

TSC 합성보의 화재시 거동 및 전열특성에 관한 실험적 연구

- 철근 보강과 하중비에 의한 내화성능의 영향 -

Structural Performance and Heat Transfer Characteristics of the TSC Composite Beam in Fire

최 승 관* 김 성 배**
Choi, Seng-Kwan Kim, Sung-Bae

Abstract

TSC composite beam is a type of innovative composite structures, composed of a concrete beam enclosed by steel plates in its three sides. The study of composite structures in fire is generally focused to investigate the structural performance in relation to the effect of strength and stiffness reduction of steel section, at which a tensile block forms in its flexural mechanism. This research also aims to experimentally assess the in-fire performance of the TSC composite beam with respect to various structural aspects such as load ratio, additional reinforcements, insulation.

키워드 : 구조내화설계, TSC 합성보, 화재거동, 하중비, 구조보강

Keywords : Fire Resistance Design, TSC Composite Beam, Fire Performance, Load Ratio, Structural Modification

1. 서 론

지난 30여 년간 합성구조는 강재부의 최적형상연구를 기반으로 다양한 중·장시간보의 개발과 화재거동에 대한 안전성 및 경쟁력 확보를 위해 주목할 만한 성장을 이루었다. 합성보의 내화거동에 관한 연구는 유럽 및 뉴질랜드의 국가 연구기관과 대학교에서 주로 수행되었으며^{(1)~(7)}, 구조설계 시방서와 설계 가이드로 적용되고 있다. 국내에서도 이러한 영향으로 iTech, TSC beam, Slim beam 등의 다양한 합성보가 제안되어 있으며^{(8)~(10)}, 화재조건에서의 거동 연구 또한 현재 수행중이다^{(10)~(12)}.

본 연구는 국내에서 다수의 적용실적이 있는 TSC 합성보의 내화거동에 관한 기초적 고찰 단계의 선행실험으로 구성되었다. 이러한 연구 배경은 최근 성능기반 연구를 위한 기초연구로 실 구조물의 화재거동에 대한 실험적 분석을 통해 안전성 증명이 요구되는 시점과 부합된다. 또한 대상 모델의 최적화 설계를 가능하게 함으로써 향후 성능설계에서 경제성을 확보하기 위해서이다⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾.

기본적인 연구 개념은 현재 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 단순 내화피복 뿔철의 사양적 설계에서 탈피하여, 사용하중 조건에서 고려된 모델의 거동 연구를 구조적인 변형을 통하여 요구 성능을 충족할 수 있는 다양

한 접근 기법에 대한 민감성에 대한 분석이다. 그러므로 본 연구의 첫 번째 단계는 무 피복 조건 부재의 성능을 하중재하 비율(40, 60%)에 따른 거동을 분석한다. 두 번째 연구 단계로 60분간의 피복조건에서의 재하 거동 분석을 수행하기 위해 강재부의 온도 변화와 연동한 종합적 이론 분석을 선행하고, 이를 토대로 강재부의 내화 피복 유·무에 따른 화재영향 성능평가 기반을 마련한다. 세 번째 단계로 무 피복 조건에서의 U자형 강재 내부에 타설된 콘크리트의 고온 조건에서 추가적인 인장응력을 확보 할 수 있는 철근을 배근하여 무 피복 조건에서 TSC 합성보의 내화 성능을 향상 할 수 있는 방안에 대한 검토를 수행하였다.

2. TSC 합성보 고찰

그림 1은 TSC 합성보의 개념도이다. TSC 합성보는 철골 단면을 구조부재의 인장 측 외피에 배치하고, 웨브에 수직 강재를 양 측면에 분리 배치한 영구 거푸집에 콘크리트를 현장 타설하여 완성한 합성보이다.

보 형상은 외부 강재가 인장력을 콘크리트 슬래브가 압축력을 부담하여 단면내력이 구성된다. 그러나 화재 조건에서는 노출 강재부가 급격한 온도상승에 따른 강도저하로 단면의 성능저하가 발생하므로 구조성능 확보를 위해 보강철근을 추가하였으며, 화재 시 성능에 대한 기여를 분석하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원, 공학박사

** 정회원, (주)센구조연구소 부장, 공학박사

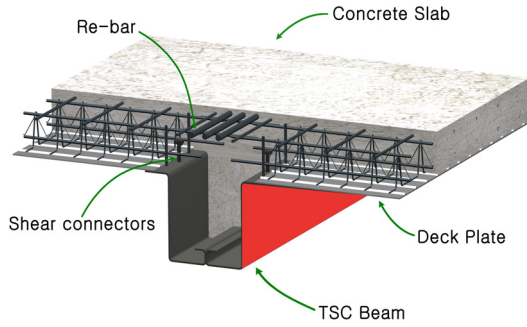


그림 1. TSC 합성보 개념도

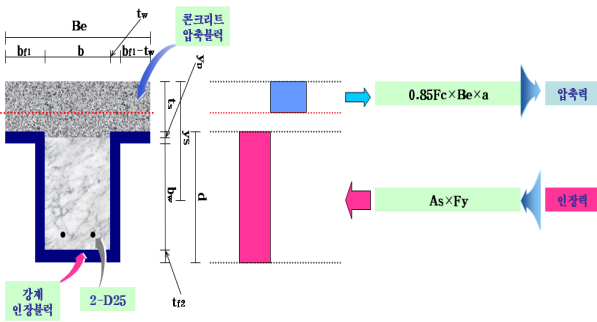


그림 2. 보 내력 분포

2.1 한계상태 소성 휨내력

소성 휨내력은 소성 중립축의 위치를 결정한 후 압축 내력과 인장응력 크기에 따른 플랜지 상단에서부터 중립축까지의 거리(y_p)와 인장응력 거리(y_s)를 계산하고, 압축 응력 또는 인장응력의 합력에 거리를 곱하여 소성 모멘트를 구한다⁽¹⁵⁾. 또한 보강방법에 따른 내화성능도 소성모멘트를 기준으로 실험 가력하중을 도출하였다. 단면응력은 그림 2와 같이 압축응력과 인장응력 블록이 분포하는 것으로 판단되며, 이때의 중립축은 계산 결과 플랜지 내부에 위치한다.

