

H형강 합성보의 화재거동에 관한 실험적 연구 Study on the Fire Behaviour of Composite Beam

김성배* · 최승관** · 한상훈†

Sung-Bae Kim* · Seng-Kwan Choi** · Sang-Hoon Han†

한국건설기술연구원 화재및설비연구센터, *(주)센구조연구소 연구개발팀장,
**University of Ulster, Lecturer in Structural Fire Engineering
(2008. 5. 19. 접수/2008. 5. 26. 채택)

요 약

본 연구는 H형강과 콘크리트 슬래브가 전단연결재로 일체화된 합성보의 화재 시 거동에 관한 실험적 연구로, 합성율과 재하율의 영향을 내화실험을 통해 평가하였다. 실험체는 H형강에 스테드 커넥터를 전단 연결재로 사용하여 제작한 6개로 구성되며, 화재거동에 대한 전열특성을 열전대를 통해 확인하였다. 실험은 표준화재곡선에 의해 진행하였으며, 건설기술연구원 화재시험실에서 수행하였다. 실험결과 합성율과 재하율에 따른 합성보의 내화 특성을 확인하였으며, 화재에 의한 H형강과 콘크리트, 전단연결재의 열 특성을 확인할 수 있는 기초자료를 확보하였다.

ABSTRACT

This paper aims to experimentally investigate the in-fire performance of composite beams with respect to the effects of load ratio and shear interaction. Under a Standard ISO834 fire, the development of temperature and deflection of simply supported composite beams were recorded. In particular, the transition of temperature distribution across the cross-section. The fire resistance of composite beam was interpreted regarding the level of shear interaction.

Keywords : Fire resistance, Composite beam, Shear interaction, Load ratio, Fire safety

1. 서 론

급등하는 원자재 가격과 인건비 상승은 건축공사에서도 공사기간 단축과 규격화·복합화 등의 변화를 요구하고 있다. 이러한 변화는 합성구조를 개발하게 하는 원동력이 되어 최근 다양한 합성구조가 적용되고 있다.¹⁻⁵⁾ 합성구조는 기둥과 보, 슬래브로 구분되며, 이중 적용범위가 넓은 합성보에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 합성보는 상부 슬래브와 하부 철골이 일체화 되도록 하여, 콘크리트 슬래브와 H형강에서 발생하는 전단력을 전단연결재를 통해 단일부재로 거동하는 구조부재이다. 전단연결재는 스테드 커넥터와 C형강, 철근 등이 적용되었으나, 사용의 편이성과 내력평가의 용이성 등으로 스테드 커넥터가 주로 사용되고 있다.⁶⁻⁸⁾

1980년대 중반이후 미국과 영국, 일본 등에서는 사양적 설계기술로는 구조물의 화재안전이 보장될 수 없음을 인식하여 성능기반 화재안전 설계기술이 적용되고 있다. 국내에서도 성능기반 화재안전 설계기술이 도입되어 철골구조의 단면형상계수가 한국산업규격에 적용되었다.⁹⁾ 또한 성능설계에 따라 내화구조의 성능을 검증할 수 있는 경우 품질시험을 생략하고 내화구조 인정이 가능토록 하고 있으며,¹⁰⁾ 구조물 성능기반 화재거동 해석 및 설계기술이 연구되고 있다.¹¹⁾

철골보를 이용한 합성보는 내화피복재를 통해 내화 성능을 확보하고 있으나 성능설계를 도입하면, 현 설계와는 상이한 적용이 다수 발생할 것으로 판단된다. 반면 합성보 및 합성구조에 대한 내화성능평가는 아직 초기단계이다.¹²⁻¹⁵⁾ 이에 본 연구에서는 슬래브와 철골보로 구성된 합성보에 대해 화재조건에서 합성율과 재하율에 따른 합성보와 전단연결재의 성능을 평가하였다.

† E-mail: hans@kict.re.kr

2. 실험 계획

2.1 합성보의 설계휨강도

합성보는 강재 부재와 철근콘크리트 부재가 하나의 단일 부재로 거동하는 구조부재로 강재보가 노출된 노출형합성보와 매입된 매입형합성보로 구분된다. 노출형합성보는 단면의 상부가 압축단이 되는 정모멘트의 휨재에 주로 사용되며, 본 연구의 합성보도 노출형합성보이다.

합성보는 강재보와 슬래브가 완전한 합성작용을 하는 완전합성보와 강재보와 슬래브 사이에 미끄러짐이 발생하는 불완전합성보로 구분된다. 일반적으로 설계는 완전합성보를 기준으로 하고 있으나, 과다설계가 되는 경우 일부 불완전합성보로 설계하기도 한다. 합성율 산정을 위한 총 수평전단력(V_s)은 식 (1)과 같다.

$$V_{s1} = F_y A_s \quad (1a)$$

$$V_{s2} = 0.85f_{ck} b_e t_c \quad (1b)$$

여기서,

- V_{s1} : 강재보에 의한 수평전단력
- V_{s2} : 콘크리트에 의한 수평전단력
- F_y : 강재의 항복강도
- A_s : 강재보의 단면적
- f_{ck} : 콘크리트 압축강도
- b_e : 콘크리트 슬래브의 유효폭
- t_c : 콘크리트 슬래브의 유효두께

스터드 커넥터 설치는 식 (1)에서 산정한 수평전단력 중 최소치를 스테드 커넥터의 내력(V_{sn})으로 나누어 그 개수(N)를 최대 정모멘트 점과 모멘트 0점 사이에 등간격으로 배열한다. 이 때 스테드 커넥터의 내력과 개수 산정은 다음 식과 같다.

$$V_{sn} = 0.5R_q A_{sc} \sqrt{f_{ck} \cdot E_c} \leq A_{sc} F_u \quad (2)$$

$$N = \frac{V_s}{V_{sn}} \quad (3)$$

여기서,

- R_q : 감소계수(평데크에서 $R_q = 1.0$)
- A_{sc} : 스테드 커넥터의 축단면적
- E_c : 콘크리트의 탄성계수
 $f_{ck} \leq 29.4 \text{ (N/mm}^2\text{)} : E_c = 4700 \sqrt{f_{ck}}$
- F_u : 스테드 커넥터의 인장강도

정모멘트 구간에서 완전합성시 설계휨강도($\phi_b M_n$)는

합성단면의 소성중립축 위치에 따라 소성중립축이 슬래브에 있는 경우($C_e = P_y$, 식 (4)), 플랜지에 있는 경우($P_{yw} < C_e < P_y$, 식 (5)), 웨브에 있는 경우($C_e \leq P_{yw}$, 식 (6)) 등 세 가지로 구분된다.

