

# TSC 합성보 내화성능 향상에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on the Fire Resistance Performance of the TSC Composite Beam

최 승 관<sup>1)\*</sup>, 이 철 호<sup>2)</sup>, 김 한 민<sup>3)</sup>, 김 성 배<sup>4)</sup>  
*Choi, Seng Kwan Lee, Choul Ho Kim, Han Min Kim, Sung Bae*

요약 : 3면이 폐쇄된 강판에 콘크리트를 채워 넣은 TSC(The SEN Steel Concrete)구조는 철근콘크리트와 철골구조의 장점을 추출하여 접목시킨 합성구조이다. 합성구조에 대한 화재거동 연구는 강재가 수행하는 인장부의 성능 저감에 따른 거동 분석이 주요 연구 방향이다. 본 연구에서는 TSC 보의 화재성능을 하중비 및 보강철근 함수의 영향을 고려하여 실험적 기법으로 분석하였다.

ABSTRACT : TSC structure is a type of composite beams, 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. This research aims to experimentally assess the in-fire performance of the TSC beam with respect to load ratio, additional reinforcements.

핵심 용어 : TSC 합성보, 화재거동, 하중비, 보강철근

KEYWORDS : TSC composite beam, fire performance, load ratio, additional reinforcement

### 1. 서론

지난 30여년간 합성구조는 강재부의 최적형상연구를 기반으로 다양한 중·장기간보에 관한 개발과 화재거동에 대한 안전성 및 경쟁력을 확보하기 위한 연구에서 그 주목할 만한 성장을 이루었다. 합성보의 내화거동에 관한 연구는 유럽 및 뉴질랜드의 국가 연구기관과 대학교에서 주로 수행되었으며, 이에 대한 결과는 구조설계 시방서와 설계 가이드로 널리 적용되고 있다. 국내에서도 이러한 영향으로 I-tech, TSC, Slim beam 등의 다양한 합성보가 제안되어 있으나, 적절한 화재조건에서의 거동 연구는 완료되지 못하였다.

본 연구는 국내에서 다수의 적용실적이 있는 TSC 보의 연구 성과를 검토한 결과 그 범위가 한계상태 휨 성능과 보-기둥 접합에 관하여 지향되었으며, 내화거동에 관한 연구는 기초적 고찰 단계이므로 이에 대한 선행실험으로 구성되었다.

이러한 연구의 배경에는 최근 국내의 구조물들이 초고층·

장기간 경향이 명확하게 추진되고 있는 시점에서 성능기반 연구로서 실 구조물의 화재거동에 대한 실험적 분석으로서 그 안전성의 증명이 요구되며, 이러한 연구의 성과는 추가로 대상 모델의 최적화 설계를 가능하게 함으로서 경제성을 확보할 수 있게 함에 있다.

기본적인 연구 개념은 현재 국내에서 적용되고 있는 사양적 설계에서 일반적으로 적용되고 있는 단순 내화피복의 도포기법의 적용에서 탈피하여, 사용하중 조건에서 고려된 모델의 거동 연구를 구조적인 변형을 통하여 요구 성능을 충족할 수 있는 다양한 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 단계로 무 피복 조건에서의 U자형 강재 내부에 타설된 콘크리트의 고온 조건에서 추가적인 인장응력을 확보할 수 있는 철근 배근을 인입하여 무 피복 조건에서 TSC 합성보의 내화 성능을 향상할 수 있는 방안에 대한 검토를 수행하였다.

- 1) 정희원, 한국건설기술연구원 화재및설비연구부 선임연구원, 공학박사  
(Tel. 031-369-0509, Fax. 031-369-0540, E-mail: sengkwanchoi@kict.re.kr)
- 2) 한국건설기술연구원 화재및설비연구부 연구원, 공학석사(chlee@kict.re.kr)
- 3) 한국건설기술연구원 화재및설비연구부 연구원, 공학사(renata81@kict.re.kr)
- 4) 정희원, (주)센구조연구소 연구팀장, 공학박사(ksb2020@senkuzo.co.kr)

### 2. TSC 합성보의 이론적 고찰

TSC 보는 그림 1에서 보는 것과 같이 철골 단면을 구조부

재의 인장축 외피에 배치하고 웨브에 해당하는 수직판을 양 측면에 분리 배치한 영구 거푸집에 콘크리트를 현장 타설하여 완성하는 합성보입니다. 이러한 형상에서는 외부 강재가 인장력을 콘크리트 슬래브가 압축력을 부담하여 단면 내력이 구성이 된다. 화재 조건에서는 인장응력이 형성이 되는 노출 강재부가 급속한 온도상승에 따른 강도저하로 단면의 성능저하가 발생한다. 이러한 취약점에 대한 보완을 본 연구에서는 구조적인 측면에서 보강철근의 추가로 수행하였으며 화재조건에서 성능에 대한 기여를 분석하였다.

