

신형상 U형 하이브리드 합성보의 내화성능에 관한 연구

김 성 배¹⁾ · 김 상 섭^{2)*} · 유 덕 수³⁾ · 최 승 관⁴⁾

¹⁾ 소장, (주)더나은구조엔지니어링 ²⁾ 교수, 한국기술교육대학교, 건축공학부 ³⁾ 대리, (주)더나은구조엔지니어링 ⁴⁾ Lecturer, University of Ulster

Fire Resistance of U-shape Hybrid Composite Beam

Kim, Sung Bae¹⁾ Kim, Sang Seup^{2)*} Ryu, Deog Su³⁾ Choi, Seng Kwan⁴⁾

¹⁾ Manager, The Naeun Structural Engineering, Seoul, 150-105, Korea

²⁾ Professor, School of Architectural Engineering, The Korea University of Technology & Education, Cheonan, 330-708, Korea

³⁾ Section Chief, The Naeun Structural Engineering, Seoul, 150-105, Korea

⁴⁾ Lecturer, School of the Built Environment, University of Ulster, Newtownabbey, BT37 0QB, UK

ABSTRACT : This paper aims to experimentally investigate the fire resistance of U-shaped hybrid composite beams protected by spray and paint insulations. Subjected to two and three hours of the Standard ISO fire, the flexural performance of 4.4m beams with/without imposed loadings was examined with respect to failure criteria such as deflection and deflection rate of the mid-span and temperatures measured in the steel section. The results demonstrated that the proposed configuration of the composite beam is able to achieve a very competitive 3-hour fire resistance rating in economical aspects.

KEYWORDS : fire resistance performance, spray-on fire protection, fireproof paint, composite beam, hybrid forming beam(HyFo beam)

1. 서 론

합성구조는 강재와 콘크리트를 조합하여 기존 강구조 또는 철근콘크리트 구조에 비해 경제성 및 시공성 등이 향상된 구조시스템으로 개발사례가 증가하고 있다^[1]. 반면 합성구조의 내화성능평가는 내화구조가 건축구조에서 차지하는 비중이 적어서 상대적으로 내화성능에 대한 연구가 미진하다고 할 수 있다^{[2],[3],[4],[5],[6],[7]}.

내화구조 성능평가기준은 한국산업표준 KS F 2257-1(건축부재의 내화시험 방법-일반 요구사항)과 KS F 2257-6(건축부재의 내화시험 방법-보의 성능조건)에 명기되어 있다^{[8],[9],[10]}. 재하가열시험의 경우, 변형량(D)과 변형률(dD/dt)을 모두 초과 시 하중지지력을 상실한 것으로 본다. 단 변형

률은 변형량이 $L/30$ (L :지점간 길이)을 초과할 때 까지 적용하지 않으며, 하중지지력 상실(또는 부적합)은 내화성능을 만족하지 못하는 것으로 구조적 붕괴는 아니다. 비재하가열시험의 경우, 측정된 강재 단면의 평균온도가 538°C ($1,000^{\circ}\text{F}$), 최대온도 649°C ($1,200^{\circ}\text{F}$)를 넘지 않아야 한다. 재하가열시험의 경우 재하하중 산정기준은 건축구조부재의 내화시험방법(KS F 2257-1(2005))에 명기되어 있다. 시험하중은 구조기준에서 규정된 설계 방법 또는 의뢰자가 제시한 사용 하중으로 한다.

신형상 U형 하이브리드 합성보의 형상은 Fig. 1과 같이 2

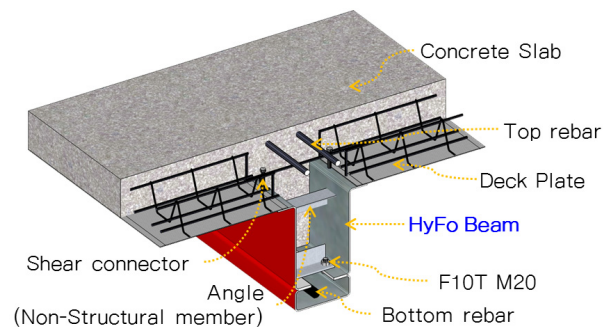


Fig. 1 Shape of HyFo beam

Note.-Discussion open until February 28, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 17, 2013; revised May 14, 2013; approved on July 24, 2013. © KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-41-560-1330 Fax. +82-41-560-1244
 E-mail: kimss@kut.ac.kr

개의 대칭되는 Z형 측판과 ㄷ자 형상의 하부강판, 내부 철근으로 구성되며, 2개의 측판과 하부강판은 고력볼트로 접합한다. 또한 2개의 측판과 하부강판은 모두 성형으로 냉간가공 제작하며, 측판과 하부강판은 필요에 따라 두께 및 강도를 상이하게 한다. 보 내부 철근은 내력증가와 무근 콘크리트의 취성파괴를 방지하기 위해 설치하며, 보 내부의 상·하부앵글은 1차 제작과정에서 발생할 수 있는 변형을 제어한다. 이때 상부앵글은 작업 중 발판으로 사용하고, 하부앵글은 형태유지와 고력볼트 체결 시 1면 전단에서 2면 전단으로 볼트내력을 증가시킨다. 또한 상·하부의 앵글과 보 내부의 Z형 측판, 고력볼트 등은 콘크리트와 강판을 일체화시키는 기능을 한다. 이러한 합성보는 하나의 보에 강도가 상이한 측판과 하부강판, 철근 등 여러 부분이 조합되어 하이브리드 보와 성형으로 냉간가공 하는 특징을 갖는 하이브리드 성형 보(Hybrid Forming Beam, 이하 HyFo Beam)가 된다.

본 연구에서는 신형상 U형 하이브리드 합성보를 개발하여 합성보 휨성능 평가와 기둥 보 접합부 내진성능평가를 하였으며^[5], 그 후속으로 신형상 U형 합성보의 내화성능평가를 실시하였다. 내화성능평가는 세라믹계의 뿔칠재와 내화페인트로 구분하여 내화시험을 하였다. 시험 변수는 피복재의 종류(뿔칠재와 페인트)와 내화시간(2시간, 3시간), 하중가력 유무(재하와 비재하), 뿔칠재 두께 등이다.

