

## 합성트러스 보의 내화성능에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Fire Resistance of Composite Truss Beam

박원섭 · 김흥열<sup>†</sup> · 김형준

Won-Sup Park · Heung-Youl Kim<sup>†</sup> · Hyung-Jun Kim

한국건설기술연구원

(2009. 11. 18. 접수/2009. 12. 11. 채택)

### 요 약

합성트러스는 북미에서 고층건물 및 장지간 건축 구조물에 널리 사용되어지고 있는 구조물의 형태로 비슷한 다른 건축 구조에 비하여 빠른 시공 속도와 낮은 경간비와 자중비의 장점이 있다. 12~18m 경간 범위에서는 가장 경쟁력이 있는 구조물의 형태로 알려져 있다. WTC 붕괴 사고 이후, 화재 시 구조물의 내화거동에 관한 연구의 필요성이 부각됨에 따라 화재와 관계된 여러 분야에서의 연구가 세계적으로 활발하게 진행 중에 있다. 본 연구에서 수행된 실험에서 화염에 직접 노출된 트러스 강재 부재의 경우 짧은 가열시간에도 불구하고, 700°C 이내의 온도 분포를 보이며 콘크리트 내부에 위치한 센서의 경우는 200°C 이내의 온도 분포를 보였다. 20mm 사재의 경우, 구조물의 처짐은 3분을 전후하여 빠른 처짐 분포를 보이며 파괴되었으나, 25mm, 35mm, 45mm 사재의 경우, 구조물은 파괴되지 않았으나 모두 15분 이내에 L/20의 처짐 기준에 도달하였다.

### ABSTRACT

The composite truss has been widely used for tall buildings and long-span structures in North America. As compared with other similar structures, it has merits such as reduction of construction period, low span/depth ratio, low dead weight and so on. It has the most effective trait for structures with long span of 12~18m. After collapse of WTC, the fire resistance behaviors of structures have been actively conducted under various fire conditions in several country. This study showed that the surface temperature of steel member in the composite truss beam was reached to 700°C under the fire condition of a short time. Under the same condition, the temperature in concrete was within 200°C. The composite truss beam with 20mm bracing was collapsed by rapid deflection after about 3minutes. However, the beams with 25mm, 35mm, and 45mm bracing were not collapsed, even though those were reached to deflection standard of L/20 within 15minutes.

**Key words** : Composite truss, Fire resistance, Deflection, Temperature, Fracture

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 목적

합성 트러스는 1960년대 중반부터 현재까지 북미에서 고층 건물 및 중·장지간 구조물에 매우 넓게 응용되어온 구조물의 형태이다. 다른 유사 구조물에 비하여 낮은 Span/Depth 비율, 빠른 시공속도 그리고 낮은

자중비, 사재와 현재 사이의 공간을 통해 설비 시설을 설치할 수 있는 장점을 기반으로 18m 이상의 지간 거리에서 가장 경쟁력 있는 구조시스템으로 인식되어 왔다.<sup>1)</sup> 2001년 WTC(World Trade Center) 테러 사고 이후, 화재 시 내화 거동에 대한 추가적인 연구가 필요함을 인식하고 여러 분야에서 화재에 대한 연구를 활발하게 수행하고 있다.<sup>4)</sup> 본 연구는 WTC 1&2에서 사용된 구조물과 유사한 합성트러스 구조물의 내화 거동에 대한 실험적 연구를 수행하기 위한 선행연구이다.

<sup>†</sup>E-mail: hykim@kict.re.kr

합성 건축 구조물은 화재 시 콘크리트 부분에는 열전달이 작게 나타나지만 노출된 강재의 경우 고온에 의하여 고유의 강성을 잃게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 내화 뿔철재나 내화 도료 등을 이용하여 화재에 노출되는 부분의 강성저하를 줄이려는 노력을 하고 있다.

본 연구는 표준 화재 조건하에 하중비와 사재의 크기에 따른 합성트러스의 내화거동을 평가·분석하기 위하여 수행되었다.

