26

Table 3. Average and Maximum Temperatures of Specimens at Termination of Tests

Specimen	Average Temperature (°C)	Maximum Temperature (°C)	Limiting Temperature in BS 5950-8 (°C)
B400-LR30	701.0	785.8	725
B400-LR40	648.5	742.8	680
B400-LR50	663.5	750.0	650
B300-LR30	710.8	795.9	725
B300-LR40	649.9	745.9	680
B300-LR50	630.1	729.3	650

3.2 처짐

Fig. 5는 각 실험체의 화재노출시간에 따른 경간중앙부 처짐량을 도시한 것이다. 전체적으로 모든 실험체의 거동이 초기 선형적인 처짐 형태에서 허용처짐량 도달 시점을 전후로 다소 처짐이 급격해지긴 했지만 그 차이는 크지 않았다. 더구나, 하중비가 작은 B300-LR30과 B400-LR30의 경우 한계처짐량 도달 시에도 처짐속도의 변화는 거의 없었다. 이는 일반적으로 합성보의 경우 압축력을 받는 콘크리트 슬래브의 휨내력 기여도로 인해 순철골보와 달리 한계변형량 도달 시점에서의 내력상실 속도가 빠르지 않기

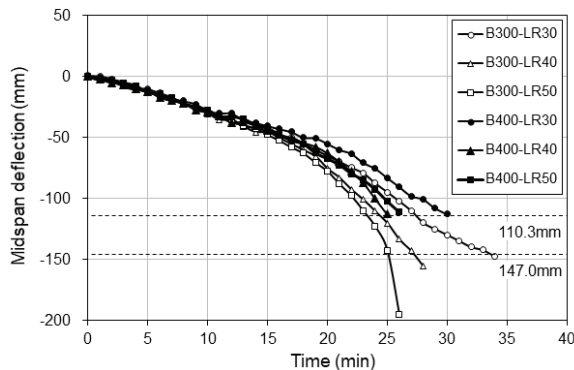


Fig. 5. Comparison of Mid-span Deflections

때문이며, 이는 합성보 설계 결과에 의한 콘크리트 슬래브와 철골보의 휨내력 기여도에 따라 달라질 수 있을 것이다. 예상과 같이 하중비가 큰 실험체의 내화시간이 짧았으나, B300과 B400 실험체 모두 하중비 0.4와 0.5 실험체간의 내화시간 차이는 크지 않았다. 이는 해당 하중비 영역에 해당하는 강제 영역의 온도변화에 의한 내력 저하가 좀 더 급속히 진행되는 것이기 때문인 것으로 파악된다 (500~700 °C).

3.3 강도

본 연구에서는 실험체에 가해진 하중비와 종곡시점의 하부플랜지 온도에 기반하여 ANSI/AISC 360-16 (2016)의 합성보 내화설계를 위한 휨내력저감법의 적합성을 검토해보았다. ANSI/AISC 360-16의 휨내력저감법은 합성보의 내화설계시에 하부플랜지 온도를 기준으로 상온대비 고온 휨내력을 저감계수(Retention Factor)만을 활용하여 간편하게 산정할 수 있는 방법이다.

Table 4에 의하면 실험 결과 종곡시점의 하부플랜지 온도에 기반하여 예상되는 휨내력저감수준을 보의 실제 휨내력과 재하량에 근거한 하중비(M_{app}/M_{pe})와 비교하면 B400 계열이 B300 계열에 비해 보다 근접한 내화성능이

Table 4. Comparison of Retention Factor and Applied Load Ratio for Composite Beam Specimens

Specimen	Bottom Flange Temperature (°C)	Retention Factor (ANSI/AISC 360-16)	Load Ratio	
			M_{app}/M_{pd}	M_{app}/M_{pe}
B400-LR30	785.8	0.23	0.30	0.24
B400-LR40	742.8	0.30	0.40	0.32
B400-LR50	750.0	0.28	0.50	0.40
B300-LR30	795.9	0.21	0.30	0.24
B300-LR40	745.9	0.29	0.40	0.33
B300-LR50	729.3	0.32	0.50	0.41