철근 배근을 고려한 TSC 합성보의 압축(C) 및 인장(F_t) 응력은 식 (1)과 같으며, 힘의 평행방정식에 의해 중립축까지 거리(y_p)는 식 (2)와 같다. 합성보 하부 인장응력과 각 요소별(하부 플랜지, 상부 플랜지, 웨브) 인장응력을 비교하여 철근 보강효과를 포함한 인장응력거리(y_s)는 식(3)과 같고, 중립축 거리와 인장응력거리를 토대로 소성 휨내력(M_p) 산정은 식(4)와 같다.

$$C = 0.85F_c B_c a + 0.85F_c b y_p + 2F_y b_{f1} y_p$$

$$F_t = A_s F_y + A_{st} F_{sy} - 2F_y b_{f1} y_p \tag{1}$$

$$y_p = \frac{(A_s F_y + A_{st} F_{sy}) - 0.85F_c B_c t_s}{4F_y b_{f1} + 0.85F_c b} \tag{2}$$

$$y_s = \frac{b_{f1} F_y (t_{f1} - y_p)^2 + A_w F_y (\frac{b_w}{2} + t_{f1} - y_p)}{(A_s - (2b_{f1} y_p)) F_y + A_{st} F_{sy}} + \frac{A_{f2} F_y (b_w + \frac{t_{f2}}{2} + t_{f1} - y_p) + A_{st} F_{sy} (d - y_p - t_{f2} - 50)}{(A_s - (2b_{f1} y_p)) F_y + A_{st} F_{sy}} + y_p \tag{3}$$

$$M_p = 0.85F_c t_s B_c (y_p + \frac{t_s}{2}) + 4F_y b_{f1} \frac{y_p^2}{2} + 0.85F_c b \frac{y_p^2}{2} + F_y A_s (y_s - y_p) + A_{st} F_{st} (y_s - y_p) \tag{4}$$

여기서, C : 압축응력의 합력 T : 인장응력의 합력
 F_c : 콘크리트 압축강도 B_c : 보 유효 폭
 t_s : 슬래브 두께 b : 보 폭
 A_{st} : 철근 단면적 F_{sy} : 철근의 항복강도
 A_s : 강제 단면적 F_y : 강재의 항복강도
 a : 등가응력블록의 길이
 y_p : 상부 플랜지에서 중립축까지 거리
 y_s : 인장축 강재의 도심

2.2 고온상태 소성 휨내력

내화 실험 중 강재부의 고온영향으로 인한 강도저감은 식 5와 같다. 식 5는 보의 휨단면력 변화와 철근 보강에 의한 구조 성능증가 등을 반영한 식(4)의 소성모멘트 산정방법을 포함하여 단순화한 방법이다. 식 5는 슬래브에서 형성되는 압축응력부와 철근 보강부의 강도 저하는 무시한다는 가정에서 산정된 것이다. 강재부의 고온 잔류응력은 BS5950 Pt8(BSI 1990)을 참고하였다⁽¹⁶⁾.

$$M_p = 0.85 F_c t_s B_c (y_p + \frac{t_s}{2}) + 4F_y b_{f1} \frac{y_p^2}{2} SRF_{2,0} + 0.85F_c b \frac{y_p^2}{2} + F_y A_s (y_s - y_p) SRF_{2,0} + A_{st} F_{st} (y_s - y_p) \tag{5}$$

여기서, SRF_2 : 강재의 2% 한계변형 고온 잔류 응력

보강 방법 및 화재 시 강도 저감을 토대로 무 보강에서 소성모멘트와 보강을 통한 모멘트 성능 향상을 비교하였으며, 철근보강방안의 효율성을 분석하였다. 또한 소성모멘트를 기준으로 각 실험변수에 따른 하중비를 계산하여 재하 하중비를 비교·분석하였다.

표 1은 보강에 따른 성능 향상 및 재하하중의 백분율이다. 철근을 보강 하지 않은 경우의 무보강과 철근을 보강한 상태에서 고온에서 보강의 영향을 정리한 것이다. 무보강 조건에서 재하 하중의 비율이 60%를 적용한 경우, 2-HD25와 2-HD29 보강의 하중율은 각각 43.0%와 40.9%가 된다. 동일한 재하 상황에서 강재부의 온도가 600℃와 700℃ 경우 무보강 조건에서는 115.3%, 219.4%의 하중율이 산정된다. 또한 2-HD25 보강조건은 76.5%

와 104.8%, 2-HD29 보강조건은 69.9%와 103.6% 이다. 상온에서 보강을 통한 모멘트 성능 증가율 보다 고온에서 보강에 따른 단면 성능의 향상이 높아지는 것으로 나타났다으며, 철근 보강 효율은 상온에서 보다 화재 상황에서 증가하는 특성이 있는 것으로 판단된다.