2. 시험 계획

2.1 시험 계획

시험은 새로운 형상의 합성보 내화성능을 평가하기 위해 실시하였으며, 단순지지 합성보로 제작하였다. 내화피복재는 뿔칠재와 내화페인트에 대해 각각 특정 1개사 제품으로 한정하였으며, 내화시간은 2시간, 3시간으로 구분하였다. 시험변수는 내화피복재의 종류와 하중가력 유·무, 내화시험시간, 피복두께 등을 변수로 8개의 시험체를 제작하였다. 시험체 변수는 Table 1과 같다.

합성보 강재 표면에는 방청페인트 도장 후 내화뿔칠이나 내화페인트를 도포하였다. 시험에 사용된 내화피복재는 모두 H형강에 적용하여 내화구조인정을 받은 제품이다. 내화구조 인정두께는 내화뿔칠재의 경우 3시간 33mm, 2시간 23mm 이고, 내화페인트는 2시간 3.65mm이다. 그러나 인정시험 시 적용한 피복두께는 시공 시 오차를 고려하여 10% 저감되므로 시험두께는 각각 30mm, 21mm, 3.3mm가 된다^[11]. 피복두께는 비재하가열시험에 의한 온도특성으로 결정한다^[8].

시험체에 사용된 재료는, 콘크리트 압축강도는 24MPa이

고, 강재의 항복강도는 235MPa(SS400)이며, 보 내부에 사용한 철근의 항복강도는 300MPa(SD300)이다. 콘크리트 물성치는 Table 2와 같고, 강재에 대한 소재시험결과는 Table 3과 같다. 콘크리트 물성치는 제조사 제시값이다. 내화뿔칠재의 주원료는 석고가 약 60% 이상의 세라믹계이며, 내화페인트의 경우 유성 아크릴계 수지이다. 내화뿔칠재의 중량 성분은 Table 4와 같고, 내화페인트의 성분은 Table 5와 같다. 각 성분분석 내용은 제조사 영업비밀로 개략적인 내용만 서술하였으며, Table 5는 특허를 참고하였다^[12].

시험체 형상은 Fig. 2와 같이 슬래브가 600×150(폭×두께, mm)이고, 합성보 단면은 300×270×5.8(축×폭×두께, mm)

Table 1. Specimen parameters

| No. | Name | Material | Load | Test time | Cover thk. (mm) |
|-----|-------------|------------|-----------|-----------|-----------------|
| 1 | S-L-3H-20 | Spray coat | loading | 3Hour | 20 |
| 2 | S-L-3H-15 | Spray coat | loading | 3Hour | 15 |
| 3 | S-U-2H-15-1 | Spray coat | unloading | 2Hour | 15 |
| 4 | S-U-2H-15-2 | Spray coat | unloading | 2Hour | 15 |
| 5 | S-U-3H-20-1 | Spray coat | unloading | 3Hour | 20 |
| 6 | S-U-3H-20-2 | Spray coat | unloading | 3Hour | 20 |
| 7 | P-U-2H-1 | Paint | unloading | 2Hour | 1.64 |
| 8 | P-U-2H-2 | Paint | unloading | 2Hour | 1.36 |

Table 2. Mix proportion of concrete

| Slump (mm) | W/C (%) | S/a (%) | Cement unit weight (kg/m ³) | Compressive Strength(MPa) |
|------------|---------|---------|---|---------------------------|
| 120 | 48.0 | 47.5 | 344 | 24 |

Table 3. Material properties of steel(SS400)

| Thickness (mm) | Yield Strength (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Elongation percentage(%) |
|----------------|----------------------|------------------------|--------------------------|
| 5.8 | 355.0 | 529.1 | 23.4 |

Table 4. Weight mix proportion of spray-on fire protection

| | Gypsum | Styrofoam | Pulp | Calcium et al. | Additive |
|-----------------|--------|-----------|------|----------------|----------|
| Weight ratio(%) | 60 | 2 | 3 | 30 | 5 |

Table 5. Weight mix proportion of fireproof paint

| | acrylic resin | blowing agent | catalyst | carboni-sation | pigment | Additive |
|-----------------|---------------|---------------|----------|----------------|---------|----------|
| Weight ratio(%) | 5~35 | 5~25 | 10~40 | 5~25 | 3~15 | 10~30 |

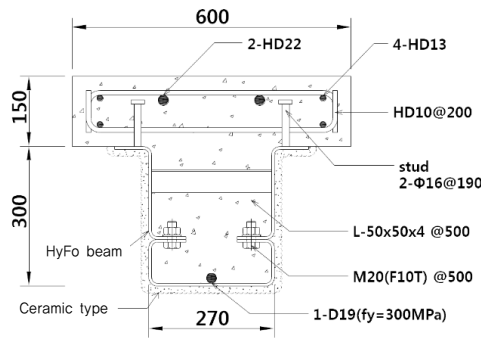


Fig. 2 Section shape (unit : mm)

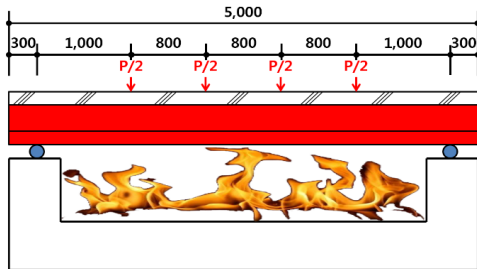


Fig. 3 Plan view of test set up

의 강관으로 절곡하였다. 시험체 길이는 Fig. 3과 같이 재하 시험체는 5,000mm이고 그 외 시험체는 4,700mm이나, 지점간 거리는 모두 4,400mm이다. 시험체는 합성보 이므로 콘크리트 슬래브와 일체로 구성되어 있으며, 슬래브 폭은 시험실여건을 고려하여 600mm로 하였다.

2.2 시험 방법

재하가열시험은 변형량과 변형속도를 측정하고, 비재하는 온도를 측정하여 관리기준과 비교하였다. 또한 시험체 설치와 열전대 부착방법 및 위치 등은 내화구조인정 시험방법을 준용하였으며, 각 시험체는 표준화재곡선에 의해 가열시험을 수행하였다.

하중가력방법은 Fig. 3, Fig. 5와 같이 두 개의 오일 잭을 이용하여 4점 가력하였으며, 처짐은 변위계를 이용하여 중앙에서 최대처짐을 측정하였다(KS F 2257-6(2006)). 또한 비재하가열시험의 경우 열전대 부착 위치는 Fig. 4와 같다.