$$M_n = \left(0.5d + h_r + t_c - \frac{0.5P_y}{0.85f_{ck} b_e} \right) P_y \quad (4)$$

$$M_n = 0.5(d - t_f) P_y + (h_r + 0.5t_c + 0.5t_f) C_e \quad (5)$$

$$M_n = M_{ps} + (0.25d + h_r + 0.5t_c + 0.5t_f) C_e \quad (6)$$

여기서,

- C_e : 슬래브 유효압축력으로 다음중 최소값
 $C_e = A_s F_y, C_e = 0.85f_{ck} b_e t_c, C_e = \Sigma V_{sn}$
- P_y : 강재보의 항복축력
- P_{yw} : 강재보 웨브 단면의 항복축력
- M_{ps} : 강재보의 소성모멘트
- ΣV_{sn} : 시어커넥터의 공칭전단강도 합
- d : 강재보의 춤
- t_f : 강재보의 플랜지 두께
- h_r : 데크플레이트 골의 춤

식 (1)~식 (6)에 의해 산정한 수평전단력과 공칭휨강도를 기준으로 합성율과 재하하중 산정 및 실험체 계획을 하였다.⁶⁾

2.2 실험 계획

실험계획은 단순지지 합성보의 합성율(80, 110, 140%)과 재하율(30, 35, 60, 70%)의 영향에 의한 열특성을 평가하기 위해 실험체를 계획하였다. 재하율은 공칭휨강도를 기준으로 가력한 하중비이다. 일반적으로 건축물에 적용되는 합성보는 합성율이 100%를 초과하여 전단연결재를 설치하는 경우는 없으며, 화재조건 하중율을 고려하면 합성율의 영향은 더 저하될 것이나 합성율의 영향을 평가하기 위해 완전합성율을 기준으로 합성율이 100%를 초과하는 경우도 포함하였다.

실험체는 동일 단면으로 설계된 단순지지 조건의 평슬래브 합성보이다. 실험체는 H-244×175×7×11이며, 스테드 커넥터의 간격은 각각 200, 150, 115 mm이다. 콘크리트의 압축강도(f_{ck})는 23.5 MPa이고, H형강의 항복강도(F_y)는 316 MPa의 SS400 강종을 적용하였다.

Table 1은 실험체 일람표이고, Figure 1은 실험체 형상이다. 실험체는 슬래브 폭 600 mm, 두께 130 mm이다. Table 2~Table 4는 실험체에 사용된 콘크리트와 철골, 스테드 커넥터의 소재특성이다. 스테드 커넥터는 검사증명서(Mill sheet)의 값을 적용하였다.

Table 1. Specimen parameters

Name	Stud spacing (mm)	Composite ratio (%)	Load ratio (%)
200-1	200	80	30
200-2	200	80	60
150-1	150	110	30
150-2	150	110	60
115-1	115	140	35
115-2	115	140	70

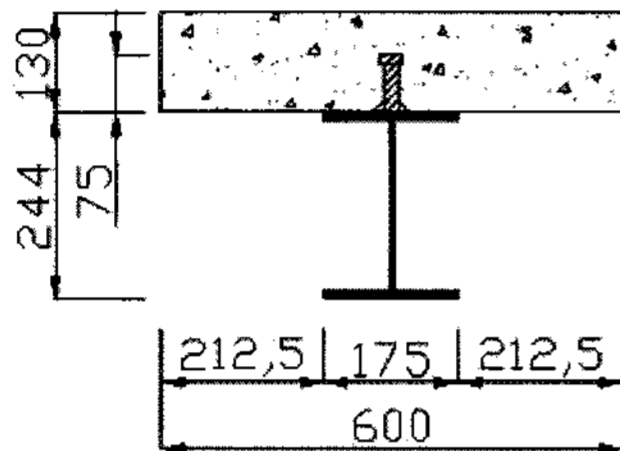


Figure 1. Cross section of specimen (unit:mm).

Table 2. Material properties of concrete

Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)
18	34.0	41.0	2415

Table 3. Material properties of steel

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
316	431	28

Table 4. Properties of stud connector

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
345	413	20

2.3 실험 방법

각 실험체는 화재에 노출된 합성보 부재의 휨강도에 영향을 미치는 합성율과 재하율을 변수로 표준화재곡선으로 가열실험을 수행하고 거동을 측정하였다.

실험체의 셋팅과 가력상황은 Figure 2~Figure 3과 같다. 가력은 두 개의 오일 잭을 이용하여 4점 가력 하였고, 처짐은 변위계를 이용하여 중앙에서 측정하였다.

합성보의 온도분포는 열전대를 부착하여 측정하였다. 열전대 설치위치는 Figure 4와 같이 부재 길이의 중앙부와 L/4 두 군데에 설치하였다.

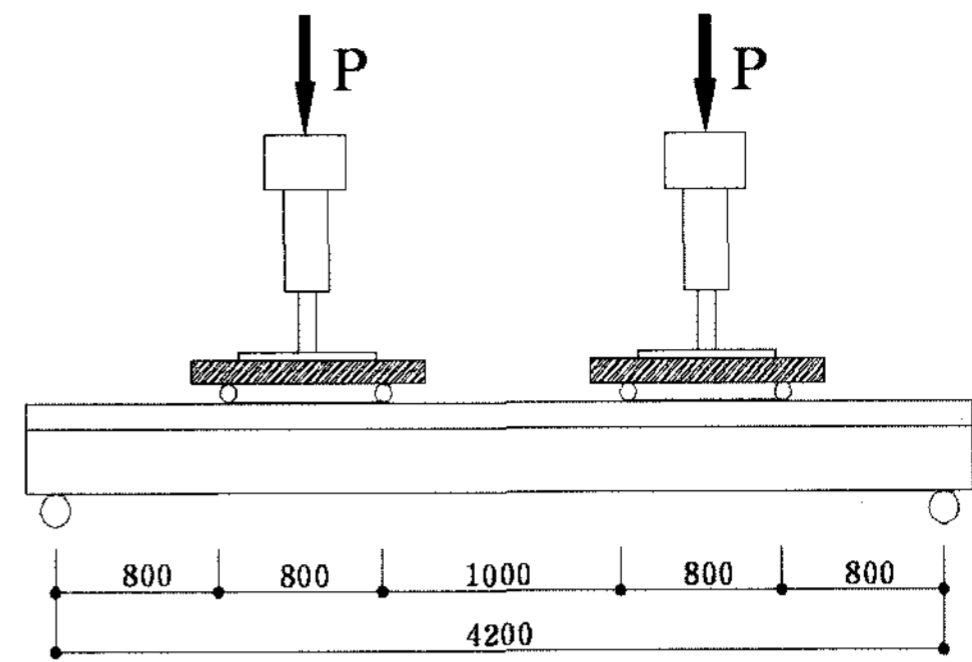


Figure 2. Plan view of test set up.



Figure 3. Photo of test set up.

