

## 스터드커넥터의 내화성능에 관한 연구 Study on Fire Performance of Stud Connectors

김성배 · 한상훈\* · 최승관\*†

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

\*FireSERT School the Built Environment University of Ulster,  
(주)켄구조연구소  
(2009. 4. 21. 접수/2009. 8. 7. 채택)

### 요 약

본 연구는 합성구조에 사용되는 스텐드커넥터의 화재시 성능에 대한 연구이다. 스텐드커넥터는 전단연결재로 가장 폭넓게 사용되고 있으며, 콘크리트와 강재를 일체화시켜 합성 성능을 확보한다. 스텐드커넥터에 대한 상세 내화성능은 아직 명확한 자료가 없으며, 향후 성능설계에서 무피복 합성보 등에 대한 설계자료로 요구 된다. 본 실험의 스텐드커넥터 성능시험은 푸시 아웃 실험을 변형하여 특수 전기로와 결합 ISO 표준온도곡선을 기본으로 거동 성능시험을 수행하였으며, 화재 조건의 파괴 형상을 기반으로 성능 분석 방법을 제안하였다.

### ABSTRACT

This research aims to conduct a pilot study for the in-fire performance of headed studs, commonly used in composite structures over the world. The robustness of the shear studs in fire appears to be a key element to govern the composite behaviour after a sudden local instability developed in structures such as trusses and cellular beams. In order to experimentally evaluate the residual strength of studs in fire, the standard push-out test was modified for a half of the original set-up to be equipped with a furnace. The adjustments allow the steel section to have a 3-sided exposure against fire. Under the Standard ISO fire, the modified push-out tests under loading were conducted to identify the failure mechanism of the studs in relation to temperature developments.

**Key words** : Fire performance, Stud connectors, Composite beam, Push - out test

### 1. 서 론

콘크리트와 강재의 조합으로 구성된 합성구조는 각 재료의 장점을 혼합하여 오랜 기간 동안 사용되어 왔다. 최근 재료비 급등으로 합성구조에 대한 관심은 더욱 증가하여, 다양한 형상의 합성구조가 개발되었다.<sup>1,2)</sup> 합성구조는 두 개의 이질재가 하나의 부재로 거동을 하므로 두 이질재료를 하나로 연결하는 전단연결재의 기능이 중요하다. 전단연결재는 철근과 형강, 스텐드커넥터 등이 사용되어 왔으나, 사용의 편이성과 내력평가의 용이성 등으로 스텐드커넥터가 주로 사용되고 있다.

반면 합성구조에 사용되는 강재는 온도에 따른 내화

성능 저감 등으로 적절한 내화피복을 필요로 한다. 현재 국내에서 적용되고 있는 내화관련 법규는 국토해양부령 제36호 '건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙'과 국토해양부 고시 제2008-154호 '내화구조의 인정 및 관리기준'에 준하며, 시험방법 등은 '내화구조 인정 및 관리업무 세부운영지침(2008. 07. 15)'과 한국산업규격 KS F 2257 '건축 구조 부재의 내화 시험방법' 등에 의한다. 현행 법 체계는 사양적 설계를 중심으로 되어 있으나, 성능기반 화재안전 설계도 가능토록 하고 있다.<sup>3)</sup> 이미 미국과 영국, 일본 등에서는 1980년대 중반이후 사양적 설계기술로는 구조물의 화재안전이 보장될 수 없음을 인식하여 성능기반 화재안전 설계기술이 적용되고 있다.<sup>4,6)</sup>

본 연구에서는 합성구조에서 두 이질재를 연결하는

† E-mail: s.choi@ulster.ac.uk

주요 연결제인 스티드커넥터에 대한 내화성능 평가를 수행하였다. 스티드커넥터에 대한 전단연결제의 성능 평가는 보 휨실험과 푸시아웃 시험 등으로 진행된다. 보 휨실험은 구조부재로 제작되므로 보다 명확한 전단연결제의 성능을 평가할 수 있으나, 제작 및 실험 규모가 커지는 단점이 있다. 반면 푸시아웃 시험은 제작 및 시험방법 등이 단순하여 폭 넓게 사용되고 있다. 이미 필자 등은 고온에서 다양한 합성보의 성능평가와 스티드커넥터의 온도영향 등을 확인하였으며,<sup>7-10)</sup> 본 연구에서는 푸시아웃 시험을 통해 스티드커넥터의 내화성능을 평가하고자 한다.

