

하부 철근 보강된 부분 매입형 합성보의 내화성능 연구

오해영¹ · 최혜정² · 한슬기³ · 이세정⁴ · 김선희⁵ · 최성모^{6*}

¹서울시립대학교 건축공학과 학사, ²서울시립대학교 건축공학과 학사과정, ³서울시립대학교 건축공학과 석사, ⁴(주)세진알앤에스 대표이사&서울시립대학교 건축공학과 박사수료, ⁵서울시립대학교 건축학부 연구교수, ⁶서울시립대학교 건축학부 교수

Study on Fire Resistance Performance of Partially Encased Composite Beams Reinforced with Re-bar

Oh, Hae Yeong¹, Choi, Hye Jeong², Han, Seul Gi³, Lee, Se Jeong⁴,
Kim, Sun Hee⁵, Choi, Sung Mo^{6*}

¹B.S., Dept. of Arichitectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02054, Korea

²Undergraduate Coure, Dept. of Arichitectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02054, Korea

³M.S., Dept. of Arichitectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02054, Korea

⁴President and Ph.D. Candidate, Sejin R&S and Dept. of Arichitectural Engineering, Seoul, 04788, Korea

⁵Research Professor, Dept. of Arichitectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02054, Korea

⁶Professor, Dept. of Arichitectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02054, Korea

Abstract - Domestic buildings are required to have long spans and high-rise buildings, research on partially encased composite beams is in progress. Due to fire resistance performance evaluation based on specification design of partially encased composite beams, fire resistance coating is essential for exposed steel materials. This causes problems of poor economics and constructability. To solve the problem, we propose the amount of re-bar and SFRM thickness of the partially encased composite beam based on fire resistance evaluation based on performance design. Heat transfer analysis was performed by setting the re-bar and SFRM thickness as a variable. The flexural performance was calculated considering the reduction factor due to fire. As a result of the analysis, fire resistance of 3 hours can be secured when applying SFRM 10mm. In addition, it was evaluated that fire resistance performance of 3 hours was secured when the area of the web and re-bar was more than 42% of the total structural member area.

Keywords - Fire Resistance Performance, Partially Encased Composite Beams, Re-bar, SFRM, Standard Fire Curve

1. 서론

국내 건축물은 제한된 토지 내에서 최대 공간 활용을 위해 장스팬화, 고층화가 요구된다. 단일 부재의 구조는 앞선 요구에 대해 다량의 부재를 필요로 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 철골과 콘크리트를 함께 사용하는 합성보에 대한 관심이 높아지고 있다^{[1],[2]}. 대표적인 예로

H형강과 철근 콘크리트의 특성을 융합한 부분 매입형 합성보인 리치거더(RCH-Girder)가 있다. 기존 부분 매입형 합성보에 대한 연구는 휨성능을 중점적으로 연구가 진행되어, 내화성능 연구는 미비한 실정이다.^{[3],[5],[6]} 내화피복 시간은 건물이나 구조물의 화재 안전성을 평가하는 중요 지표로 피난 및 구조 시간, 화재 진압 등과 같은 요소를 고려하여 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙에 제시되어 있다^[8]. 이 기준에 따라 부분 매입형 합성보는 내화성능을 확보를 위해 SFRM(Spray-applied Fire Resistive Material) 도포가 필요하다.

본 연구는 표준화재(Standard Fire)에 노출된 부분 매입형 합성보의 온도거동을 확인하고자 열전달 해석(Heat Transfer Analysis)을 수행하였다. 화재에 의한 강도와 탄성계수의 저감계수를 고려하여 휨 내력을 산정

Note.-Discussion open until October 31, 2024. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on January 30, 2024; revised on March 20, 2024; approved on April 04, 2024.

Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-2749

E-mail. smc@uos.ac.kr

하여 하부 철근과 SFRM 두께에 따른 내화거동을 분석하였다. 사양 및 성능설계 기반의 내화성능 평가를 비교하여 부분 매입형 합성보의 내화성능을 위한 하부 철근량과 SFRM 두께를 제안하는 것을 목적으로 한다.

2. 부분 매입형 합성보의 이론적 고찰

2.1 부분 매입형 합성보의 형상과 특성

Fig. 1에서 보는 바와 같이 강재를 콘크리트로 둘러싼 매입형 합성보는 콘크리트 타설을 위한 거푸집 공사로 인해 시공성 및 경제성에 불리하므로 국내의 경우 적용 사례가 많지 않다.

매입형 합성보와 노출형 합성보의 단점을 상호보완하기 위해 구조적 형태를 접목시킨 부분 매입형 합성보에 대한 연구가 수행되고 있다. 부분 매입형 합성보의 형상은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 형태상으로는 매입

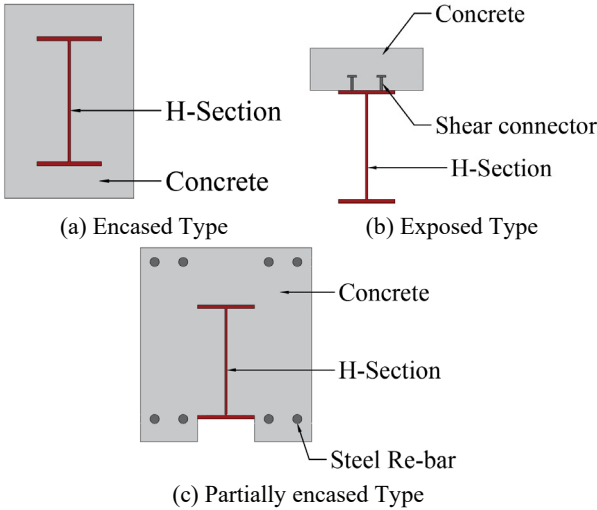


Fig. 1. Type of composite beams

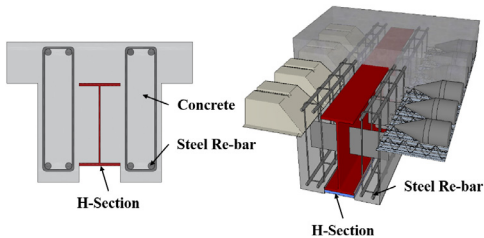


Fig. 2. Composition of partially inserted composite beam

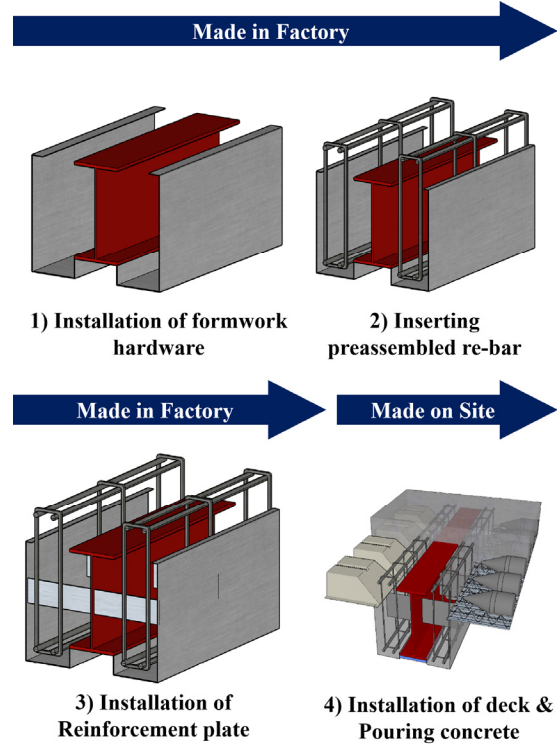


Fig. 3. Construction Process of partially inserted composite beam

형합성보와 같지만, 합성보의 일부를 공장 제작하여 차이를 가진다. 부분 매입형 합성보의 제작 공정과 납품의 과정은 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 따르면, 거푸집 및 철근은 공장 제작하여 시공성을 확보 가능하다. 또한, 슬림플로어 시스템을 적용하여 층고 절감이 가능하다^[4].