## 2. 합성트러스 보 내화 실험 계획

### 2.1 실험변수 및 시험체 제작

합성트러스 시험을 위하여 4개의 시험체가 BS 5950 Part 1의 기준에 의하여 설계 되었으며, Span/Depth 비율은 15로서(길이 4.2m, 춤 0.28m) 실제 건물에 응용되고 있는 장지간 합성 트러스의 비율을 고려하였다. 상현재와 하현재는 CT형강(75 × 100 × 6 × 9), 사재는 double L형강(45 × 45 × 6, 35 × 35 × 6, 25 × 25 × 5, 20 × 20 × 5)으로 설계 하였으며, 6mm 필렛 용접(E51 electrode)을 사용하여 부재를 연결하였고, 강종은 모두 SS400( $P_y = 245 \text{ N/mm}^2$ )을 사용하였다. 슬래브는 60mm의 Topping과 75mm의 Rib로 구성되었으며, 바닥 강판 위에 일반콘크리트( $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$ )를 타설했으며, 균열 제어용 와이어메쉬( $\phi 6\text{-}100\text{mm}$ )를 토핑부에 포함하였다. 완전 합성 구조로서 강재 트러스와 슬래브 간에 100%의 수평전단력이 전달되도록 전단 연결재( $\phi 19\text{-}95\text{mm}$ )를 설치하였다. 재하 하중비는 0.4~0.7의 비율로 실험 변수를 선정하였다.

본 실험은 표준화재 조건에서 적용모델의 거동을 재하 하중율과 사재의 크기에 대한 영향을 고려하여 실

험체 비교 분석과 구조물의 화재거동 분석을 위하여 적용된 각 부재의 시간에 따른 전열 특성을 분석하는 것으로 선정하였다. 재하 하중은 4점 재하를 하여 중앙부에 균등한 하중이 전달되도록 하였으며, 보 중앙부의 처짐은 와이어 게이지를 이용하여 측정하였다. 온도는 상현재 · 하현재 · 사재 부재 · 콘크리트 부재의 온도 변화를 측정하기 위하여 40개의 열전대를 설치하였으며, 그 위치는 Figure 1과 같다.

편의상 시험체의 중앙부 하현재 #1, 2&3 사재 #10, 11&12 상현재 #22&23을 Group 1, L/4 지점 하현재의 #4, 5&6 사재의 #13, 14&15 상현재의 #24&25를 Group

Table 1. Test Specimen Detail

Specimen	Max.Moment (Load)	Load (R.L)	Brace Member
M-45-0.4	315.4kN · m (300.4kN)	120.2kN (0.4)	L-45 × 45 × 6
M-35-0.7		210.4kN (0.7)	L-35 × 35 × 6
M-25-0.4		120.2kN (0.4)	L-25 × 25 × 5
M-20-0.7		210.4kN (0.7)	L-20 × 20 × 5



Figure 2. Shape of 4 points loading.

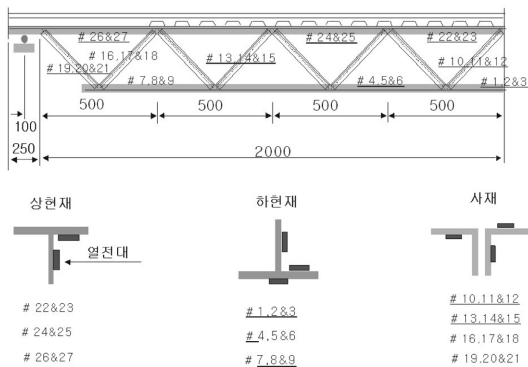


Figure 1. Thermocouple location.

Table 2. Sensor name of Structural Member

Structural Member	Sensor name
Top chord	M45-T-G1: Specimen name-Structural Member-location
Web member	Structural member: Top Chord
Bottom chord	Web member (Bracing), Bottom Chord
	Location: Group 1, 2, 3

2, 단부 하현재 #7, 8&9 사재의 #16, 17&18 #19, 20&21 상현재의 #26&27을 Group 3이라고 정의하였다. Table 2는 시험체의 센서 명칭에 대하여 요약한 것이다.

