

TSC 보 내화성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fire Resistance Performance of the TSC Beam

○ 함 정 태* 김 성 배* 이 창 남* 최 승 관** 민 병 렬** 김 상 섭***
Ham, Jung-Tae Kim, Sung-Bae Lee, Chang-Nam Choi, Seng-Kwan Min Byung-Yeol Kim, Sang-Seup

Abstract

The purpose of this experiment is to evaluate the fire resistance of TSC beam. TSC beam is a type of composite beams that is enclosed by steel plate and cast inside with concrete. The fire resistance of TSC is expected to be different from that of traditional steel beam because there are some obvious dissimilarities in the shapes of sections between the two beams. In this experiment, we applied small size TSC beam in original size of TSC beam regarding given condition of laboratory, and we applied the most widely used spray-on protection in Korea. Based on the experiment which is mentioned above, we will provide evaluation results of fire resistance of TSC beam.

키워드 : TSC 보, 합성보, 내화성능, 내화피복

key word : TSC Beam, Composite Beam, Fire Resistance, Spray-on Protection

1. 서론

국내의 내화성능 평가방법은 1999년 ISO 834를 기준으로 개정된 한국산업규격 KS F 2257의 '건축구조 부재의 내화 시험방법'에 의하고 있다⁽¹⁾. 반면 내화성능은 코팅제 등의 제품 사양에 의한 사양적 내화구조 기준을 적용하고 있으나, 일부에서는 실내 가연물의 종류와 양, 화재실의 규모, 화재 하중 등을 고려한 건축물의 내화성능 평가의 필요성을 요구하고 있다⁽²⁾.

현재 피난시간 확보를 위해 뿔칠 또는 부착하는 코팅재의 경우 내화성능 평가는 구조부재에 설치 후 비재하 상태에서 평가되고 있다. 그러나 구조부재의 성능 평가는 재하시험으로 진행 되고 있으며, 모든 건축물은 상시하중을 받고 있는 상태이므로 비재하에 의한 코팅재의 성능 평가 방법은 실 조건과 상이한 문제점을 안고 있다.

국내에서 개발되어 적용되고 있는 복합 구조 시스템 중 TSC 보와 iTECH, HI-Beam, Slim floor 등은 강재와 콘크리트의 합성으로 내화에 우수할 것으로 판단된다. 반면 이러한 복합구조의 내화성능에 대한 연구는 아직 초기 단계로 부재에 대한 내화실험 결과가 일부 발표 되었으나⁽³⁾ 합성보에 대한 자료는 거의 없다.

이에 본 연구에서는 국내에서 개발한 TSC 합성보⁽⁴⁾를 대상으로 내화실험을 하였다. TSC 합성보는 그림 1과 같이 외부의 강재와 내부의 콘크리트가 조합되어 콘크리트에 의한 축열효과 등으로 내화성능이 우수할 것으로 판단된다. 실험 변수는 형상의 종류와 가력 하중, 코팅제 보강방법 등을 변수로 실험을 실시하였으며, 합성보의 내화성능 평가를 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 실험체 계획

표 1은 실험체 일람표이다. 실험체는 크기에 따라 소형과 중형으로 구분하였고, 내화뿔칠은 내화시간을 기준으로 없는 경우와 15, 25mm로 하였다. 내화피복재는 공인기관으로부터 15mm 1시간, 25mm 2시간의 내화인증을 취득한 제품이다. 내화피복재의 선정은 현재 국내에서 사용되는 피복재 중 시장점유율이 가장 높은 A사 제품으로 임의 선정 하였다. 내화피복재의 중량 배합비는 표 2와 같다.