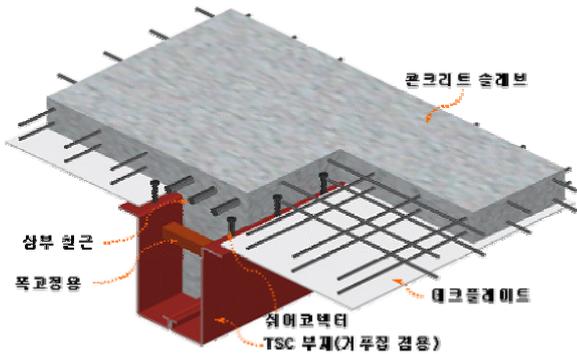


그림 1. TSC 보의 개념도

## 2.1 한계상태 소성휨내력 분석

소성 중립축의 위치를 결정한 후 압축내력과 인장응력 크기에 따른 플랜지 상단에서부터 중립축까지의 거리( $y_p$ )와 인장응력 거리( $y_s$ )를 도출해 낼 수 있으며, 이를 기반으로 하여 소성 모멘트(설계 모멘트)를 계산하여 보강방법에 따른 TSC 합성보의 내화성능을 예측한다. TSC 합성보에 적용할 재하하중산정을 위해 이 소성모멘트를 기준으로 실험 재하하중을 도출하였다.

TSC 보의 단면응력은 그림 2와 같이 분포하는 것으로 판단되며, 이때의 중립축은 플랜지 내부에 위치하는 것으로 판단된다. 상온에서 철근 보강을 고려하지 않는 조건에서 소성모멘트는 325.17(KN·m)로 도출되었다.

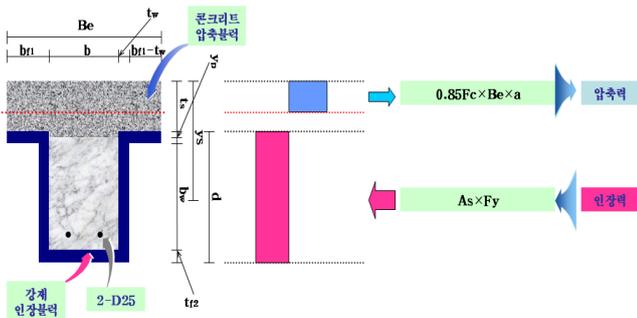


그림 2. TSC보 단면의 내력 분포

철근 배근을 고려한 TSC 합성보의 압축(C) 및 인장(F) 응력은 제시된 식 (1)을 토대로 예측할 수 있으며, 힘의 평행방정식을 토대로 중립축까지의 거리( $y_p$ )를 산정할 수 있는 식 (2)를 도출하였다.

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

$$C = 0.85F_c B_c T_s + 0.85F_c b y_p + 2F_y b_{f1} y_p \quad (1)$$

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

TSC 합성보 하부 인장응력과 각 개별 요소(하부플랜지, 상부플랜지, 웨브)별 인장응력을 비교하여 철근 보강효과를 포함한 인장응력거리( $y_s$ )를 식(3)과 같이 도출하였으며, 중립축 거리와 인장응력거리를 토대로 소성 휨내력 산정 식을 식(4)와 같이 제시할 수 있다.

