건축방재

프리스트레스 파형웹 합성보의내화성능에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Fire Resistance Performance of Prestressed Composite Beam with Corrugated Web

조범연* · 김흥열** · 김형준*** · 강 현*** · 김강수****

Cho, Bum-Yean*, Kim, Heung-Youl**, Kim, Hyung-jun***, Kang, Hyun***, Kim, Kang-Su****

Abstract

In this study, the fire resistance tests were performed on the conventional slim floor beam and the prestressed composite beams with corrugated webs, which is suitable for the long-span structure with a reduction in story height by utilizing the prestress and accordion effect. In the fire test program, the ISO 834 standard fire curve was adopted, and key test variables were effect of prestress, shape of corrugated webs, and thickness of sprayed fire proofing material. All of test specimens showed enhanced fire resistance performances exceeding the expected performance level, and the prestressed composite beams with corrugated webs especially showed the excellent fire performances considering that these specimens had thin fire proofing thickness compared to conventional slim floor specimen.

Key words : Prestress, Corrugated Web, Slim Floor, Fire Resistance, Composite Beam

요 지

이 연구에서는 장경간을 실현하면서 층고절감의 목적을 동시에 달성하기 위하여 개발된 파형웹보가 적용된 프리스트레스트 매립형 합성보와 일반적인 슬림플로어 보의 내화성능평가를 수행하였다. 내화성능 평가실험에서는 ISO 834 표준화재곡선을 적용하였으며, 주요실험 변수는 프리스트레스의 도입여부, 파형 웹의 형상, 그리고 내화피복의 두께였다. 모든 실험체들은 목적인 화재저항시간보다 더욱 향상된 화재성능을 보여주었으며, 프리스트레스가 도입된 파형웹 합성보는 일반적인 슬림플로어 합성보에 비하여 얇은 내화피복을 적용하였음을 감안하면 매우 우수한 화재저항성능을 보여주었다.

핵심용어 : 프리스트레스, 파형웹, 슬림플로어, 내화, 합성보

1. 서 론

최근 건축물이 대형화 및 고층화되어감에 따라 장스팬과 층고절감에 대한 요구가 증대되고 있는 추세이다. 이에 국내·외에서 층고절감에 효과적인 새로운 합성보에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만, 층고절감에 효과적이면서 장경간에 적용이 가능한 합성 보에 대한 개발은 부족한 실정이다(Kim *et al.*, 2011; Kim and Lee 2011). 또한, 최근 들어 중장경간 건축구조물에서는 철골부재와 철근콘크리트 부재의 단점을 보완한 Fig. 1에 나타난 것과 같이 다양한 형태의 장스팬 합성

보 시스템에 대한 도입이 종종 검토되고 있다. 따라서 Oh *et al.*(2012)에서 Fig. 2에 나타난 장경간 및 층고절감에 적합한 구조형식의 실현을 위해서 파형웹보가 적용된 프리스트레스트 매립형 합성보를 제안하였다. 제안합성보의 특징은 기존의 I-형 단면 및 합성단면의 축강성이 커서 프리스트레스트 도입효율이 매우 떨어지는 점을 개선하기 위하여 파형웹보를 도입함으로써 아코디언효과로 알려진 상하부플렌지의 응력집중현상을 최대한 활용하여 프리스트레스의 도입효율을 높일 수 있으며(Abbas *et al.*, 2007; Elgaaly *et al.*, 1997), 파형웹 철골보를 콘크리트에 매립함으로써 기존의 강과 콘크리트 사

*정회원. 서울시립대학교 건축공학과 박사과정(E-mail: choby277@kict.re.kr)

Member. Ph.D Candidate, Department of Architecture Engineering, University of Seoul

**한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구위원 Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

***서울시립대학교 건축공학과 박사과정 Ph.D Candidate, Department of Architecture Engineering, University of Seoul

****교신저자. 정회원. 서울시립대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-2-6490-2762, Fax: +82-2-6490-2749, E-mail: kangkim@uos.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Professor, Department of Architecture Engineering, University of Seoul

Fig. 1. The Type of Composite Beam.