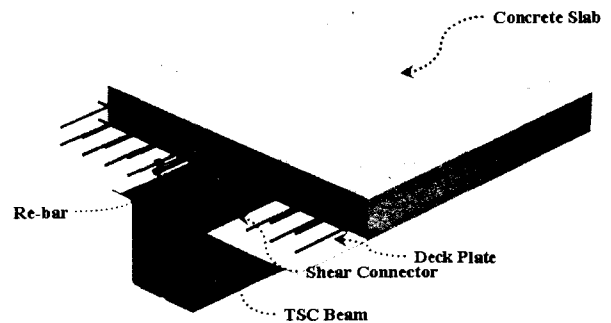
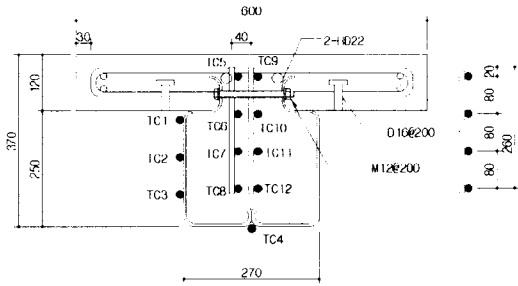


그림 1. TSC 합성보 형상

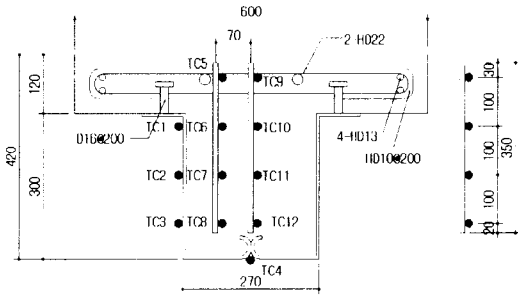
표 1. 실험체 일람표

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

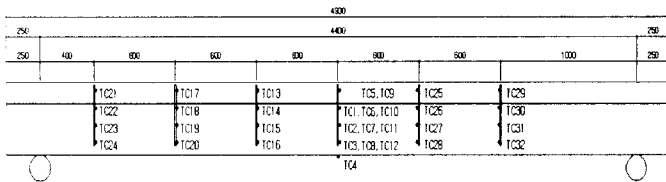
1) 정희원, (주)센구조연구소
2) 정희원, 한국건설기술연구원
3) 정희원, 한국기술교육대학교 건축학부 교수



(a) 소형 실험체



(b) 중형 실험체



(c) TB-M-25 실험체의 열전대 설치 위치
그림 2. 실험체 형상 및 열전대 위치

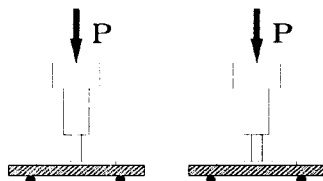


그림 3. 실험체 설치도

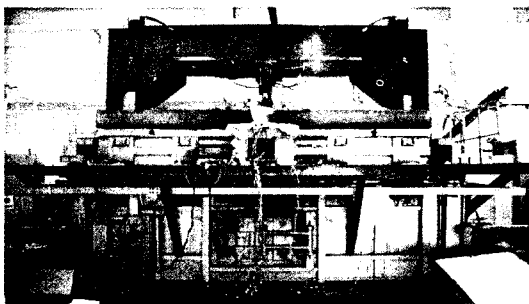


사진 1. 실험체 가력 상황

그림 2는 실험체의 단면형상과 실험체의 온도 측정을 위한 열전대의 설치위치를 함께 나타내었다. 실험체는 슬래브를 포함하여 보 축이 370, 420(mm)이고, 상부 슬래브가 600(mm), 실험체 총 길이는 4,900(mm), 지점간 간격은 4,400(mm)이다. 실험체 형상은 실험실 조건을 기준으로 하였다.

2.2 가력 및 측정방법

실험체의 가력은 그림 3과 같다. 가력은 두 개의 오일 잭을 이용하여 4점 가력하였고, 처짐은 변위계를 이용하여 중앙에서 측정하였다. 가력은 한국산업규격의 KS F 2257-1에 의해 부재내력을 기준으로 하였고, 가력 하중은 부재 응력을 기준으로 70, 100, 130(%)로 하였다. 사진 1은 실험체 세팅과 가력상황이다.

