

TSC 합성보의 내화성능에 관한 연구

Study on the Fire Resistance Performance of the TSC Beam

김 성 배¹⁾ · 최 승 관^{2)†} · 이 창 남³⁾ · 김 상 섭⁴⁾

Kim, Sung Bae Choi, Seng Kwan Lee, Chang Nam Kim, Sang Seup

요약 : 복합 구조 시스템은 강재와 콘크리트의 합성으로 내화성능이 우수할 것으로 판단된다. 그러나 복합구조의 내화성능에 대한 연구는 아직 초기 단계로 기둥과 보 등의 부재에 대한 내화실험 결과가 일부 발표 되었으나 합성보에 대한 자료는 거의 없다. 이에 본 연구에서는 TSC 합성보의 내화성능 평가를 위해 내화실험과 수학적 및 수치 해석적인 방법을 통해 평가하였다. 내화실험은 형상의 종류와 가력 하중, 내화피복재 보강방법 등을 변수로 실험을 실시하였다. 또한 수치 해석 중 강재와 콘크리트의 재료특성은 Eurocode에 준하였으며 온도의 변화는 열전도 FE 해석과 수학적인 방법을 사용하였다.

ABSTRACT : The purpose of this paper is to evaluate the fire resistance of the TSC beam, a composite beam composed of a concrete beam enclosed by steel plates. Since a discrepancy was observed between the structural mechanisms of TSC and typical composite beams, the fire performances of the two beams are likewise believed to be partially dissimilar.

In this experiment, small and medium-sized TSC beams were tested under given conditions in the laboratory, with/without one of the most widely used spray-on fire protections in Korea. Furthermore, based on the steel and concrete properties under elevated temperatures that were obtained from Eurocode, temperature development across the section was suggested, using mathematical methods and the results of heat- transfer FE analyses. To determine the capacity of a modified plastic section, the fire performance of the model was also examined.

핵심 용어 : TSC 보, 합성보, 내화성능, 열전도 해석, 내화피복재

KEYWORDS : TSC Beam, Composite Beam, Fire Resistance, Heat Transfer Analyses, Spray-on Fire Protection

1. 서 론

국내의 내화성능 평가방법은 1999년 ISO 834를 기준으로 개정된 한국산업규격 KS F 2257(1999)의 '건축구조 부재의 내화 시험방법'에 준한다. 반면 내화성능은 내화피복재 등의 제품 사양에 의한 사양적 내화구조 기준을 적용하고 있으나, 실내 가연물의 종류와 양, 화재실의 규모, 화재 하중 등을 고려한 건축물의 내화성능 평가의 필요성을 요구하고 있다(민병렬 2001; Andrew H. Buchanan 2001).

현재 피난시간 확보를 위해 뽕칠 또는 부착하는 내화피복재의 경우 내화성능 평가는 구조부재에 부착 후 비재하 상태에

서 평가되고 있다. 그러나 구조부재의 성능 평가는 재하시험으로 진행되고 있으며, 모든 건축물은 상시하중을 받고 있는 상태이므로 비재하에 의한 내화피복재의 성능평가 방법은 실 조건과 상이한 문제점을 안고 있다.

국내에서 개발되어 적용되고 있는 복합구조시스템은 TSC 보(이지운 등 2004)와 iTECH(천성철 등 2002), HI-Beam(김육종 등 2001), Slim floor(문재대 등 2003) 등이 있으며 강재와 콘크리트의 합성으로 내화성능이 우수할 것으로 판단된다. 그러나 복합구조의 내화성능에 대한 연구는 아직 초기 단계로 기둥 및 보 등의 단위 부재에 대한 내화실험 결과가 일부 발표 되었다(권인규 등 2002).

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

1) 정회원, (주)센구조연구소 연구개발팀장, 공학박사

(Tel : 02-2629-3190, E-Mail : ksb2020@senkuzo.co.kr)

2) 교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구원, 공학박사

(Tel : 031-9100-308, Fax : 031-9100-381, E-Mail : sengkwanchoi@kict.re.kr)

3) 정회원, (주)센구조연구소 대표이사, 구조기술사(thesen@kornet.net)

4) 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 교수, 공학박사(kimss@kut.ac.kr)

그림 2의 TSC 합성보의 내화성능 평가를 위해 본 연구에서는 내화실험과 수치 해석을 수행하였다. 내화실험은 형상의 종류와 가력 하중, 내화피복재 보강방법 등을 변수로 실험을 실시하였다. 또한 수치 해석 중 강재와 콘크리트의 재료특성은 Eurocode로부터 고려하였으며 온도의 변화는 열전도 FE 해석과 수학적인 방법으로 산정하였다. 본 연구의 목적은 합성보의 내화성능평가를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 실험체 계획

표 1은 실험체 일람표이다. 실험체는 크기에 따라 소형과 중형으로 구분하였다. 소형 실험체는 춤이 250(mm), 판 두께 4.4(mm)이며 중형 실험체는 춤 300(mm), 판 두께 6.0(mm)이다.

내화쁨칠의 두께는 내화시간을 기준으로 0, 15, 25mm로 하였다. 내화피복재는 공인기관으로부터 1시간 15mm, 2시간 25mm, 3시간 35mm의 내화인증을 취득한 제품이다. 내화피복재의 선정은 현재 국내에서 사용되는 피복재 중 시장점유율이 가장 높은 A사 제품으로 임의 선정 하였고, 사용된 내화피복재의 중량 배합비는 표 2와 같다. 내화피복재의 주성분은 페라이트와 석고, 시멘트 등으로 구성되어 있으며 뜯칠 시 두께를 측정하여 시공오차가 0~3mm 이하가 되도록 관리하였다. 그 밖의 내화피복재의 시공관리는 제품의 특기사항에 준하였다. 그림 1은 내화피복재의 뜯칠 과정과 두께 측정 등의 시공과정을 나타낸 사진이다.