## 2. 합성보와 전단연결제

### 2.1 합성보의 거동

합성보는 강재보와 콘크리트 슬래브가 하나의 단일부재로 거동하는 구조부재이다. 강재보는 웹 중앙을 기준으로 상부는 압축, 하부는 인장력이 작용하나, 슬래브와 합성작용으로 거동하면 콘크리트 슬래브의 유효폭 까지 압축대가 형성되어 중립축이 슬래브 쪽으로 이동하게 된다. 그러므로 중립축 이동으로 휨내력이 상승하여 강재보를 효과적으로 사용할 수 있다.

강재보와 콘크리트 슬래브 사이에는 분리되려는 전단력이 발생하게 되는데 이 때 전단력에 저항하고, 두 부재 간 일체화를 도모하는 것이 시어커넥터이다. 두 부재에서 발생하는 수평전단력( $V_s$ )은 식(1) 중 작은 값으로 하며, 일반적으로 콘크리트에 의한 수평전단력( $V_{s2}$ )이 강재보 수평전단력( $V_{s1}$ ) 보다 크다.

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

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

여기서,  $F_y$ : 강재의 항복강도(N/mm<sup>2</sup>)

$A_s$ : 강재보 단면(mm<sup>2</sup>)

$f_{ck}$ : 콘크리트 압축강도(N/mm<sup>2</sup>)

$b_e$ : 콘크리트 슬래브의 유효폭(mm)

$t_c$ : 콘크리트 슬래브의 유효두께(mm)

시어커넥터는 일반적으로 스티드커넥터로 사용하며, 스티드커넥터는 식(1)에서 산정한 수평전단력을 스티드커넥터의 공칭강도( $Q_n$ )로 나누어 그 개수(N)를 최대 정모멘트 점과 모멘트 0점 사이에 등간격으로 배열한다. 스티드커넥터의 공칭강도 산정은 식(2)와 같다.<sup>11)</sup>

$$Q_n = 0.5 A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq R_g R_p A_{sc} F_u \quad (2)$$

여기서,  $A_{sc}$ : 스티드커넥터의 단면적(mm<sup>2</sup>)

$R_g, R_p$ : 감소계수,  $w_c$ : 콘크리트의 단위중량

$E_c$ : 콘크리트의 탄성계수( $= 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_{ck}}$ )

$F_u$ : 스티드커넥터의 인장강도(MPa)

### 2.2 전단연결제의 내력평가

스티드커넥터에 관한 연구는 1950년대 I.M. Viest에 의해 시작되었다. 초기 그가 제안한 스티드커넥터의 전단내력( $Q_u$ )은 식(3)과 같다.<sup>12)</sup>

$$Q_u = 37.5 A_s \sqrt{f_c} \quad (3)$$

그 후 1971년 J. W. Fisher 등은  $\phi 19$  스티드커넥터를 사용한 푸시아웃 실험결과를 다중회귀분석하여 전단내력을 식(4)와 같이 정리하였다.<sup>13)</sup>

$$Q_u = 1.106 A_s f_c^{0.3} E_c^{0.44} \quad (\text{kips}) \quad (4)$$

또한 J. W. Fisher는 식(4)를 설계용식으로 단순화하여 식(5)를 제안하였다.