표 1. 보강에 따른 성능 향상(재하율 60%의 경우)

강도저하를 고려하지 않을 경우		강도저하 고려할 경우				
변수	하중비(백분율, %)		하중비(백분율, %)			
	20℃		600℃ (강재부)		700℃ (강재부)	
	무보강	철근 보강	무보강	보강	무보강	보강
2-D25	43.0	-	115.3	76.5	219.4	104.8
4-D25	36.2	-		53.8		71.4
2-D29	-	40.9		69.9		103.6
4-D29	-	33.8		46.7		60.0

표 2. 실험 변수 계획

실험체 명	하중 비 (%)	피복	추가 철근 배근 (%)	재하하중 (kN)
실험체 I	60	무	무	261.4
실험체 II	40	무	무	171.2
실험체 III	60	유	무	261.4
실험체 IV	60/43.1*	무	2-HD25	261.4
실험체 V	60/40.9*	무	2-HD29	261.4

* 철근 고려 시 하중 비

표 3. 내화피복재 물성(중량 배합비)

구분	질석	시멘트	석고 플라스터	맥반석	퍼라이트	기타
중량 배합비(%)	20	20	25	13	7	15
허용오차 (%)	±2	±2	±2	±2	±1	±1

표 4. 열전대 설치 위치 ; 위치별 열전대 번호

실험체	부재 길이	STEEL		CONCRETE			
		TSC	Re-bar	1/4 D	2/4 D	3/4 D	SLAB
I, II, III	L/2	1~5		6~10	11~13	14~16	17~20
	L/4	21~25		26~30	31~33	34~36	37~40
	L/2	1~3	4,5	6~10	11~13	14~16	17~20
IV, V	L/2	21~23	24~25	26~30	31~33	34~36	37~40
	L/4						
	L/2						

L : 부재 길이(=4,400mm), D : 보 춤(=470mm)

철근 보강 실험체계획은 온도에 따른 강도저하를 고려하여 400N/mm² 강재의 약 50% 강도손실(≒600℃)과 약 80%의 강도손실(≒700℃)을 고려하여 2-HD25와 2-HD29로 계획하여 재하하중에 대한 영향을 검토하였다. 또한 보 내부의 철근 배근은 강도저하에 대한 고려와 함께 무피복 조건에서 합성보의 내화성능향상을 검토하기 위해 계획되었다.

3. 화재거동 실험계획

3.1 실험체 계획

실험체 형상은 그림 3과 같다. 실험체는 보 춤 350mm, 강종 SS400(400N/mm²), 판 두께 6mm이고 슬래브는 600mm 폭에 콘크리트 압축강도는 24MPa이다. 실험체의 지점간 거리는 4.4m, 화재노출 길이는 4.0m이다. 실험체의 형상 중 실험체 길이는 한국산업규격 KS F 2257⁽¹⁷⁾에 준하였으나, 실험체 폭은 가열로 특성 및 규격에 의한 것이다. 일부 실험체는 무피복 조건에서 화재로 인한 강재의 성능 저하를 보완하고, 내화성능 증진을 위해 보 하단에 철근을 배근하였다. 철근은 2-HD25와 2-HD29로 배근하였으며, 보와 콘크리트 슬래브 사이에 전단 연결재로 스티드 커넥터를 사용하였다.

표 2는 실험 변수 계획이다. 보 성능 평가를 위해 재하하중과 내화피복 적용 유·무, 철근 배근 등을 변수로 하였다. 재하율은 소성모멘트를 기준으로 무 피복 조건에서 60%, 40%로 하였고, 철근배근 시 재하율은 당초 60%에서 43%와 41%로 변경되었다.

실험체 I, II는 재하 하중비를 변수로 하였고, 실험체 IV, V는 최적 내화성능 보강방안을 검토하였다. 실험체 III은 1시간 내화성능을 확보하는 뿔칠재를 도포하여 피복에 의한 내화성능을 평가하였다. 뿔칠재는 건설현장에서 일반적으로 적용되고 있는 A사의 질석계 제품으로 1시간 내화성능 확보를 위한 뿔칠 두께는 20mm이다.

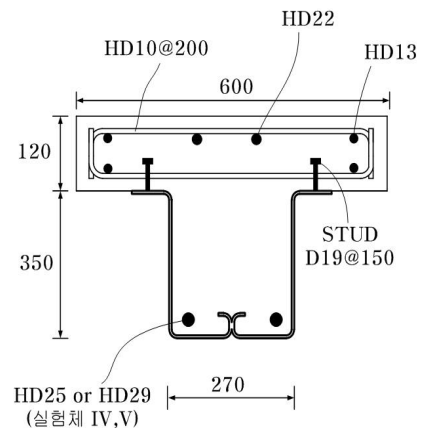


그림 3. 실험체 형상

적용 제품은 건설기술연구원 건설자재인정센터의 내화 인증을 획득한 제품이며, 시방서에 준해 작업하였다. 뿔철재 물성은 제품의 구성 배합비에 의해 결정되며, 중앙 배합비는 표 3과 같다.

3.2 열전대 설치 계획

단면내의 열 분포를 측정하기 위하여 실험체 내·외부에 열전대를 각각 40개소를 설치하였다. 보 내부에 설치하는 열전대는 이질 재료의 사용으로 인한 열전달 오차를 줄이기 위해 콘크리트 부재와 동일한 배합비로 양생한 간격재(50×100mm)를 제작하여 콘크리트 타설 전 열전대와 함께 설치였다. 강재에 설치하는 열전대는 정확한 위치에 설치하기 위해 간격재를 위치 별로 구멍을 뚫고, 그 곳에 열전대 센서 부분을 삽입하여 고정시켰다.

열전대 위치는 콘크리트의 보의 열 특성을 분석하기 위하여 표 4와 같이 배치하였다. 설치 개소는 보 내부에 11개소, 철근에 2개소, 강재 표면에 2개소, 내부 고정철물에 1개소, 상부 슬래브에 4개소를 설치하였으며, 하부와 옆면의 깊이를 고려하여 중복되는 위치가 발생하지 않도록 열전대 설치 계획을 수립하였다. 콘크리트 슬래브의 열 분포 특성 파악을 위해 슬래브 상부로부터 열전대를 설치를 고려하였으며, 강재 부분의 열 특성 분포를 분석하기 위해서 보의 하단부와 옆면 양단에 각각 열전대 설치를 고려하였다.