시험체의 표면온도 측정을 위해 열전대는 부재 지점간 길이의 1/4, 2/4, 3/4 위치에 각각 4개씩 표면에 설치하였고, 열전대의 종류는 KS C 1602(2009)의 K형이다. K형 열전대의 온도범위는 클래스 1의 경우 375~1,000(°C)이다. 열전대 설치시 열전대의 소선을 3회 이상 꼬아서 접점을 발생시켜 설치 위치의 철골 단면 중앙부분에 위치하도록 하였다^[11]. 하중 지지력 판정기준에 의한 변형량(D)과 변형률

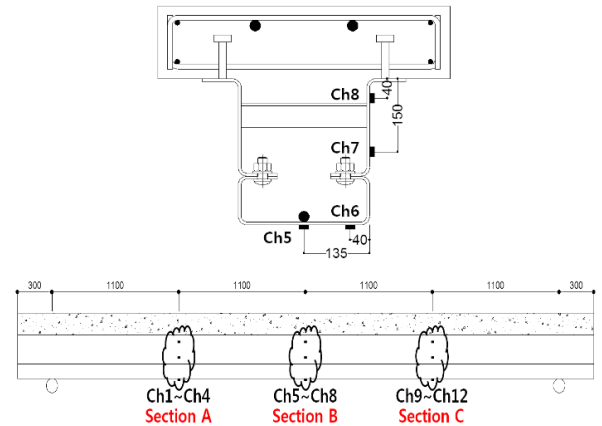


Fig. 4 Detail of thermocouples



Fig. 5 Test set up

(dD/dt)은 다음과 같다.

$$D = \frac{L^2}{400d} = \frac{4,400^2}{400 \times 450} = 107.6 \text{ (mm)}$$

$$\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9,000d} = \frac{4,400^2}{9,000 \times 450} = 4.78 \text{ (mm/min)}$$

$$\frac{L}{30} = \frac{4,400}{30} = 146.7 \text{ (mm)}$$

L : 시험체 지점간 길이(mm), d : 보 굵(mm)

2.3 재하하중 선정

재하하중은 외국의 경우 화재 발생 시 적재하중저감 등을 고려하여 최대 휨모멘트를 일정비율로 저감하나^[13], 국내에는 아직 하중저감에 대한 기준이 명기되어 있지 않다. 단지 일부 연구결과에서 이러한 외국의 하중저감을 반영하여 재하하중을 내력비의 약 40~60(%) 범위로 저감시키고 있으나^[14], 한국산업규격에는 구조기준에서 산정된 방법을 적용하므로 설계강도를 재하한다고 볼 수 있다^[8]. 재하하중산정은 건축 구조기준 및 해설의 노출형합성보 설계식을 적용하여 U형 합

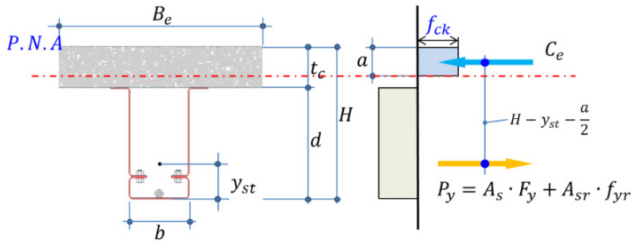


Fig. 6 Plastic neutral axis(PNA) in slab

성보의 최대 휨내력(M_n)을 산정한 후, Fig. 3 에서 최대 휨 모멘트를 발생시키는 하중을 재하하였다^{[15],[16],[17],[18],[19],[20]}.

하중 산정 시 단면특성은 Fig. 2를 적용하였으며, 기호표시는 Fig. 6과 같다.

$$M_n = (A_s F_y + A_{sr} f_{yr}) \times (H - y_{st} - \frac{a}{2}) \times 10^{-6} \quad (1)$$

M_n : 공칭휨강도(kN·m), ϕ_b : 저항계수(= 0.9)

A_s : 강재보 단면적(mm²)

A_{sr} : 철근 단면적(mm²)

F_y : 강재보 항복강도(MPa),

f_{yr} : 철근 항복강도(MPa),

y_{st} : 강재부분 도심거리(mm),

a : 등가응력블록깊이(mm, $a = \frac{A_s F_y + A_{sr} f_{yr}}{0.85 f_{ck} B_e}$)

1) 재료 정수

- 강재(SS400) 항복강도 : $F_y = 235$ MPa
- 철근(SD300) 항복강도 : $f_y = 300$ MPa
- 콘크리트 압축강도 : $f_{ck} = 24$ MPa
- 슬래브 유효폭 : $B_e = 600$ mm
- 스티드커넥터 : $\phi 16@190$
- HyFo 합성보(300×270×5.8×5.8) 단면성능 :
 $A_s = 7,190.3$ mm² $y_{st} = 116.3$ mm
 $I_s = 6.83 \times 10^7$ mm⁴ $Z_x = 8.35 \times 10^5$ mm³

2) 재하하중 산정

- 부재의 고정하중
 콘크리트 자중 : 4.104 kN/m
 보 중량 : 0.564 kN/m
 HyFo 부재의 총 중량(W_d) : 4.668 kN/m
- 최대 모멘트 산정(M_u) :

$$M_u = (P \times 2.2 - \frac{P}{2} \times 1.2 - \frac{P}{2} \times 0.4) + \frac{4.67 \times 4.4^2}{8} = 1.4P + 11.30 \quad (2)$$

$$M_u \leq \phi M_n \quad (3)$$

$$M_a = M_n / \Omega \quad (4)$$

M_u : 최대 모멘트(팩터하중에 의한 모멘트)

M_a : 최대 모멘트(서비스하중에 의한 모멘트)

M_n : 공칭휨강도(= 450.8kN·m)

Ω : 안전율(= 1.5), ϕ_b : 저항계수(= 0.9)