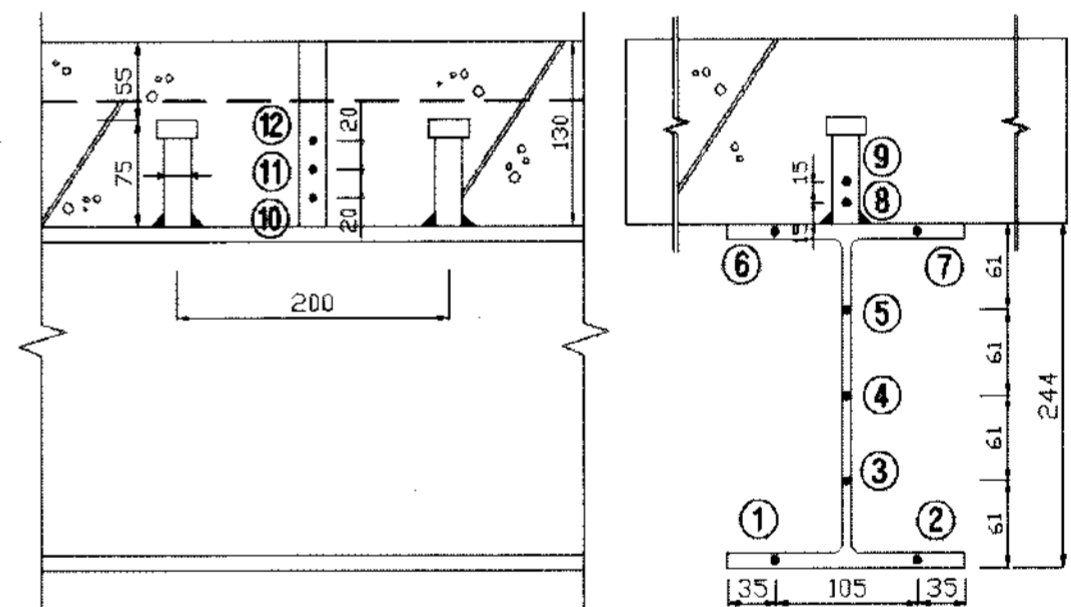


Figure 4. Detail of thermocouple.

실험 시 하중 지지력 판정기준은 KS F 2257에 의해 허용 변형량($D = L^2/400d$)과 허용변형속도($dD/dt = L^2/9000d$)를 모두 초과 시 시험 하중에 견디는 시간으로 하며, L/30을 초과한 이후에 적용한다.¹⁶⁾ 또한 본 연구에서는 보의 중앙 처짐이 L/20에 도달하면 실험을 종료하였다.

3. 실험 결과

Table 5는 실험결과를 정리한 것이다. 각 실험체별로

Table 5. Summary of test results

Name	Allowable deflection over time		Allowable strain rate over time		Fire resistance time (min)
	Time (min)	Deflection (mm)	Time (min)	Strain rate (mm/min)	
200-1	21	261.8	17	8.2	21
200-2	19	282.2	14	8.3	19
150-1	20	279.5	18	13.5	20
150-2	19	258.8	14	11.0	19
115-1	23	243.8	15	9.0	23
115-2	13	180.0	11	11.0	13

- Allowable deflection : $D = L^2/400d = 180.7 \text{ mm}$ ($d = 224 \text{ mm}$)
- Allowable strain rate : $dD/dt = L^2/9000d = 8.0 \text{ mm/min}$
- Minimum base : $L/30 = 140 \text{ mm}$

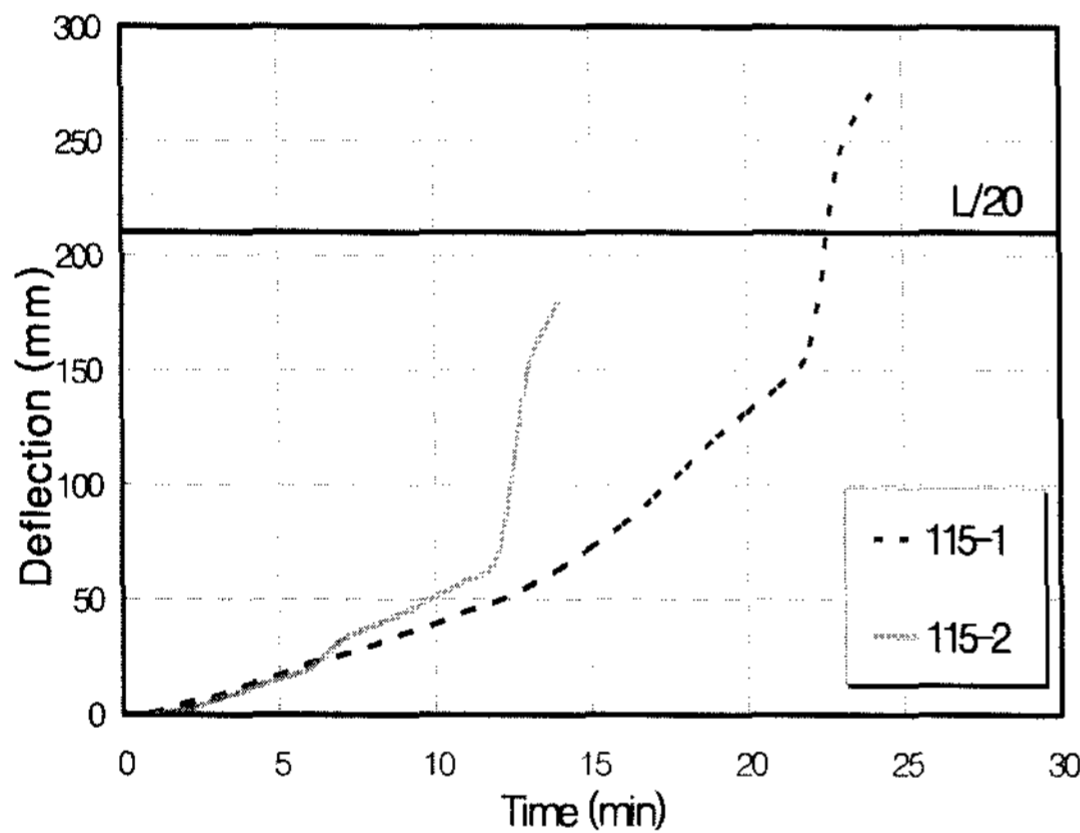


Figure 5. Mid span deflection against time (115 Series specimens).