본 실험은 KS F 2257-6의 표준화재 조건에 의하여 재하 후 3면 가열을 하였으며 한국건설기술연구원 방내화 실험실에서 실시하였다. Table 1은 시험체의 사재별 최대모멘트, 재하 하중과 하중비를 나타낸다.

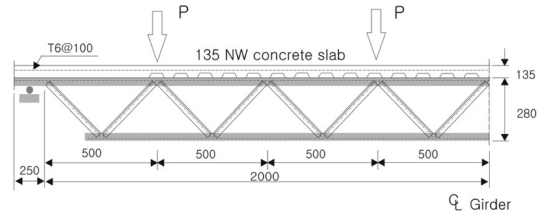


Figure 3. Composite truss specimen section.

2.2 합성트러스의 모멘트 성능

한계상태 설계에서 합성트러스의 모멘트 성능은 보에 적용되는 계수모멘트 이상이 되어야 한다.<sup>2)</sup> 합성트러스는 일반 합성보와 같이 압축력은 콘크리트 부분인 슬래브가 인장력은 트러스의 하현재가 지지한다. 트러스 부분인 강재의 압축력 지지는 미미하므로 없는 것으로 가정하였다.

SS400 강재의 설계 강도  $p_y = 245 \text{ N/mm}^2$ , 콘크리트 압축력은  $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$ 이다.

Table 1의 합성트러스 모멘트 성능은 BS5950 Part 1에 의하여 다음 식으로 계산하였다.<sup>6)</sup>

$$R_c = 0.45f_{cu}B_c x_c \tag{1}$$

여기서,  $R_c$ : 데크 위의 콘크리트 압축강도  
 $f_{cu}$ : 콘크리트의 28일 압축강도  
 $B_c$ : 콘크리트 슬래브의 유효 너비  
 $D_s$ : 슬래브 전체 깊이  
 $D_p$ : 데크의 깊이

$$R_s = A_b p_y \tag{2}$$

여기서,  $R_s$ : 강재의 강도  
 $A_b$ : 하현재의 전단면적  
 $p_y$ : 강재의 설계 강도

콘크리트의 중립축 깊이는 다음과 같다.

$$x_c = (D_s - D_p) \frac{R_s}{R_c} \tag{3}$$

합성트러스의 모멘트는  $R_s < R_c$ 인 경우 다음식과 같다.

$$M_c = R_s \times [D_t + D_s - x_b - 0.5x_c] \tag{4}$$

여기서,  $D_t$ : 강재 트러스의 전체 깊이  
 $x_b$ : 트러스 하현재의 중립축 거리

3. 재료실험 및 실험 평가

합성트러스의 재료적 성질을 알기 위하여 KS B 0802 시험 방법에 의한 금속 재료 인장 시험을 실시하였으며 강재의 재료적 성질은 Table 3, 4와 같다.

3.1 형강에 따른 하중-처짐 곡선

인장 시험 결과  $\Gamma$ -형강의 항복 강도는 48.68kN으로 측정되었으며, 극한 강도는 73.15kN으로 측정되었고, 최대 변형은 22.2mm로 측정되었다. CT-형강의 항복 강도는 84.11kN으로 측정되었으며, 극한 강도는 121.94kN으로 측정되었고, 최대 변형은 20.57mm로 측정되었다.

Table 3. Tensile Test of Steel

시험체	표점 길이	너비 (mm)	두께 (mm)	단면적 (mm <sup>2</sup> )	항복강도 (N)	항복응력 (Mpa)	인장강도 (N)	인장응력 (Mpa)	변형길이 (mm)	연신율 (%)
$\Gamma$ Steel	103.00	27.86	6	167.13	48678.72	291.26	73149.35	437.67	22.20	21.55
CT Steel	95.40	31.33	6/9	249.03	84112.51	337.76	121941.96	489.66	20.57	20.57