표 2는 하중 지지력 판정기준과 각 실험체별 열전대 설치 번호이며 위치는 그림 2와 같다. 하중 지지력 판정기준은 허용 변형량($D=L^2/400d$)과 허용 변형속도($dD/dt=L^2/9000d$)를 모두 초과 시 구조적 붕괴로 판정하며, $L/30$ 을 초과하지 않는다. 단, 내화피복을 실시한 경우 측정된 강재의 평균온도가 $538^{\circ}\text{C}(1,000^{\circ}\text{F})$, 측정된 어느 곳에서도 최대온도 $649^{\circ}\text{C}(1,200^{\circ}\text{F})$ 를 넘어서는 안 된다.

표 2. 내화피복재 중량 배합비

| 구분 | 펄라이트 | 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 (tf/cm ²) | 인장강도 (tf/cm ²) | 연신율 (%) |
|------|----------------------------|----------------------------|---------|
| 플레이트 | PL-4.4 | 3.11 | 37.94 |
| | PL-6.0 | 3.23 | 25.95 |
| 철근 | D10 | 5.03 | 13.19 |
| | D13 | 4.19 | 24.74 |
| | D22 | 5.19 | 24.66 |

표 5. 콘크리트 배합비 및 압축강도(28일) 시험결과

| 실재강도 (kgf/cm ²) | 압축강도 (kgf/cm ²) | 물시멘트비 | S/A | 단위 골재량 (kg/m ³) | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------|------|-----------------------------|-----|-----|-----|
| | | | | W | C | S | G |
| 210.0 | 290.0 | 52.5 | 49.8 | 166 | 316 | 901 | 913 |

S : 잔골재량 G : 굵은 골재(최대치수 25mm)

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 |
| B-M-15 | 211.9/ 67분 | 53.9/ 67분 | 705*2/ 57분 | 858/ 57분 | 51 |
| B-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

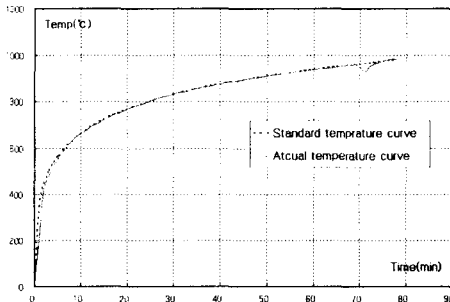


그림 4. 표준 시간-가열 온도와 실제 온도 곡선

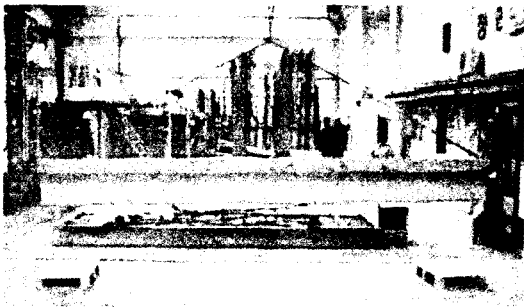


사진 2. 가력 종료 후 실험체 형상

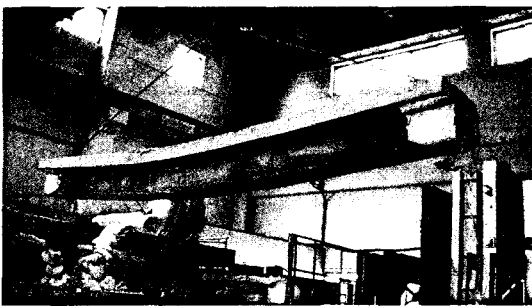


사진 3. 가력 전 형상

2.3 소재 시험

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

3. 실험 결과

3.1 실험 결과

그림 4는 표준 시간 가열온도와 노 내부에 부착된 열전대를 통해 측정된 온도 곡선이다. 노내의 온도는 표준 가열 온도 곡선의 백분율 편차 내에 있음을 확인할 수 있다.