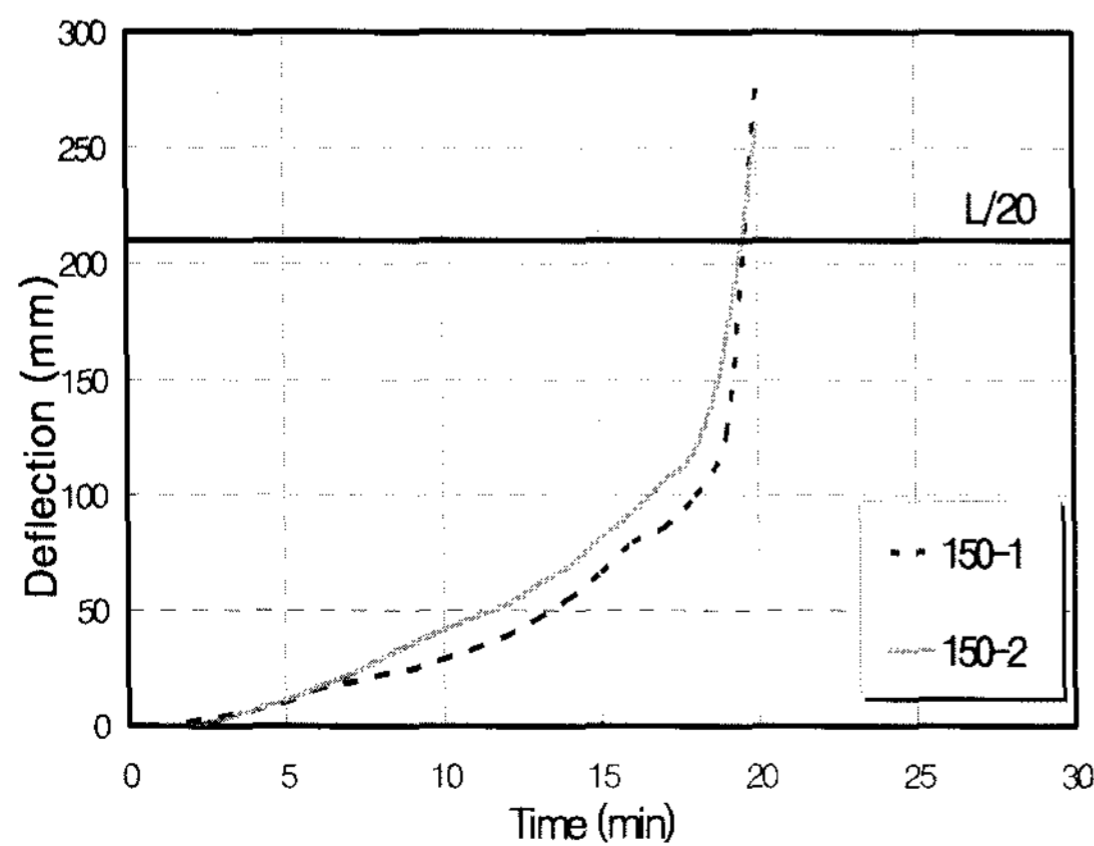


Figure 6. Mid span deflection against time (150 Series specimens).

허용변형량과 허용변형속도를 초과하는 시간과 그 때의 변형량 및 변형속도를 정리하였다. Figure 5~Figure 7은 합성율을 기초로 구분한 스테드 커넥터의 간격별 실험체의 시간 변형그래프이다. 그래프에는 보 중앙처짐이 $L/20$ 에 달하는 경우를 표기하였다.

실험결과 합성율이 80%이고 스테드 커넥터의 간격이 200 mm인 실험체(200-1, 200-2)의 경우, 변형량이 변형속도 보다 내화시간이 다소 길다. 또한 재하율이 30%와 60%를 비교하면 재하율에 의한 내화시간은 2분의 차이를 보이고 있어 재하율에 의한 내화시간의 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

합성율이 110%이고 스테드 커넥터의 간격이 200 mm인 실험체(150-1, 150-2)의 경우, 스테드 간격이 200 mm인 실험체와 내화시간과 변형량 등 거의 동일한 양상을 보인다.

합성율이 140%이고 스테드 커넥터의 간격이 200 mm인 실험체(115-1, 115-2)의 경우, 재하율이 35%인 실험체는 다른 시리즈의 실험체 보다 내화성능이 다소 증

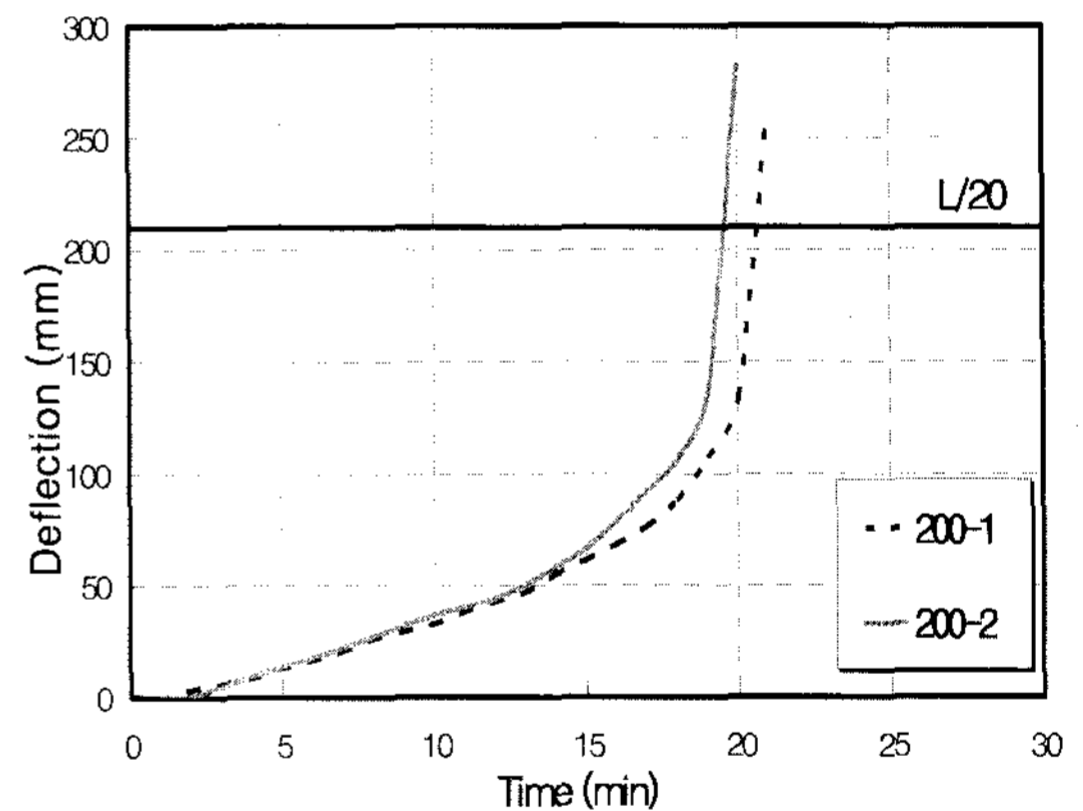


Figure 7. Mid span deflection against time (200 Series specimens).



Figure 8. Specimen before test.