Fig. 2. Description on Prestressed Composite Beam with Corrugated Webs.

이에서 발생하는 부착응력에 파형웹의 파고에 의한 콘크리트와 접촉면적의 증가로 인한 추가적인 지압면적을 확보하여 합성성능을 증대시킬 수 있다(Belletti and Gasperi 2010). 또한, 파형웹 합성보의 단점으로 지적되던 국부좌굴을 콘크리트와 합성을 통해 방지할 수 있어 매우 효율적이다(Bergfelt and Leiva 1986). 그러나 현행실제기준에서는 모든 구조물에 대하여 적절한 수준의 내화성능을 요구하고 있다. 따라서 이 연구에서는 이전 연구에서 개발된 파형웹 합성보의 내화성능을 평가하기 위하여 화재성능평가실험을 수행하였다. 주요 실험변수는 주요 실험변수는 프리스트레스의 도입여부, 파형웹의 형상, 그리고 내화피복의 두께였고, ISO 834 표준화재곡선을 적용하여 내화성능을 평가하였다.

2. 실험계획

2.1 실험개요

PS를 도입한 파형웹브 합성보의 내화성능을 평가하기 위하여 PS도입 유무 및 단면형상 그리고 보 하부의 내화피복 두께에 따라 내화실험을 진행하였다.

Fig. 3. The Shape of Corrugated Web.

PS도입 파형웹브 합성보의 내화성능은 본 공법과 가장 유사한 형태인 PS가 도입되지 않은 비데칭 H형강에 Deep-deck을 적용한 슬림플로어(slim floor) 합성보와의 내화성능 비교를 통해서 PS 및 파형웹브 도입 효과를 검증하였다. 파형웹브 합성보는 Fig. 3과 같이 단일(1layer) 파형웹브와 이중(2layer) 파형웹브로 구분하여 내화성능을 분석하였다. 또한 기존의 연구사례를 바탕으로 슬림플로어 합성보 및 PS도입 파형웹브 합성보 하부의 강재 부분에 3시간 이상의 내화성능을 확보할 수 있도록 습식 펄라이트계 내화피복재를 뿔칠시공 하였다. 장스팬 합성보에 대한 내화성능 분석을 위하여 실험체는 가열면 길이 7.5 m, 지점길이 7.7 m로 제작하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 강재

본 연구에서 사용된 H형강은 SS400 강종으로 Fig. 4와 같이 크기 360×236×346×14×22의 비대칭으로 제작되었다. 건축구조용 강재인 SS400의 기계적 성질은 KS D 3503 「일반 구조용 압연강재」에서 Table 1과 같이 규정하고 있다.

2.2.2 콘크리트

합성보 제작을 위한 콘크리트는 24 MPa를 적용하였으며 배합비는 Table 2와 같다. 배합표에 따른 레디믹스트 콘크리트를 타설하였으며 KS F 2405에 따른 콘크리트 공시체의 압

Table 1. The Result of Tensile Test

Type	Spec.	Testing Method	Testing Result
Test			
Yield strength (MPa)	≥ 245	KS B 0802	251
Tensile strength (MPa)	400~510		422
Elongation (%)	≥ 20		29

Table 2. Mixing Ratio of Concrete

fck (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Content(kg/m ³)				
			Cement	Sand	Gravity (19 mm)	Water	SP (%)
24	47.2	46.8	341	874	993	161	1.02

Table 3. The Result of Concrete Test

Type	Spec.	Testing Method	Testing Result
Test			
Compression strength (MPa)	≥ 24	KS F 2405	26

축강도를 측정결과는 Table 3과 같다.