한계상태설계법은 식 (3)과 같이 공칭휨강도(M_n)에 저항계수(ϕ_b)를 곱한 설계강도가 소요강도(M_u , 최대 휨모멘트)보다 커야 한다. 소요강도는 식 (2)와 같고, 공칭휨강도는 식 (1)로 산정된다. 식 (1)로 산정한 공칭휨강도(M_n)는 450.8kN·m이다. 그러나 시험 시 재하하중은 하중계수가 반영되지 않은 값이므로 서비스하중에 의한 모멘트(M_a)로 변경하여 식 (4)와 같이 재산정하면 최대모멘트는 300.5kN·m 이 된다. 그러므로 식 (2)를 기초로 산정한 재하하중(P)은 169kN이므로 전체 가력하중($2P$)은 340kN이 된다. 그러나 산정한 가력하중은 시험체의 고정하중을 제외하였고, 성능 확인을 위한 예비시험이므로 재하하중을 다소 증가시켜 380kN 으로 시험을 수행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

내화시험은 Table 1과 같이 8개의 시험체를 제작하여 시험하였다. 시험결과는 Table 6, Table 7과 같다. Table 7 에는 재하 및 비재하가열시험의 평균온도와 최고온도를 정리 하였으며, 평균온도는 각 단면 평균온도에 대한 평균치이다. 시험결과 하중가력 유무 및 내화피복재 종류와 무관하게 모두 목표성능시간을 만족하였다. 내화페인트의 경우 기존 인증

Table 6. Result of loading test

| Specimens | Time (min) | Deformation $L^2/400d$ (mm) | | Strain rate $L^2/9000d$ (mm/min) | |
|-----------|------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------|
| | | Deformation of Test | Standard performance | Strain rate of test | Standard performance |
| S-L-3H-15 | 180 | 30.2 | 107.6 | 1.96 | 4.78 |
| S-L-3H-20 | 180 | 23.6 | | 0.54 | |

Table 7. Temperature summary of loading and unloading test

| Specimens | Time (min) | Average temperature(°C) | | Maximum temperature(°C) | |
|-------------|------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| | | Temperature of test | Standard temperature | Temperature of test | Standard temperature |
| S-L-3H-20 | 174 | 347.6 | 538 | 647.5 | 649 |
| S-L-3H-15 | 180 | 358.4 | | 427.9 | |
| S-U-2H-15-1 | 120 | 269.5 | | 337.5 | |
| S-U-2H-15-2 | 120 | 260.3 | | 326.7 | |
| S-U-3H-20-1 | 180 | 300.7 | | 351.6 | |
| S-U-3H-20-2 | 180 | 314.3 | | 382.8 | |
| P-U-2H-1 | 120 | 438.3 | | 547.0 | |
| P-U-2H-2 | 120 | 437.0 | | 519.0 | |



Fig. 7 Test of fireproof paint (top : before test, bottom : after test)



Fig. 8 Test result of spray-on fire protection

받은 두께의 약 40%, 뽀칠재의 경우 3시간은 약 60%, 2시간은 65%의 두께를 적용하였다. 피복두께 저감기준은 기존 시험결과를 기초로 하였다^{[6],[21]}.

Fig. 7, Fig. 8은 시험 전후 시험체 형상이다. Fig. 7은 내화페인트를 적용한 시험체이다. 내화페인트의 경우 사진과 같이 페인트가 팽창하면서 강재의 온도증가를 억제하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 내화뽀칠재를 적용한 시험체의 시험 후 형상이다. 슬래브 하부에 콘크리트 폭열이 발생하였으며, 시험종료 후 시험체 해체 과정에서 보 하부에 뽀칠재 탈락이 발생하였다. 일반적으로 슬래브 하부의 콘크리트 폭열은

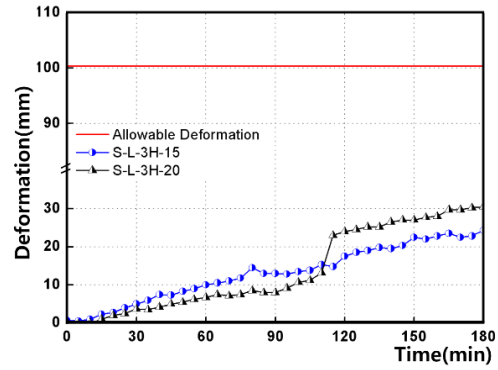


Fig. 9 Deformation-time curve for loading specimens

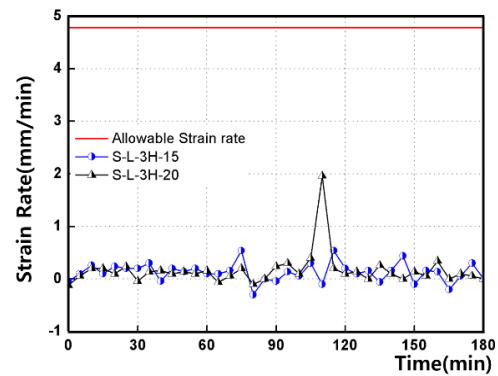


Fig. 10 Strain rate-time curve for loading specimens

시험 후 약 30분 이내에 발생하기 시작하는 것으로 육안관찰 시 확인되었다.

3.1 뽀칠재 재하기열시험

재하기열시험은 세라믹계 피복재를 신형상 U형 합성보의 강재표면에 뽀칠하여 3시간 내화성능시험을 수행하였다. 피복 두께는 S-L-3H-15의 경우 15mm, S-L-3H-20의 경우 20mm이다. 재하기열시험이므로 가열 전 보에 380kN의 하중을 가력 후 시험을 시작하였다. 재하기열시험의 성능평가 기준은 변형량과 변형률로 측정하나, 열전대를 부착하여 온도도 측정하였다.

S-L-3H-15 시험체는 시험 후 23분경 보 상부 슬래브에 수증기가 관찰되었으며, 43분경 보 양단부에 수분이 맺히기 시작하였다. 변형량은 30.2mm이고, 변형률은 1.96mm/min이다. 3시간 시험 후 최고온도는 427.9°C이며, 각 단면별 평균온도는 358.4°C이다. 변형량과 변형률, 온도 모두 내화성능 목표치에 비해 매우 낮게 측정되어, 안정적인 거동을 하는 것으로 확인되었다.