Table 4. Mechanical Property of Universal Structural Steel

시험체	항복 응력(MPa)			인장응력 (N)	연신율(%)			
	강재 두께(mm)				강관 두께(mm)			
	16 이하	16~40	40초과		5 이하	5~16	16~50	40 이상
SS 400	245 이상	235 이상	215 이상	400~510	21 이상	17 이상	21 이상	23 이상

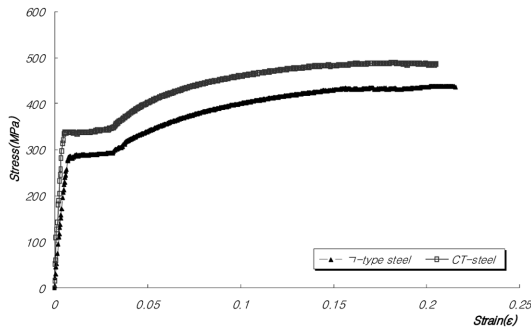


Figure 4. Stress-strain curve.

Γ-형강은 CT-형강 항복 강도의 약 57.87%, 인장 강도의 약 59.99%의 강도 차이를 나타내었으며, 변형은 CT-형강의 113.12%로 측정되었다.

3.2 형강에 따른 응력-변형도 곡선

인장 시험 결과 Γ-형강의 항복응력은 291MPa, CT-형강은 338MPa로 나타났으며, 인장응력은 Γ-형강은 438MPa, CT-형강은 490MPa로 나타났다. 재료의 연성을 나타내는 연신율도 모두 기준에 적합한 것으로 나타났다. Γ-형강은 CT-형강 항복응력의 약 86.23%, 인장강도의 약 89.38%의 응력 차이를 나타내었으며, 연신율은 CT-형강의 104.77%로 측정되었다.

3.3 KS 기준과 비교

항복응력과 인장응력을 KS 기준과 비교하였을 때 Γ-형강과 CT형강 모두 적합하며, 재료의 연성을 나타내는 연신율도 모두 기준에 적합한 것으로 나타났다.

3.4 실험 평가

KS 기준의 내화 성능 평가는 ISO 834를 기준으로 하는 KS F 2257의 건축구조 부재의 내화시험방법에 의한다.<sup>7)</sup> 비재하 실험의 경우는 온도를 기준으로 평균 온도 538°C와 최대온도 649°C를 넘지 않아야 한다고 규정되어 있다. 재하실험의 경우 부재의 변형량은 허용 변형량인  $D = (L^2/400d)$ 와 변형속도인  $(dD/dt) = (L^2/9000d)$ 를 초과할 경우 구조적 붕괴상태로 판정하고 처짐 기준인  $L/30$ 을 초과 하지 않도록 하고 있다.<sup>7)</sup> 본 실험은 재하 실험으로 두 번째 기준에 의하여 평가 하였으며 중앙부 처짐이  $L/30$ 을 초과할 때 붕괴 상태로 판정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 하중비(0.4) 조건에 따른 화재거동 분석

하중비 0.4의 조건으로 사재의 크기가 다른 두 개의 시험체인 M-45-0.4와 M-25-0.4의 온도와 처짐을 분석하였다. KS F 2257-6<sup>7)</sup>의 조건에 의하여 보의 3면 가열을 한 결과 열을 가장 직접적으로 받는 하현재와 사재의 온도 비교를 하였을 때 Figure 5~6에서 보는바와 같이 하현재의 온도에 비하여 사재의 온도 분포가 더 높았으며 M-45-0.4 시험체의 경우, 사재의 온도 상승이 시험체의 내화 거동에 영향이 있는 것으로 판단되었다.