$$y_s = \frac{b_{f1}F_y(t_{f1} - y_p)^2 + A_wF_y\left(\frac{b_w}{2} + t_{f1} - y_p\right)}{(A_s - (b_{f1} \times y_p \times 2)) \times F_y + A_{st}F_{st}} \quad (3)$$

$$+ \frac{A_{f2}F_y\left(b_w + \frac{t_{f2}}{2} + t_{f1} - y_p\right) + A_{st}F_{st}(d - y_p - t_{f2} - 50)}{(A_s - (b_{f1} \times y_p \times 2)) \times F_y + A_{st}F_{st}}$$

$$+ \frac{A'_tF_y(d - y_p - t_{f2} - h_t/2)}{(A_s - (b_{f1} \times y_p \times 2)) \times F_y + A_{st}F_{st}} + y_p$$

$$M_p = 0.85F_t t_s B_c \left(y_p + \frac{t_s}{2}\right) + 4f_y b_{f1} \frac{y_p^2}{2} \quad (4)$$

$$+ 0.85f_b \frac{y_p^2}{2} + f_y A_s (y_s - y_p) + A_{st}F_{st} (y_s - y)$$

표준화재조건에서 수행하는 실험에서 전열현상으로 인한 온도상승으로 철근의 성능저하를 막기 위하여 화재노출면인 단면의 밀면과 옆면으로부터 피복두께는 약 50mm이상을 확보 상온의 강성을 확보 하였다.

## 2.2 고온 소성휨내력 분석

내화 실험에서 합성보의 휨단면력의 변화와 철근 보강의 구조적인 측면에서 성능증가에 대한 평가는 식(4)의 소성모멘트 산정방법에서 강재부의 고온영향으로 인한 강도저감을 포함하여 단순화한 방법으로 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$M_p = 0.85F_t t_s B_e (y_p + \frac{t_s}{2}) + 4f_y b f_1 \frac{y_p^2}{2} SRF_{2.0} \quad (5)$$

$$+ 0.85f_y b \frac{y_p^2}{2} + f_y A_s (y_s - y_p) SRF_{2.0} + A_{st} F_{st} (y_s - y)$$

여기서, SRF2.0: 강재의 2% 한계변형 고온 잔류 응력

이러한 산정방법은 슬래브에서 형성되는 압축응력부와 철근 보강부의 강도 저하는 무시한다는 가정에서 산정된 것이다. 강재부의 고온 잔류응력은 BS5950 Pt8(BSI 1990)으로 부터 참고하여, 약 50% 강도손실을 유발하는 온도인 600℃와 약 80%의 강도 손실 유발하는 온도인 700℃에서의 강재의 강도잔류 고려하여 D25@2와 D29@2(SD400)의 두 경우를 고려하였다.

무보강 조건에서 재하율 60%의 하중을 적용한 경우 D25@2와 D29@2 보강에서 실 하중율은 각각 43%와 41%가 발생한다. 동일한 재하 상황에서 강재부의 온도가 600℃와 700℃ 경우에 무보강 조건에서는 115%와 219%의 하중율이 산정되며, D25@2 보강조건에서는 76%와 105%가, D29@2 보강조건에서는 70%와 104%가 산정된다. 이는 상온에서 보강을 통한 모멘트 성능 증가율 보다 고온에서의 보강에 따른 단면 성능의 향상이 높아진다고 분석되었으며, 이를 통해 철근의 보강 효율은 상온에서 보다 화재 상황에서 증가하는 특성이 있는 것으로 판단된다.

### 3. TSC 합성보 화재거동 실험계획

#### 3.1 시험체 설계 및 제원

TSC 보의 내화 거동 평가를 수행하기 위해 표 1과 같은 구조 실험체 제작을 하였다. 실험체의 춤은 350mm이며, 강재 플레이트 두께는 6mm를 사용한다. 콘크리트는 24MPa의 일반강도를 사용하며, 플레이트는 SS400강재를 사용하여 그림 3과 같이 제작한다. 강재 플레이트의 화재로 인한 성능 저하를 보완하기 위하여 TSC 보 하단에 철근을 배근하여 전체적인 인장강도의 저하가 발생하지 않도록 실험 계획을 수립하였으며, 콘크리트 슬래브에는 주근과 보조근·능근을 각각 배근하며 하부에는 데크 플레이트를 설치한다. 강재와 콘크리트와의 일체화를 위한 방법으로 전단 연결재를 사용하였으며, 열전대의 정확한 위치에 설치를 위해 사용 콘크리트와 같은 배합비로 특수 제작한 콘크리트 간격재를 철근에 고정시킨다.

TSC 보의 내화성능 평가를 위하여 하중재하·인장 철근 보강 등의 실험 변수를 표 2와 같이 산정하여 실험을 수행한다.