S-L-3H-20 시험체는 시험 후 38분경에 15mm 시험체와 마찬가지로 보 상부 슬래브에서 수증기가 관찰되었으며, 57

분경 보 양단부에 수분이 맺히기 시작하였다. 변형량은 23.6mm 이고, 변형률은 0.54mm/min 이다. 시험 후 93분경 보 단부(Section C) 하단에서 피복재의 일부 박리가 발생하여 순간적으로 40℃ 상승하였으며, 175분경 최고온도가 649℃를 초과하였다. 최고온도가 성능평가온도를 초과하였으나, 재하 가열시험의 경우 KS F 2257-1에서 변형량과 변형률이 성능평가기준이므로 내화성능은 목표치를 달성한 것으로 볼 수 있다. Fig. 9는 두 시험체의 변형량과 시간 관계이며, Fig. 10은 변형률과 시간 그래프이다.

3.2 뿔철재 비재하가열시험

세라믹계 피복재를 대상으로 4개의 시험체를 제작하여 비재하가열시험을 실시하였다. 2시간 내화성능 시험체는 15mm를 뿔철하였고, 3시간은 20mm이다.

S-U-2H-15-1 시험체는 가열 시작 후 34분에 수증기가 발생하였고, 45분경에 단부에서 수분이 맺히기 시작하였다. 각 단면에서 측정된 열전대의 평균온도는 269.5℃(538℃ 이하)이며, 최고온도는 337.5℃(649℃ 이하)이다. S-U-2H-15-2 시험체는 가열 시작 후 38분에 수증기가 발생하였고, 첫 번째 시험체와 동일하게 45분경 단부에서 수분이 맺히기 시작하였다. 시험은 2시간 동안 내화성능을 검토하였으며, 평균온도는 260.3℃(538℃ 이하)이고, 최고온도는 326.7℃(649℃ 이하)이다.

비재하로 실시한 두 시험체의 평균온도와 최고온도의 차이는 5% 이하로 크지 않고, 시험중 양상도 유사하여 안정적인 성능을 나타낸 것으로 평가할 수 있다.

S-U-3H-20-1 시험체는 시험 후 38분에 수증기가 발생하였으며, 47분경에 보 단부에 수분이 맺히기 시작하였다. 각 단면에서 측정된 평균온도는 300.7℃(538℃ 이하)이며, 최고온도는 351.6℃(649℃ 이하)이다. S-U-3H-20-2 시험체는 가열 후 35분에 수증기가 발생하였다. 보 내부의 평균온도는 각각 314.3℃(538℃ 이하)이고, 최고온도는 382.8℃(649℃ 이하)이다.

3시간 내화성능을 목표로 수행한 두 시험체의 평균온도와 최고온도는 모두 약 10% 이하의 오차가 발생하여 2시간 보다는 오차비가 다소 증가하였으나, 상당히 안정적인 거동을 한 것으로 평가할 수 있다.

Fig. 11~Fig. 14는 비재하가열시험으로 진행한 4개 시험체의 시간-온도그래프이다. 각 단면별 평균온도와 최고온도를 함께 표기하였다. 각 단면별 평균온도는 4개 시험체 모두 큰 오차가 발생하지 않은 것으로 확인되었다.

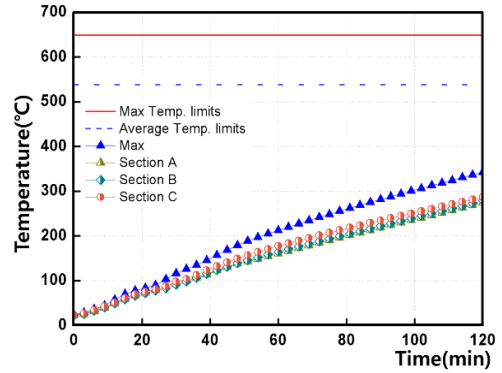


Fig. 11 Temperature-time curve for S-U-2H-15-1

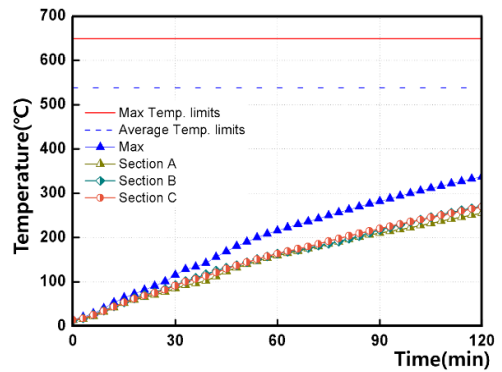


Fig. 12 Temperature-time curve for S-U-2H-15-2

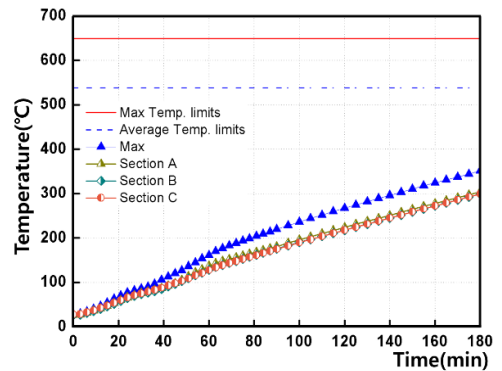


Fig. 13 Temperature-time curve for S-U-3H-20-1

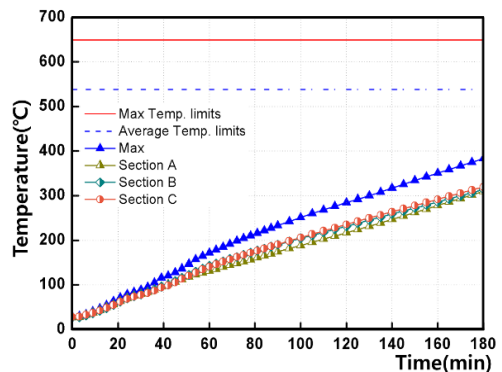


Fig. 14 Temperature-time curve for S-U-3H-20-2

3.3 내화 페인트 비재하가열시험

내화페인트를 적용한 2개의 시험체를 제작하여 비재하가열 시험을 실시하였다. P-U-2H-1 시험체의 내화페인트의 도막 두께는 평균 1.64mm 이고, P-U-2H-2 시험체는 1.36mm이다.