그림 3는 실험체의 단면형상과 온도 측정을 위한 열전대의 설치위치이다. 열전대는 실험체 내·외부의 온도 측정을 위해 설치하였다. 내부에 설치하는 열전대는 철근을 이용하여 위치를 고정시켰고, 실험체 중앙부의 축방향으로 등 간격이 되도록 하였다. 또한 TB-M-25 실험체는 내부의 길이방향 온도분포를 명확히 파악하기 위해 600(mm) 등 간격으로 추가 설치하였다. 외부에 설치한 열전대는 탈락이 발생하지 않도록 실험체에 고정시켰다. 열전대(Thermo couple)는 ASTM에 제시된 K 타입을 적용하였으며 온도 측정 범위는 -250~1260°C 구간이다. 온도 측정 오차는 0~1250°C 구간에서 ±2.5°C이다.



그림 1. 내화피복재의 시공 상황

실험체는 슬래브 120(mm)이고 보 춤은 250, 300(mm), 상부 슬래브 폭은 600(mm), 실험체 총 길이는 4,900 (mm), 지점간 간격은 4,400(mm)이다. 실험체 형상은 설계 조건을 기준으로 하였다.

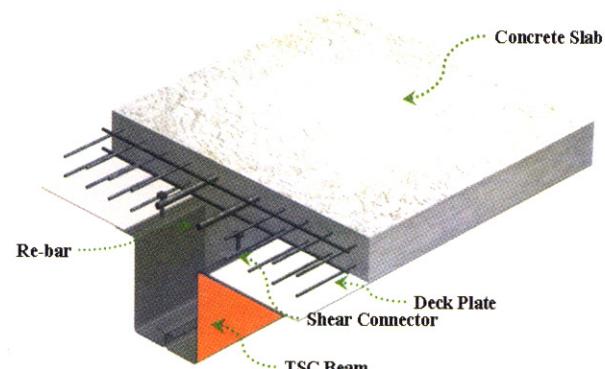
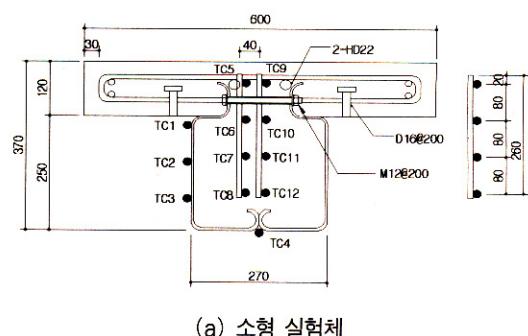
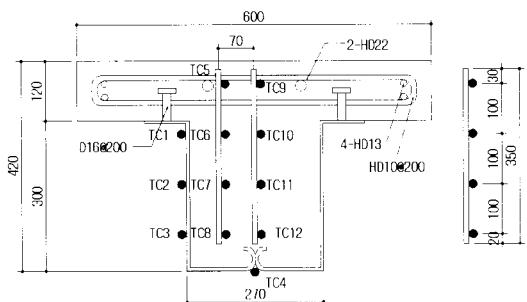


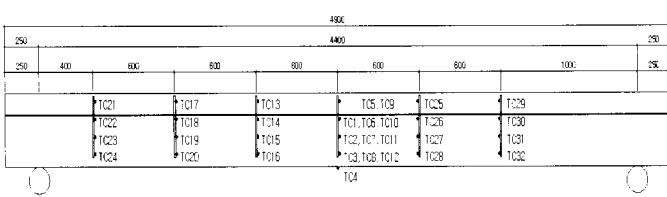
그림 2. TSC 합성보 형상



(a) 소형 실험체



(b) 중형 실험체



(c) TB-M-25 실험체의 열전대 설치 위치

그림 3. 실험체 형상 및 열전대 위치

표 1. 실험체 일람표

실험체명	구분	실험체 크기(mm)	플레이트 두께(mm)	괴복두께 (mm)	비고 (내화시간)
TB-S-N	소형 실험체	250×270×4.4	4.4	None	-
TB-S-15		250×270×4.4	4.4	15	1시간
TB-M-15	중형 실험체	300×270×6.0	6.0	15	1시간
TB-M-25		300×270×6.0	6.0	25	2시간

표 2. 내화피복재 중량 배합비

구분	페라이트	시멘트	석고	펄프	혼화제
중량비(%)	30	20	39	7	4

표 3. 하중지지력 판정기준 및 열전대 번호

실험체명	허용 변형량 (mm)	허용변형 속도 (mm/min)	$\frac{L}{30}$ (mm)	부재 내력비 (%)	열전대 번호
TB-S-N	131	5.8	146.7	130	TC1~TC12
TB-S-15				70	TC1~TC12
TB-M-15	115	5.1		100	TC1~TC14
TB-M-25				100	TC1~TC32

표 4. 강재의 인장강도 시험 결과

시험편	항복강도 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)	연신율 (%)
플레이트	PL-4.4	305.0	37.94
	PL-6.0	316.7	25.95
철근	D10	493.2	13.19
	D13	410.9	24.74
D22	508.9	612.9	24.66

표 5. 콘크리트 배합비 및 압축강도(28일) 시험결과

설계강도 (N/mm ²)	압축강도 (N/mm ²)	물시멘트비	S/A	단위 골재량 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
20.6	28.4	52.5	49.8	166	316	901	913

S : 잔골재량 G : 굽은 골재(최대치수 25mm)

2.2 가력 및 측정방법

실험체의 가력은 그림 4과 같다. 가력은 두 개의 오일 책을 이용하여 4점 가력 하였고, 처짐은 변위계를 이용하여 중앙에서 측정하였다. 가력은 한국산업규격의 KS F 2257-1(1999)에 의해 부재내력을 기준으로 하였다.

재하는 가력하중이 내화시간에 미치는 영향을 평가하기 위해 부재 내력을 기준으로 70, 100, 130(%)로 하였다. 사진 2는 실험체 세팅과 가력상황이다.