$$Q_u = 0.5 A_s \sqrt{f_c E_c} \quad (\text{kips}) \quad (5)$$

일본에서는 松井은 기존 연구자의 실험결과와 추가 실험을 통해 스티드커넥터의 내력을 식(6)으로 제안하였다.<sup>14)</sup>

$$Q_u = 100 A_s \sqrt{(H/D) f_c} + 1000 \quad (\text{kgf}) \quad (6)$$

국내 연구에서도 스티드커넥터의 축단면적을 포함한 다중회귀곡선을 통해 전단내력을 평가하여 식(7)을 제안하였다.<sup>15)</sup>

$$Q_u = 1.38 A_s^{0.89} f_c^{0.3} E_c^{0.52} \quad (\text{kgf}) \quad (7)$$

미국과 캐나다는 상기 식(5)를 기본으로 식(8)을 적용하여 스티드커넥터의 전단내력을 평가하였다. 또한 식(8)은 최근 건축구조설계기준(KBC 2009)이 개정되기 전 까지 국내 기준으로 사용되었다.

$$Q_u = 0.5 A_{sc} \sqrt{f_c E_c} \leq A_{sc} F_u \quad (8)$$

상기 식(8)에 대해 유로코드(Eurocode 4)에서는 식(9)를 적용하고 있다.<sup>6)</sup>

$$Q_u = 0.37 A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq 0.8 A_{sc} F_u \quad (9)$$

이와 같이 스티드커넥터에 관한 연구는 오랫동안 국내·외 지속되어 각국의 설계기준에 삽입되어 있으며 그 기본방향은 실험을 통한 경험식에 기초하고 있다. 또한 실험방법도 보 휨실험과 푸시아웃 실험으로 구분되며, 푸시아웃 실험의 경우 실험체 형상은 리하이(Lehigh) 대학과 영국 기준 등을 기준으로 적용되고 있다.

### 3. 실험계획 및 방법

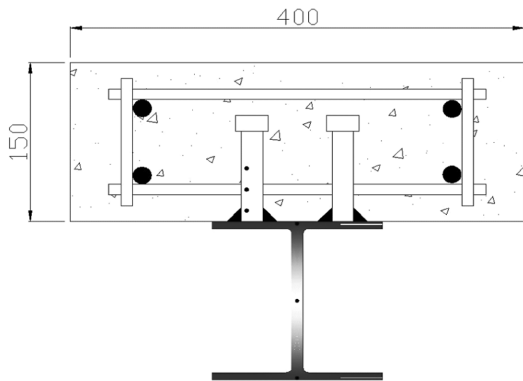
실험은 스테드커넥터의 온도 특성을 평가하기 위해 상온과 30분 가열 후, 60분 가열 후로 구분하여 재하하였다.

실험체 형상은 Figure 1과 같다. 실험체는 한쪽 면에 콘크리트 슬래브를 폭 400mm, 두께 150mm, 높이 500mm로 제작하였다. H형강은 150×150×7×12 (SS400) 길이는 650mm이며, 플랜지에 스테드커넥터  $\phi 19$ (h = 100 mm) 2개를 설치하였다. H형강과 스테드커넥터로 구성된 실험체에는 K형 열전대를 Figure 1(b)와 같이 플랜지와 웨브, 스테드커넥터 축부 등에 설치하여 열특성을 확인하였다.

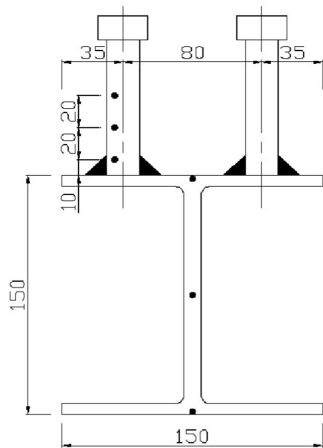
실험은 고온조건이 가능하도록 표준화재온도를 구현할 수 있는 전기가열로를 제작하였다. 전기로는 Figure

2와 같이 한쪽에 콘크리트 슬래브가 있고, 반대편은 H형강의 3면을 가열하도록 제작하였다. 가력은 30분 또는 60분 가열 후 즉시 액추에이터를 이용하여 정적 가력(1,000kN)하였고, 가력 속도는 1mm/1min 이다. 변형량은 2개의 변위계(LVDT, 50mm)로 측정하였고 하중과 온도는 정적변형기(TDS 303)로 측정하였으며 수직 반력 및 회전평형은 발생하지 않도록 하였다.