열전대(Thermo couple)는 ASTM에 제시된 K 타입을 적용하였으며 온도 측정 범위는 -250~1,260°C 구간이다. 온도 측정 오차는 0~1,250°C 구간에서 ±2.5°C이다.

그림 4는 내부에 철근이 배근된 실험체의 열전대 설치 위치이다. 내부에 철근이 없는 실험체는 철근의 위치를 제외하고, 철근의 열전대 4, 5는 강재 표면 열전대 4'와 5'로 변경하면 된다.

허용 변형속도($dD/dt = L^2/9000d$)를 모두 초과 할 경우 구조적 붕괴상태로 판정하며, 전체 처짐의 $L/30$ 을 초과 하지 않도록 하고 있다⁽¹⁷⁾.

국내 구조요소의 내화성능 평가기준을 준용하여 본 실험에 적용한 재하성능 기준은 허용 변형량은 103mm 이며, $L/30$ 이후 성능 기준을 제시하는 허용 변형속도는 5.38mm/min이다.

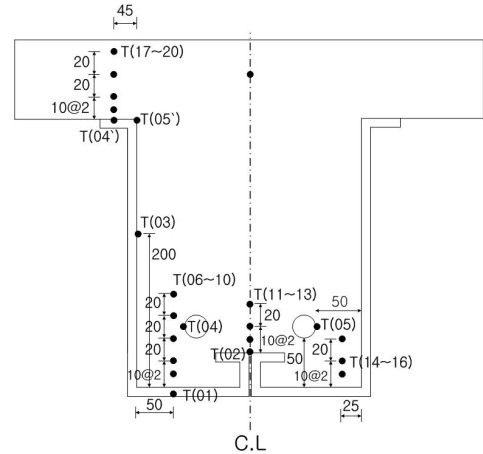


그림 4. 열전대 설치 위치

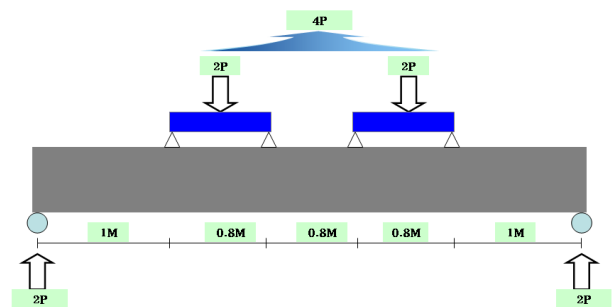


그림 5. 하중 가력도

3.3 하중 재하 및 실험평가 기준

하중재하는 그림 5와 같이 4점 가력 방식을 하였으며, 하중은 무보강 조건 합성보의 중앙부 모멘트 휨내력을 기준으로 하였다.

국내의 내화성능 평가방법은 1999년 ISO 834를 기준으로 개정된 한국산업규격 KS F 2257의 '건축구조 부재의 내화 시험방법'에 준한다. 내화 성능평가를 위한 국내 구조물의 내화 거동 평가는 재화와 비재하 방법으로 구분하여 규정하고 있다.

비 재하 실험은 온도를 기준으로 하여 구조체의 내화 성능을 평가하며, 평가기준은 구조체의 평균온도인 538°C (1,000°F), 최대온도 649°C (1,200°F)를 넘지 않아야 한다. 재하 실험은 재하 성능 평가를 선택적으로 채택할 수 있으며, 하중지지력 판정을 기준으로 변형량과 변형속도를 고려한다. 부재의 변형량은 허용변형량($D = L^2/400d$)과

3.4 소재 시험 결과

화재에 노출된 구조체는 사용재료에 따라 열적 거동 특성이 달라지므로 구성성분 및 배합비율, 재료 강도 등에 대한 명확한 규명이 필요하다. 특히 고온하의 콘크리트 재료는 경우 골재 특성, 콘크리트 배합비, 수분함유량, 공극압력, 재하 하중, 가열 방법, 최대 열용량 등 다양한 변수에 의해 복합적으로 영향을 받으므로 콘크리트와 강재 등에 대한 재료 특성 파악이 필요하다.

실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201 포틀랜드 시멘트 규정에 적합한 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 콘크리트용 잔골재 및 부순 굵은 골재는 경기도 여주산 강모래와 쇄석을 사용하였다. 또한 콘크리트의 설계 기준강도는 24MPa이며, 콘크리트 배합비는 표 5와 같다. 콘크리트 배합에 사용된 AE 감수제의 특성은 표 6과 같고, 공기량과 슬럼프 및 콘크리트 압축강도 시험결과

표 7과 같다.

표 8은 보에 사용한 강재의 기계적성질 및 화학성분이 다. 기계적성질 및 화학성분 시험은 검사증명서(Mill Sheet) 값으로 하였다. 실험체 제작에 사용된 철근의 소재시험은 생략하였다.

표 5. 콘크리트 배합비

물시멘트 비W/C (%)	조골재율 (s/a)	중량배합 (kg/m ³)				
		시멘트	천연 잔골재	굵은골재 (25mm)	단위수량	AE감수제 (시멘트0.3%)
42.7	46.5	341	874	993	146	1.02

표 6. AE 감수제의 물리적 특징

시험항목	재료 특성		
	기준 값	시험 값	
비중(20℃)	1.2±0.05	1.196	
PH	7.0±3.0	7.1	
고형분(%)	34±2.0	34	
콘크리트 공기량(%)	4.5±0.5	4.8(초기)/4.4(60분)	
감수율(%)	8이상	26.1	
블리딩량의 비(%)	70이하	46	
압축 강도의 비(%)	3일	125이상	161
	7일	115이상	148
	28일	110이상	141
길이 변화의 비(%)	120이하	101	