표 1. 실험체 상세 설계

실험체	스팬 (m)	깊이 (m)	실험체 크기 B*D	강재 두께 (mm)	콘크리트 압축강도	재료 강도 (MPa)	연결
강재부	4.4	0.35	350×270	6	24.9 MPa	콘크리트	전단 연결재 D19 @ 150
				추가 철근 배근		플레이트	
				2-D25 or 2-D29 능근 D10@ 200	항복 320 극한 480		
슬래브	4.4	0.12	120×600	주근 2-D22 보조근 4-D13 능근 D10 @ 200	평판 6mm	설계 강도 24	

표 2. 실험 변수 계획

보충	실험체 명	하중 비 (%)	피복	추가 철근 배근 (%)	재하하중 (KN)
350	실험체 I	60	무	무	261.4
	실험체 II	40			171.2
	실험체 III	60/43.1		2-D25	261.4
	실험체 IV	60/40.9		2-D29	

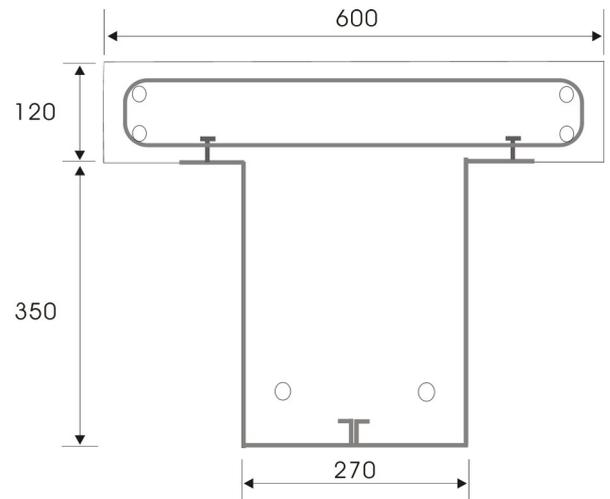


그림 3. TSC보의 단면 형상

TSC 보의 구조 부재로서의 성능 평가를 위해 재하 하중을 적용하여 실험을 실시하며, 단면과 재료 특성을 토대로 계산한 TSC 합성보의 소성모멘트를 계산한 수치 분석을 토대로 무 피복 조건에서 재하율(60%,40%)에 따른 재하하중을 산정하여 Model I&II 실험을 진행한다. 무 피복 조건에서의 실험체 Model III&IV는 TSC 보의 강제 부분이 화재 노출에 의해 인장 강도 저하가 발생할 경우 인장강도 보강을 위한 철근 배근이 TSC 보의 내화 성능을 유지 할 수 있는 설계 방법인지에 대한 평가와 최적 내화 성능 보안 방안을 도출하기 위한 실험 변수이다.

Model I, III & IV의 비교를 통해 고온 상황에서의 실험체의 온도에 의한 강도 저하 비율을 고려한 최적 내화성능 보안방안을 검토하며, 철근 배근량을 줄일 수 있는 경제성 있는 내화 성능 보완 방안 도출 가능성을 검토한다.

### 3.2 열전대 설치 계획

단면내의 열 분포를 측정하기 위하여 실험체에 열전대를 각각 40개소를 설치하여 실험을 수행하며, 이질재료의 사용으로 인한 열전달 오차를 줄이기 위하여 콘크리트 부재와 동일한 배합비로 양생한 간격재(50×100)를 특수 제작한다. 정확한 위치에의 열전대 설치를 위하여 특수제작 간격재에 위치 별로 보링을 하고, 그 곳에 열전대의 센서 부분을 삽입하여 고정 시킨다. 열전대 위치는 콘크리트의 보의 열 특성을 분석하기 위하여 그림4와 같이 배치하였으며, TSC 보 내부에 11개소, 철근에 2개소, 강제 표면에 2개소, 내부 고정철물에1개소, 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, 강제부분의 열 특성 분포를 분석하기 위해서 보의 하단부와 옆면 양단에 각각 열전대 설치를 고려하였다.