2.2.3 내화 피복재

합성보의 하부에 노출된 강재를 내화피복하기 위하여 습식 펄라이트계 내화피복재를 뿔칠시공 하였다. 피복재는 내화인정을 받은 K사의 E제품을 사용하였으며 제품을 보에 적용하

Table 4. Mixing Ratio of Concrete

Fire resistance performance	Thickness (mm)
1 hour	9
2 hour	19
3 hour	29

Table 5. The Result of Fire Resistance Covering Material Test

Type	Spec.	Testing Method	Testing Result
Test			
Density (g/cm ³)	≥ 0.33	KS F 2901	0.38
Bond strength (N/mm ²)	≥ 0.05		0.09

였을 경우 요구내화성능 별 피복두께는 Table 3과 같다. Table 4는 내화피복재의 주요물성인 밀도 및 부착강도에 대한 실험 결과이다.

2.3 실험체 제작 상세

표준화재 재하조건에서 PS도입 파형웹 합성보의 내화성능 평가를 위하여 Table 1과 같이 실험체 구성하였다. PS를 도입하지 않고 비대칭 H형강에 deep-deck를 적용한 슬림플로어 합성보[S-1]와 직경 12.7 mm의 긴장재(tendon)로 PS를 도입하고 deep-deck을 적용한 파형웹 합성보[S-2 & S-3]를 Fig. 3과 같이 제작하였다. 또한 파형웹은 이중웹[S-2]와 단일웹[S-3]로 구분하여 웹 형태에 따른 내화성능을 비교하였다. 선행 연구에서 슬림플로어 합성보는 경간거리 4.2 m, 하부 철골의 무피복 조건에서 89분의 내화성능을 만족하는 것

Table 6. Composition of Specimen

Specimen	Parameter	Prestress	Thickness of covering material (mm)	H-beam Size (mm)
S-1	Slim floor	×	29	360×236×346×14×22
S-2	2 layer corrugated web	○	19	
S-3	1 layer corrugated web	○	9

Fig. 3. Drawing of Specimen.

Fig. 4. Location of Thermocouple.

으로 나타났다. 하지만 본 실험조건인 경우 경간길이를 7.7 m로 변경하여 3시간 내화성능 확보를 위해 피복재 29 mm를 뿔칠 시공하였다. 또한 파형웹브 합성보는 PS도입과 파형웹브로 인한 아코디언 효과를 감안하여 이중웹브의 경우 19 mm, 단위웹브의 경우 9 mm로 뿔칠 시공하였다.

내화실험 시 강재와 콘크리트 내부의 온도변화를 관찰하기 위하여 Fig. 4와 같이 K-Type 1 mm 열전대를 설치하여 실험체 내부 온도를 측정하였다.

2.4 실험방법

내화실험은 KS F 2257-5 「건축 부재의 내화 시험 방법-수평 내력 구획 부재의 성능 조건」을 따랐으며, Fig. 5와 같이 등분포 재하조건에서의 내화실험을 수행하였다. Table 7은 실험체의 설계하중 및 재하조건이다.

재하조건에서 내화성능의 평가기준은 KS F 2257-1 「건축 부재의 내화 시험 방법-일반 요구 사항」에 따라 변형량과 변형률에 의해 판정하며, 변형량(1)과 변형률(2) 2가지 기준을 모두 초과하였을 때 부적합한 것으로 간주한다. 이 기준은 안정된 상태에 도달할 때까지 상대적으로 급속한 변형이 생길 수 있으므로, 변형률의 성능 기준은 변형량이 $L/30$ 을 초과할 때까지 적용하지 않는다.

$$\text{변형량} : D = \frac{L^2}{400d} \text{ mm} \quad (1)$$

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

여기서, L : 시험체 스패(mm), d : 구조 단면의 최대 압축력을 받도록 설계된 위치에서 최대 인장력을 받도록 설계된 위치까지의 거리(mm)

Table 7. Design Load and Loading Condition for Fire Test

Specimen	Design Load (ton)	Load Ratio	Test Load (ton)
S-1	80.6	0.4	32.2
S-2	82.7		33.1
S-3	82.7		33.1

Fig. 5. Testing Setup.