각 실험체의 내화성능 평가 결과는 표 6과 같다. 표에는 성능평가 기준인 하중지지력과 부재온도 등에 대해 측정치와 그 때의 시간, 내화성능을 나타내었다. TB-S-15 실험체는 초기 설정된 내화시간을 초과하여도 구조적 붕괴에 도달하지 않아 추가로 1시간 재가력 하였다. 실험 결과 내화성능은 피복재의 두께에 의한 영향 보다 작용하는 부재내력의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 또한 하중지지력에 의한 변형 또는 변형률에 의한 영향 보다 실험체의 온도 상승에 의해 내화성능이 결정되었다.

3.2 파괴 양상

모든 실험체는 하중이 재하 되는 동안 노와 실험체에 부착된 온도센서에 의한 온도변화와, 변위계에 의한 변형과 하중측정만이 가능하며 육안에 의한 관측은 실험특성상 불가능하다. 각 실험체의 실험 및 파괴 진행에 대한 특이사항은 다음과 같다.

각 실험체는 약 10~40여 분이 경과 후 외부에 노출된 단면의 콘크리트 슬래브 하부에서 수증기와 함께 일부 다량의 물이 발생하였다. 이것은 콘크리트 중에 분산된 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 주성분인 석고(CaO)와 물(H₂O)로 분해되는 과정에서 생성된 것이다.

사진 2, 3은 실험체 가력 전 후의 파괴양상이다. 실험체에 부착된 내화피복재는 하중이 재하 되면서 부재의 변형과 피복재의 변형률이 상이하여 피복재 탈락에 의한 강재의 급격한 내력저하로 인해 실험이 종료되었다. 그림 5는 각 실험체의 처짐량 그래프이다. 3시간 내화성능을 보인 실험체(TB-S-15)를 제외하고 일정 시간 이후 급격한 변형량 증가로 실험이 종료되었음을 보이고 있다.

사진 4는 이러한 문제점을 확인하기 위해 30X30X3(mm)의 앵글을 실험체 3개소에 등 간격으로 설치하여 슬래브에서 철선으로 고정시킨 후 실험 하였고, 가력하중도 부재내력의 70%로 저감하였다. 실험 종료 시 까지 일부 내화피복재가 부착된 상태에서 실험이 진행되었으며 내화성능도 초기 예상치를 훨씬 초과하여 2시간 내화성능 평가 후 1시간 추가 가력하였다. 그러므로 내화피복재로 내화시간을 확보하는 경우 내화성능은 내화피복재의 탈락에 의한 내력저하가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