2.2 부분 매입형 합성보의 휨내력

부분 매입형 합성보는 일반 H형강(RH-Beam)을 콘크리트 보에 매입하여 사용되지만, 하부 플랜지가 노출된 형태의 구조이다. 이러한 기본 모델에서 인장-압축 철근을 배근하여 보강된 형태가 ‘철근 보강 부분 매입형 합성보’이다.

부분 매입형 합성보의 휨내력은 KDS 41 31 00 (2019)^[9] 기준에 의해 등가응력블록에 의한 소성해석을 적용하여 계산할 수 있다. 소성해석의 기본가정은 다음과 같다^[7].

(1) 콘크리트는 압축력만을 부담하고 인장에 대해서

는 응력을 부담하지 않는다.

- (2) 극한 내력 상태에서 콘크리트 내의 압축응력 분포는 그 크기가 $0.85 f_{ck}$ 장방형 응력블록으로 한다.
- (3) 극한 내력 상태에서 철골보·보강 철근의 압축 및 인장응력 분포는 그 크기가 F_y 의 장방형 응력블록으로 한다.

정모멘트를 받는 합성단면의 중립축이 콘크리트 슬래브 안에 위치할 경우, 플랜지 안에 위치할 경우, 웹브 안에 위치할 경우를 나누어 산정한 다음 검토하여 휨내력을 산정한다. 휨내력 계산에서 적용한 재료강도는 Table 1에 나타내었다. 또한, 보 외부에 부착된 강판은 보-기둥 접합 시 추가적인 이음 접합이 필요하고 화재 시 탈락되어 구조 해석에서 제외하였다.

Table 1. Material properties of design criterion strength

Material	Modulus of Elasticity (MPa)	Strength (MPa)
Steel	210,000	355
Concrete	26,702	27
Re-bar	200,000	400

2.3 화재 발생시 구조소재별 강도 저감

2.3.1 콘크리트

콘크리트의 경우 Eurocode 1991-1-2(2002)^[10] 기준에 제시된 500°C 이상의 온도에서 콘크리트의 강도와 강성이 계산에서 무시되며, 500°C 미만의 온도에서 콘크리트는 상온 강도의 80% 정도 수준의 강도와 강성을 유지한다고 가정한다. 이는 Fig. 4에 나타내었다.

2.3.2 강재

강재는 강구조 내화설계 예제집(2021)^[11]에 제시된 유효항복 강도저감계수를 적용하였다. 이는 Fig. 4에 나타냈다.

2.4 성능설계 기반 내화성능평가

콘크리트 구조설계 기준 KDS 41 12 00(2022)^[12]에 따라 상온 시 하중 계수는 Dead Load는 1.2, Live Load는 1.6을 적용한다. Kwon(2020)^[13]에 따른 화재 시 하중

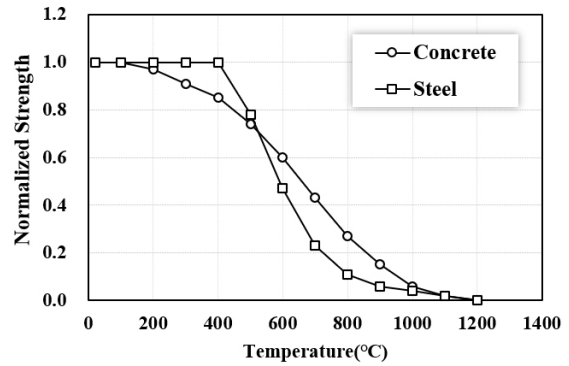


Fig. 4. Normalized strength of concrete and steel as a function of temperature

계수는 Dead Load는 1.0, Live Load는 0.5로 적용한다.

상온 시 하중계수와 화재 시 하중계수를 비교하였을 때, 화재 시 하중이 상온 시 하중의 약 40% 정도로 확인된다. 이를 성능기반 내화성능 평가에 적용하여 화재 휨내력이 상온 휨내력의 40%이상을 확보하게 될 시에는 내화성능이 확보된 것으로 판단한다.

2.5 사양설계 기반 내화성능평가

국내 내화구조 성능평가는 KS F 2257-1(2019, 건축 부재의 내화시험방법-일반요구사항), KS F 2257-6(2019; 건축구조부재의 내화시험방법-보의 성능조건)기준을 적용한다. 강재 단면의 평균온도 538°C, 최대온도 649°C를 넘지 않아야 한다고 규정되어있다.(KS F 2257-6, 2019). 사양기반 내화성능 평가는 부분 매입형 합성보의 부재별 온도평가에서 사용한다.

3. 부분 매입형 합성보의 열전달 해석

3.1 개요

무보강 및 철근 보강 부분 매입형 합성보를 범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS(2023)^[15]를 사용하여 열전달 해석을 수행하였다. 국내에서 내화성능을 사양기반으로 평가하기 때문에 KS 2257-1(2019)^[16]에 제시된 표준화재곡선으로 가열하였다. SFRM 두께(0, 10, 20, 30 mm)를 변수로 시간 경과에 의한 각 부분 매입형 합성보의 온도상승을 확인하였다.

Table 2. List of analysis model

Analysis model	Re-bar	SFRM thickness (mm)
SOS00	O	0
SOS10	O	10
SOS20	O	20
SOS30	O	30
SXS00	X	0
SXS10	X	10
SXS20	X	20
SXS30	X	30

SOS00

SFRM Thickness: 0, 10, 20, 30 mm
Re-bar : O, X

3.2 해석계획

부분 매입형 합성보의 내화성능을 확인하고자, SFRM 두께(0, 10, 20, 30 mm)와 하부 철근의 보강 유무를 변수로 총 8개의 해석모델을 계획하였다. 부분 매입형 합성보의 사용된 H형강은 실제 현장에서 소요량이 많은 H-400X200X8X13을 적용하였다. 이에 대한 해석모델 리스트는 Table 2에 정리하였다. 시간경과에 따른 온도상승은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 플랜지 상부와 하부, 웨브의 상부와 하부 평균, 하부 콘크리트와 하부 철근에서 측정하였다.