M-25-0.4 시험체의 사재와 하현재의 온도 분포를 비교한 결과 M-45-0.4 시험체와 달리 하현재의 온도가 더 높았으며 사재의 크기가 작은 경우 하현재의 온도 상승이 시험체의 화재 거동에 영향을 준 것으로 판단된다. Figure 9의 처짐 비교에서 M-45-0.4 시험체의 내화시간은 12분이었으며 처짐은 124.2mm, M-25-0.4 시험체의 경우 내화시간은 12분으로 처짐은 131.5mm로 나타났다. 사재의 부재 크기가 내화 시간에 영향을 적

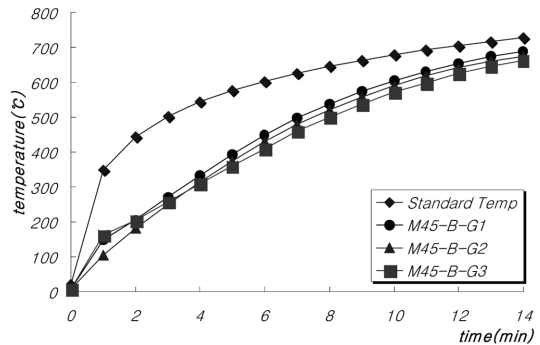


Figure 5. M-45-0.4 bottom chord temperature.

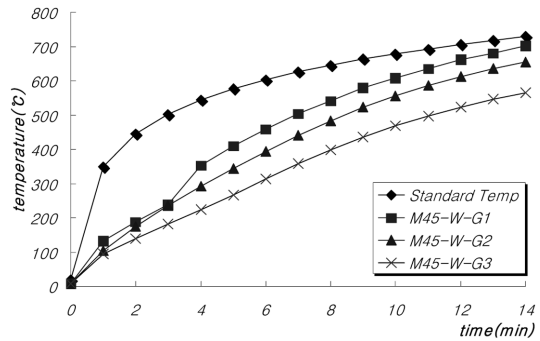


Figure 6. M-45-0.4 brace temperature.

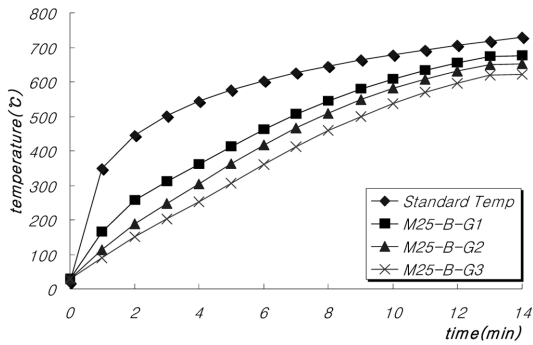


Figure 7. M-25-0.4 bottom chord temperature.

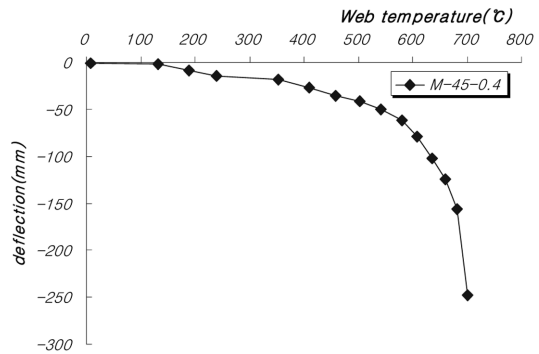


Figure 10. M-45-0.4 brace member temp.-deflection.

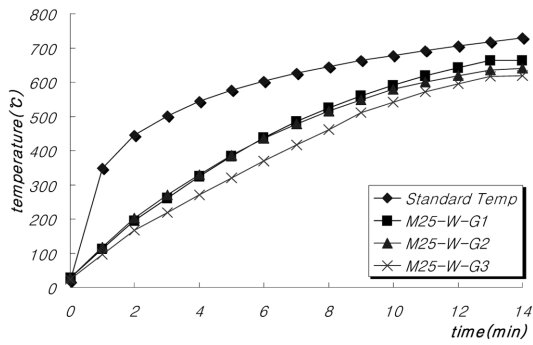


Figure 8. M-25-0.4 brace temperature.

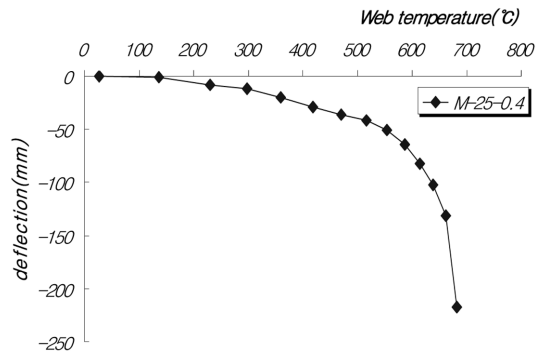


Figure 11. M-25-0.4 brace member temp.-deflection.