표 7. 콘크리트 재료강도 시험결과

슬럼프(cm)	공기량(%)	온도 (°C)	압축 강도(MPa)	
			7일	28일
8	4.51	30	21.4	24.9

표 8. 강재의 기계적성질 및 화학성분

기계적성질	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)		연신율(%)	
		311	459		25
화학성분	C(10 ⁻⁴)	Si(10 ⁻³)	Mn(10 ⁻³)	P(10 ⁻⁴)	S(10 ⁻⁴)
	1,570	10	640	110	70

표 9. 내화성능 실험결과

실험체명	하중비 (%)	한계 처짐	온도 분포			내화 성능 (시간)
			노내온도 (°C)	평균온도 (°C)	최고온도 (°C)	
실험체 I	60.0	139.0	819.7	190.4	537.5	24분
실험체 II	40.0	140.4	860.3	233.9	629	30분
실험체 III	60.0	51.5	1109.7	303	473.4	180분
실험체 IV	43.1	148.5	864.6	231.51	620.7	31분
실험체 V	40.9	109.6	856.7	230.8	654.3	32분

4. 화재거동 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

표준화재조건에서 화재거동 실험결과는 표 9와 같고, 각 실험체의 화재거동은 그림 6과 같다.

한계처짐을 기준으로 동일 재하하중 비에서 내화성능을 비교한 결과 무보강 실험체(실험체 I)에 비해 강재의 강성저하를 보강하기 위해 철근을 매립한 실험체(실험체 IV, V)가 약 10분 정도 화재저항 성능이 증가 되는 것으로 확인되었다. 또한 재하 하중비가 유사한 실험체II와 실험체IV, V를 비교하면 내화성능은 유사하다. 내화피복재는 뿔칠 각도와 이에 따른 뿔칠재의 밀도, 작업조건 등의 영향을 복합적으로 받으나, 1시간 내화피복재를 뿔칠한 실험체(실험체III)의 경우 3시간 내화성능을 보였다.

그림 7은 표준 시간 가열온도와 노내의 온도 그래프이다. 표준화재 조건을 충분히 재현하였으며, 그림 8, 그림 9는 실험체의 화재 전·후 양상이다.

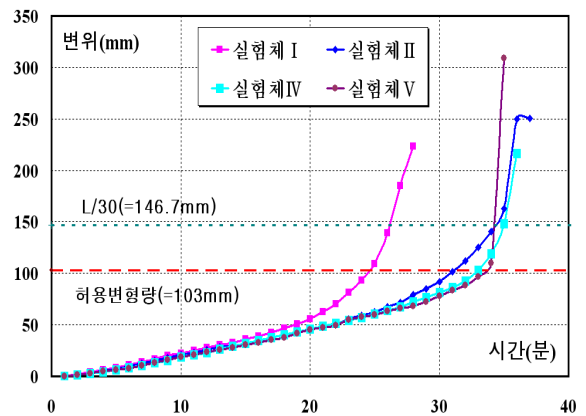


그림 6. 실험체별 처짐거동

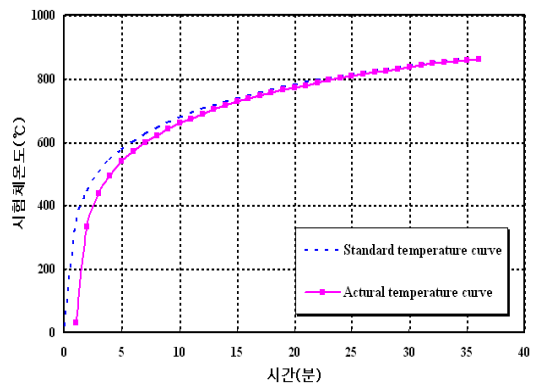


그림 7. 표준 시간-가열 온도와 실제 온도 곡선

4.2 보 전열특성

4.2.1 강재의 온도특성

그림 10, 그림 11은 강재 면에 설치된 열전대의 온도특성이다. 그림 중 범례 표기는 첫 번째 영문자의 경우 열

전대의 보 길이방향 위치로 'A'는 L/2, 'B'는 L/4이고, 두 번째 영문자는 보 단면방향 위치이며 'S'는 강제 표면, 'C'는 콘크리트 보 내부이다. 다음 숫자는 열전대 번호이며 그림 12와 같이 두 번째 숫자는 보 내부 최하단으로 부터의 거리(mm)이다. 열 특성을 정리한 각 그림의 표기는 동일하며, 열전대 번호는 그림 4와 같다.

그림 10은 실험체 I의 온도분포이다. 측정결과 1번 열전대는 20분이 경과하면서 센서에서 오류가 발생하였다. 측정된 보 표면의 강제온도는 보 내부 돌기에 설치된 열전대(열전대 2번)를 제외하면, 하부 플랜지로부터 슬래브 방향으로 갈수록 온도가 저하된다. 이것은 화재 노출면으로부터 투입된 일방향 열유동에 대한 콘크리트 재료의 열역학적인 영향이다.



그림 8. 하중재하 전 실험체 형상 및 노 내부 전경



그림 9. 하중재하 후 실험체 형상

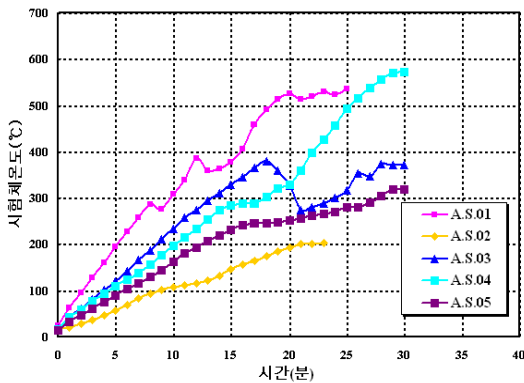


그림 10. 보 중앙부 강재의 온도변화

발화 후 25분이 경과하면 무피복 조건의 강제 표면은 위치에 따라 가스 버너의 분사 방향과 형태계수(view factor)의 영향으로 약 200°C 이상의 온도차를 보인다. 이때 강재의 온도는 하부 플랜지가 가장 높고, 온도는 600°C를 초과하여 부재내력은 50% 이상 저하된다.