3.3 해석모델

시간에 따라 온도가 변하는 화재의 특성을 적용하기 위해 열전달해석을 수행하였다. 본 해석은 단면의 온도 분포만을 확인하기 위해 Shell 요소로 모델링을 진행하였다. KS 2257-1(2019)^[6] 기준에 따른 표준화재 곡선에 슬래브 하부, 부분 매입형 합성보의 하부 및 측면이 동일하게 노출되었다고 가정하였다. Eurocode 1991-1-2(2005)^[10] 기준에 제시된 값으로 열전달의 3가지 기본 메커니즘인 전도, 대류, 복사를 경계조건으로 설정하였다. SFRM과 강관은 완전부착으로 적용하였다.

3.4 재료 열적특성

3.4.1 콘크리트

콘크리트는 Eurocode 1994-1-2(2005)^[17] 기준으로

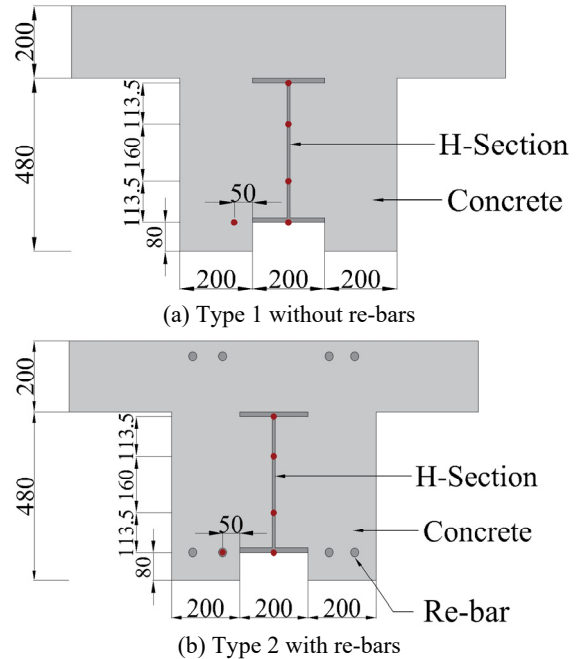


Fig. 5. Cross-section of analysis model (unit: mm)

온도변화에 따른 열전도율과 비열을 적용하였다. Eurocode 1994-1-2(2005)^[17] 기준에서 콘크리트의 수분 함유량은 보통 3%, 습윤 기후에 노출된 부재는 10% 정도 함유하는 것으로 제시되어 있다. 따라서 콘크리트의 함유량은 10%로 가정하였으며 화재 시 콘크리트에 포함된 자유수의 증발로 인한 잠열을 고려하기 위해 비열의 최고 값(Peak)은 115°C에서 5,600 J/kg·K를 적용하였다. 콘크리트의 밀도는 23 kN/m³로 적용하였다.

3.4.2 강재와 철근

강재와 철근은 Eurocode 1993-1-2(2005)^[18] 기준에 제시된 온도변화에 따른 열전도율과 비열을 적용하였다. 밀도는 78.5 kN/m³로 적용하였다.

3.4.3 SFRM

SFRM의 열전도율, 비열, 밀도는 Choi(2020)^[14] 연구에서 수행된 시험결과인 Fig. 6를 기반으로 해석을 수행했다.

3.5 해석모델검증

부분 매입형 합성보의 열전달 해석모델을 검증하기

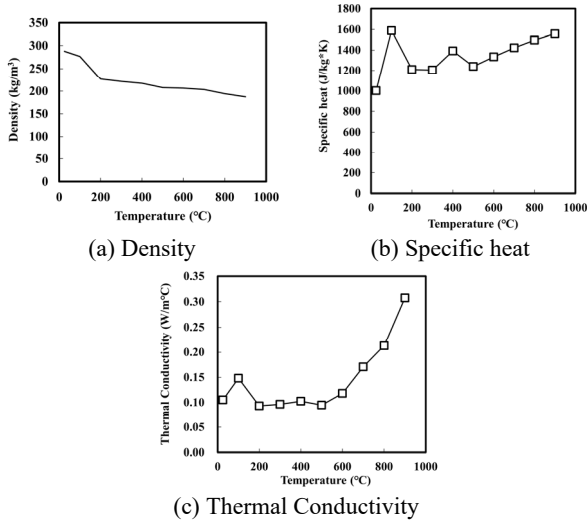


Fig. 6. Thermal properties of SFRM^[14]

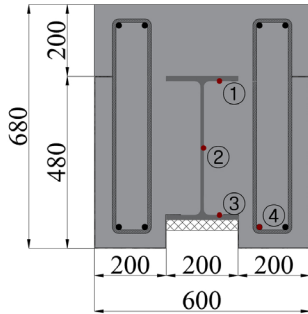


Fig. 7. Location of Thermocouples(Unit:mm)

위해 2024년 1월 16일에서 19일까지 KTR 흥성에서 진행한 한국강구조학회 주관의 RCH-Girder의 수평가열로 실험결과를 이용하여 해석모델을 검증하였다.

Fig. 7에 나타난 실험체의 열전대는 플랜지, 웨브, 철근에 부재별로 위치한다. 열전대의 한계로 하부 플랜지

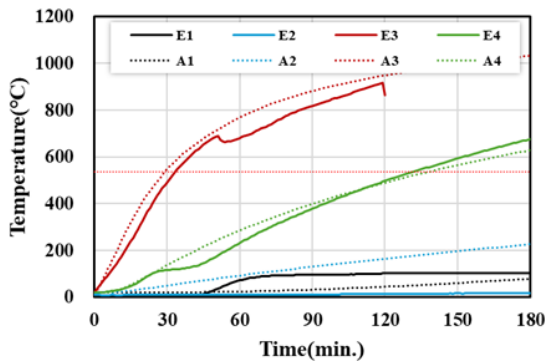


Fig. 8. Comparison of time-temperature curves for experiments and analysis

는 화재 발생 2시간까지의 데이터를 유효한 것으로 판단한다. 화재 발생 2시간 시 Ch3의 온도는 실험과 해석에서 각각 947.2°C, 916.2°C로 약 3% 차이를 확인하였다. Fig. 8에 시험체의 화재에 따른 온도변화의 해석결과와 실험결과를 나타내었다. 해당 결과에 따라 실험과 해석 데이터는 약 5%의 편차가 있으나, Fig. 8에 따라 경향성이 유사한 것을 확인하였다.

3.6 열전달 해석결과

3.6.1 H형강 온도분포

철근 무보강 부분 매입형 합성보(SXS00-SXS30)와 철근 보강 부분 매입형 합성보(SOS00-SXS30) 총 8가지 모델을 비교 분석해본 결과, H형강은 철근 무보강 부분 매입형 합성보와 철근 보강 부분 매입형 합성보의 H형강 하부의 온도(㉑, ㉒ Fig. 5)는 유사한 온도분포를 보인다. 이 결과에 따라 철근 보강 유무는 H형강의 온도분포에 대한 영향이 적음을 확인할 수 있다. 이에 대한 결과는 Table 3와 Table 4에 정리하였다.