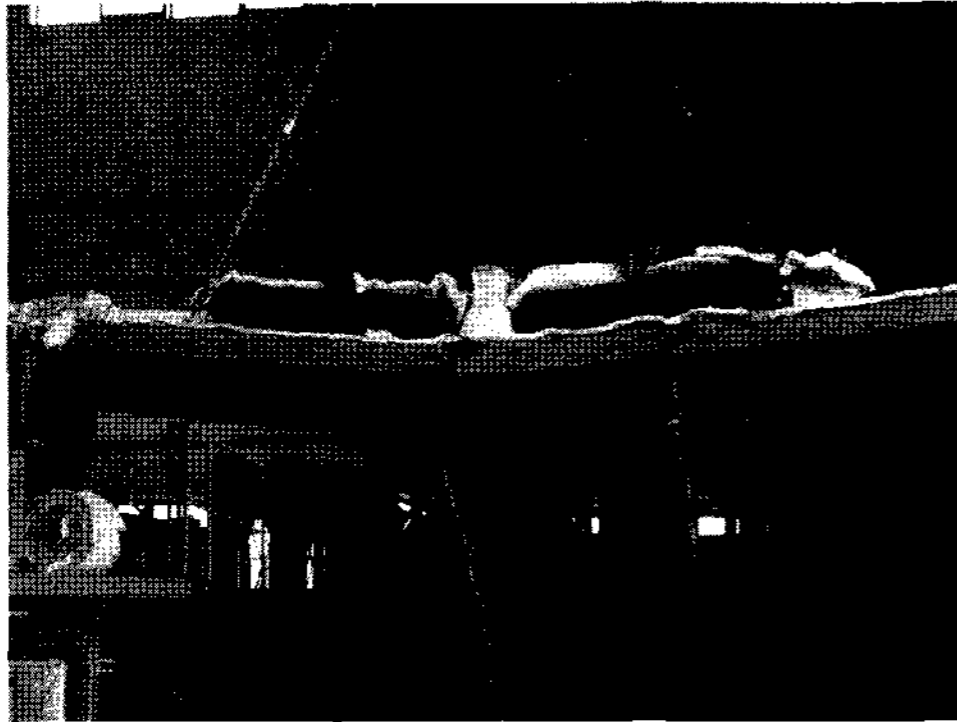


Figure 9. Specimen after test.

가하였다. 반면 재하율이 70%인 실험체는 내화시간이 13분으로 급격히 저하하였다.

Figure 8~Figure 9는 실험체의 가력 전·후를 비교한 것이다. 파괴양상은 무피복 H형강의 하부 강재가 열에 의한 내력상실로 휨변형이 과도하게 발생하였으며, 콘크리트 슬래브의 압축파괴도 동반하였다.

4. 분석 및 고찰

4.1 위치별 온도분포

Figure 10~Figure 11은 합성율이 140%이고, 재하율이 35%, 스티드 커넥터의 간격이 115 mm인 115-1 실험체에 부착한 열전대의 온도분포이다. 각 번호는 Figure 4에 나타난 열전대의 번호이며, 열전대는 중앙부와 1/4 위치에 부착하여 상호 비교한 것이다. 그림에서 누락된 번호는 열전대를 초기 부착 후 운반, 실험과정에서 열전대가 손상되어 데이터 취득 및 자료 활용이 부적합한 경우이다.

열전대의 온도분포 양상은 철골보 단면의 경우, 하

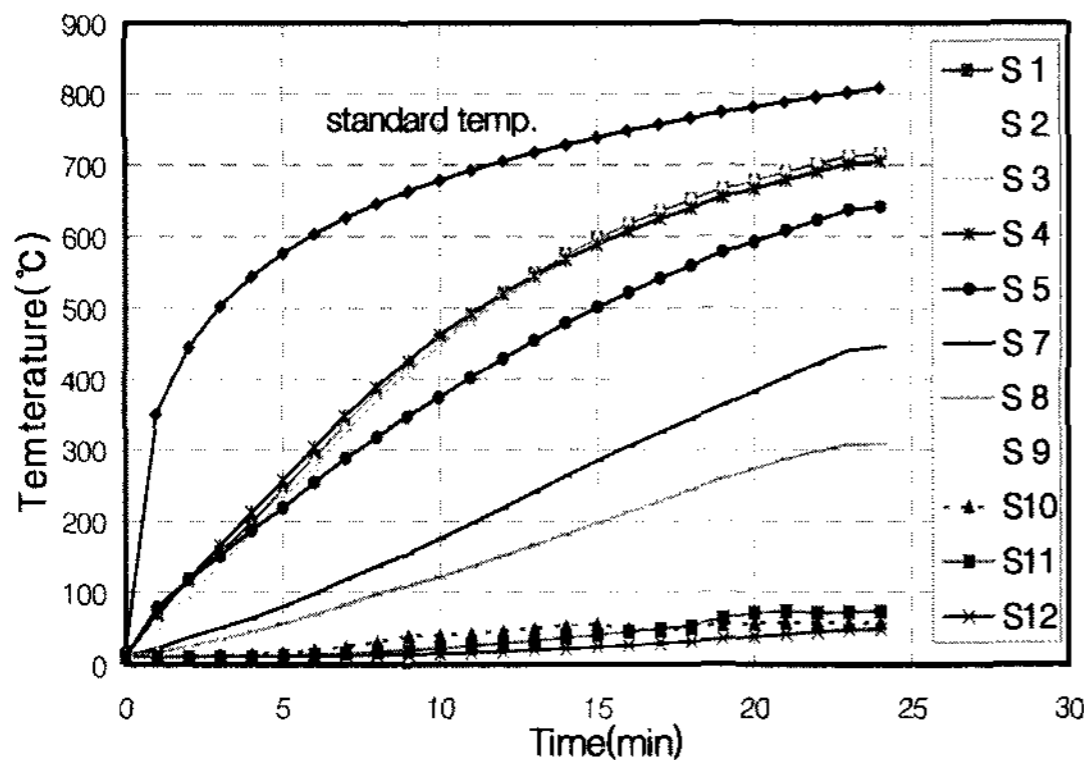


Figure 10. Temperature distribution at quarter of beam.