Table 1은 실험체 제작에 사용된 H형강과 스테드커

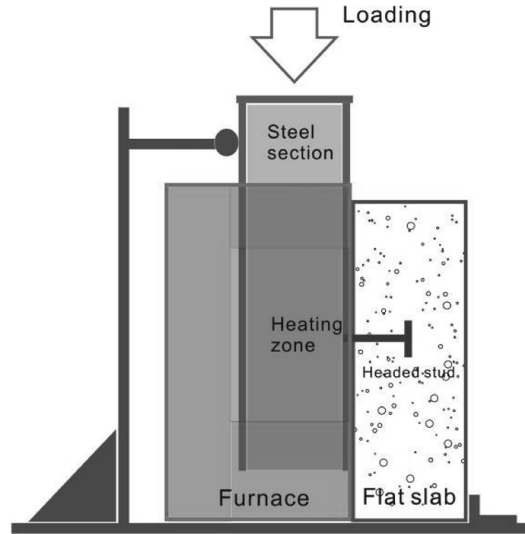


(a) Composite beam with ribbed bar



(b) Location of thermocouple

Figure 1. Specimen for modified push out test.



(a) Conceptual section of modified push out test



(b) Instrumentation arrangements

Figure 2. Proposed slip test set-up in fire.

**Table 1.** Properties of Steel Stud Connector

	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Shear Stud ( $\phi 19$ )	349	427	25
H-beam	322	452	33

**Table 2.** Properties of Concrete

Slump	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight ( $\text{kg/m}^3$ )	Design Strength (MPa)
18cm	34	41	2,415	28

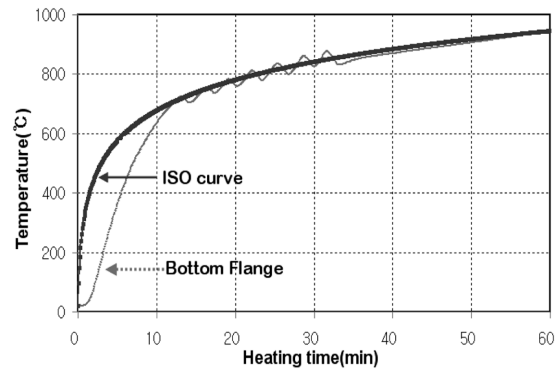
넥터의 기계적 성질이다. 스티드커넥터는 제품 관리규격상 인장강도는 379.5MPa이나, 시험결과 관리규격을 상회한다. Table 2는 콘크리트 압축강도 시험결과이다. 콘크리트의 설계압축강도는 28MPa이다.

## 4. 실험결과 및 분석

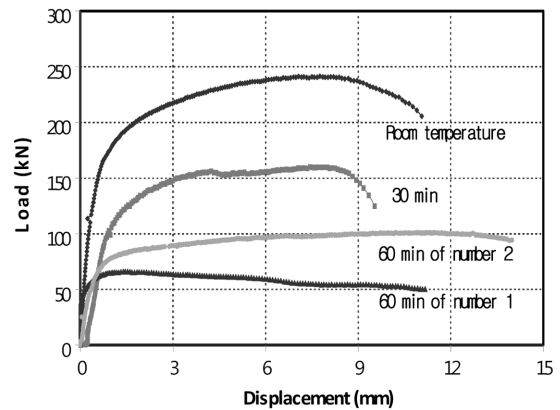
### 4.1 실험결과

Table 3은 실험결과를 정리한 것이다. 각 실험체에 대해 최대하중과 최대하중 시 변형량, H형강의 상부 플랜지와 스티드커넥터 10mm 높이에 설치된 열전대의 온도를 정리하였다. 상온 재하와 30분, 60분 가열 후 재하 시 온도증가에 따른 급격한 내력저하가 확인되었다. 또한 60분 가열 후 재하 경우, 두 실험체간 내력 편차가 크다.