Table 3. Temperature distribution for SFRM thickness without re-bar

SFRM Thickness		Temperature(°C)			
		None	10 mm	20 mm	30 mm
Lower Flange (㉑)	1h	762.9	327.0	261.0	205.6
	2h	947.3	516.6	413.5	343.0
	3h	1,034.1	639.1	522.2	447.0
Lower Web (㉒, ㉓)	1h	364.9	108.5	105.4	85.2
	2h	516.0	257.2	190.6	161.5
	3h	610.6	351.7	264.6	232.0

Table 4. Temperature distribution for SFRM thickness with re-bar

SFRM Thickness		Temperature(°C)			
		None	10 mm	20 mm	30 mm
Lower Flange (㉑)	1h	762.9	335.9	270.6	196.9
	2h	947.2	539.3	433.4	329.8
	3h	1,034.0	671.5	551.2	430.5
Lower Web (㉒, ㉓)	1h	365.0	110.0	107.5	82.2
	2h	516.0	259.2	197.2	156.2
	3h	610.7	354.6	277.0	225.2
Re-bar (㉔)	1h	167.5	145.8	144.4	140.5
	2h	346.2	313.5	306.9	294.8
	3h	481.9	446.7	434.6	414.1

3.6.2 내화기준온도와 온도비교

1-3시간 화재 이후 내화기준 평균 온도 538°C, 최대 온도 649°C를 초과한 시간을 도출하였다. 확인되는 온도의 위치는 하나의 열전대 온도를 의미하며, 웨브의 경우에만 ②, ③의 평균값으로 온도를 확인한다. 무피복(SFRM 0 mm) 상태일 때의 철근 무보강 부분 매입형 합성보(SXS00-SXS30)와 철근 보강 부분 매입형 합성보(SOS00-SOS30) 두 모델 모두 플랜지 하부(①)의 온도가 내화기준 온도인 538°C를 초과하는 값을 나타내었다. 1시간 경과시 무피복(SFRM 0 mm) 상태일 때 두 모델의 플랜지 하부(①)는 내화기준 대비 온도가 약 42% 높고, 2시간 경과시 약 76% 높다. 3시간 경과시에는 내화기준 대비 약 92% 높다. 웨브 하부(②)는 두 모델 모두 1-2시간까지는 내화기준온도를 초과하지 않고, 3시간 경과시 내화기준 대비 온도가 약 3.4% 높다. 철근 보강 부분 매입형 합성보(SOS00-SOS30)의 하부

철근(④)의 온도는 피복 두께의 관계없이 모두 538°C를 초과하지 않는 값으로 나타난다.

3.6.3 SFRM 두께별 온도분포

SFRM 두께별 온도를 비교해보면, 철근 무보강 부분 매입형 합성보의 무피복 모델(SXS00)이 SFRM 10 mm 모델(SXS10) 대비 온도가 약 88%~185% 높다. 철근 보강 부분 매입형 합성보의 무피복 모델(SOS00)이 SFRM 10 mm 모델(SOS10) 대비 온도가 약 65%~143% 높다. Fig. 9과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 두 부분 매입형 합성보(SXS10-SXS30, SOS10-SOS30)의 SFRM 두께별 온도를 비교해보면, 무피복의 하부 Flange 온도 대비 SFRM 10 mm 모델의 하부 Flange 온도가 42% 감소하여 가장 급격한 변화가 발생한다. 이에 따라 SFRM의 도포 여부가 온도 변화에 영향을 더 많이 받음을 확인할 수 있다.

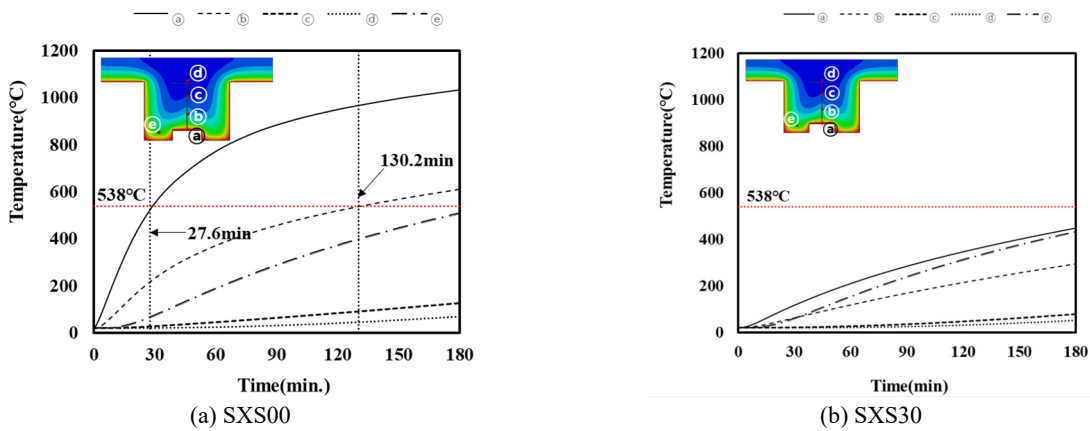


Fig. 9. Time-temperature curves without re-bar

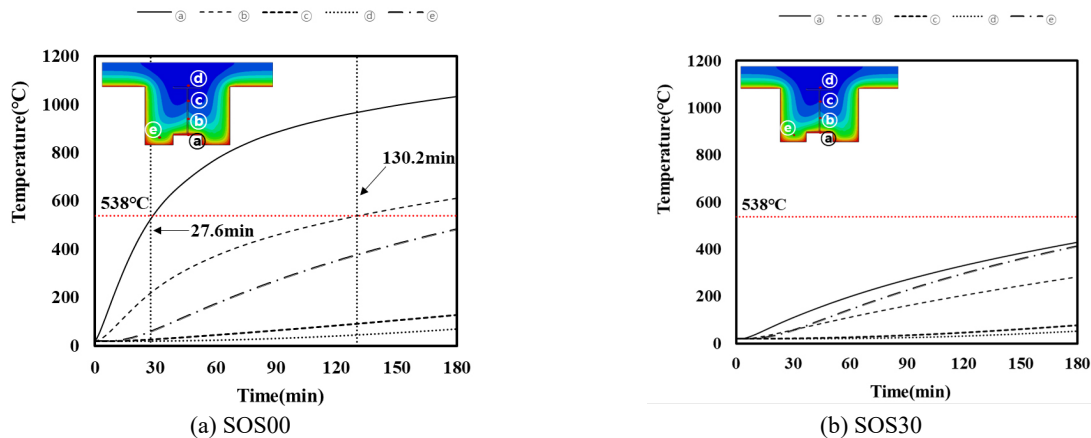


Fig. 10. Time-temperature curves with re-bar

4. 온도 상승을 고려한 부분 매입형 합성보의 휨내력

4.1 개요

철근이 배근되지 않은 부분 매입형 합성보와 일반 철근이 배근된 부분 매입형 합성보를 등가응력블록에 의한 소성해석을 적용하여 휨내력을 산정하였다. 부재별 강도 및 탄성계수는 열전달 해석 결과를 참고한 강도감소계수를 적용하였다. SFRM 두께(0, 10, 20, 30 mm)를 변수로 표준화재 1, 2, 3시간별 휨내력 감소를 확인하였다.