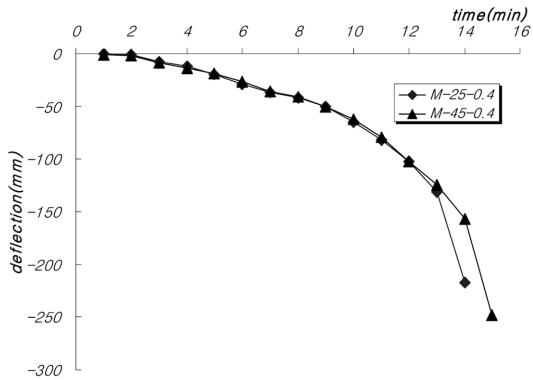


Figure 9. Deflection of R.L 0.4 specimen.

계 미치는 것으로 나타났다.

화재의 영향이 가장 직접적으로 나타나는 하현재의 경우 두 시험체 모두 4분 이내에서 400°C 이하의 분포를 보였으며 4분 이후부터 강재의 내력 저하가 나타난 것으로 판단된다. 시험체 중앙부의 사재에 설치된 10~12번 열전대 센서의 온도가 다른 열전대에 비하여

높은 것으로 나타났으며 이는 부재의 중앙부 처짐에 영향을 준 것으로 판단된다. Figure 10~11의 온도에 따른 실험체의 처짐 비교에서 하중비 0.4에서 비슷한 경향을 보였다.

사재 온도에 대한 처짐을 비교하였을 때 M-45-0.4는 680.93°C, M-25-0.4는 661.3°C에 도달한 이후 급격한 처짐이 발생하였다. 하중비 0.4에서 부재의 크기 변화는 합성트러스의 내화거동에 영향이 적은 것으로 판단된다.

#### 4.2 하중비(0.7) 조건에 따른 화재 거동 분석

하중비 0.7 조건의 M-35-0.7과 M-20-0.7의 시험체 비교에서 Figure 12~13은 하현재와 사재 부재의 온도 분포를 나타낸다. M-20-0.7 시험체의 경우 시험시간 4분 경과 후 L/30의 처짐 기준에 도달하고 급격한 처짐 양상을 보였다. 20mm, 25mm 사재를 사용한 시험체의 경우, 양단부의 사재에 좌굴이 발생하였다.

M-20-0.7 시험체는 재하 지점의 콘크리트와 데크의 박리가 다른 시험체와 비교하여 심각하였고 단부의 사

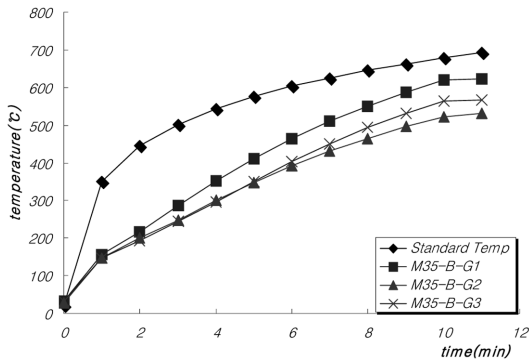


Figure 12. M-35-0.7 bottom chord temperature.

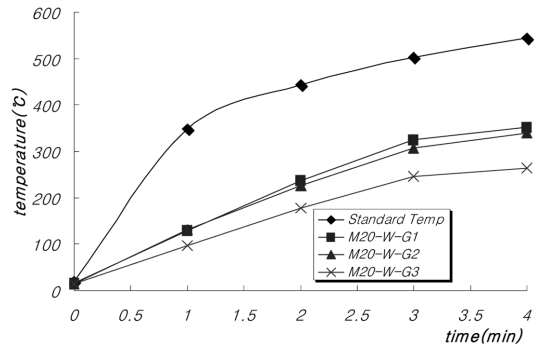


Figure 15. M-20-0.7 brace temperature.