실험 시 하중 지지력 판정기준은 ISO 834-1(1999)와 KS F 2257-1에 의해 허용 변형량($D=L^2/400d$)과 허용변형속도($dD/dt=L^2/9000d$)를 모두 초과 시 구조적 붕괴로 판정하며, $L/30$ 을 초과하지 않아야 한다. 단, 내화피복을 실시한 경우 측정한 강재의 평균온도가 538°C(1,000°F), 측정된 어느 곳에서도 최대온도 649°C(1,200°F)를 넘어서는 안된다. 표 3은 이러한 하중 지지력 판정기준과 각 실험체별 열전대 설치 번호이다. 소형과 중형 실험체로 구분하여 허용 변형량과 허용 변형속도 등을 나타내었다.

2.3 소재 시험

실험체에 사용된 이형철근의 인장시험편은 KS B 0801(금속재료 인장시험편 규정)에 따라 10호 시험편으로 제작하였고, 강판(SS400)은 KS B 0801에 따라 5호 시험편으로 제작하여 인장시험을 실시하였으며, 결과는 표 4와 같다.

콘크리트의 압축강도 시험용 공시체는 KSF 2404에 따라 직경 100mm, 높이 200mm의 실린더형 몰드를 사용하여 제

작하였으며, 공시체는 본 실험체와 동일한 조건 하에서 양생킨 후 본 실험과 동시에 압축강도시험을 실시하였다. 캐핑(Capping) 후 실시한 콘크리트 압축강도는 3개 공시체의 평균값으로 하였으며, 결과는 표 5와 같다.

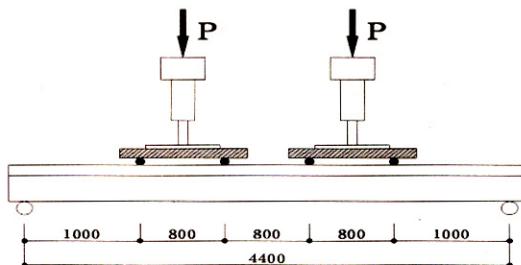


그림 4. 실험체 설치도

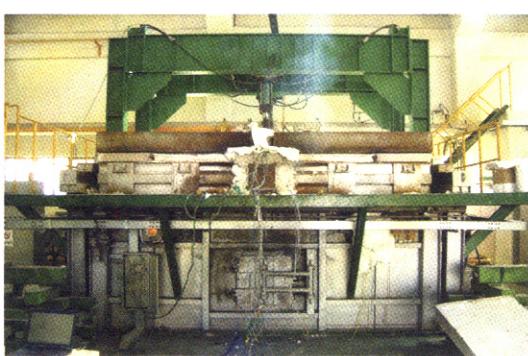


그림 5. 실험체 가력 상황

3. 실험 결과

3.1 실험 결과

그림 6은 표준 시간 가열온도와 노 내부에 부착된 열전대를 통해 측정한 온도 곡선이다. 가열로 내부의 온도는 한국산업 규격 KS F 2257에서 규정한 가열 온도 곡선의 백분율 편차 내에 있음을 확인할 수 있다.

내화성능 실험 결과는 표 6과 같다. 표에는 성능평가 기준인 하중지지력과 온도에 대해 정리하였다. 하중지지력은 변형과 변형률로 구분하였고, 부재에서 측정된 온도는 평균온도와 최고온도로 나누어 측정 시간과 그 때의 측정값을 정리하였다.

TB-S-N는 무피복 실험체이며 가력 하중은 부재 내력의 130%이다. 실험결과 하중 지지력은 28분, 실험체의 측정 온도는 16분으로 나타났으나, 내화피복을 실시하지 않은 경우 내화 성능은 하중 지지력으로만 평가 되므로 27분이 되었다.

TB-S-15는 소형 실험체이며 내화피복재를 1시간에 해당하는 15(mm) 뾰칠 하였고, 가력 하중은 부재 내력의 70%로

저감하였다. 실험 시 초기 설정 시간(120분)을 경과하여도 구조적 붕괴에 도달하지 않아 1시간 추가 가력 하였다. 변형률 측정은 2시간 가력 후 1시간 재가력으로 전체 3시간에 걸친 변형률 측정이 불가하여 측정치를 제외하였다.

TB-M-15는 중형 실험체이며, 내화피복재를 15(mm) 뾰칠 하였고, 가력 하중은 부재 내력의 100%로 하였다. 실험 결과 내화성능은 하중 지지력 보다 실험체 온도 상승으로 종료되었고 내화성능은 51분이다.

TB-M-25는 내화피복재를 2시간에 해당하는 25(mm) 뾰칠을 하였고, 가력 하중은 부재내력의 100%이다. 실험 결과 내화 성능은 TB-M-15 실험체와 동일하게 실험체 온도 상승으로 종료 되었고, 내화성능은 70분이다.

실험 결과 내화성능은 하중지지력에 의한 변형 또는 변형률 보다 실험체의 온도 상승에 의해 내화성능이 결정되었다. 또한 피복재의 두께에 의한 영향 보다 작용하는 가력하중의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

3.2 파괴 양상

모든 실험체는 하중을 재하 하는 동안 노와 실험체에 부착된 온도센서로 온도변화 측정을 하였고, 가열로 상부에 설치된 오일잭과 변위계로 변형과 하중을 측정하였다. 실험특성상 육안 관측은 불가능하며, 각 실험체의 실험 및 파괴 양상은 다음과 같다. 각 실험체는 약 10~40여 분이 경과 후 외부에 노출된 단면의 콘크리트 슬래브와 강재 보가 만나는 경계면에서 수증기와 함께 다량의 물이 발생하였다. 그림 7, 8는 실험체 가력 전 후의 형상이다.