4.2 강도감소계수를 적용한 휨내력 산정 절차

부분 매입형 합성보의 휨내력은 등가응력블록에 의한 소성해석을 적용하여 계산하였다. 부분 매입형 합성보 단면의 공칭휨강도를 기준으로 휨내력을 산정하였다. Fig. 11과 같이 합성단면에서 정모멘트를 받는 합성단면의 중립축이 각각 콘크리트 슬래브, 플랜지, 웹 안에 위치할 경우를 나누어 산정 및 검토하여 상온 시 휨성능을 확인하였다. 열전달해석을 통해 부분매입형 합성보가 표준화재에 노출되었을 때, 단면의 온도를 확인하였다. 각 재료별 강도감소계수를 중립축을 구할 때 적용하여 감소된 휨내력을 산정하였다.

4.3 표준화재 시간에 따른 철근 무보강 부분 매입형 합성보의 휨내력

표준 화재에 노출된 철근 무보강 부분 매입형 합성보에서 각 해석 모델별 1, 2, 3시간일 때의 휨내력을 산정하였다. 화재 후 1, 2, 3시간일 경우 휨성능의 영향을 주는 상·하부 플랜지, 웹의 강도감소계수를 부위별로 적용하였다.

철근 무보강 부분 매입형 합성보의 상온 시 휨내력은 751.39 kN·m이다. 콘크리트 피복두께는 모두 동일하고 SFRM 두께 0, 10, 20, 30 mm를 변수로 설정하였다. 상온 시 공칭휨강도를 M_m , 화재 노출로 감소한 휨내력을 M_n 으로 하여 휨내력을 비교하였다. 비교 결과인, 경과된 시간과 SFRM 두께별 단면의 휨성능을 Table 5에 정리하였다. 표준화재 3시간 노출 후 철근 무보강 부분 매입형 합성보의 잔존 휨내력은 무피복상태(SFRM 0 mm), SFRM 10, 20, 30 mm일 때 각각 22, 69, 84, 95% 확보하는 것으로 확인하였다.

4.4 표준화재 시간에 따른 철근 보강 부분 매입형 합성보의 휨내력

표준 화재에 노출된 철근 보강 부분 매입형 합성보에서 각 해석모델별 1, 2, 3시간일 때의 휨내력을 산정하

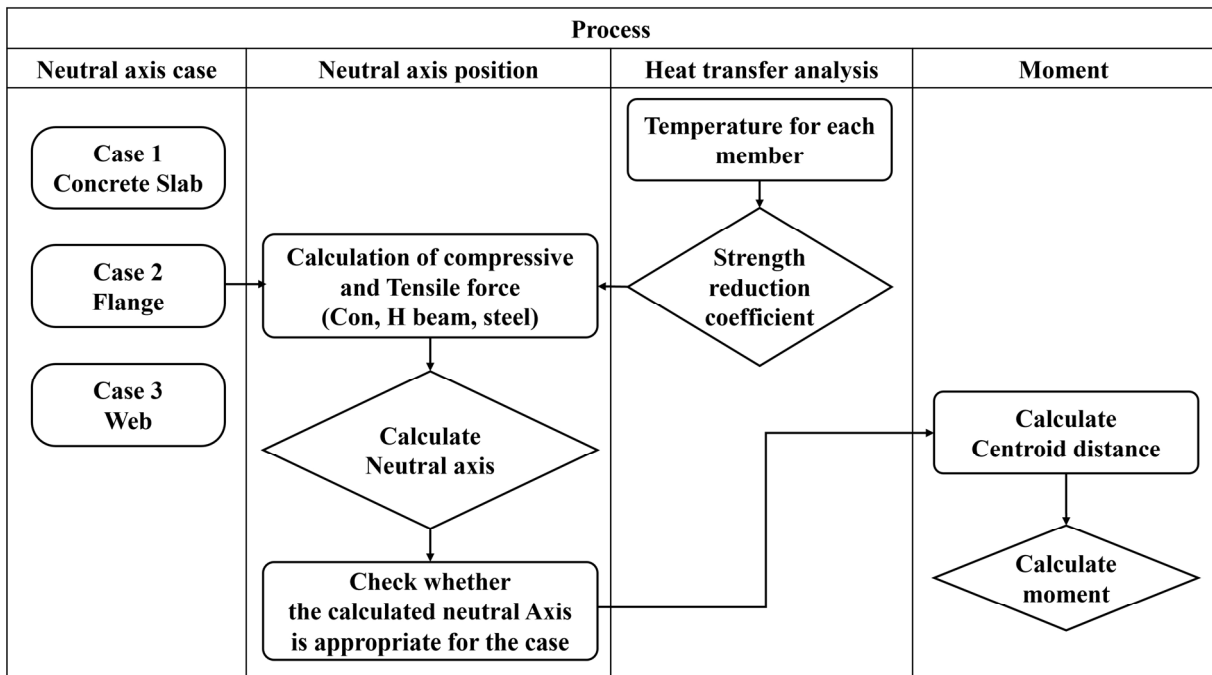


Fig. 11. Flowchart showing the procedures for the fire resistance calculation of composite beam

Table 5. Flexural strength without re-bar

SFRM thickness (mm)	Time (min.)	Flexural Strength (kN·m)	M _n /M _m
0	60	421.25	0.56
	120	287.30	0.38
	180	164.70	0.22
10	60	751.39	1.00
	120	656.62	0.87
	180	519.85	0.69
20	60	751.39	1.00
	120	737.31	0.98
	180	631.16	0.84
30	60	751.39	1.00
	120	751.39	1.00
	180	714.26	0.95

였다. 휨성능의 영향을 주는 상·하부 플랜지, 웹, 하부 철근 등의 시간별 온도를 파악하여 강도감소계수를 적용하였다. 철근 보강 부분 매입형 합성보의 상온 시 휨내력은 949.97 kN·m이다. SFRM을 변수로 설정하여 두께는 해석모델별 0, 10, 20, 30 mm이다. 상온 시 합성보의 공칭휨강도를 M_m, 화재 노출된 합성보의 휨내력을 M_n으로 하여 감소된 휨내력을 비교하였다. Table 6는 1-3시간에 따른 휨내력 결과이다. 철근 보강 부분 매입형 합성보가 표준화재 3시간 노출 후 잔존 휨내력은 무피복상태(SFRM 0mm), SFRM 10, 20, 30 mm일 때 각각 34, 75, 87, 96%의 휨성능을 확보한다.

5. 분석 및 고찰

5.1 사양설계 기반 부분 매입형 합성보의 온도분포

합성보의 휨내력을 구성하는 주요 부재인 H형강 하부 플랜지와 철근의 온도분포와 내화성능을 확인하였다. H형강 하부 플랜지의 온도는 부분 매입형 합성보와 노출형 합성보를 비교하여 분석하였다. 열전달 해석결과를 통해 부재의 온도분포를 확인하였으며, 사양설계 기반인 강재의 임계온도 538°C를 기준으로 내화성능을 평가하였다.