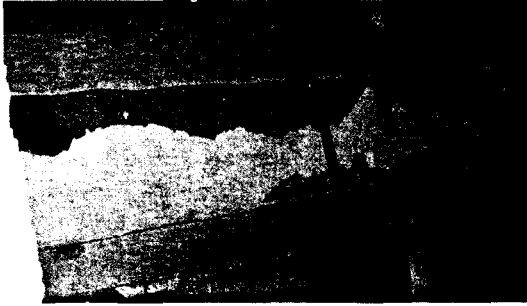


사진 4. 내화 피복 탈락방지용 앵글 설치 실험체 - 가력 종료 후

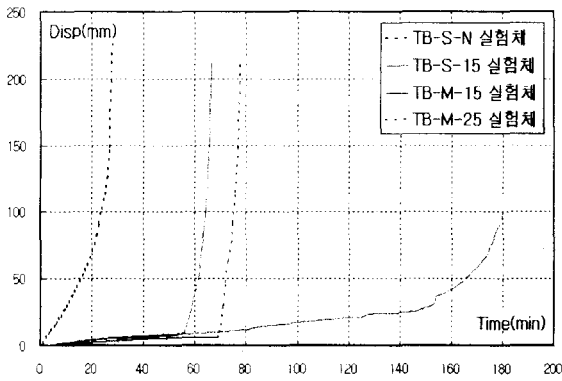


그림 5. 각 실험체의 처짐량

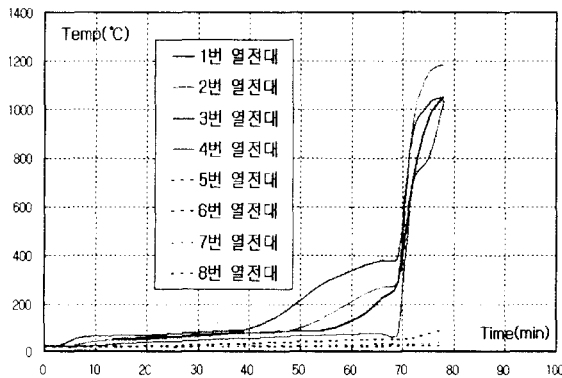


그림 6. 시간-온도 그래프(TB-M-25 실험체)

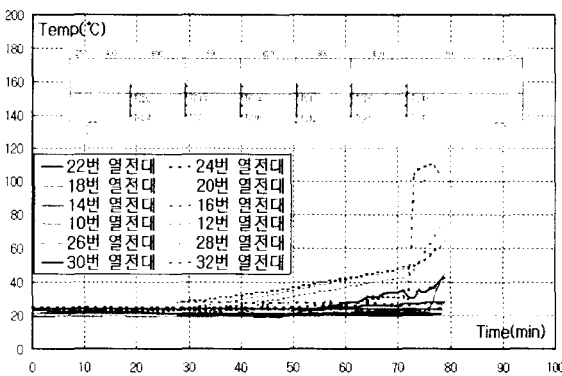


그림 7. 위치별 온도변화(TB-M-25 실험체)

3.3 실험체의 온도 특성

각 실험체는 그림 2와 표 3에 정리한 바와 같이 열전대를 부착하여 실험 중 온도변화를 측정하였다. 열전대는 와이어형으로 데이터 로그를 이용하여 온도변화를 측정하였다.

그림 6은 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 온도상승을 보여주고 있다. 이는 외부에 부착된 내화피복재의 탈락에 의한 급격한 온도상승의 영향이다. 또한 1/4지점에 설치한 열전대의 경우 100℃ 이하의 낮은 온도분포를 보이고 있어 내부 콘크리트의 경우 온도상승이 거의 없음을 확인할 수 있다.

그림 7은 실험체 중앙에 길이방향으로 설치한 열전대의 온도분포이다. 내화성능 시간인 70분 까지 거의 모든 열전대가 위치에 관계없이 100℃ 이하의 낮은 온도분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 복합구조인 합성보에 대한 내화성능을 실험을 통해 평가하였다. 내화성능은 사회적 관심이 많은 반면 그 성능을 평가하기 어려운 부분이 많고, 구조체에 대한 내화성능 평가는 아직 자료가 부족하다. 또한 복합구조인 합성보의 특성 평가는 실험 자료가 거의 없다. 이에 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 내화피복재로 내화시간을 확보하는 경우 내화성능은 내화피복재의 탈락에 의한 구조재의 내력저하가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
2. 내화성능은 피복재의 두께에 의한 영향 보다 작용하는 부재내력의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.
3. 외부에 내화피복을 하는 경우 내부 콘크리트는 내화시간 까지 실험체 전체에 걸쳐 온도변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. KS F 2257, 건축 구조 부재의 내화 시험 방법, 1999.
2. 민병렬 “국내 내화법규 및 제도”, 대한건축학회 국제세미나, 내화기술 발전방향, 2001. 11.
3. 권인규, 지남용, 이세현 “철골 기둥 및 보부재의 허용온도에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 구조계, 18권 10호, pp45~52, 2002. 10.
4. 이지운, 김도훈, 김성배, 이창남, 김상섭, 김규석 “TSC 합성보의 제작방법에 따른 구조적 거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, 24권 1호, pp59~62, 2004. 4.
5. Andrew H. Buchanan “Structural Design for Fire Safety”, John Wiley & Son, LTD, 2001.
6. 日本建築學會, “鋼構造耐火設計指針”, 1999.