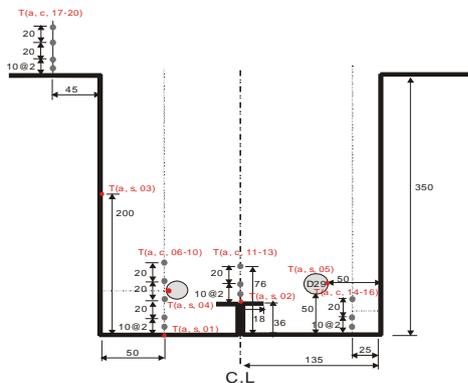


그림 4. 실험체 III & IV의 열전대 설치

### 3.3 하중 재하 및 거동 기준

하중재하는 그림 5와 같이 4점 가력 방식을 적용하며 TSC 보의 지지점간 거리는 4.4m로 화재노출 길이는 4.0m로 실험을 수행하였다. 하중은 무보강 조건 합성보의 중심부의 모멘트가 단면휨내력을 기준으로 요구량이 발생할 수 있도록 산정하였다(표 3).

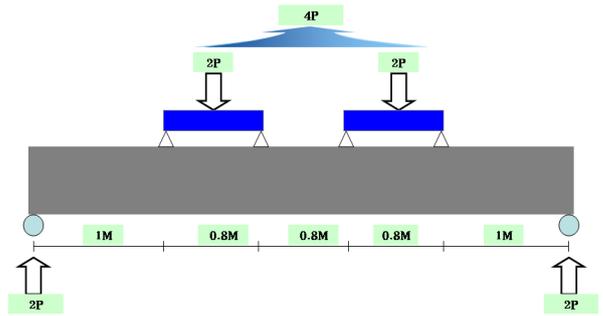


그림 5. TSC보 내화실험 재하하중 적용

표 3 실험체별 재하하중 및 허용 변형량

실험체명	M <sub>b</sub> (Kn·m)	가력 점수 (EA)	가력하중 2P(KN)	허용 변형량 (mm)	허용 변형속도 (mm/min)	L/30 (mm)
실험체 I	618	4	261.4	103	5.4	146.7
실험체 II	618		171.2			
실험체 III	860		261.4			
실험체 IV	905		261.4			

국내의 내화성능 평가방법은 1999년 ISO 834를 기준으로 개정된 한국산업규격 KS F 2257의 ‘건축구조 부재의 내화 시험방법’에 준하여 수행되고 있다. 내화 성능 평가를 위한 국내 구조물의 내화 거동 평가는 재화와 비 재하 방법에 대해서 규정하고 있다. 비 재하 시에는 온도를 기준으로 하여 구조체의 내화성능을 평가하며, 평가 기준은 구조체의 평균온도인 538℃(1,000°F), 최대온도 649℃(1,200°F)를 넘어서는 안 된다는 규정을 KS에서 표 3.과 같이 제시하고 있다. 재하 실험에서는 재하 성능 평가를 선택적으로 채택할 수 있으며, 하중지지력 판정을 기준으로 하여 변형량과 변형속도를 고려하는데, 부재의 변형량을 허용변형량( $D = \frac{L^2}{400d}$ )과 허용 변형속도( $\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d}$ )를 모두 초과 할 경우 구조적 붕괴상태로 판정하며, 전체 처짐의 L/30을 초과하지 않는다는

규정을 KS에서 제시하고 있다. 국내 구조요소의 내화성능 평가기준을 준용하여 본 실험에 적용한 TSC 보의 재하성능 기준은 허용변형량은 131mm로 계산되었으며, L/30이후의 성능 기준을 제시하는 허용변형속도는 5.38mm/min으로 아래 표 3.와 같이 제시할 수 있다.

## 4. TSC 화재거동 실험결과

### 4.1 처짐거동 분석

표준화재조건에서 실험체의 보 중앙부의 수직변위를 측정하여 제안된 처짐기준 내화성능과 그림 6에서 비교 하였다. 시험체-I와II는 24분과 30분의 성능을 보여 주었으며, 철근을 보강한 시험체-III와IV는 33분의 성능을 보여 주었다. 시험체-I과 시험체-II의 성능의 비교는 하중비의 거동에 대한 영향을 명확하게 나타내고 있는 것이다. 시험체-II, III과 IV의 하중비는 각 40%, 43%과 41%로서 이러한 내화 성능의 결과는 하부 TSC 강재에 비해 상대적으로 매립 철근이 내화 성능의 향상에 도움이 됨을 설명하고 있다.