Figure 3은 본 실험을 위해 제작한 전기로의 표준 가열곡선과 푸시아웃 실험체의 온도분포양상이다. 표준간열곡선의 온도는 식(10)과 같이 시간에 따른 온도의 로그함수로 정의되며, 푸시아웃 실험체의 온도분포는 콘크리트 슬래브의 H형강 하부 플랜지에 부착한 열전대 온도이다. 비교결과 약 10분 이내의 경우 표준가열곡선과 보 하부 플랜지의 온도분포가 다소 상



**Figure 3.** Temperature-time curves compared with ISO standard curve and bottom flange of 60minute specimen number 2.



**Figure 4.** Load-displacement curves for push out test.

이하나 그 이후 표준가열곡선과 거의 동일한 온도분포를 보인다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (10)$$

여기서, T: 노내 평균온도, t: 시간

**Table 3.** Summary of Test Results

Specimen Name & Classification		Max. Load (kN)	Max. Displacement at Max. Load (mm)	Temperature (°C)	
				Top Flange	10mm at Stud
RT	Room Temperature	241.5	7.73	-	-
30M	30minute	159.9	7.58	602.8	434.5
60M-1	60minute	66.1	1.64	807.4	599.7
60M-2	60minute	100.4	9.53	794.4	607.5

Figure 4는 푸시아웃실험의 하중 변위관계이다. 전반적으로 안정적인 변형거동을 확인할 수 있다. 그러나 60-1 실험체는 상대적으로 초기 최대하중이후 하중이 증가하지 않고 계속 저하하며 타 실험체와 다소 상이한 경향을 보이고, 최대하중도 60-2 실험체 보다 적게 나타나고 있다.

Figure 5~Figure 7은 30분 및 60분 가열 후 재하 한 각 실험체의 열전대에서 측정된 온도와 시간 그래프이다. 전기로에 노출된 정도에 따라 하부 플랜지에서부터 슬래브 콘크리트에 묻힌 스투드 상부로 올라갈수록 현저한 온도저감을 보인다. 특히 보 하부 플랜지는 Figure 3과 같이 표준가열곡선의 온도분포와 거의 동일하나 온도가 다소 편차를 보인다. 또한 각 위치별 시

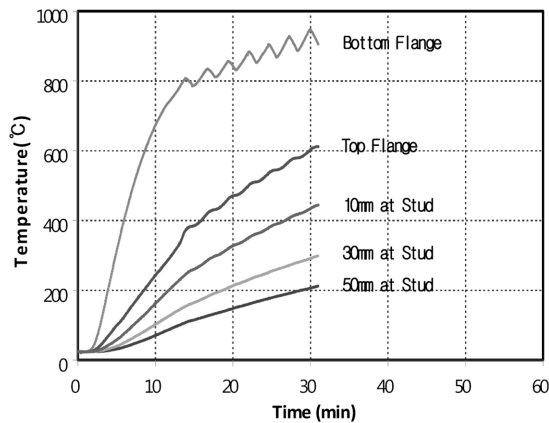


Figure 5. Temperature-time curves in steel and stud connector of 30minute specimen.

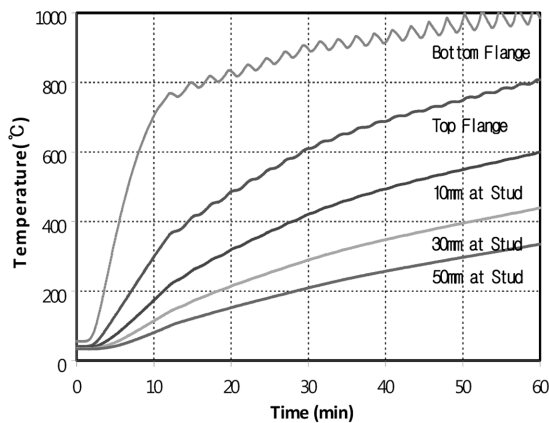


Figure 6. Temperature-time curves in steel and stud connector of 60minute specimen number 1.

간별 온도분포는 세 실험체 모두 동일하여 온도 편차가 크지 않음도 확인할 수 있다.