표 6. 실험체의 내화성능

실험체명	하중 지지력		온도(°C)		내화성능 (분)
	변형(mm)	변형률 (mm/min)	평균온도	최고온도	
TB-S-N	225.9/ 28분	77.5/ 28분	543/ 16분	666/ 17분	27
TB-S-15	97.0/ 120+60분	-	484 ^{*1} / 120+57분	537/ 120+60분	120+60
TB-M-15	211.9/ 67분	53.9/ 67분	425 ^{*2} / 66분	659/ 52분	51
TB-M-25	215.6/ 78분	32.8/ 77분	689/ 71분	906/ 71분	70

* 1. 4번 열전대 측정 후 157분에서 탈락, 2. 1번 열전대 초기 탈락

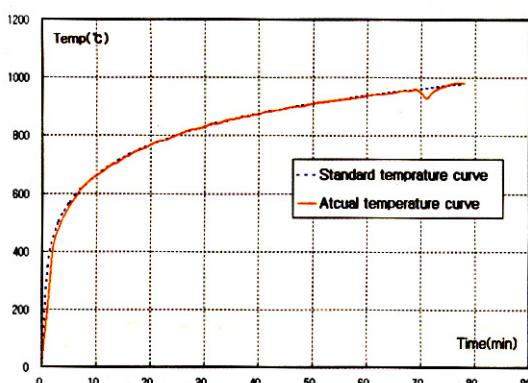


그림 6. 표준 시간-기열 온도와 실제 온도 곡선



그림 7. 가력 전 형상



그림 8. 가력 후 실험체 형상

실험체에 부착된 내화피복재는 지속 되는 재하로 보부재로 사용된 강재의 변형량과 피복재의 변형량이 상이하여 탈락하였고, 내화피복재의 탈락은 강재가 노출되는 결과가 되었다. 이 때 노출된 강재는 표면 온도가 급상승하여 강재의 내력이 저하하여 실험이 종료되었다.

그림 9는 각 실험체의 처짐량 그래프이다. 3시간 내화성능을 보인 실험체(TB-S-15)를 제외하고 일정 시간 이후 급격한 변형량 증가로 실험이 종료되었음을 보이고 있다.

그림 10은 이러한 문제점을 확인하기 위해 30×30×3(mm) 앵글을 실험체 3개소에 등 간격으로 설치하여 슬래브에서 철선으로 고정시킨 후 실험 하였고, 가력하중도 부재

내력의 70%로 저감하였다. 실험 종료 시 까지 일부 내화피복재가 부착된 상태에서 실험이 진행되었으며, 내화성능도 초기 예상치를 훨씬 초과하여 계획한 2시간 가력 후 1시간 추가하였다. 각 실험체의 파괴 양상을 정리하면, 내화성능은 내화피복재로 내화시간을 확보하는 경우 내화피복재의 탈락에 의한 내력저하와 작용 하중에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

3.3 중성화 측정

실험 종료 후 콘크리트 슬래브에 대해 중성화 검사를 하였다. 콘크리트는 500~580°C의 온도가 되면 식 (1)에 의한 화학반응이 발생한다.

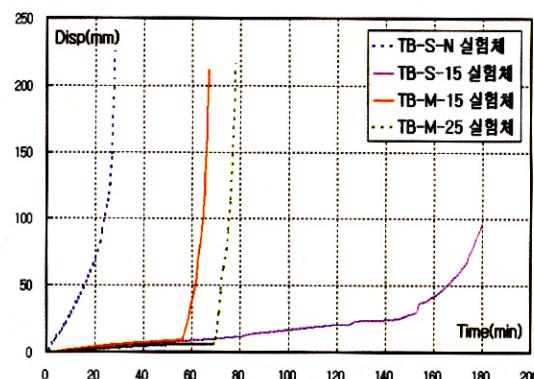
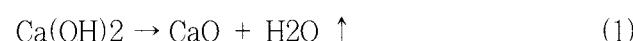


그림 9. 각 실험체의 처짐량



그림 10. 가력 후 내화 피복 탈락방지용 앵글 설치 형상

이러한 화학반응은 콘크리트 중에 분산된 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 주성분인 생석회(산화칼슘, CaO)와 물(H_2O)로 분해 되는 과정이다(일본건축학회, 1999). 실험 중 발생한 다량의 물은 화학반응 과정에서 발생한 것이다.



중성화 검사는 파쇄 면에 폐놀프탈레이인(농도 1%)과 에틸알

콜을 혼합한 액을 분무하여 알칼리성의 정도를 파악하며, 이 때 알칼리성은 적색, 중성은 무색으로 나타난다. 측정 개소는 슬래브 단부에 구멍을 일부 천공하여 확인한 것이 그림 12의 (a)이고 (b)는 일부 파쇄된 측면에 대해 측정하였다. 측정 결과 중성화는 나타나지 않았다.

3.4 실험체의 온도 특성

각 실험체는 그림 3와 표 3에 정리한 바와 같이 열전대를 부착하여 실험 중 온도변화를 측정하였다. 열전대는 와이어형 K-type으로 데이터 로그를 이용하여 온도변화를 측정하였다.

그림 11은 TB-M-25 실험체 표면과 실험체 외부로부터 1/4 지점(약 60mm) 떨어진 곳에 설치한 열전대의 온도변화 그래프이다. 외부에 부착한 1~4번 열전대는 거의 동일한 온도변화를 보이고 있으며, 70분 전후를 기점으로 급격한 온도 상승을 보여주고 있다.

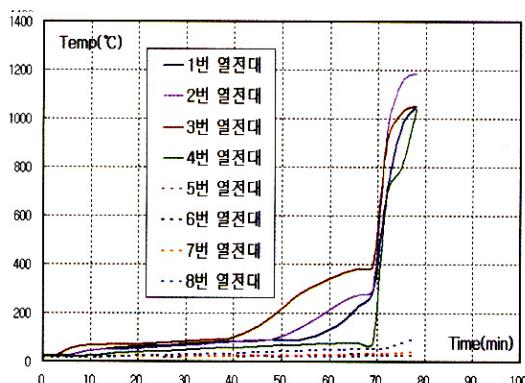


그림 11. 시간-온도 그래프(TB-M-25 실험체)

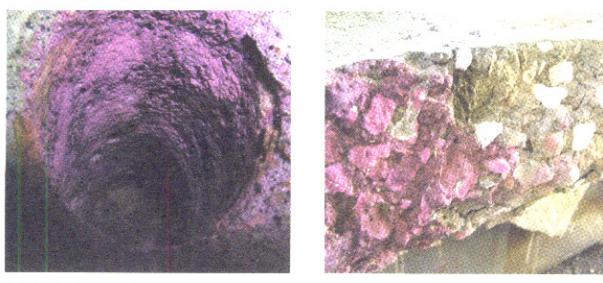


그림 12. 실험 종료 후 중성화 측정

이러한 현상은 외부에 부착된 내화피복재의 탈락에 의한 급격한 온도상승의 영향이다. 또한 내부에 설치한 5~8번 열전대의 경우 100°C 이하의 낮은 온도분포를 보이고 있어 내부 콘크리트의 경우 온도상승이 거의 없음을 확인할 수 있다.