그림 11은 실험체 V의 온도특성이다. 스펠 L/4위치에서 측정된 것이며, 4번, 5번 열전대 위치는 철근이다. 보강 철근의 온도는 표준화재 30분간 100°C 정도로 콘크리트의 수분으로 인해 온도상승이 억제되고 있으므로 강성의 저하는 발생하지 않는다. 또한 그림 10의 보 중앙부 온도분포와 비교하면 보 스펠 L/4위치의 온도는 근사하다.

4.2.2 강재의 온도특성과 고온 잔류 소성모멘트

TSC 합성보의 고온 잔류 소성모멘트는 식(5)를 활용하고, 그림 10의 보 중앙부 강재의 온도와 그림 4의 열전대 설치위치 중 최 하단의 측정점 T(01)자료 온도를 고려하여 산정할 수 있다.

표 10은 실험체 I의 강제부 온도와 잔류 소성모멘트 관계이다. 표준화재 조건에서 소성모멘트는 15분부터 감소가 시작되어 20분과 27분에서 각각 70%와 60% 이하의 모멘트가 잔류된다.

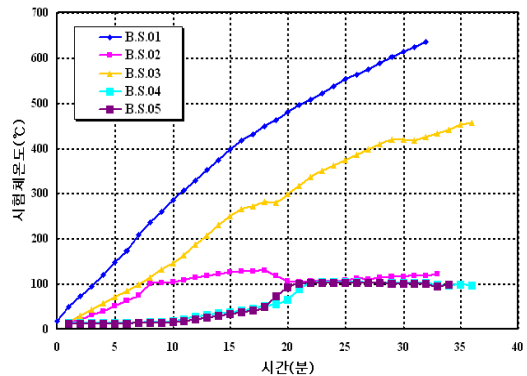


그림 11. 보 1/4위치의 강재의 온도변화

표 10. 강제부의 온도와 잔류 소성모멘트 관계

시간(분)	강제부 온도 (°C)	보 중앙 처짐 (mm)	잔류 소성 모멘트 비율(%)
0	24.2	0.0	100
5	195.1	-10.9	100
10	332.6	-23.2	100
15	436.3	-38.9	94
20	525.2	-62.6	70
25	572.7	-139.0	62
30	599.6	∞	57

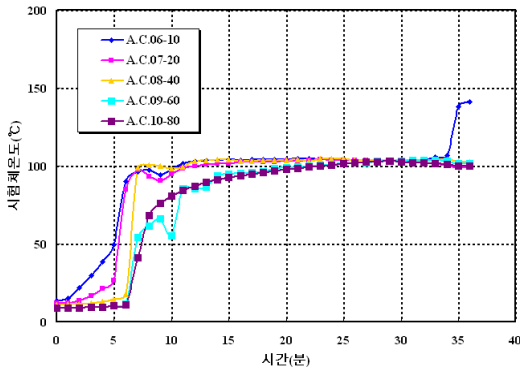


그림 12. 보 내부(좌측) 열전대의 온도변화

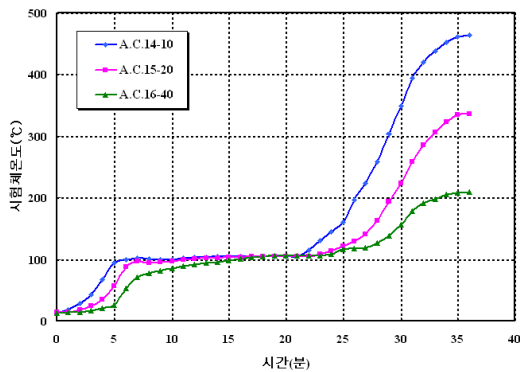


그림 13. 보 내부(우측) 열전대의 온도변화

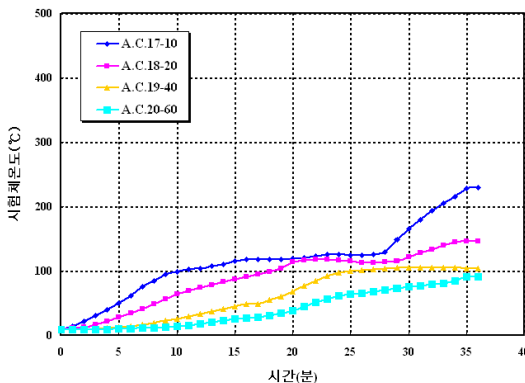


그림 14. 슬래브 열전대의 온도변화

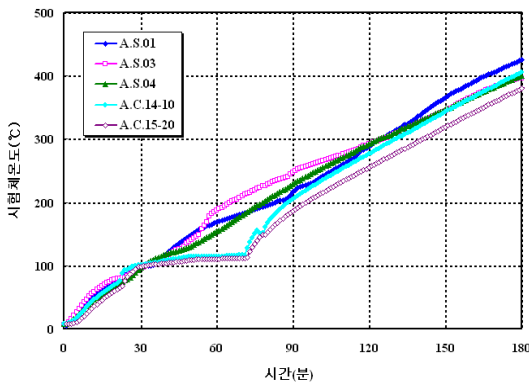


그림 15. 피복재 뿔칠 시 열전대의 온도변화

하중비 60% 조건에서 실험체I의 하중지지력이 보 중앙 처짐을 기준으로 그림 6에서 약 25분 동안 확보될 수 있음을 증명한 실험결과와 매우 근접한 결론이 도출된다. 그러므로 제안된 고온 소성모멘트 산정 기법을 실험으로부터 측정된 강재부의 온도 변화값과 연동하여 활용하면 TSC 합성보의 타당한 하중지지력 기준의 안전성 거동 산정이 가능하다고 판단된다.