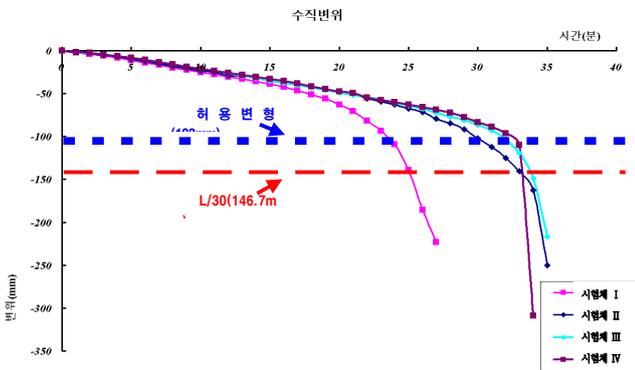


그림 6. 표준화재조건 실험체별 처짐거동

### 4.2 TSC 보의 전열특성

시간에 따른 구조요소의 온도변화를 분석하기 위하여, 강제 요소와 콘크리트 요소를 분류하여 그림 4와 같이 그룹을 지정하여 하부 강재로부터의 거리에 따른 온도변화특성을 정리 하였다. 시험체-IV를 대표 모델로 선정하여 강제부(그림 7), 보강철근(그림 8)의 온도변화, 강제 내부의 콘크리트(그림 9)와 슬래브의(그림 10) 온도변화를 화재노출면으로부터 깊이별로 시간을 기준으로 표현하였다.