Figure 8은 60-1 실험체의 실험 종료 후 스투드커넥터 파괴양상이다. Figure 8(b)를 보면 스투드커넥터가 충분히 연성적인 거동을 한 후 파단되어, 고온 시 내

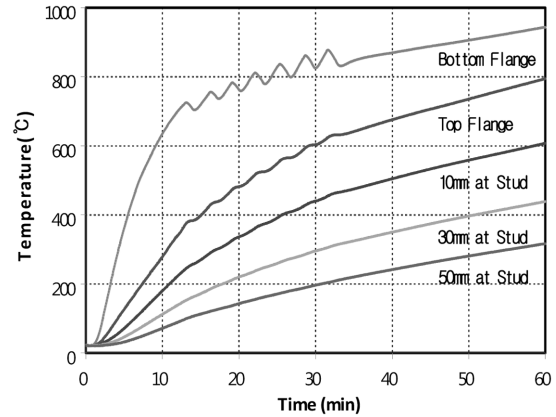
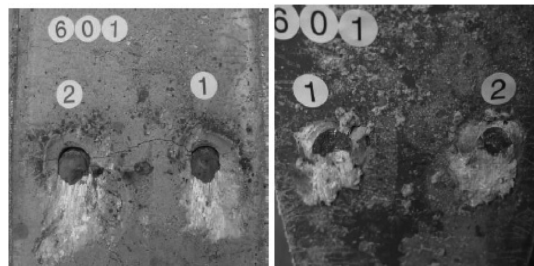


Figure 7. Temperature-time curves in steel and stud connector of 60minute specimen number 2.



(a) Surface of concrete and steel section



(b) Failure of headed stud

Figure 8. Failure of shear connector after push-out test in fire (60M-1).



**Table 5.** Test result and evaluation of shear force of stud connector

Specimen	Test Result (kN)	Evaluation (kN)	
RT	241.5	237.7	Equation 2
30M	159.9	168.2	Equation 11
		163.1	Equation 12
60M	83.3	77.3	Equation 11
		103.9	Equation 12

이다. 상온은 식(2)를 적용하여 평가한 것이고, 고온은 식(11)과 식(12)의 일본과 뉴질랜드의 강재온도에 따른 내력저감을 이용하여 스테드커넥터의 고온성능을 평가한 결과이다.

상온의 경우 실험결과는 식(2)의 평가식과 잘 대응하고 있다. 고온의 경우, 평가는 Table 4에서 산정한 각 시간(30분, 60분)에 대해 스테드커넥터 10mm 높이에서 측정된 평균온도(30분의 경우 431.6°C)를 기준으로 식 2로 산정한 기준 내력치로 저감한 것이다. Figure 1(b)와 같이 스테드커넥터 10mm 위치는 H형강 보에 부착된 스테드커넥터의 최소 측정위치이며, H형강 보에 가장 인접한 곳으로 볼 수 있다. 이곳에서 측정된 평균온도를 기준으로 온도저감에 따른 내력비를 적용하면, 두 식은 실험결과와 상당히 잘 일치함을 알 수 있다.

60분 실험결과는 두 개 실험체의 평균치로 적용하였다. 60분 실험체의 경우 다소 편차가 존재함을 고려하면, 식(11)의 일본 평가식은 상대적으로 저온 보다 고온평가가 잘 대응되는 경향을 보이며, 식(12)의 뉴질랜드 평가식은 고온과 저온에서 실험결과와 상당히 적합한 평가를 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

실험결과가 제한되어 적합한 평가식을 선정하기는 어렵다. 그러나 스테드커넥터 10mm 높이에서 측정된 평균온도로 강재의 내력비를 저감시킨 후 상온의 스테드커넥터 전단내력을 곱하면, 고온내력을 평가할 수 있다. 이 때 스테드커넥터의 위치와 시간에 따른 온도는 '4.2절의 스테드커넥터의 온도 분포'와 같이 평가가 가능하다. 또한 고온에서 스테드커넥터의 전단내력을 알면, 반대로 스테드커넥터의 위치에 따른 온도분포도 확인할 수 있게 된다.