3. 실험 결과

3.1 단면형상 변화에 따른 부위별 온도변화

PS도입 유무 및 웹브 형태, 피복두께에 따른 강재(H형강)와 콘크리트 내부의 온도에 측정하여 내화성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

3.1.1 강재(H형강)

강재의 온도에 따른 내화성능을 분석하기 위하여 H형강의 상·하부 플랜지 및 웹브의 온도를 측정한 결과 Table 8과 같이 나타났다. 하부 철골에 29 mm의 피복재를 도포한 S-1의 경우 180분에서 하부 플랜지의 온도가 277.6°C, 웹브의 온도가 135.3°C, 상부 플랜지의 온도가 113.9로 나타났다. 19 mm의 피복재를 도포한 S-2의 경우 하부 플랜지 온도가 291.4, 웹브의 온도가 144.7°C, 상부 플랜지 온도가 113.7°C로 나타났다. 9 mm의 피복재를 도포한 S-3의 경우 하부 플랜지 온도가 418.3°C로 나타났다.

단면형상에 따른 상부 플랜지 온도를 비교한 결과 피복두께가 가장 두꺼운 S-1가 가장 낮았어야 함에도 S-1과 S-2는 거의 차이가 발생하지 않았으며, 피복두께가 가장 얇은 S-3가 S-1, 2에 비해 약 8°C 낮은 것으로 나타났다. 이는 deep-deck을 적용함으로써 상부 플랜지와 웹브가 콘크리트에 매립되어 있어 하부 플랜지를 통해서 흡수된 열이 상부 플랜지에 전달되는 열의 주요인자인 조건에서 S-1의 경우 S-2와 S-3에 비해

Table 8. Steel Temperature of LSC* Beam

Thermo couple location	Time (min)	S-1 (°C)	S-2 (°C)	S-3 (°C)
Top Flange	60	40.6	29.9	35.0
	120	89.2	105.9	70.3
	180	113.9	113.7	105.8
Web	60	47.3	46.1	61.5
	120	108.7	108.1	103.8
	180	135.3	144.7	148.6
Bottom Flange Bottom	60	93.9	106.5	163.2
	120	182.9	201.4	287.0
	180	277.6	291.4	418.3

LSC* : Long Span Composite

Fig. 6. Steel Temperature of LSC Beam.

웹의 단면적이 작아 콘크리트와 접촉되는 면적이 작아지기 때문에 판단된다. 또한 파형웹의 형태에 따라 S-2의 경우 이중웹을 적용함으로써 웹 사이에 증공이 발생하는 구조로써 S-3에 비해 콘크리트에 의한 열흡수가 적게 발생하고 하부 플랜지에서 흡수된 열이 웹과 콘크리트를 통한 전도뿐만 아니라 복사에 의해서 전달되기 때문에 판단된다. 하부 플랜지의 온도는 피복두께의 영향을 받아 S-1가 가장 낮고, S-3가 가장 높게 나타났다. 하지만 가장 얇은 9 mm의 피복재를 도포한 S-3의 경우에도 하부 플랜지의 온도가 418.3°C로 강재의 내화성능 판정 기준인 평균 538°C, 최고 649°C를 넘지 않은 것으로 나타났다. 이는 파형웹에 deep-deck을 적용함으로써 철골의 하부를 제외하고 모두 콘크리트에 매립되고 파형웹을 적용함으로써 콘크리트에 의한 열흡수가 효율적으로 일어났기 때문에 판단된다. 따라서 슬림플로어 합성보에 비해 파형웹 합성보가 흡수되는 열을 효과적으로 제어는 것으로 나타났으며 단일 파형웹 합성보가 동일 피복두께를 적용할 경우 내화성능이 가장 우수한 것으로 사료된다. Fig. 6은 시간에 따른 H형강의 부위별 온도와 KS F 2257-1에서 규정하고 있는 강재의 온도에 의한 내화성능 판정 시 기준치를 나타낸 것이다.