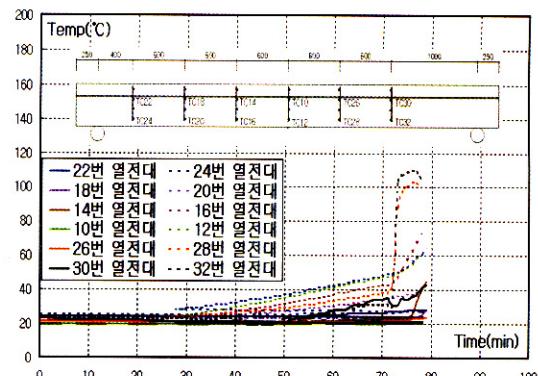


그림 13. 위치별 온도변화 그래프(TB-M-25 실험체)

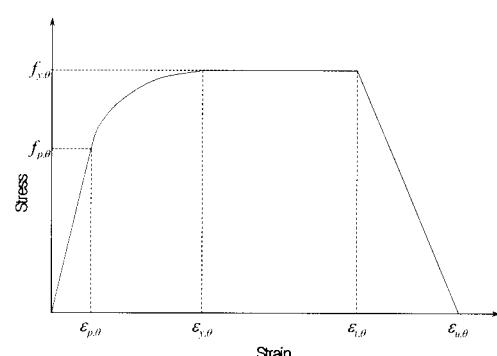


그림 14. 온도특성에 의한 강재의 응력 변형도 곡선

여기서, $f_{y,\theta}$: 항복강도
 $f_{p,\theta}$: 비례한도
 $\epsilon_{p,\theta}$: 항복강도 시 변형율
 $\epsilon_{y,\theta}$: 항복 변형율(변형율 2%)
 $\epsilon_{t,\theta}$: 항복강도 시 최대 변형율(변형율 15%)
 $\epsilon_{u,\theta}$: 최대 변형율(변형율 20%)

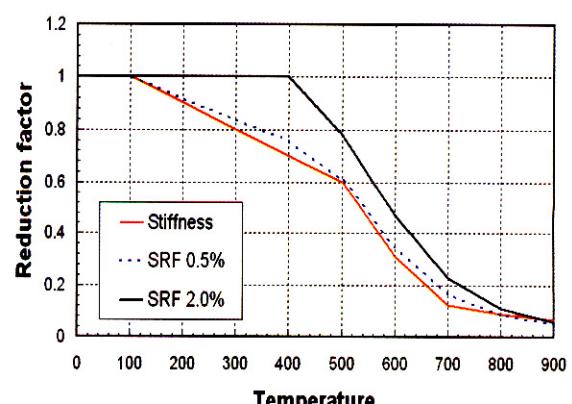


그림 15. 온도별 강재의 잔류 강도 및 강성

그림 13은 TB-M-25 실험체의 내부 중앙에 길이방향으로 설치한 열전대의 온도분포이다. 각 열전대의 번호와 설치위치는 그림 3의 (c)와 같다. 측정결과는 내화성능 시간인 70분

까지 거의 모든 열전대가 위치에 관계없이 50°C 이하의 낮은 온도분포를 보이고 있다. 또한 70분의 내화성능을 경과하면서 실험체 하부에 위치한 열전대에서 온도가 일부 상승하고 있으나 약 100°C 정도의 온도상승을 보인 후 실험이 종료되었다. 그러므로 내화뿜침을 하는 경우 내부의 콘크리트 온도는 크게 상승하지 않는 것으로 확인되었으며, 3.3절에서 실시한 콘크리트의 중성화가 확인되지 않은 것도 보 내부의 온도가 낮아 중성화가 발생할 수 있는 온도까지 상승하지 않았기 때문이다.

4. 수치 해석

4.1 고온 재료 특성

본 장에서는 TSC 보의 내화성능 평가를 위해 수학적 및 수치 해석적인 방법을 통해 내화 거동을 예측 및 분석하였다.

분석 모델 및 조건은 KS F 2257(1999)의 '건축구조 부재의 내화 시험방법' 및 건설교통부 고시 제2000-93호에 따라 그림 3(a)의 소형 TSC보를 60분간 ISO 표준화재 조건에 의해 3면 노출상태로 온도 분포 거동을 분석하였다. 강재와 콘크리트의 재료특성은 Eurocode로부터 고려하였으며 온도의 변화는 열전도 FE 해석과 수학적인 방법으로 산정하였고, 이를 기본으로 모델의 내화성능을 분석하였다.

고온에서 건설용 재료는 화학적 구성과 원자의 구조에 따라서 관련 특성인 강도, 강성, 비열, 전도율, 열팽창률 등이 온도와 함께 연동되어 비선형적으로 변화한다. 이는 화재 발생시 구조물에 복합적인 거동을 발생시키는 한 원인이 된다. 본 연구에서는 열전도 해석을 위하여 강재와 콘크리트 재료의 고온 특성을 Eurocode 3 & 4 Part 1.2 (Eurocode 3, 1993와 Eurocode 4, 1994)를 기본으로 설정하였다.

4.1.1 강재

고온에서 강재의 응력-변형률 곡선은 그림 14과 같다. 고온에서 강재의 응력-변형 특성은 선형적인 초기 변형을 지나서, 타원방정식을 사용하여 항복응력에 접근함으로 수치해석 연구를 수행함에 안정적인 수렴조건을 제공한다. 또한 필요에 따라 변형도 경화(strain hardening) 영향을 포함할 수 있으며, 한계 변형률을 20%까지 허용한다. 강도(2% 변형 한계 조건)는 약 300°C부터 열의 영향으로 그 값이 감소하여 800°C가 넘으면 잔류강도가 상온의 10%까지 감소하며, 강성 역시 강도가 변하는 것과 유사한 방식으로 감소한다. 그림 15는 온도 변화에 의한 강재의 0.5%와 2.0% 변형한계 조건의 잔류강도 및 강성의 변화 그래프이다.