P-U-2H-1(1.64mm) 시험체는 시험 후 12분경 슬래브에서 수증기가 발생하였고, 35분경 슬래브에서 수분이 발생하였다. Fig. 15와 같이 54분경 초층부 페인트가 탄화되는 과정에서 박리되는 현상이 발생하였으나, 2시간의 내화성능을 나타내었다. 페인트가 초기 박리된 원인은 충분하지 않은

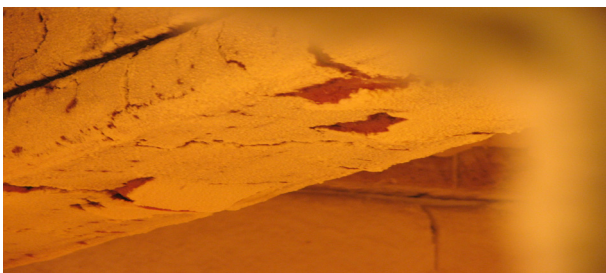


Fig. 15 Desquamate of spray-on fire protection

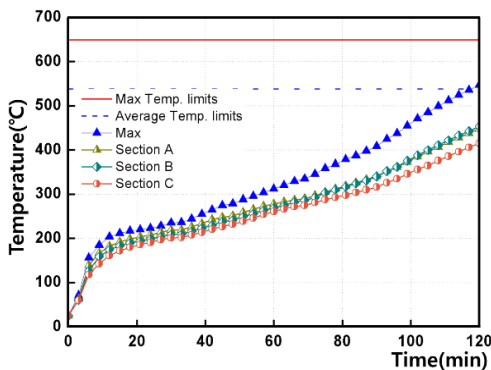


Fig. 16 Temperature-time curve for P-U-2H-1 (thk. = 1.64mm)

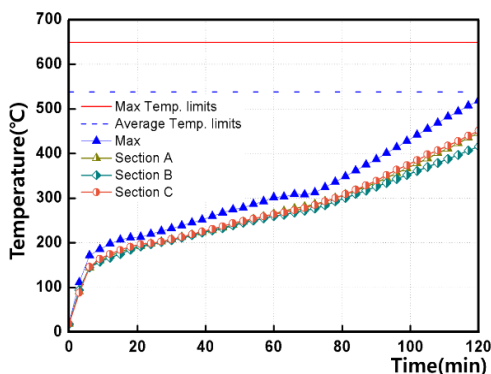


Fig. 17 Temperature-time curve for P-U-2H-2 (thk. = 1.36mm)

양생 때문으로 판단된다. 2시간 내화시험 종료 시 각 단면의 평균온도는 438.3°C, 최고온도는 547°C이다. P-U-2H-2 (1.36mm) 시험체는 시험 후 9분경 슬래브에서 수증기가 발생하였으며, 21분경 슬래브에 수분이 맺히기 시작하였다. 2시간 내화시험 종료 시 평균온도는 437.0°C, 최고온도는 519°C이다.

내화페인트의 경우 도막두께에 따른 온도차이가 크지 않은 이유는 P-U-2H-1(1.64mm) 시험체의 양생이 부족하였기 때문으로 판단되며, 페인트가 초기 박리되는 현상도 발생하였다. P-U-2H-2(1.36mm) 시험체의 경우 충분한 양생을 위해 성능시험은 한 달 뒤 수행하였으며, 이러한 영향으로 도막 두께 차이에 의한 내화성능은 크게 발생하지 않았다. Fig. 16~Fig. 17은 두 시험체의 시간 온도 그래프이다. 각 단면 별 온도차이가 크지 않다.

신형상 합성보에 내화피복재를 상이하게 적용하여 동일한 시험방법으로 시험한 결과, 철골보(H형강)로 인정받은 제품을 피복두께를 절감하여 시험하여도 내화성능을 만족하는 것으로 나타났다. 이것은 일반 H형강에 비해 보 내부와 슬래브 콘크리트에 함유된 수분 또는 함수율이 열을 발산하여 온도를 저하시키기 때문으로 판단된다^[13].

3.4 재하가열시험과 비재하가열시험

뿔철재 시험체에 대해 재하와 비재하로 구분하여 시험을 실시하였다. Table 8은 2개 시험체의 평균온도와 최고온도를 평균하여 정리한 것이다. 재하시험체는 15, 20(mm) 뿔

Table 8. Test result of loading and unloading

| | Average Temperature(°C) | | | Maximum Temperature(°C) |
|--------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| | A section | B section | C section | |
| | Loading | Loading | Loading | Loading |
| | Unloading | Unloading | Unloading | Unloading |
| 30min | 84.6 | 81.3 | 87.1 | 103.2 |
| | 77.9 | 76.6 | 76.5 | 87.3 |
| 60min | 148.1 | 135.2 | 143.9 | 184.1 |
| | 134.3 | 135.6 | 134.4 | 166.6 |
| 90min | 201.8 | 183.7 | 200.1 | 251.7 |
| | 177.6 | 183.0 | 182.9 | 226.3 |
| 120min | 247.4 | 233.9 | 290.1 | 406.3 |
| | 220.6 | 224.6 | 226.6 | 275.7 |
| 150min | 294.2 | 279.0 | 348.3 | 478.9 |
| | 263.5 | 265.6 | 268.5 | 322.1 |
| 180min | 341.6 | 324.3 | 404.0 | 545.1 |
| | 306.9 | 306.5 | 309.2 | 367.2 |

Table 9. Loading test result of spray thickness

| | Average Temperature(°C) | | | Maximum Temperature(°C) |
|--------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| | A section | B section | C section | |
| | 15mm | 15mm | 15mm | 15mm |
| 30min | 98.0 | 93.1 | 100.6 | 127.2 |
| | 71.1 | 69.4 | 73.6 | 79.2 |
| 60min | 161.3 | 151.5 | 163.3 | 217.2 |
| | 134.8 | 118.9 | 124.4 | 150.9 |
| 90min | 214.0 | 204.4 | 217.0 | 278.6 |
| | 189.6 | 163.0 | 183.2 | 224.7 |
| 120min | 263.5 | 255.4 | 264.5 | 322.5 |
| | 231.3 | 212.3 | 315.7 | 490.0 |