3.1.2 콘크리트

콘크리트의 온도에 따른 내화성능을 분석하기 위하여 가열면에서 깊이별로 콘크리트 내부 온도를 측정된 결과 Table 9

와 같이 나타났다. 가열면으로부터 콘크리트 내부 10 mm 위치의 온도는 180분에서 S-1은 236.1°C, S-2는 313.0°C, S-3는 384.8°C로 S-1에 비해 S-2는 1.3배, S-3는 1.6배 높게 나타났다. 가열면으로부터 콘크리트 내부 50 mm 위치의 온도는 180분에서 S-1은 141.1°C, S-2는 163.3°C, S-3는 176.9°C로

Table 9. Concrete Temperature of LSC Beam

Thermo couple location (mm)	Time (min)	S-1 (°C)	S-2 (°C)	S-3 (°C)
10	60	91.8	102.2	131.8
	120	131.6	180.0	245.2
	180	236.1	313.0	384.8
20	60	87.4	96.2	115.5
	120	121.9	154.2	190.7
	180	205.8	275.7	320.5
30	60	80.1	80.1	106.3
	120	115.8	124.8	139.7
	180	173.1	195.9	264.3
40	60	74.0	73.9	103.1
	120	112.4	119.4	107.0
	180	152.6	167.6	215.4
50	60	67.6	55.7	89.3
	120	108.7	113.1	106.5
	180	141.1	163.3	176.9

Fig. 7. Concrete Temperature of LSC Beam.

S-1에 비해 S-2는 1.2배, S-3는 1.3배 높게 나타났다. 이처럼 콘크리트 내부온도는 가열면에서 가까울수록 피복재의 영향을 크게 받는 것으로 나타났고, 가열면으로부터 거리가 멀어질수록 온도편차는 줄어드는 경향이 나타났다. Fig. 7은 시간에 따른 콘크리트 내부 위치별 온도변화이다.

3.2 단면형상에 따른 내화성능 변화

PS도입 유무 및 웨브 형태, 피복두께에 따른 내화실험을 실시한 결과 Table 10과 같이 S-1, S-2, S-3 모두 180분 이상의 내화성을 확보 할 수 있는 것으로 나타났다. 내화실험을 종료한 180분에서 S-1의 경우 변형량이 -56.98 mm, 변형률이 -1.04 mm/min로 나타났고, S-2의 경우 변형량 -82.2 mm, 변

Fig. 8. Displacement of LSC Beam.

Table 10. Fire Resistance Performance by Displacement and Rate of Displacement

Specimen	Time (min)	Displacement (mm)	Rate of displacement (mm/min)	Fire resistance (min)
S-1	60	-11.22	-0.18	180
	120	-30.14	-0.28	
	180	-56.98	-1.04	
S-2	60	-24.9	-0.08	180
	120	-50.0	-0.66	
	180	-82.2	-0.70	
S-3	60	-25.4	-0.04	180
	120	-48.5	-0.16	
	180	-73.6	-0.28	

형률이 -0.70 mm/min로 나타났으며, S-3의 경우 변형량이 -73.6 mm, 변형률이 -0.28 mm/min로 나타났다. 3.4절의 내화성능 판정기준에 따르면 S-1, S-2, S-3의 변형량 기준은 -325.1 mm, 변형률 기준은 -14.4 mm/min이다.

변형량 허용 한계치를 기준으로 S-1은 17.5%, S-2는 25.3%, S-3는 22.6%의 변형이 발생하였다. 변형량이 가장 적게 발생한 S-3 실험체의 경우 내화피복재의 두께가 9 mm로 가장 적은 양을 도포하였음에도 불구하고 3배 이상의 내화피복재를 도포한 S-1과 내화성능 측면에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 PS도입으로 인하여 휨변형에 대한 구조적 성능이 향상되었기 때문으로 판단된다. 또한 S-2, S-3의 내화성능이 유사한 수준으로 나타났다. 하지만 S-2의 경우 S-3 보다 내화 피복재를 2배 이상 도포한 것을 감안하면 이중 파형웨브에 비해 단일 파형웨브가 아코디언 효과로 인하여 상하부 플랜지

(a) Before Fire Test(S-1)

(b) Before Fire Test(S-2)

(c) Before Fire Test(S-3)

(a) After Fire Test(S-1)

(b) After Fire Test(S-2)

(c) After Fire Test(S-3)

Fig. 9. The Result of Fire Test [S-1, 2 and 3].