나타났고, 하중비가 높아질수록 실제 내력(하중비에 해당)과 예측 내력(휨내력저감계수에 해당)간의 차이는 커짐을 알 수 있다. 이는 ANSI/AISC 360-16의 휨내력저감법이 일반적인 합성보 형상(보의 춤이 폭보다 큰 경우)에 보다 적합하고, 하중비가 큰 경우에는 보다 보수적인 설계결과를 유도할 수 있음을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 무피복 철골 합성보의 재하가열실험에 의한 내화성능평가를 통하여 하중비와 단면형상이 합성보의 내화성능에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 이를 위해 고온에서 합성보의 온도, 변형, 휨내력 변화를 살펴보고, 현행의 합성보 내화설계기법들의 활용성을 검토하였다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 현행의 합성보 내화성능평가는 기존 강구조에 획일적으로 적용되던 한계온도기준(평균 538 °C, 최대 649 °C)을 그대로 준용해오고 있으나, 이는 합성부재의 증진된 내화성능을 합리적으로 평가할 수 없음이 본 연구에서 다시 확인되었다. 본 연구에서의 H 형강의 깊이가 300, 400 mm이고, 하중비가 공칭강도기준 0.3, 0.4, 0.5인 무피복 합성보의 경우 내화성능을 상실하는 중구상태에서의 강재 평균온도는 630.1~710.8 °C로 현행 한계온도를 크게 상회하였다.
- (2) 실험결과 하중비가 낮은 합성보(LR30)의 경우 하중비가 높은 합성보(LR40, LR50)에 비해 20% 이상 내화시간이 더 확보될 수 있음을 확인하였다. 특히, 하중비가 낮은 경우 순철골보와 달리 한계처짐량 부근에서 급작스런 처짐량의 증대도 발생하지 않았다.
- (3) 실험에서 계측한 하부플랜지 온도변화에 근거하여 ANSI/AISC 360-16의 휨내력저감법을 적용한 결과와 실제 실험체에 작용한 하중비를 비교한 결과, 내화설계시 낮은 하중비에서는 ANSI/AISC 360-16의 휨내력저감법을 활용하는 것이 적합하지만, 하중비가 높아짐에 따라 보수적인 합성보 내화설계를 유도할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 실험결과에 의하면 일반적인 H 형강 합성보의 경우 현행의 한계온도 기반 내화성능평가방법이나 ANSI/AISC 360-16의 휨내력저감법에 대하여 하중비 및 단면형상과 같은 하중조건과 화재노출조건을 적절히 반영할 수 있는 방향으로 개선이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(20AUDP-B100356-06)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 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*, Vol. 27, No. 2, pp. 143-153.
- ANSI/AISC 360-16. (2016). *Specification for structural steel building*. American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, IL, USA.
- BS 5950-8. (1990). *Structural use of steelwork in building, Part 8: Code of practice for fire resistant design*. British Standards Institution (BSI).
- Cho, B.Y., Kim, H.Y., Kim, H.J., Kang, H., and Kim, K.S. (2014). Experimental study on the fire resistance performance of prestressed composite beam with corrugated web. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 1, pp. 379-388.
- Ellobody, E. (2011). Nonlinear behaviour of unprotected composite slim floor steel beams exposed to different fire conditions. *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, No. 6, pp. 762-771.
- EN 1994-1-2. (2005). *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1.2: General rules - Structural fire design*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium.
- ISO 834-6. (2000). *Fire resistance test - Elements of building construction, Part 6: Specific requirements for beams*. International Standards Organization (ISO).
- Kim, J.H., Kang, C.K., and Choi, B.J. (2020). The effect of temperature characteristics toward composite beams with fire conditions subjected vertical loading. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 32, No. 3, pp. 189-200.
- 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*, Vol. 25, No. 4, pp. 379-388.
- KS F 2257-1. (2019). *Methods fire resistance test for elements of building construction - General requirements*. Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F 2257-6. (2014). *Methods fire resistance test for elements of building construction - Specific requirements for beams*. Korean Agency for Technology and Standards.
- Piloto, P., Gavilán, A., Zipponi, M., Marini, A., Mesquita, L., and Plizzari, G. (2013). Experimental inves-

tigation of the fire resistance of partially encased beams. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 80, pp. 121-137.

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, Vol. 26, No. 6, pp. 72-77.

Received	July 30, 2020
Revised	July 31, 2020
Accepted	August 3, 2020