4.2.3 콘크리트의 온도특성

그림 12~그림 14는 실험체II 내부에 설치한 열전대의 온도특성이다. 그림 12는 콘크리트 내부 중 보 좌측에 설치한 열전대에서 측정된 온도분포이며, 그림 13은 보 우측, 그림 14는 슬래브에 설치한 열전대의 온도분포이다. 그림 12와 그림 13의 온도특성 차는 횡 방향 화재노출면으로부터 열유동의 방향성에 대한 영향을 나타내고 있다.

그림 12의 열전대 6, 7, 8번과 그림 13의 열전대 14, 15, 16은 보 하부 길이방향에 대해 동일한 깊이에 설치한 것이다. 반면 열전대 6, 7과 14, 15는 실험 후 약 20분 까지 온도분포가 내부 수분의 기화로 인하여 100°C 이하로 큰 변화가 없다. 이때의 온도는 콘크리트 내부에 묻혀 있는 철근의 온도변화와 동일하다. 반면 약 30분이 경과하면서 보 우측에 설치한 14, 15번 열전대의 온도는 급격히 상승하여 400°C를 초과하고 있다. 이러한 원인은 보 측면(웹)으로 부터의 거리와 관계 되는 것으로 판단된다. 내화시간이 경과하면서 보 측면의 열전달로 보 우측의 열전대는 콘크리트의 열전달로 온도가 추가 상승 하고 있으나, 좌측의 열전대(열전대 6, 7번)는 온도가 상승하고 있지 않다. 그러므로 콘크리트 내부는 노출 표면으로부터 50mm가 이격되면 표준화재조건 30분간에는 강성의 변화가 없다고 판단된다.

4.2.4 뿔칠에 의한 보 내부의 온도특성

그림 15는 내화피복재를 뿔칠한 실험체III의 열전대 온도특성이다. 온도가 가장 많이 올라가는 강재 표면의 열전대 1, 3, 4번과 콘크리트 내부의 열전대 14, 15번의 온도분포이다. 1시간의 성능을 갖고 있는 내화피복재 이므로 1시간을 기준으로 하면, 내화피복재가 뿔칠 시 강재와 콘크리트 내부 온도는 모두 200°C 이하의 온도분포를 보인다. 반면 내화피복재의 내화인증 시간을 초과하면 강재와 내부의 콘크리트가 동일하게 급격히 상승하는 양상을 보인다.

실험체III은 1시간 내화피복재 뿔칠 후 3시간 까지 강재표면의 온도가 500°C이하를 유지하여 3시간 내화성능을 갖게 되었다. 그러나 이것은 내화피복재 물성 또는 시공의 부정확, 내화피복재의 미탈락으로 인한 내화성능 추가 확보, TSC 합성보가 갖는 내부 콘크리트의 영향 등 복합적인 것으로 1시간 뿔칠로 3시간의 성능을 확보한다는 결론을 내리기에는 부정확하며 추가 검토가 필요하다.

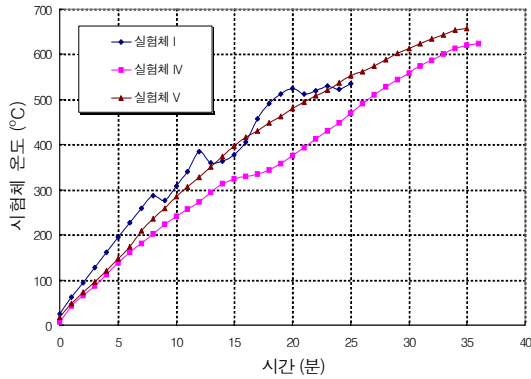


그림 16. 강제 하부 플랜지의 온도변화

4.3 하중비와 철근의 영향

본 연구에서는 부재내력에 대한 가력하중의 비(하중비)를 변수로 실험하였다. 실험체 I · II는 하중비를 60%와 40%로 조정된 경우이다. 표 9와 그림 6을 보면, 실험체 I에 비해 실험체 II는 하중이 2/3로 저감되었으나 내화성능시간은 7분의 추가 내화성능 시간을 확보할 수 있었다. 이는 표준화재의 온도의 발달이 로그 함수 기준으로 증가하고 있고 낮은 형상계수의 무피복 강제부의 온도발달 또한 그와 유사한 온도 발달에 기인한다. 또한 실험체 V는 하중비가 유사한 경우 콘크리트에 매립된 철근은 상대적으로 직접 화염에 노출된 강재에 비해 강성저하가 적게 발생하여, 내화성능의 추가적 확보가 가능한 것으로 판단된다.

그림 16은 화재조건 휨 거동에 가장 영향이 큰 강제 하부 플랜지의 온도(열전대 1번)를 기준으로 실험체 I · IV · V를 비교한 그래프이다. 내화성능시간을 기준으로 실험체 I과 실험체 V에 대해 보강에 의한 영향을 비교하면, 실험체 I의 내화성능 시간인 23분경과 시 최대 처짐은 93.3mm이며 이 때 보 하부 플랜지의 온도는 529.7°C (SRF₂=0.69)이나, 실험체 V는 동일 시간, 동일 위치에서는 각각 57.5mm, 520.8°C이며 약 60%정도 최대 처짐이 제어되었다. 실험체 IV · V의 한계 처짐이 발생한 시점의 내화성능 시간인 31분 32분으로 근소한 차이를 보이고 있으나 각각의 하부 플랜지 온도는 573.3°C로 634.5°C로 상당한 차이를 나타내고 있다. 이는 실험체 I에서 측정된 값과 경향성을 비교하였을 경우 실험체 V의 온도 발달이 타당하다고 판단되며 이 경우 잔류 강도가 0.39이다. 이러한 한계 처짐 발생의 온도를 고려하여 요구되는 피복의 적절한 산정과 이를 통한 거동의 최적화 조절이 요구된다.