Fig. 12의 그래프를 보면 SFRM두께가 0 mm일 때, 부분 매입형 합성보의 하부 플랜지 표면 온도는 표준화

Table 6. Flexural strength with re-bar

SFRM thickness (mm)	Time (min.)	Flexural Strength (kN·m)	M _n /M _m
0	60	577.31	0.63
	120	443.96	0.48
	180	311.76	0.34
10	60	909.78	1.00
	120	790.93	0.86
	180	679.61	0.75
20	60	909.78	1.00
	120	882.67	0.97
	180	791.50	0.87
30	60	909.78	1.00
	120	909.78	1.00
	180	874.64	0.96

재 28분 경과 시 임계온도 538°C에 도달하였다. 또한, 하부 Flange의 온도는 표준화재 온도의 약 67% 정도로 상승하여, 시간이 지남에 따라 표준화재에 근접하게 온도상승 됨을 확인하였다. 노출형 합성보의 하부 Flange 표면 온도는 표준화재 28분 경과 시 표준화재 온도의 72%인 임계온도 538°C에 도달하였다. 부분 매입형 합성보의 하부 플랜지의 표면 온도는 노출형 합성보 하부 플랜지 표면온도의 약 87% 정도의 온도를 보여준다. 노출형 합성보의 온도가 부분 매입형 합성보와 비교하여 급격하게 상승됨을 확인할 수 있다. 노출형 합성보와 비교하여 부분 매입형 합성보는 반노출 형태이기에, 동일한 조건의 표준 화재 노출 시에도 하부 플랜지에서 13% 열차단 효과를 보여줌을 확인할 수 있다.

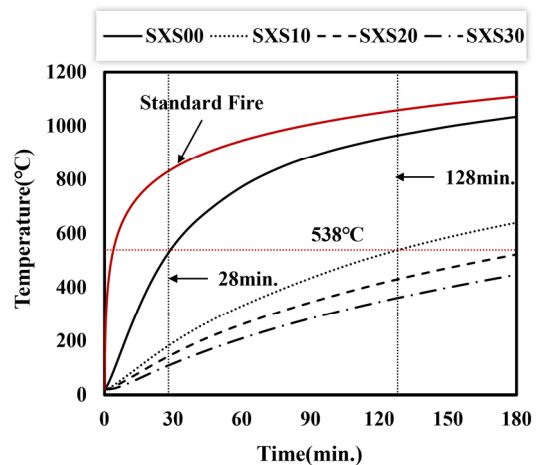


Fig. 12. Time-temperature curve for Lower flange

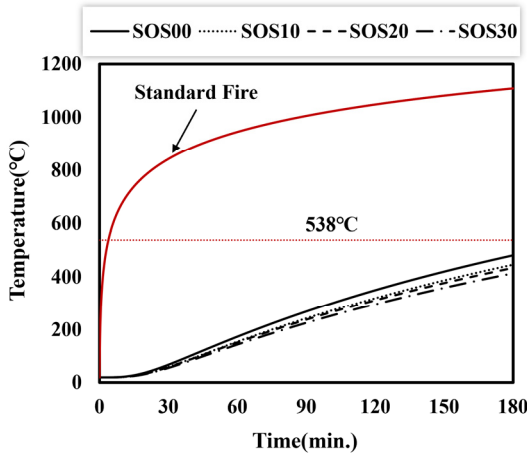


Fig. 13. Time-temperature curve for re-bar

Fig. 13을 보면, 부분 매입형 합성보의 매립된 철근 표면 온도는 표준화재 3시간 경과시에도 481°C로 임계온도 538°C를 초과하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 표준화재 3시간이 경과하여도 임계온도인 538°C를 넘지 않기 때문에 내력은 건전하게 발휘 될 것으로 판단된다.

5.2 성능설계 기반 무피복 부분 매입형 합성보의 하부 철근량

부분 매입형 합성보의 하부 보강 철근을 변수로 성능설계 기반의 3시간 내화성능을 평가하였다. 표준화재에 노출되었을 경우, SFRM 두께를 0 mm로 두고 부분 매입형 합성보를 열전달해석으로 휨내력을 평가한다. 또한, 화재 발생 시 주요 휨내력 부재의 면적 비율에 따른 내화성능 확보 가능한 철근량을 고찰하였다.

상온 시 휨내력은 철근 보강 부분 매입형 합성보에 경우가 무보강인 해석모델보다 121% 정도 더 크다. Fig. 14에 나타난 두 해석모델의 상온 대비 화재 시 휨강도를 비교하였을 때, 하부 철근을 보강한 경우가 표준화재에 노출 시 평균 10% 내외의 휨성능을 더 발휘함을 확인하였다.

본 해석모델의 휨내력을 구성하는 주요 부재인 하부 플랜지, 웹 및 인장철근의 단면적의 비와 감소된 휨성능의 관계를 통해 내화성능이 확보 가능한 하부 철근량을 제안한다. 화재 발생 3시간 경과 시 무피복 하부 플랜지는 기존 내력 대비 10% 미만으로, 휨내력을 거의 발휘하지 못한다. 화재 발생 시 주요 휨내력 발휘 부재인 웹과 철근의 면적 비율은 전체 부재 면적의

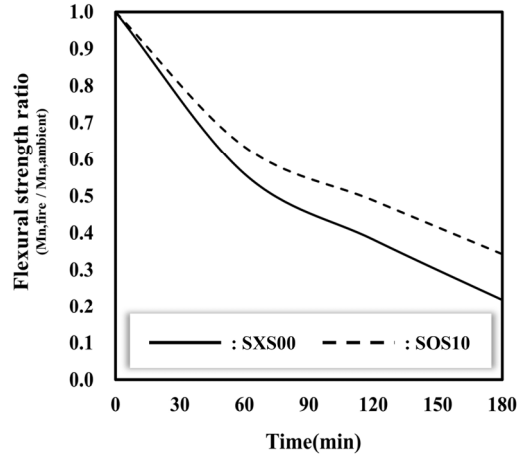


Fig. 14. Time-Flexural strength ratio curve

36%이다. 이는 Table 6에 나타난 상온 휨내력 대비 화재 발생 휨내력의 비율인 34%와 유사하다. 2%의 차이는 3시간 화재 발생 시 하부 보강 철근이 일정 강도 감소 계수가 적용됨에 나타난 결과이다. 단, 웹의 경우 무피복인 상태에서 3시간 경과시 약 50% 정도가 휨성능을 발휘할 수 없으므로, 웹 면적비의 0.5를 적용하였다. Fig. 15는 Eq. 1의 수식과 상온 대비 화재 시 휨성능의 비율 사이의 관계를 그래프로 나타낸 결과이다. 화재 3시간 기준 면적 비율이 약 42% 이상일 경우 성능

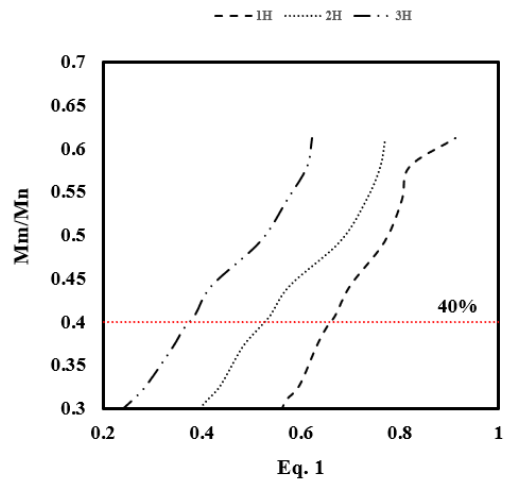


Fig. 15. Variation of flexural strength ratio for Eq. 1 value

$$\frac{0.5 A_w + A_s}{A_w + A_f + A_s} \geq 0.42 \quad (1)$$

A_w : Cross-sectional area of Web
 A_s : Cross-sectional area of lower Flange
 A_f : Cross-sectional area of Re-bar

기반 내화성능 평가의 기준인 40%를 충족 시킬 수 있음을 확인하였다. 앞선 기준을 적용할 경우 무피복임에도 내화성능을 확보할 수 있다. 단, 각 부재의 중립축 위치가 상부 플랜지 이상이어야 하는 한계가 있다.