### 5. 결 론

1. 스테드커넥터의 고온 전단내력은 스테드커넥터 10mm 높이에서 측정된 온도를 이용하여 일본과 뉴질랜드의 온도에 따른 강재의 내력저감식으로 평가하면

실험결과와 잘 일치한다. 특히 일본 평가식은 저온 보다 고온평가가 잘 대응되는 경향을 보이며, 뉴질랜드 평가식은 고온과 저온에서 실험결과와 상당히 적합한 평가를 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

2. 슬래브에 삽입된 스테드커넥터의 화재에 의한 고온 특성은 파괴양상을 통해 콘크리트 강도 보다 스테드커넥터를 기준으로 평가하는 것이 적절할 것으로 사료된다. 또한 스테드커넥터가 콘크리트에 삽입되어 있는 조건 등을 반영하면, 고온내력은 위치에 따른 온도 특성과 시간영향 등을 일차함수로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 슬래브에 삽입된 스테드커넥터의 전단내력은 온도 증가에 따라 감소하며, 보 플랜지에서 스테드커넥터 높이 방향으로 증가할수록 온도는 저감하여 콘크리트 슬래브가 온도를 흡수하는 경향을 보인다.

본 연구는 콘크리트의 압축강도가 제한된 조건 속에서 시행된 실험결과이다. 그러나 실험결과를 통해 합성정보 등에 사용되는 전단연결재의 화재 시 고온성능은 스테드커넥터의 온도로 평가가 가능하며, 스테드커넥터의 위치와 시간의 영향도 평가가 가능함을 확인하였다. 향후 콘크리트 강도 및 물성치 등에 대한 자료가 더 정비되면, 무피복 조건의 스테드커넥터 고온성능을 평가하는 것이 용이할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 지원(2009 기본과제)으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 천성철, 주영광, 정광량, 김상대, “비대칭 유공 합성보 iTECH beam의 휨성능평가”, 대한건축학회논문집 구조계, 18권, 4호(2002).
2. 김상섭, 김상모, 김성배, 서동기, 김규석, “단순지지 T형 합성보의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 한국강구조학회논문집, 16권, 2호(2004).
3. 국토해양부, “건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙”, 국토해양부령, 제36호(2008).
4. ACI 216R-89, “Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements”(1989).
5. European Committee for Standardisation, ENV 1993-1-2: Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1.2: General Rules: Structural Design for Fire, Brussels, BE(1993).
6. European Committee for Standardisation, ENV 1994-1-2: Eurocode 4: Design of Composite Steel

- and Concrete Structures. Part 1.2: General Rules: Structural Fire Design, Brussels, BE(1994).
7. 김성배, 최승관, 한상훈, “H형강 합성보의 화재거동에 관한 실험적 연구”, 한국화재소방학회논문집, 제 22권, 2호 (2008).
  8. 최승관, 김성배, “TSC 합성보의 화재 시 거동 및 전열특성에 관한 실험적 연구 - 철근 보강과 하중비에 의한 내화성능의 영향”, 대한건축학회논문집 구조계, 제 24권, 1호(2008).
  9. 한상훈, 최승관, 김희주, “비대칭 H형강을 사용한 슬림플로어 보의 내화성능에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집, 19권, 4호(2006).
  10. S.K. Choi, I.W. Burgess and R.J. Plank, “Performance in Fire of Long-Span Composite Truss Systems”, Engineering Structures, Vol.3, No.3, pp.683-694(2008).
  11. 한국강구조학회, “KBC 2009 강구조설계”(2009).
  12. I.M. Vest, “Investigation of Stud Shear Connector for Composite Concrete and Steel T-beam”, ACI Journal, Vol.27(1956).
  13. J.G. Ollgaard, R.G. Slutter and J.W. Fisher, “Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-weight Concrete”, AISC Engineering Journal, Vol.8, No.2(1971).
  14. 松井, 平城, “頭付府きスタッドの強度評價式の誘導”, 日本土木學會構造工學論文集, Vol.35A(1989).
  15. 金圭石, 金相燮, “スタッドコネクタのせん断耐力と合成はりの舉動に關する實驗的研究”, 日本建築學會構造系論文報告集, 第389号, pp.79-87(1988).
  16. 日本建築學會, “鋼構造耐火設計指針”(1999).
  17. Michael Spearpoint, “Fire Engineering Design Guide”, 3rd Edition(2008).