강재의 비열 및 열전도율은 온도 변화와 연동하여 변화하는

특성을 갖고 있다. 또한 약 750°C 부터 일정기간 동안 지속되는 재료의 결정구조의 상변위 현상을 고려하여 비선형적으로 표현되는 것으로 발표되었고, 본 논문에서는 이러한 강재의 온도특성은 생략하였다. 밀도($\rho_a = 7,850 \text{ kg/m}^3$)는 온도 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있으므로 상온 값으로 적용했다.

4.1.2 일반 콘크리트

콘크리트는 재료의 비균질성 및 재령의 영향 등으로 온도 변화에 따른 열역학적 특성 분석이 다른 건설재료에 비해 상대적으로 복잡하고, 실험 방법에 의한 영향도 커서 정의에 어려움이 있다. 이러한 열역학적 특성 분석이 어려운 것은 부피의 주류를 이루는 골재의 영향력이 지배적이기 때문이다. 또한 고온 조건에서 강도와 탄성비 산정은 골재/시멘트 비율과 골재의 종류 및 크기가 중요한 변수로 인식이 되어 있다. Eurocode 4 Part 1.2에 정의 되어 있는 일반 콘크리트의 고온에서 압축 영역의 응력-변형률 곡선은 다음 식(2) 및 표 7과 같고, 열전도율은 식(3)과 같다.

표 7. 온도별 콘크리트의 잔류 응력 및 변형율

온도 (°C)	$f_{c,\theta}/f_{c,20\text{C}}$	$\epsilon_{c1,\theta} / 10^{-3}$
20	1.0	2.5
100	0.95	3.5
200	0.90	4.5
300	0.85	6.0
400	0.75	7.5
500	0.60	9.5
600	0.45	12.5
700	0.30	14.0
800	0.15	14.5
900	0.08	15.0
1000	0.04	15.0

$$f_c = f_{c,\theta} \left(\frac{\epsilon_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta}} \right) \frac{3}{2 + \left(\frac{\epsilon_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)^3} \quad (2)$$

여기서, $f_{c,\theta}$: 콘크리트의 설계기준강도(N/mm²)
 $\epsilon_{c1,\theta}$: 콘크리트 설계기준강도의 변형율

$$c_c = 2 - 0.24 \times (\theta_c/120) + 0.012 \times (\theta_c/120)^2 \quad (3)$$

$$20^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1,200^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$C_c = 900 + 80 \times (\theta_c/120) - 4 \times (\theta_c/120)^2$$

$$20^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 1,200^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

여기서. c_c : 열전도율(W/mK)
 C_a : 비열(J/kgK)

온도와 함께 비선형적 증가를 보이는 비열은 식 4와 같으나, 본 연구에서는 콘크리트 중량대비 4% 함수량을 고려하여 100~200°C 구간에서 부분적인 피크($C_c^* = 2750\text{J/kgK}$)를 포함하였다. 밀도($\rho_c = 2300\text{kg/m}^3$)는 온도의 변화와는 독립적으로 고정된 값을 사용하였다

4.2 내화 성능 분석

TSC 합성보에서 소성 힘 저항력은 강재가 인장응력을, 콘크리트 슬래브가 압축응력을 부담하도록 되어있다. 이에 각각의 응력 블록에서 화재조건의 영향을 고려하면 전체적인 변화에 대한 고찰이 가능하다. 표준 화재 조건의 가열로에서 강재의 온도변화는 많은 연구결과를 통해 기본적인 화재 실험 기간 동안 부재의 온도 산정에 대한 결과가 제시되어 있다.

본 연구에서는 무피복 및 피복 상태의 TSC 보 온도 변화에 대한 열역학적 분석을 수행하였다. 또한 60분간 내화성능 기준을 KS F 2257에서 제시한 강재의 평균 온도 538°C, 국부적인 최대 온도 649°C를 넘지 않는 조건을 만족시키도록 온도 변화를 고려한 단면의 소성모멘트 관점에서 단면력의 변화를 고찰 하였다.

4.2.1 무 피복 조건

가열로에서 무 피복 강재의 온도 산정은 Fourier Heat diffusion 공식을 무차원으로 적용하여 식 5와 같다(Eurocode 4, 1994).

식의 가정은 가열로 내부 고온 가스에서 강재 구조물로 열 전달의 역학적 조건은 가스를 통한 대류와 가열로 벽면에 의한 복사를 고려하며, 강재의 온도 변화는 두께에 따라 변화하지 않는 조건은 가정하고 있다. 그리고 단면 형상에 따른 온도 변화의 영향을 고려하기 위해 단면계수(A/V, section factor)를 포함하여 사용된 강재의 단면적과 화재에 노출된 비율을 고려하여 온도의 발달 정도를 산정할 수 있게 정의하였다.