Table 10. Unloading test result compared spray with paint

| | Average Temperature(°C) | | | Maximum Temperature(°C) |
|--------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| | A section | B section | C section | |
| | Spray | Spray | Spray | Spray |
| | Paint | Paint | Paint | Paint |
| 20min | 61.6 | 65.5 | 65.8 | 78.3 |
| | 202.0 | 202.5 | 191.5 | 215.5 |
| 40min | 103.6 | 114.2 | 113.6 | 144.3 |
| | 233.5 | 237.5 | 220.0 | 253.5 |
| 60min | 156.2 | 157.8 | 161.1 | 206.2 |
| | 280.0 | 282.0 | 262.5 | 303.5 |
| 80min | 190.2 | 191.3 | 199.9 | 252.6 |
| | 325.0 | 333.0 | 303.5 | 364.0 |
| 100min | 221.8 | 230.5 | 235.6 | 294.1 |
| | 386.0 | 399.0 | 360.0 | 438.5 |
| 120min | 253.9 | 265.4 | 269.2 | 332.1 |
| | 465.5 | 477.0 | 432.5 | 524.0 |

칠한 경우이고, 비재하시험체는 20mm이다. 재하와 비재하 가열시험 간 온도 차이는 크지 않은 것으로 평가할 수 있으나, 120분 이후 그 차이가 크게 벌어지고 있다. 이러한 이유는 재하시험체 중 S-L-3H-20 시험체가 92분경 보 단부(Section C) 하단에서 피복재 일부가 탈박되면서 온도가 상승하였기 때문이다.

Table 9는 2개 재하시험체에 대해 피복두께의 영향을 비교한 것이다. 피복두께가 증가할수록 내화성능이 향상되고 온도가 낮아질 것으로 예상할 수 있다. 이러한 예측은 약 90분까지 일치하나, 20mm를 뿔칠한 S-L-3H-20 시험체의 경우 피복재 탈락으로 온도가 상승하여 예측과 상이하다. 기 발표한 자료에서도 재하와 비재하의 영향은 없으며^[6], 본 연구에서도 동일한 경향을 나타내고 있다.

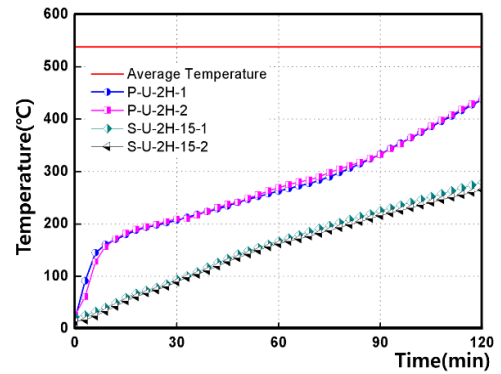


Fig. 18 Average temperature-time curve according to covering materials

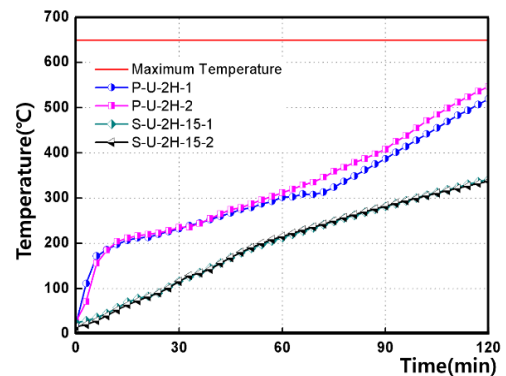


Fig. 19 Maximum temperature-time curve according to covering materials

하중 재하 여부가 온도로 평가되는 내화성능에 큰 영향을 미치는 않는 이유는 재하하중이 부재의 항복하중을 기초로 산정하였으나, 재료(강재와 콘크리트 등)에는 초과강도가 존재하여 부재가 항복에 도달하지 않고 탄성 상태에 머물렀기 때문으로 판단된다. 물론 이러한 시험결과는 뿔칠재 내화피복재에 대한 일부 한정된 결론으로 지속적인 연구가 진행되면 정량적인 평가도 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 18은 평균온도이고, Fig. 19는 최고온도 분포이다. 내화페인트와 뿔칠재 모두 평균온도와 최고온도의 편차가 적으나, 내화페인트가 뿔칠재 보다 평균온도와 최고온도 모두 높다. 또한 내화페인트의 온도분포는 초기 10분 정도 온도가 급격히 상승한 후, 완만하게 증가하고, 약 30여분 남은 후 온도가 재상승하는 3차 선형(three linear) 그래프를 보인다. 반면 뿔칠재의 경우 완만한 온도상승을 나타내고 있다. 이러한 차이는 내화피복재의 특성에 의한 것으로 판단된다.

내화피복재의 영향은 피복재 종류와 두께, 합성보 단면 형상 등을 모두 포함하여 평가하는데 한계가 있다. 단지 본 연구에서는 피복재 종류에 의한 차이를 내화뿔칠과 내화페인트로 구분하여 온도그래프를 통해 개략적으로 상호 비교하였다.

4. 결 론

뿔철재와 내화페인트, 하중 재하 여부 등을 변수로 신형상 U형 합성보의 내화성능에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 신형상 U형 합성보는 재하가열시험의 경우, 세라믹계 피복재를 15mm, 20mm 뿔철한 시험체 모두 3시간 내화성능을 만족하였고, 비재하가열시험의 경우, 기존 인정두께를 절감하여 20mm로 뿔철하여도 3시간 내화성능을 만족하였다.
- (2) 하중 재하와 비재하로 구분하여 시험한 결과, 하중 재하 여부가 내화성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 재하하중이 부재의 항복하중을 기초로 산정하였으나, 재료의 초과강도로 부재가 항복에 도달하지 않고 탄성 상태에 머물렀기 때문으로 판단된다.
- (3) 신형상 U형 합성보는 일반 H형강을 적용하여 시험에 통과한 내화피복재의 인정두께를 내화페인트의 경우 약 40%, 뿔철재의 경우 약 65%로 저감하여도 내화성능이 확보되었다. 그러나 내화제품 종류에 따른 정량적인 저감비 산정은 합성보 형상(보폭 및 보춤, 강재 두께 등)과 관련한 다양한 변수가 조합되므로 지속적인 검토가 필요하다.
- (4) 합성보는 H형강으로 인정을 받은 뿔철재 또는 내화페인트를 적용하는 경우 충분한 내화성능을 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 일반 H형강에 비해 콘크리트 내부의 수분이 열을 발산하여 온도를 저하시키기 때문으로 판단된다.