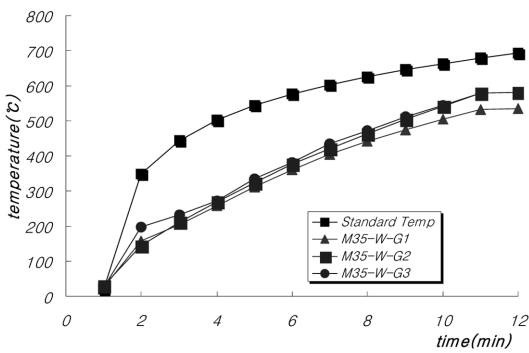


Figure 13. M-35-0.7 brace temperature.

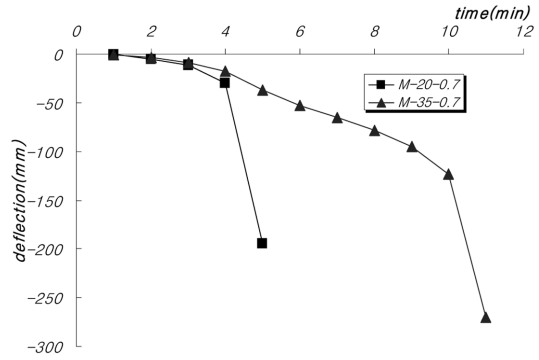


Figure 16. Deflection of R.L 0.7 specimen.

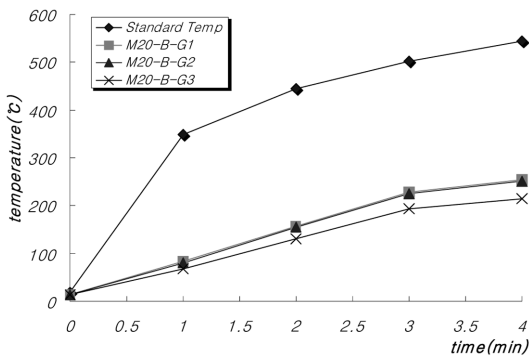


Figure 14. M-20-0.7 bottom chord temperature.

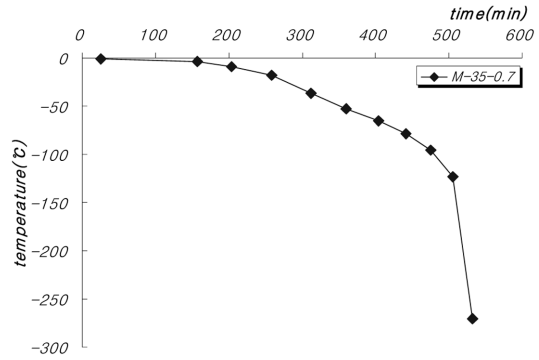


Figure 17. M-35-0.7 brace member temp.-deflection.

재 좌굴도 더 많이 나타났다. 온도 분포의 비교에서 M-20-0.7 시험체의 시험 시간이 짧아 전체적인 비교는 어려우나 시험 시간 4분까지의 온도 분포는 다른 시험체와 비슷한 경향을 보였다. M-35-0.7 시험체의 경우 하현재의 온도 분포가 사재에 비하여 12분 시험 경과 후 40°C의 차이가 있었으며 하현재의 온도가 시험체의

처짐에 영향을 준 것으로 판단된다. M-20-0.7 시험체의 경우 사재의 온도가 하현재에 비하여 실험시간 4분에서 100°C의 온도 차이가 있었으며 사재의 크기가 작은 경우 사재의 온도 차이에 의한 시험체의 거동이 나타났다.