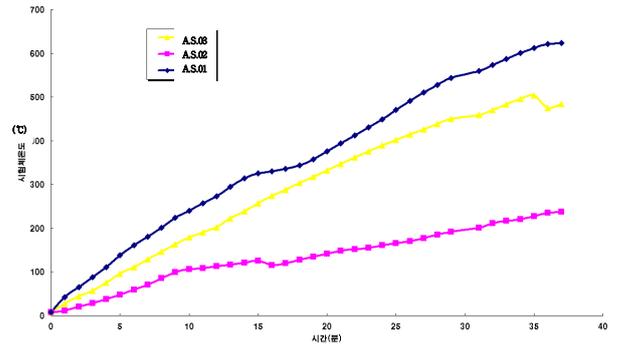


그림 7. 강제부의 온도변화

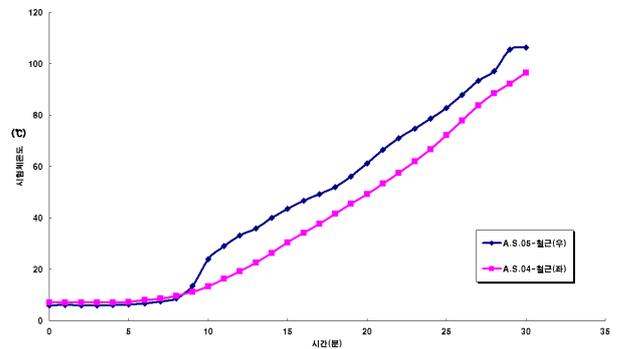


그림 8. 보강철근의 온도변화

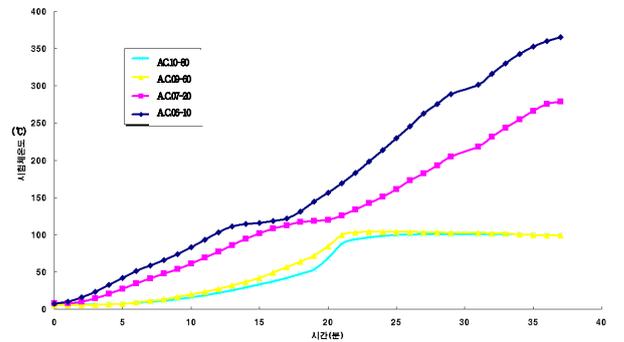


그림 9. 강제내부 콘크리트의 온도변화

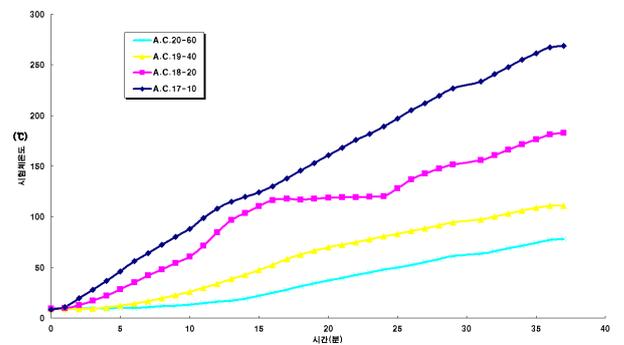


그림 10. 슬래브의 온도변화

## 5. 결론

본 연구에서는 TSC 합성보의 표준화재조건 화재거동 및 전열특성을 분석하였다. 이론적 고찰을 통해 고온에서의 소성모멘트 변화 및 보강방안에 대한 효율성을 분석하였으며, 화재실험을 토대로 내화성능 향상방안에 관한 타당성여부를 검토하였다.

- (1) TSC 보의 이론해석 결과 철근보강으로 인한 소성모멘트의 성능향상효율은 상온보다 고온에서 더 높아지는 것으로 분석되었다.
- (2) 실험체-II와 철근보강이 된 실험체-III,IV는 재하 하중비를 고려하여 유사하게 설계하여 실험을 수행하였으며, 실험분석 결과 내화성능은 32분과 33분으로 도출되었다. 그러나 콘크리트에 매립된 철근(최고온도 100℃내외)은 상대적으로 직접적 화염에 노출된 TSC 강재(최고 600℃내외)에 비해 강성저하가 적게 발생하여, 내화성능의 추가적 확보가 가능한 것으로 판단된다.
- (3) 실험체-I의 24분 내화성능을 기준으로 처짐 정도를 실험체-III과 비교한 분석한 결과 실험체-I은 하부플랜지의 최고온도는 522℃에 109.4mm처짐이 발생하였으나, 철근을 보강한 실험체III의 경우 540℃에서 59mm정도의 처짐이 발생하여 약 50%정도의 최대 처짐을 제어할 수 있는 것으로 분석되었다.
- (4) 향후 적용 피복제의 도포를 통한 성능향상을 확인하기 위한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단되며, 피복도포 후 온도변화의 신뢰성 있는 측정을 통해 피복사용 실험체와 보강방안 실험체의 내화성능을 분석할 필요성이 있다고 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 2005-2011년도 철도종합안전기술개발사업의 국가R&D과제지원으로 수행되었으며 연구지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- 김성배, 최승관, 이창남, 김상섭(2006), "TSC 합성보 내화성능에 관한 연구", 한국 강구조 학회 논문집, 제18권 1호, pp. 113~122
- 김상모, 김규섭(2003), "T형 합성보의 내력평가에 관한 연구", 한국 강구조 학회 논문집, 제15권 4호, pp.467~474

- KS F 2257-1, 6, 7(2005), "구조부재의 내화시험방법 - 보, 기둥", 한국산업규격
- (사) 한국강구조학회(2000), "강구조의 설계", 구미서관
- Lin-Hai Han, Jing-si Huo, Yong-Chang Wang(2005), "Compressive and Flexural Behaviour of Concrete Filled Steel Tubes after Exposure to Standard Fire", Journal of Constructional Steel Research 61, pp 882~901
- Y. C. Wang(1998), "Composite Beams with Partial Fire Protection" Fire Safety Journal 30, pp 315~332
- Ove Pettresson, Sven-Erik Magnusson, Jorgen Thor(1976), "Fire Engineering Design of Steel Structures", Swedish Institute of steel construction
- John A. Purkiss(1996), "Fire Safety Engineering Design of Structures", Butterworth Heinemann
- Y. C. Wang(2002), "Steel and Composite Structures - Behaviour and Design for Fire Safety", Spon Press
- British Standards Institution(1990) "BS 5950 Part 8 Structural use of steelwork in building - Code of practice for fire resistance design"
- CEN, "Eurocode 3.(1995) Design of Steel Structure Part 1.2: General Rules Structural fire design", pp 15-21
- Centre for Advanced Engineering University of Canterbury(1994), "Fire Engineering Design Guide", pp 49-61
- Franssen, J. M.(2000), Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire, Fire Safety Journal, 34, pp 191-207
- Morris W.A.(1998), "Guidelines for the construction of fire-resisting structural elements", Building Research Establishm