참 고 문 헌(References)

[1] 김인석, 김학수 (2008) 철근콘크리트와 강을 합성한 복합 단면보의 구조거동평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제5호, pp.665-673.
Kim, I.S. and Kim, H.S. (2008) Structure Behavior Evaluation of Beams composited with Steel and Reinforced Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 5, pp.665-673 (in Korean).

[2] 권인규 (2010) 하중비에 따른 강재 보의 한계온도에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제6호, pp.581-588.
Kwon, I.K. (2010) Experimental Study on Limiting Temperatures of Structural Beams made with Structural Steel According to Load Ratios, *Journal*

of Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol. 22, No. 6, pp.581-588 (in Korean).

[3] 김해수, 이치형 (2010) 내화피복 종류에 따른 각형 CFT 기둥의 온도분포에 관한 실험적연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제6호, pp.523-532.
Kim, H.S. and Lee, C.H. (2010) An Experimental Study on the Temperature Distribution of Square CFT Columns According to the Types of Fire Protection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No. 6, pp.523-532 (in Korean).

[4] 김선희, 원용안, 최성모 (2012) 비재하 가열실험을 통한 이중강관 CFT기둥의 잔존강도 평가연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.81-89.
Kim, S.H., Won, Y.A., and Choi, S.M. (2012) A Study on the Evaluation of Residual Strength of Double Concrete Filled Tube Column by Unstressed test (2012) *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 1, pp.81-89 (in Korean).

[5] 김성배, 이원록, 김정연, 이승배, 유덕수, 김대회, 김상섭 (2012) 신형상 U형 하이브리드 합성보의 휨성능에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제 5호, pp.521-534.
Kim, S.B., Lee, W.R., Kim, J.Y., Lee, S.B., Ryu, D.S., Kim, D.H., and Kim, S.S. (2012) Study on the Flexible Strength of U-shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 24, No. 5, pp.521-534 (in Korean).

[6] 김성배, 이창남, 김우철, 김상섭 (2009) 하중재하 영향에 의한 합성보의 화재거동에 관한 연구, 한국화재소방학회논문집, 한국화재소방학회, 제23권, 제2호, pp.27-35.
Kim, S.B., Lee, C.N., Kim, W.C., and Kim, S.S. (2009) "Study on the Fire Behaviour of Composite Beam with Loading and Unloading", *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 23, No. 2, pp. 27-35 (in Korean).

[7] 김성배, 최승관, 한상훈 (2009) 스티드커넥터의 내화성능에 관한 연구, 한국화재소방학회논문집, 한국화재소방학회, 제22권, 제4호, pp.59-66.
Kim, S.B., Choi, S.K., and Han, S.H. (2009) "Study on Fire Performance of Stud Connector", *Journal of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 22, No. 4, pp.59-66 (in Korean).

[8] KS F 2257-1 (2005) 건축 구조 부재의 내화 시험 방법 -일반요구사항, 한국산업표준.
KS F 2257-1 (2005) *Methods fire resistance test for elements of building construction - General*

requirements, Korea Standard Association (in Korean).

[9] KS F 2257-6 (2006) 건축 구조 부재의 내화 시험 방법 -보의 성능조건, 한국산업표준.
KS F 2257-1 (2006) *Methods fire resistance test for elements of building construction - Specific requirements for beams*, Korea Standard Association, (in Korean).

[10] 국토해양부 고시 제2010-331호 (2010) 내화구조의 인정 및 관리기준, 국토해양부.
Ministry of Land Infrastructure and Transport Notification No.2010-331 (2010) *Fireproof Structure Recognition and Management Standards*, Ministry of Land Infrastructure and Transport (in Korean).

[11] 한국건설기술연구원 (2010) 내화구조 인정 및 관리업무 세부운영지침.
Institute of Construction Technology (2010) *Fireproof Structure Recognition and Management of Detailed Operating Instructions* (in Korean).

[12] 대한민국 특허청, 발포성 내화도료 조성물 및 이를 사용한 피도물체의 내화성 부여방법 (2007) 특허등록번호 10-0688254.
The Korea Intellectual Property Office (2007) *Antifire painting composition and its usage, Patent Registration No. 10-0688254* (in Korean).

[13] Michael Spearpoint (2008) Fire Engineering Design Guide 3rd Edition, New Zealand center for advanced engineering.

[14] 대한건축학회 (2004) 콘크리트충전 강관구조 요설, 기문당.
AIK (2004) *Concrete Filled Tube(CFT) Structures* (in Korean).

[15] 대한건축학회 (2009) 국토해양부고시 건축구조기준 및 해설, 기문당.
AIK (2009) *Standard of Architectural Structure and Commentary*, Kimundang, Korea (in Korean).

[16] 한국강구조학회 (2009) 국토해양부제정 하중저항계수설계법에 의한 강구조설계기준, 구미서관.
KSSC (2009) *Standard of Design of Steel Structure by Load and Resistance Factor Design Method* (in Korean).

[17] 日本建築學會 (1998) 鋼構造限界狀態設計指針-同解説.
AIJ (1998) *Recommendation for Limit State Design of Steel Structures*.

[18] Segui, W.T. (2007) *Steel Design, 4th Ed.*, THOMSON.

[19] Charles, G., Salmon, J.E., and Johnson, F.A.M. (2009) *Steel Structures - Design and Behavior*, Pearson Education Inc., 5th Ed., pp.804-828.

[20] AISC (2011) *Steel Construction Manual, 14th Ed.*, American Institute of Steel Construction.

[21] 한국건설기술연구원 (2013) 민원업무전산시스템, 내화구조 인정현황 <<http://cert.kict.re.kr/certifire/cert1.asp>>.

요 약: 본 연구에서는 신형상 U형 하이브리드 합성보의 내화성능평가를 실시하였다. 내화성능평가는 세라믹계의 뿔칠재와 내화페인트로 구분하여 내화시험을 수행하였다. 시험 변수는 피복재의 종류(뿔칠재와 페인트)와 내화시간(2시간, 3시간), 하중가력 유무(재하와 비재하), 뿔칠재 두께 등이다. 내화성능평가 합성보는 기존 철골보로 인정을 받은 제품에 비해 내화성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 내화성능 향상에 대한 정량적인 평가는 합성보 형상과 관련한 다양한 변수가 조합되므로 지속적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

핵심 용어: 내화성능평가, 내화페인트, 내화뿔칠, 합성보, 하이브리드 성형 보(HyFo Beam)