현행 우리나라의 내화성능 시간은 건물의 층수와 연면적 등에 의해 1·2·3시간으로 구분되어 있으나, 철근을 보강하면 일상적으로 건축물에 내력이 작용하는 무피복 조건에서도 30분의 내화성능은 확보할 수 있는 것으로 확인되었다.

5. 결론

본 연구에서는 TSC 합성보의 표준화재조건 화재거동 및 전열특성을 실험을 통해 분석하였다. 고온에서의 소성 모멘트 변화 및 보강방안에 대한 효율성을 기초로 내화 시험을 실시하여 내화성능 향상방안에 관한 타당성여부를 검토하였다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) 동일 하중재하 조건에서 실험체 I과 철근 보강된 실험체 V의 고온 거동을 비교하면 구조적인 측면의 보강으로 효과적인 구조물의 고온 성능의 향상을 확보할 수 있음이 판단되면, 이는 높은 내화성능이 요구되는 조건에서 적절한 내화 피복과 동시에 적용될 경우 본 구조체에 대한 매우 경제적인 최적화 설계가 가능한 방안으로 사료된다.

(2) 실험체 II와 철근보강이 된 실험체 IV · V는 유사한 조건으로 가력 하중비를 고려하여 실험을 수행하였으며, 실험분석 결과 내화성능은 실험체 II 30분, 실험체 IV 31분, 실험체 V 32분으로 도출되었다. 이러한 양상은 직접 화염에 노출된 강재에 비해 콘크리트에 매립된 철근의 온도상승이 적어 강성저하가 낮기 때문으로 판단된다.

(3) 합성보의 보강에 따른 성능효율을 재하율 60%에 대해 검토한 결과 철근보강으로 인한 소성모멘트의 성능효율은 상온보다 고온에서 더 높아지는 것으로 나타났다.

(4) 내화피복재를 도포하여 측정된 실험체의 경우, 실험체 수량이 적어 신뢰성 있는 피복재의 영향을 평가하기 어렵다. 그러나 향후 내화피복재에 의한 내화성능 향상 방안은 피복재의 열역학적인 성능을 기반으로 휨 거동과 처짐, 주요부의 연동 온도를 조절하여 최적의 경제적인 내화성능을 도출할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구는 최근 사회적 관심이 크게 증가되고 있는 내화성능 평가를 위한 기초연구로 합성보의 내화성능 향상 방안을 모색하기 위해 실시되었다. 구조부재의 내화성능 향상 방안은 구조보강에 의한 성능향상과 적절한 뿔철 두께의 확보 등 다양한 방법이 적용 가능할 것으로 예측되는바 이를 위한 초기연구로 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원과 센구조 연구소의 지원으로 수행되었으며, 실험자료의 정리에 박원섭 및 김형준의 도움이 있었습니다.

참고문헌

1. Butcher E. G., Parnell A. C., "Designing for Fire Safety". pp.74-87, 1983

2. Centre for Advanced Engineering University of Canterbury, "Fire Engineering Design Guide", pp.49~61, 1994
3. Choi S. K., Burgess I. W., Plank R. J., "Behaviour of Lightweight Composite Trusses in Fire - A Case Study", Steel and Composite Structures, 7(2), pp. 105-118, 2007
4. Kruppa J., Zha B., "Fire Resistance of Composite Beams to Eurocode 4 Part 1.2" Journal of Constructional Steel Research, Vol. 33, pp.51~69, 1995
5. Wang Y. C., "Composite Beams with Partial Fire Protection" Fire Safety Journal, Vol. 30, pp.315~332, 1998
6. Choi S. K., Burgess I. W., Plank R. J., "Performance in Fire of Long-Span Composite Truss Systems", Engineering Structures, in press.
7. Bailey C. G., Burgess I. W., Plank R. J., 'Computer Simulation of a Full-Scale Structural Fire Test', The Structural Engineer, 74(6), pp. 93-100, 1996
8. 천성철, 주영광, 정광량, 김상대, "비대칭 유공 합성보 iTECH beam의 휨성능평가", 대한건축학회논문집 구조계 18권 4호, pp.67~74, 2002
9. 김상섭, 김상모, 김성배, 서동기, 김규석, "단순지지 T형 합성보의 휨거동에 관한 실험적 연구", 한국강구조학회논문집, 16권 2호 pp.225~233, 2004
10. 한상훈, 최승관, 김희주, "비대칭 H형강을 사용한 슬림플로어보의 내화성능에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집, 19권 4호 pp.235~246, 2006
11. 김성배, 최승관, 이창남, 김상섭, "TSC 합성보 내화성능에 관한 연구", 한국강구조학회 논문집, 제18권 1호, pp.113~122, 2006
12. 이승재, 강성덕, 최승관, 김명환, 김상대, 'iTECH 합성보의 내화성능에 대한 실험연구', 한국강구조학회 논문집, 제18권 5호, pp.643~653, 2006
13. KS F 2848, "단면형상계수에 따른 구조용 강재의 내화 피복 두께 산정방법, 한국산업규격, 2005
14. "건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙", 건설교통부령 523호, 2006
15. Ivan M. Viest, "Composite Construction Design for Buildings", 1997
16. British Standards Institution, "BS5950 part8 Structural use of steelwork in building - Code of practice for fire resistance design", 1990
17. KS F 2257, "건축 구조 부재의 내화 시험 방법", 한국산업규격, 1999

(接受: 2007. 8. 24)