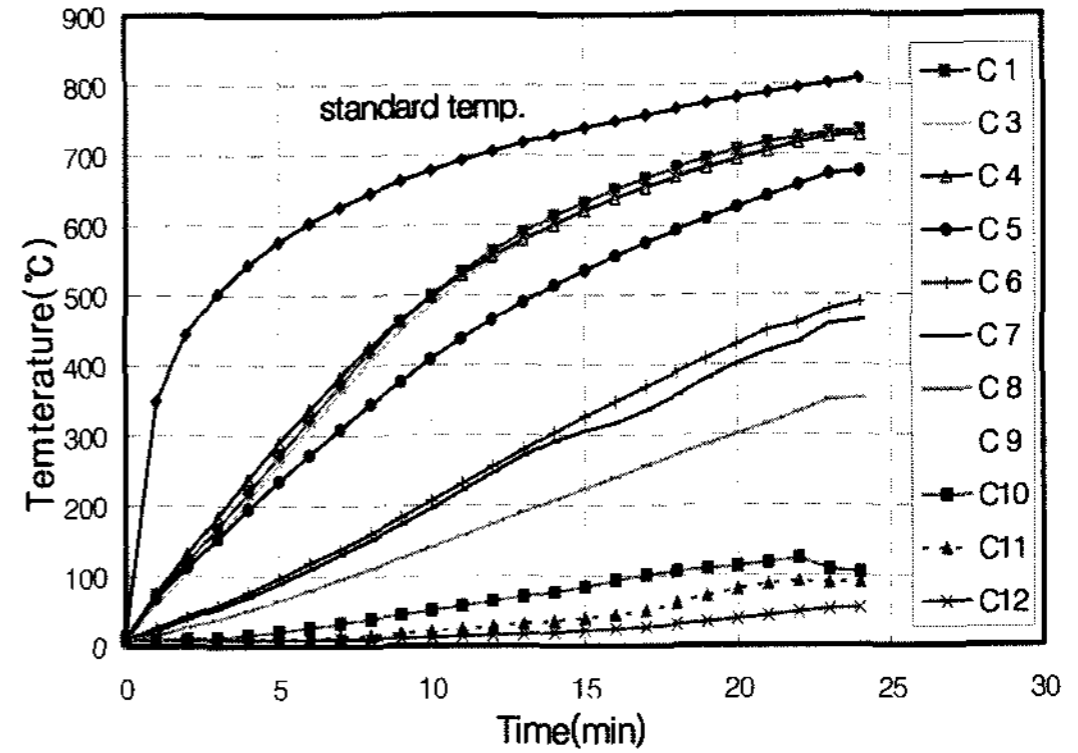


Figure 11. Temperature distribution of at mid span of beam.

부 플랜지에 해당하는 ①, ②번의 온도가 가장 높고, ③~⑦번까지 철골보 하부 플랜지에서 웨브, 상부 플랜지로 올라 갈수록 온도가 저해된다. 이것은 노 내부의 하구 위치와 노출 정도에 의한 것이다.

스티드 커넥터에 부착한 ⑧, ⑨번 열전대는 보 상부 플랜지의 온도와 비교 시 보 상부 플랜지에서 콘크리트 슬래브로 올라갈수록 온도는 약 100~150°C 정도 저해되어 최대온도는 400°C를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 온도저하는 콘크리트 슬래브에 의해 온도가 흡수되기 때문으로 판단된다.

콘크리트 슬래브 내부에 설치된 ⑩~⑫번 열전대는 위치에 따라 다소 상이하나 약 100°C 전후를 나타내어 무피복으로 철골보의 온도가 상승하여 부재 내력이 상실되어도 콘크리트 내부의 온도는 약 100°C 전후가 되는 것으로 판단할 수 있다. 또한 스티드 커넥터와 유사한 위치에 부착한 콘크리트 내부의 열전대 온도를 비교하면, 온도차는 200°C 이상을 보인다. 이러한 양상은 스티드 커넥터의 경우 콘크리트 슬래브에 묻혀있어도 H형강 철골보에 의한 열전달에 의해 온도가 상승함을 보여준다.

합성보에서 열전대 부착위치에 의한 영향은 1/4 지점과 중앙부의 열전대를 상호 비교하면, 보 위치에 의한 열전대의 온도분포는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 합성율과 재하율이 상이한 다른 실험체도 동일한 양상을 나타내고 있다. 이것은 노 내부의 온도는 표준화재온도곡선에 의해 동일한 온도로 관리되므로 보 위치에 의한 온도 차는 없는 것으로 판단할 수 있다.

4.2 합성율의 영향

Figure 12는 각 실험체의 합성율에 따른 내화시간 그

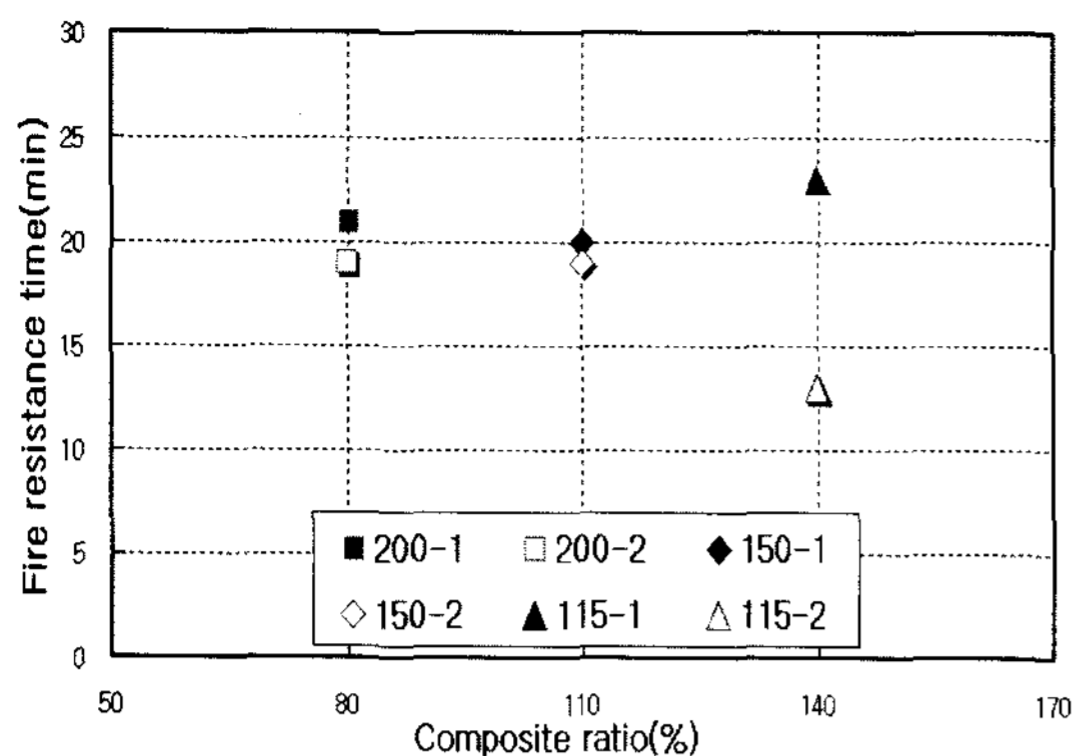


Figure 12. Relation of composite ratio and fire resistance time.

래프이다. 합성율이 140%인 115-2 실험체의 경우 Figure 5에서도 알 수 있듯이 다른 실험체에 비해 조기 파단된 경향을 보이고 있으나, 전반적으로 합성율이 80~140%의 경우 합성율에 의한 내화시간의 영향은 적은 것으로 확인할 수 있다. 국내기준에서 불완전합성보의 경우 수평전단력은 50%까지 저감할 수 있어,⁶⁾ 50% 합성율에 의한 영향을 추가로 검토하면 합성율에 의한 내화시간의 경향을 더 명확히 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

외부에 노출된 강재의 재하조건은 표준화재곡선에 의해 진행되었으므로 합성율에 의한 열전대의 온도 차는 보이지 않는다. 그러나 스티드 커넥터와 콘크리트 슬래브 내부의 열전대 경우 합성율에 의한 온도차를 확인하기 위해 각 자료를 비교하였다.