내화 시간의 비교에서 M-20-0.7의 내화시간은 3분이

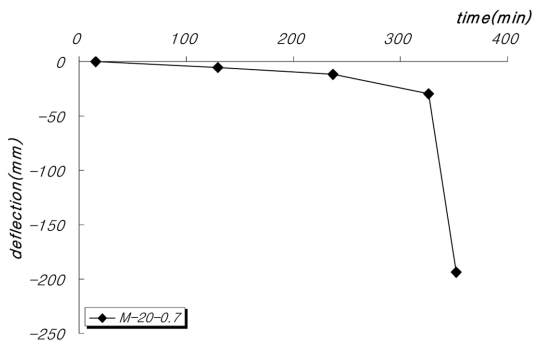


Figure 18. M-20-0.7 brace member temp.-deflection.

었으며 처짐은 30mm, M-35-0.7의 내화시간은 9분으로 처짐은 123mm이다. M-25-0.4의 사재 부재의 경우 하중비 0.4에서 M-45-0.4 시험체와 내화시간의 차이가 적었으나 20mm 사재 부재의 경우는 하중비 0.7에서 35mm 사재 부재와 비교하였을 때 3배 정도의 내화시간 차이가 나타났다.

### 5. 결 론

본 연구는 합성트러스 보에 대하여 표준화조건에서 재하 하중비와 사재 부재의 크기에 따른 영향을 고려하여 화재 시 합성트러스 보의 내화거동을 분석하였다.

- 1) M-45-0.4 시험체에서 하현재보다 사재의 온도 분포가 더 높았으며 사재의 온도 상승이 시험체의 내화거동에 영향이 있는 것으로 판단된다. 내화시간은 12분, 처짐은 124.2mm로 나타났다.
- 2) M-25-0.4 시험체는 하현재의 온도 분포가 더 높았으며 내화시간은 12분으로 M-45-0.4 시험체와 같았으며 처짐은 131.5mm로 나타났다. 하중비 0.4에서는 사재 부재 크기가 내화성능 향상에 영향이 적은 것으로 판단된다.
- 3) M-35-0.7 시험체는 하현재의 온도 분포가 사재와 비교하여 시험시간 12분 경과 후 40°C의 차이가 있었으며 하현재의 온도가 처짐에 영향을 준 것으로 판단된다.
- 4) M-20-0.7 시험체는 사재의 온도에 따른 처짐이 발생한 것으로 판단되며 실험시간 4분 경과 후 사재의 온도가 100°C 높았다. 하중비 0.7 조건에서 M-35-0.7

시험체와 M-20-0.7 시험체의 화재 실험 결과 내화시간은 각각 9분, 3분으로 3배 정도의 차이가 나타났고, 처짐은 123mm, 30mm이었다.

4. 하중비 0.7 조건에서 사재 부재의 크기 변화가 내화성능 향상이 있는 것으로 나타났으며 35mm 이하의 사재 부재를 사용할 경우 단부의 사재 부재의 좌굴이 발생하였다.

향후 추가 연구로 하부 노출 부분에 대한 피복을 통한 내화 성능 향상을 위한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원에서 수행하는 국가 R&D 과제인 “(06건설핵심 C23) 비대칭H형강 합성플로어 성능기반 내화거동 고도화 연구” 과제와 관련하여 한국건설교통기술평가원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. D.L. Mullett, “Composite Floor Systems“, pp.112-118, Blackwell Science, UK(1998).
2. S. Kravanja and S. Silih, “Optimization Based Comparison between Composite I Beams and Composite Trusses”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.59, pp.609-625(2003).
3. Graeme Flinta, Asif Usmania, Susan Lamontb, Jose Toreroa, and Barbara Laneb, “Effect of Fire on Composite Long Span Truss Floor Systems”, Journal of Constructional Steel Research, Vol.62, pp.303-315(2006).
4. S.-K. Choi, I. Burgess, and R. Plank, “Performance in Fire of Long-span Composite Truss Systems”, Engineering Structures, Vol.30, pp.683-694(2008).
5. British Standards Institution, “BS5950 Part8 Structural use of Steelwork in Building. - Code of Practice for Fire Resistant Design”(2003).
6. Chanakya Arya, “Design of Structural Elements”, pp.203-212, Spon Press, UK(2003).
7. KS F 2257-6: 2006. “건축부재의 내화 시험 방법 - 보의 성능 조건”, 한국산업규격.