TSC 보에서 강재부는 콘크리트와 접촉 조건을 고려하여 3면 노출 조건으로 식 5에 적용 하면 온도 변화는 그림 16과 같다. 이는 표준 화재 조건에서 약 12분과 16분이 지나면, 강재의 온도가 600°C와 700°C에 도달하게 된다. 이러한 온도특성은 그림 15를 참조하면 2.0% 변형한계에서 잔류 강도는 약 47%와 23% 정도가 된다. 이는 일반적인 사용하중을

고려하였을 경우 무 피복 상태에서 고려된 모델은 10여분 정도의 표준 화재 조건에서 구조적 안전성이 확보됨을 확인할 수 있다.

$$\Delta\theta_a = \frac{\alpha_c + \alpha_r}{C_a\rho_a} \cdot \frac{A}{V} \cdot (\theta_f - \theta_a) \cdot \Delta t \quad (5)$$

여기서. α_c : 대류열 전달 계수
 α_r : 복사열 전달 계수
 $\left[= \Phi \left(\frac{5.67 \times 10^{-8} \epsilon_{res}}{\theta_i - \theta_a} \right) \left((\theta_i + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right) \right]$
 Φ : 형상 함수
 ϵ_{res} : 종결 방사율
 C_a : 강재의 비열(J/kgK)
 ρ_a : 강재의 밀도(kg/m³)
 A : 단위 길이 당 강재의 노출 면적(m²/m)
 V : 단위 길이 당 강재의 체적(m³/m)
 θ_i : 시간(Δt)변화에 의한 평균 가스 온도(°C)
 θ_a : 종료 시 강재 온도(°C)
 Δt : 시간 차(s)

표준 화재 조건에서 일반콘크리트를 사용 시 TSC 보의 압축블록을 포함한 콘크리트의 온도 변화를 고찰하였다. 열전도 해석은 TSC 보 대칭 단면의 절반을 FE 소프트웨어인 FPRCBC-T를 사용하여 수행하였다(Huang, Z., 1996). 그림 17은 표준 화재 조건에서 일반 콘크리트를 사용한 TSC 보의 시간별 온도분포 변화이다. 본 해석에서는 일반적으로 검증된 열역학적인 관련 계수를 사용하였으며 (Andrew H. Buchanan 2001), 4%의 수분 함량 조건에서 수행 되었다. 고려된 모델의 소성중립축의 위치가 슬라브의 윗부분으로부터 30cm 이내에 존재함을 고려하였을 때, 60분간의 표준화재 조건에서 온도의 변화는 200°C 이내이다. 이는 식 2와 표 7을 참고하면 화재 내구 기간 내 소성중립축의 윗부분에서 강도의 저감은 무시할 수 있음을 인식할 수 있다.

무 피복 상태에서 TSC 보의 온도 변화를 고찰 하면 압축응력 블록의 강도 감소는 미미하다. 그러나 인장 응력부분의 감소는 10분정도가 경과하면 급격히 진행되어 화재상태의 사용하중에 대한 60분간의 내구성을 확보하는 것에는 어려움이 있으며, 인장 응력 블럭 보강을 위한 피복이 필요함이 확인되었다. 이러한 해석결과는 식 5가 보수적인 관점에서 정의된 결과이며, 그 밖의 복합구조의 경우도 거의 유사한 결과를 갖는 것으로 확인되고 있다. 또한 한국산업규격 KS F 2257에 의하면 하중 지지력은 내화 피복을 실시한 경우 측정 온도에 의해 구조적 붕괴로 판정할 수 있으나, 무피복은 평균 온도와 최대 온도가 아니고 하중 지지력으로 판정된다. 이러한 판정 기준에 대한 영향과 보수적인 관점에서 정의된 식 등으로 해석 치가 실험 결과 및 실구조물과 약간의 차이가 있을 수 있다.

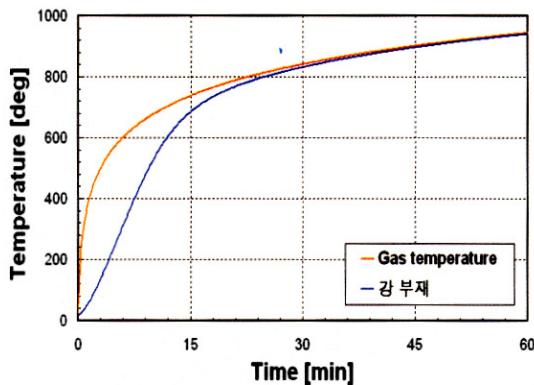


그림 16. 무 피복 조건의 TSC 보 온도 곡선

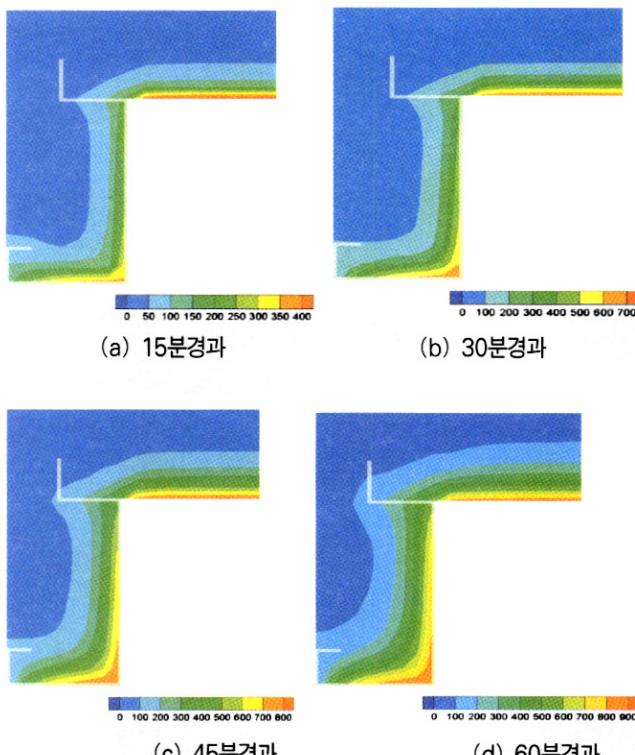


그림 17. TSC 보의 시간에 따른 온도 분포 변화

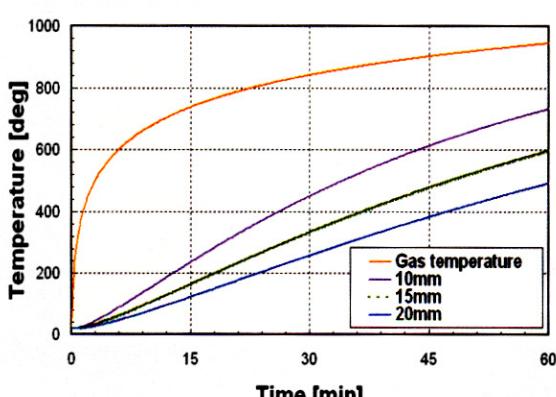


그림 18. 피복재 사용 시 TSC보의 강재 온도 변화

4.2.2 피복 조건

피복된 강재의 온도 변화 고찰은 피복물질의 열전도 특성을 고려하여 부재에 온도 전도를 산정하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 이는 식 5를 기본으로 피복물질의 열 특성을 포함하면 식 6과 같다.