5.3 성능설계 기반 부분 매입형 합성보의 SFRM 두께와 도포 길이

부분 매입형 합성보의 SFRM 두께를 변수로 성능설계 기반의 3시간 내화성능을 평가하였다. 화재가 발생했을 경우와 상온 시 하중 계수를 비교하여, 3시간 화재 시 하중이 상온 시 하중의 약 40%를 발휘할 수 있는 SFRM 두께를 확인하였다. 또한, 노출된 하부 플랜지에 적용하는 SFRM의 적절한 도포 길이를 고찰하였다.

Fig. 16에서 하부 보강 철근이 없는 무피복 부분 매입형 합성보의 휨성능은 상온 시 휨내력의 22%, 철근 보강 부분 매입형 합성보는 34%로 내화성능을 확보하지 못함을 보여준다. SFRM 10 mm를 적용한 경우에는 SFRM 0 mm인 경우와 비교하면 50% 이상의 열 차단 효과를 보이고 있다. 휨성능은 상온시 대비 65%이상으로 내화성능을 확보하여, SFRM 10 mm 도포 시 3시간의 내화성능을 발휘할 수 있다고 판단된다.

양단 강접합 된 부분 매입형 합성보의 경우 중앙부 하단에 인장력이 발생하고, 단부 하단에서는 압축력이 발생한다. 단부 하단이 표준화재에 노출 시 단부 상부의 인장내력이 저감하는 변수가 발생한다. 하지만, 상온 단부 휨내력 대비 화재 시 휨내력의 비율은 52%로 성능설

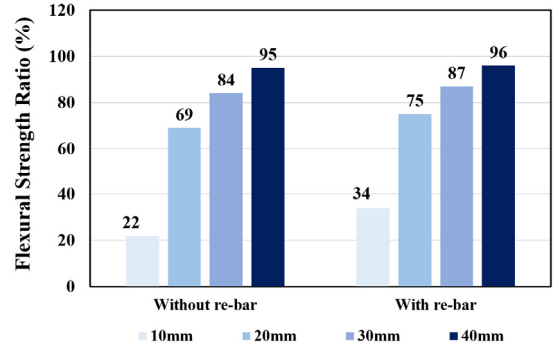


Fig. 16. Flexural strength ratio for SFRM thickness

계기반 내화성능 평가 기준에 충족되어 내화성능이 확보되는 것으로 판단한다. 이에 따라 중앙부의 하부 플랜지만 SFRM을 적용하여도 충분한 내화성능을 확보할 수 있다. 변곡점의 길이를 L, 단부 휨모멘트를 M_o 로 설정하여, 적절한 뿔칠내화피복 길이를 제안한다.

연속보, 비연속보 등 부분 매입형 합성보의 시공 형태에 따라 중앙부의 하부 Flange가 받는 인장력의 범위가 달라진다. 따라서 범용성을 위해 부분 매입형 합성보의 휨모멘트도에서 나타나는 변곡점을 기준으로 뿔칠내화피복 길이를 적용한다. 부분 매입형 합성보의 중앙부 최대 휨모멘트는 단부 휨모멘트의 50%~60% 정도이고, 변곡점에 가까울수록 휨모멘트는 점차 감소한다. 열전달해석과 휨내력 평가 결과, SFRM이 없는 부분 매입형 합성보는 표준화재 3시간 노출 시 상온 휨내력의 22%를 발휘한다. 따라서 변곡점 기준의 SFRM 길이에서 양단 22% 감소된 길이를 SFRM 길이로 적용하

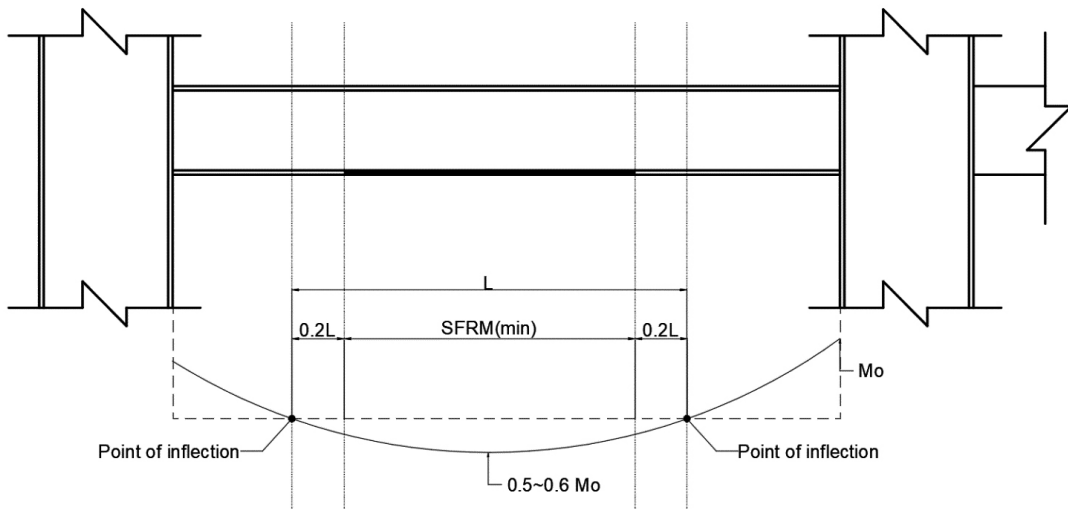


Fig. 17. SFRM coating length required for lower flange

여, 내화성능을 확보할 수 있다. 하지만 SFRM이 적용된 부분과 적용되지 않는 부분이 혼재하여, 내화피복 접침부위에서 하부 플랜지의 온도가 열해석결과보다 상승할 것으로 판단된다. 이를 고려하여 SFRM의 최소 길이를 변곡점 길이에서 양단 20% 감소된 길이로 제안한다. 이에 따른 도식 자료를 Fig. 17에 나타내었다.