Figure 13~Figure 14는 스티드 커넥터에 부착된 ⑧, ⑨번 열전대와 콘크리트 슬래브 최 하단의 ⑩번 열전대를 재하율이 30%인 경우와 60%(115-2 실험체의 경

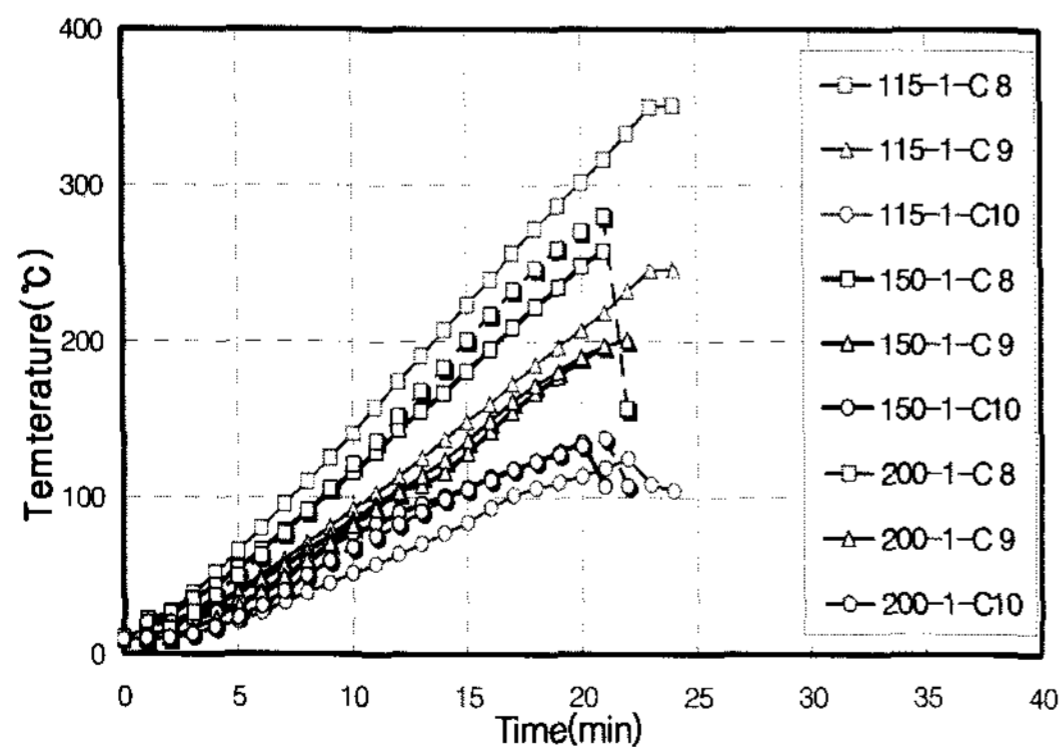


Figure 13. Temperature development against time (thermocouple no. 8~10 of composite ratio 30%).

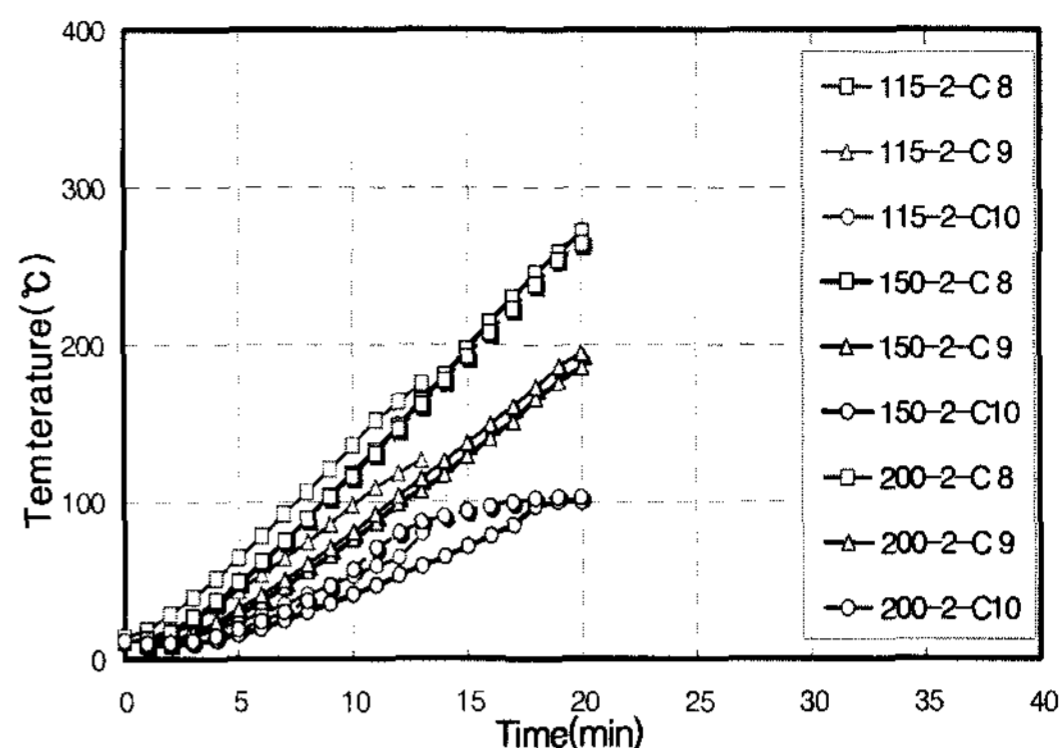


Figure 14. Temperature development against time (thermocouple no. 8~10 of composite ratio 60%).

우 70%)로 구분하여 내화시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 재하율이 30%인 Figure 13의 경우 합성율이 증가할수록 온도가 상승하는 양상을 보인다. 그러나 재하율이 60%인 Figure 14의 경우, 그러한 양상을 나타내고 있지 않는데 이는 115-2 실험체가 충분한 내화시간 확보 전 실험체가 조기 파단되어 실험이 종료된 영향으로 판단된다.

4.3 재하 하중비의 영향

Figure 15는 재하 하중비와 내화시간과의 관계이다. 공칭휨강도에 대한 하중비를 30, 60, 70%로 증가시키는 경우 내화시간이 저하 하는 경향을 보이고 있다. 그러나 115-2 실험체가 조기에 파단된 경향이 있어 재하율과 내화시간의 관계를 명확히 평가하기는 다소 어려운 형상을 보이고 있다. 그러므로 합성율과 동일하게 재하율도 하중비를 증가시켜 그 상관성을 추가로 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.