의 응력집중 현상이 완화에 효과적인 것으로 판단된다. Fig. 8은 실험체 별 시간에 따른 변형량이며, Fig. 9는 실험 전 · 후 형상이다.

5. 결 론

이 연구에서는 프리스트레스의 도입유무와 웹의 형상 및 내화피복두께를 주요변수로 합성보의 내화성능 평가를 수행하였고, 이를 바탕으로 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었다.

- 1) 계측된 온도데이터를 분석한 결과 화재에 노출된 합성보의 하부 가열면으로부터 흡수된 열이 철골보의 웹과 상부플랜지까지 전달되는 과정에서 콘크리트와 접촉하는 면적이 파형웹 합성보가 일반적인 슬림 플로어 합성보에 비하여 크기 때문에 웹과 상부플랜지에서 계측된 온도가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.
- 2) 이중(2 layer) 파형웹의 경우 보 내부에 중공이 형성되어 전도뿐만 아니라 복사에 의한 열전달로 인하여 단일 파형웹에 비해 상부플랜지의 온도가 높은 것으로 나타났다. 단일 파형웹의 경우에는 이 같은 효과를 차단하여 더욱 향상된 화재저항성능을 나타낸 것으로 판단된다.
- 3) 실제 사용하중이 재하된 내화실험을 실시한 결과 이 연구에서 실험된 모든 합성보 실험체들은 화재에 노출된 3시간 동안 KS F 2257-1에서 제한하고 있는 휨성능(변형량 및 변형률) 기준을 모두 충분히 만족하는 것으로 나타났다.
- 4) 파형웹 합성보의 경우에는 슬림플로어 합성보에 비해 내화피복재를 더욱 얇게 도포하였음에도 불구하고, 유사한 내화성능을 발휘한 것으로 나타났으며, 이는 프리스트레스의 도입을 통한 휨강성이 향상에 기인한 것으로 판단된다.
- 5) 이 연구의 실험결과 PS도입 단일파형웹 합성보 시스템이 가장 우수한 내화성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 그러나 구조적인 보강으로 무피복 조건에서 3시간 이상의 내화성능을 만족할 수 있도록 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원하에 수행된 국가 R&D사업인 “내화피복이 없는 층고절감형 7.5 m 보의 3시간 내화성능 확보 공법 개발(2차년도)” 과제와 관련한 연구에 의행 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Abbas, H.H., Sause, R., and Driver, R.G. (2007) Analysis of flange Transverse Bending of Corrugated Web I Girders under In-Plane Loads, ASCE, *Journal of Structural Division*, Vol. 133, No. 3, pp. 347-355.
- Belleti, B. and Gasperi, A. (2010) Behavior of Prestressed Steel Beams, ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 136, No.94, pp. 1131-1139.
- Bergfelt, A. and Leiva-Aravena, J. (1986) Buckling of Trapezoidally Corrugated Web and Panels, IASBE Colloquium, pp. 67-74.
- Elgaaly, M., Seshadri, A., and Hamilton, R.W. (1997) Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs, ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 6, , pp. 772-782.
- Kim, H.J., Kim H.Y. (2012) An Experimental Study on the Fire Resistance behaviour of Asymmetric Slimfloor Beam According to Cross Section Shape Variation, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 26, No. 1, pp. 23-30.
- Kim, K.S., Lee, D.H., Choi, S.M., Choi, Y.H., and Jung, S.H. (2011) Flexural Behavior of Prestressed Composite Beams with Corrugated Web: Part I. Development and Analysis, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 6, pp. 1603-1616.
- Kim, K.S. and Lee, D.H. (2011) Flexural Behavior of Prestressed Composite Beams with Corrugated Web: Part II. Experiments and Verification, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 6, pp. 1617-1629.
- Oh, J.Y., Lee, D.H., and Kim, K.S. (2012) Accordion Effect in Prestressed Steel Beams with Corrugated Webs, *Thin-Walled Structures*, Vol. 57, No. 1, pp. 49-61.

Received January 21, 2014

Revised January 22, 2014

Accepted January 27, 2014