6. 결론

본 연구에서는 부분 매입형 합성보 철근 보강 유무와 SFRM 두께에 따른 단면의 온도분포를 확인하고 온도 상승에 따른 부분 매입형 합성보의 휨내력 저하를 평가하였다. 이에 따라 성능설계 기반의 내화성능 평가로 부분 매입형 합성보의 유효한 SFRM 두께와 SFRM 없이 휨내력을 확보하기 위한 적절한 하부 보강 철근량을 제안하기 위해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 부분매입형 합성보의 휨내력을 구성하는 주요 부재인 H형강 하부 플랜지와 철근의 표면온도에 따른 사양기반의 내화성능을 확인하였다. 부분 매입형 합성보와 노출형 합성보 모두 노출된 하부 플랜지가 각 표준화재의 67%, 72% 온도 상승으로 표준화재와 근접하게 상승됨을 확인하였다. 철근은 표준 화재 3시간이 경과하여도 538°C를 넘지 않기 때문에 내력은 건전하게 발휘 될 것으로 판단된다. 부분 매입형 합성보의 하부 플랜지는 노출형 합성보와 비교하여, 13%의 열차단 효과가 나타나 내화성에서 더 우수한 것으로 판단된다.
- (2) 표준화재 노출 시 부분 매입형 합성보의 감소한 휨내력과 주요 구조 부재의 면적 간의 상관관계를 통해 성능설계기반 내화성능평가에 만족하는 철근량을 확인하였다. H형강 및 철근의 면적 대비 철근, 웹의 면적 비율이 32%일 때, 감소한 휨성능은 상온 시 휨내력의 34%를 나타내었다. 철근량을 변수로 두어 감소된 휨내력의 변화를 그래프로 도출하였다. 웹의 50% 면적과 하부 보강 철근 면적의 합이 인장 부담 부재 면적의 42% 이상일 때, 성능설계의 내화성능 평가 기준에 충족함을 확인하였다. 앞선 기준에 충족한 철근량을 배근할 경우 SFRM 없이 부분 매입형 합성보의 내화성능을 확보할 수 있다.

- (3) 성능설계 기반의 3시간 내화성능 확보를 위한 부분 매입형 합성보의 SFRM두께와 실제 적용에 따른 SFRM 도포 길이를 확인하였다. 콘크리트 피복두께를 80 mm일 때 SFRM 두께를 변수로 설정하여 열전달해석을 수행한 결과, 무보강 부분 매입형 합성보와 철근 보강 부분 매입형 합성보 모두 SFRM 10 mm로 3시간 내화성능을 확보할 수 있음을 확인하였다. 중앙부 하단에 인장력이 발생하고, 단부 하단에서는 압축력이 발생한다. 따라서, 부분 매입형 합성보의 휨모멘트도(B.M.D)에서 나타나는 변곡점을 기준으로 길이를 제안하였다. 뿔내화피복의 길이는 중앙부 휨모멘트의 크기, 변곡점, 접침부위를 고려하여 설정하였다. 이에 따른 최소길이는 무피복 부분 매입형 합성보의 잔존 휨내력을 고려하여 양단 20% 감소된 길이를 적용하여, 내화성능을 확보할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 기초연구실지원사업에 의해 수행되었습니다.(NRF-2021R1A4A1031201) 해석검증에 사용된 수평가열로 시험 데이터는 (주)세진 알앤에스에 의해 제공되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Seo, K.D. (2014) *A Development of Design Program of Partially Embedded Composite Beam*, Master's thesis, Yonsei University (in Korean).
- [2] 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).
- [3] Han, S., Norovbadam, D., Min, J., Kim, S., and Choi, S. (2023) Flexural Performance of Concrete-filled Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Plastic Rebar Exposed to Standard Fires, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KoSACS, Vol.14, No.1, pp.17-27 (in Korean).

- [4] 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).
- [5] Ahn, J., Yeo, I., Cho, G., and Hwang, K. (2020) Fire Resistance of Steel Composite Beams without Fire Protection, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KoSHaM, Vol.20, No.5, pp.83-89 (in Korean).
- [6] Kang, J.W., Kang, M.S., and Yoon, H. (2023) Structural Fire Analysis of a Composite Beam Protected by Fire-Resistant Materials, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, CoSEIK, Vol.36, No.2, pp.137-145 (in Korean).
- [7] Chae, H.S., Ryoo, J.Y., Chung, K.S., Moon, Y.M., and Choi, S.M. (2010) Experimental Study on Structural Performance of End-reinforced Steel-beam system(Eco-girder), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp.533-541 (in Korean).
- [8] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2023) *Regulations on standards for evacuation and fire protection structures of buildings, etc*, Ordinance of the land, Infrastructure and Transport No. 1247, MOLIT (in Korean).
- [9] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2019) *Building Concrete Structural Design Standards*, KDS 41 31 00 : 2019, MOLIT (in Korean).
- [10] CEN (European Committee for Standardization) (2002) *Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire*, Eurocode 1991-1-2:2002, CEN, Belgium.
- [11] KSSC (Korean Society of Steel Construction) (2021) *Fire Resistant Design Examples of Steel Structures*, Goomibook (in Korean).
- [12] MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2021) *Analysis and Design of Reinforced Concrete*, KDS 14 20 10 : 2021, MOLIT (in Korean).
- [13] Kwon, I. (2020) A Study on Development of the Guideline (Draft) for Performance-based Structural Fire Engineering Design in Building Structures, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KoSHaM, Vol.20, No.3, pp.89-95 (in Korean).
- [14] Choi, I.-R. (2020) High-Temperature Thermal Properties of Sprayed and Infill-Type Fire-Resistant Materials Used in Steel-Tube Columns, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.20, No.3, pp.777-787.
- [15] Dassault Systemes (2023) *ABAQUS/Standard 2023. Simulia 2023*, Dassault Systemes.
- [16] KSA (Korean Standards Association) (2019) *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - General Requirements*, KS F 2257-1:2019, KSA (in Korean).
- [17] CEN (European Committee for Standardization) (2005) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, Eurocode 1994-1-2, CEN, Belgium.
- [18] CEN (European Committee for Standardization) (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, Eurocode 1993-1-2, CEN, Belgium.

요 약: 건축물의 장스팬화, 고층화가 요구되어 부분 매입형 합성보의 연구가 진행되고 있다. 부분 매입형 합성보는 사양설계 기반의 내화성능 평가로 노출된 강재에 대하여 내화피복작업이 필수적이다. 이는 경제성과 시공성이 떨어지는 문제를 유발한다. 이를 보완하고자 성능설계 기반의 내화성능 평가를 기준으로 부분 매입형 합성보의 하부 철근량과 SFRM 두께를 제안한다. 하부 철근 보강 유무와 SFRM 두께를 변수로 표준화재에 노출된 부분 매입형 합성보의 열전달해석을 수행하였고 화재에 의한 저감계수를 고려하여 휨내력을 산정하였다. 해석결과 SFRM 10 mm 적용 시 3시간의 내화성능을 확보할 수 있다. 또한, Web와 Re-bar의 면적이 전체 구조부재 면적 대비 42% 이상일 경우 3시간의 내화성능을 확보하는 것으로 평가되었다.

핵심용어: 내화성능, 부분 매입형 합성보, 철근, 뽐칠피복재, 표준화재곡선