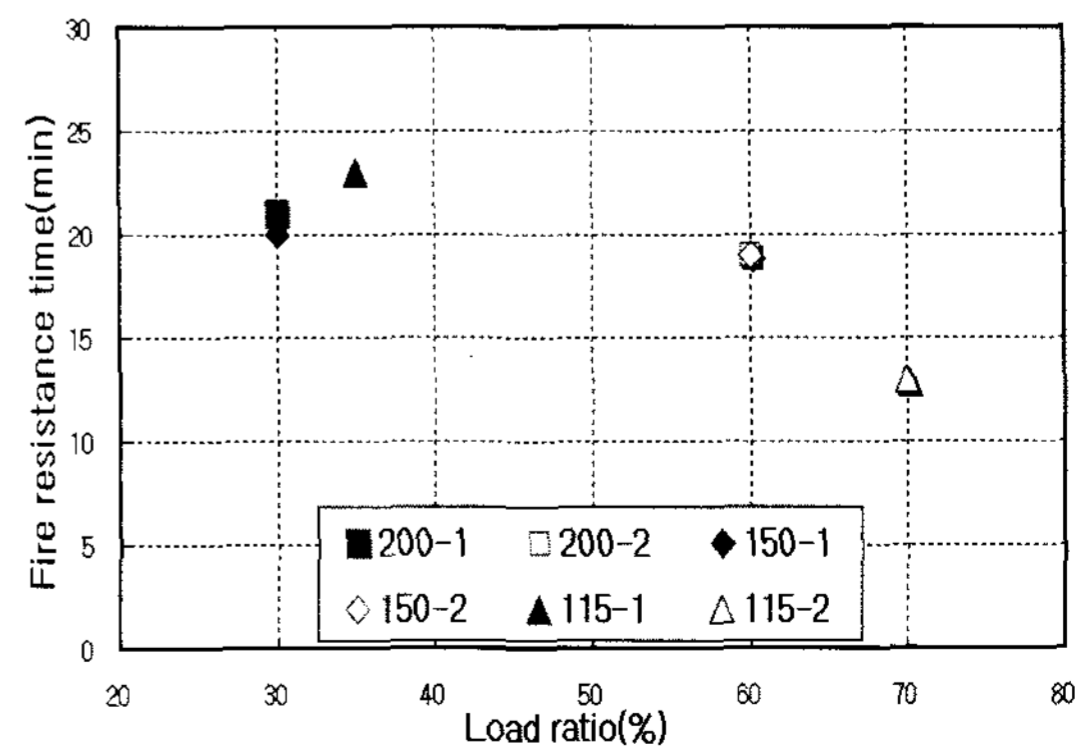


Figure 15. Relation of load ratio and fire resistance time.

5. 결 론

본 연구에서는 H형강 합성보에 대해 합성율과 재하율에 따른 내화시간과 열전대의 온도분포를 평가하였다. 특히 합성율에 영향을 미치는 스티드 커넥터의 온도를 확인하여 기초자료를 제시하였으나, 합성율과 재하율의 범위가 한정되어 추가적인 실험을 통한 충분한 자료 확보가 필요할 것으로 판단된다. 본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 합성율이 80~140%의 경우, 합성율이 내화시간에 미치는 영향은 적은 것으로 보이며, 스티드 커넥터와 콘크리트 슬래브에 부착된 열전대의 온도 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 합성율의 범위가 완전합성에 가까운 80% 이상의 범위임을 고려하면, 합성율의 범위를 더 낮춰 합성율의 영향을 추가로 검토하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

2. 공칭휨강도를 기준으로 산정한 하중에 대해 재하하중을 30, 60, 70%로 증가시키는 경우 내화시간이 저감되는 경향을 보인다. 그러나 상관관계를 명확히 평가하기 위해서는 재하율을 더 증가시켜 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3. H형강 합성보의 온도분포는 보 중앙부와 1/4위치를 비교하면 위치에 의한 온도 차이는 없으나, H형강 단면의 온도분포는 보 하부 플랜지에서 웹, 상부 플랜지, 스티드 커넥터, 콘크리트 슬래브의 순으로 온도가 저하된다. 또한 스티드 커넥터는 콘크리트 슬래브 내부에 묻혀 있어도 H형강에 의해 열전달이 되어 온도가 350°C 이상으로 상승한다. 그러므로 스티드 커넥터는 온도 특성에 의한 내력변화를 추가적으로 검토할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 지원(2008 기본과제)으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 천성철, 주영광, 정광량, 김상대, “비대칭 유공 합성

- 보 iTECH beam의 휨성능평가”, 대한건축학회논문집 구조계, Vol.18, No.4, pp.67-74(2002).
2. 김상섭, 김상모, 김성배, 서동기, 김규석, “단순지지 T형 합성보의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 한국강구조학회논문집, Vol.16, No.2, pp.225-233(2004).
3. 허병욱, 배규웅, 문태섭, “매입형(슬림플로어) 합성보의 휨성능 평가-춤이 깊은 데크플레이트와 비대칭 H형강 철골보”, 한국강구조학회논문집, Vol.16, No.2, pp.235-245(2004).
4. (사)한국복합화건축기술협회, “2007년도 정기총회 및 1차 기술세미나, 후분양제도에 대응하기 위한 공기단축 복합화공법”(2007).
5. 홍원기, 박선치, 이경훈, 김점한, 이호찬, 황윤하, “친환경 층고 절감형 합성보의 시공 Process 및 시공사례”, 한국생태환경건축학회 논문집, Vol.7, No.6(2007).
6. 대한건축학회, “건설교통부 고시, 건축구조설계기준”(2005).
7. D.L. Mullett, “Composite Floor Systems”, Blackwell Science(1998).
8. Deric J. Oehlers, Mark A. Bradford, “Elementary Behaviour of Composite Steel and Concrete Structural Members”, Butterworth-Heinemann(1999).
9. 한국표준협회, “KS F 2848 - 단면 형상 계수에 따른 구조용 강재의 내화 피복 두께 산정 방법”(2005).
10. 건교부, “건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙”, 건설교통부령 제563호(2007).
11. 한국건설기술연구원, “구조물 성능기반화재거동 해석 및 설계기술연구(I)”(2007).
12. 한상훈, 최승관, 김희주, “비대칭 H형강을 사용한 슬림플로어 보의 내화성능에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집, Vol.19, No.4, pp.235-246(2006).
13. 이승재, 강성덕, 오명호, 김명한, 김상대, “SC 합성기둥의 내화성능에 대한 실험연구”, 한국강구조학회 논문집, Vol.19, No.4, pp.425-434(2007).
14. 최승관, 김성배, “TSC 합성보의 화재 시 거동 및 전열특성에 관한 실험적 연구 - 철근 보강과 하중비에 의한 내화성능의 영향”, 대한건축학회논문집 구조계, Vol.24, No.1, pp.27-35(2008).
15. S.K. Choi, I.W. Burgess and R.J. Plank, “Performance in Fire of Long-Span Composite Truss Systems”, Engineering Structures, in press.
16. 한국표준협회, “KS F 2257 - 구조부재의 내화시험방법”(2005).