$$\Delta\theta_a = \frac{\lambda_i/d_i}{c_a\rho_a} \cdot \frac{A}{V} \cdot \frac{1}{1+\xi/3} \cdot (\theta_t - \theta_a) \cdot \Delta t - [(e^{\xi/10} - 1)\theta_t]$$

$$\xi = \frac{c_i d_i A_i}{c_a \rho_a V}$$
(6)

여기서, λ_i : 단열재의 열전도율(W/mK)

d_i : 단열재 두께(m)

c_i : 단열재의 비열(J/kgK)

A : 강재의 단위 길이 당 단열재 면적(m^2/m)

ρ_i : 단열재의 밀도(kg/m^3)

$\Delta\theta_t$: 시간(Δt)변화에 의한 온도 상승

수치해석에 사용된 단열재는 무기섬유 뼈칠용 재료(단위질량 : 300kg/m², 전도율 : 0.12W/mK, 비열 : 1200/kgK)이며 두께 10mm와 15mm, 20mm를 TSC 보의 강재에 적용 하였을 경우, 표준화재 조건에서 강재의 온도변화는 식 6을 이용하여 산정하였다.

그림 12는 표준화재 조건에서 내화피복재를 사용한 경우의 TSC보의 강재 부분 온도 변화이다. 피복 두께가 15mm와 20mm 경우 부재의 온도가 각 600°C와 500°C까지 60분간의 화재에서 증가하는 것을 고려하면, KS F 2257에서 제시한 조건을 만족시키기 위하여 약 17.5mm 정도의 내화피복재가 필요함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 요구된 온도에서 강의 약 60% 잔류응력을 고려하면 사용하중에 대해 적절한 대응능력이 주어진다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 복합구조인 합성보의 내화성능을 실험과 수치해석을 통해 평가하였다. 한정된 실험체 수로 충분하게 성능을 평가할 수 없으나 합성구조의 내화성능에 대한 기초 자료로 제시하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 합성보의 내화성능은 작용하는 부재내력크기와 내화피복재의 부착 여부가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러므로 철골 및 합성부재에 사용하는 내화피복재는 구조 부재가 상시 하중을 받고 있으므로 변형을 흡수할 수 있는 재료특성의 확보와 이를 기초한 시험방

법의 검토가 필요하다.

- (2) TSC 합성보의 내화성능은 60분간의 표준 화재 조건에서 열전도 해석을 기본으로 분석한 결과 무피복 조건에서는 강재(인장블록) 온도의 급격한 증가로 인해 적절한 피복이 요구되며, 콘크리트 슬래브의 압축블록은 온도의 영향이 거의 없음이 확인되었다. 또한 피복재의 열 특성을 고려한 내화시간 산정은 프로그램을 이용한 해석으로 합성보 부재의 온도변화를 검증할 수 있다.
- (3) 외부에 내화피복을 하는 경우 내부 콘크리트는 내화시간 까지 실험체 전체에 걸쳐 온도변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 TSC 합성보의 실험과 해석으로 복합구조의 내화성능을 검증하였다. 실험결과 내화성능은 내화피복재의 부착과 재하력이 큰 영향을 미치며, 해석으로 내화성능의 평가 가능성을 확인하였다. 그러나 실험실 여건으로 실험체 규모가 제한되어 부재 크기에 의한 축열의 영향 등을 평가하기 어렵고 내화실험 시 재하력의 영향을 통한 내화성능평가 등이 검토 되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- KS F 2257(1999), “건축 구조 부재의 내화 시험 방법”, 한국 산업규격.
- 건설교통부 고시(2000) 제2000-93호
- 민병렬(2001) “국내 내화법규 및 제도”, 대한건축학회 국제세미나, 내화기술 발전방향
- 김옥종, 문정호, 이리형(2001) ‘단부 RC조와 중앙부 철골조로 이루어진 RS 보의 전단내력에 관한 연구’, 대한건축학회 논문집, 17권 6호, pp. 27~34
- 권인규, 지남용, 이세현(2002) “철골 기둥 및 보부재의 허용온도에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 구조계, 18권

10호, pp. 45~52

천성철, 주영규, 정광량, 김상대(2002) “비대칭 유공 합성보 iTECH beam의 휨성능평가”, 대한건축학회 논문집, 18권 4호 pp. 67~74

문재대, 곽명근, 허병욱, 배규웅, 문태섭(2003) “층고 절감형 합성보의 휨성능에 관한 실험적 연구”, 학술발표회 논문집, 한국강구조학회, pp. 485~492

이지운, 김도훈, 김성배, 이창남, 김상섭, 김규석(2004) “TSC 합성보의 제작방법에 따른 구조적 거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 24권 1호, pp. 59~62

ISO 834-1(1999), Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction and Materials.

Andrew H. Buchanan(2001) “Structural Design for Fire Safety”, John Wiley & Son, LTD

European Committee for Standardization, ENV 1993-1-2: Eurocode 3(1993): Design of Steel Structures. Part 1.2: General Rules: Structural Design for Fire, Brussels, BE

European Committee for Standardization, ENV 1994-1-2: Eurocode 4(1994): Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1.2: General Rules: Structural Fire Design, Brussels, BE, 1994.

Huang, Z., Platten, A and Roberts, J.(1996) “Non-linear finite element model to predict temperature histories within reinforced concrete in fires”, Building and Environment, 31(2), pp. 109-118

AISC(2003), “Steel Design Guide 19, Fire Resistance of Structural Steel Framing”

日本建築學會(1999), “鋼構造耐火設計指針”

日本建築學會(2004), “建物の火災診断及び補修・補強方法”

(접수일자 : 2005. 10. 15 / 심사일 2005. 11. 1 /

심사완료일 2005. 12. 12)