

# 고온에 노출된 외적 포스트텐션 보강이 적용된 철근콘크리트 보의 거동

## Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened With Externally Post-tensioning Steel Rods at Fire Exposure

○박 정 환\*      이 수 헌\*\*  
Park, Jung-Hwan      Lee, Swoo-Heon

### Abstract

This experimental investigation was conducted to observe the thermal behaviors of the reinforced concrete (RC) beams with externally post-tensioned (EPT) steel rods at fire exposure. A total of three specimens were prepared and tested to fail in a horizontal heating furnace. First specimen was tested without external post-tensioned steel rods, while second and third one were with externally post-tensioned steel rods of 22mm in diameter. Also, third specimen's steel rods were insulated with ceramic wool during the test. The test results indicated that applying a strengthening method to RC beams with externally post-tensioned steel rods with insulation can delay the rapid increase in deflection of the RC beams by approximately 30 minutes. Additionally, it confirmed a preventive effect of over 27% in total deflection.

키워드 : 철근콘크리트, 외적 포스트텐서닝, 강봉, 보강, 화재손상

Keywords : Reinforced Concrete (RC), Externally Post-tensioning, Steel Rod, Strengthening, Fire-damaged

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 목적

소방방재청에서 발간한 2022년 화재통계연감에 의하면 최근 10년(2013년~2022년)간 발생한 평균 화재건수는 41,257건, 인명피해 2,287명, 재산 피해 652,882백만 원으로 집계되었다. 2022년도의 경우 건축·구조물 화재가 25,426건으로 전체 화재의 63.4%를 차지하고 있으며 유형별 화재 중 가장 큰 규모를 차지하고 있다. 2021년 대비 건축·구조물 화재 건수와 인명피해, 재산피해 모두 증가하였다.

건설 현장에서 사용되는 콘크리트와 철근은 불연성과 낮은 열전도율로 화재 상황에서도 우수한 성능을 가지고 있다. 하지만 장시간 일정 온도 이상의 고온에 노출될 경우, 재료특성 변화 또는 성능저하의 위험이 발생하며 외관적·기능적 손상이 야기된다(Ju *et al.*, 2016). 외관적 손상은 복구를 통해 재사용하기 쉬우나, 기능적 손상의 경우 피해 정도에 따라 부분적·전체적 복구 혹은 재건 여부를 결정하여야 하며, 복구 방안 중 고강도 강봉을 이용한 외적 포스트텐서닝 공법(Lee, 2023)을 활용하는 방안도 있다.

#### 1.2 연구목적 및 범위

본 연구에서는 화재상황을 가정한 중앙 집중하중 상태의 수평가열로 고온가열 실험을 통해 고강도 강봉을 이용한 외적 비부착식 포스트텐션 공법과 유리섬유 내화 단열재(세라크울)를 이용한 보강재의 내화 단열효과가 철근콘크리트 보의 거동에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 본 연구의 상세한 내용 및 범위는 다음과 같다.

- 고온가열 실험을 통한 처짐의 양상
- 내화 단열재 적용에 따른 보강재의 내화 단열효과

### 2. 실험계획

#### 2.1 실험체 계획

철근콘크리트 보가 고온에 노출되었을 때 강봉을 이용한 외적 보강의 효과를 확인하기 위해 본 연구에서는 수평가열로 내에 실험체를 설치, 중앙 집중하중을 받는 단순 지지보 실험을 진행하였다. 실험체의 경우 단면크기 270 mm ( $b$ ) $\times$ 400mm ( $h$ )이고 총길이( $L_{total}$ ) 4,700mm, 가력스팬( $L_{span}$ ) 4,200mm인 실험체를 변수별로 구성하여 실험을 수행하였다. 실험체는 1) 무보강 실험체, 2)  $\phi$ 22mm 강봉으로 보강한 실험체, 3)  $\phi$ 22mm 강봉으로 보강 및 내화 단열을 적용한 실험체로 분류하였다. 보강재는  $\phi$ 22mm 고강도 강봉, 내화 단열재의 경우 유리섬유 내화 단열재(세라크울)가 사용되었으며 각 실험체의 변수는 표 1에 정리

\* 경북대 융복합시스템공학과 석사과정

\*\* 경북대 융복합시스템공학부 부교수, 공학박사

(Corresponding author : School of Convergence & Fusion System Engineering, Kyungpook National University, p20613@knu.ac.kr)

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1062907).



그림1. 철근콘크리트 보 실험체 배근도

하였다. 철근은 HD400급으로 하여 압축철근 3-D13(380.1 mm<sup>2</sup>), 인장철근 3-D19(859.5mm<sup>2</sup>)로 배근하여 총 3개의 실험체로 실험을 진행하였으며 철근콘크리트 보 실험체의 배근 상세는 그림 1과 같다. 실험체 명의 'R'은 고강도 강봉을 사용한 외부 비부착 보강의 적용을 나타내고 'I'는 내화 단열재의 부착을 나타낸다.

표1. 실험체별 변수 계획

No.	실험체명	설정 시간 (min)	가열 시간 (min)	초기 하중 (kN)	강봉 보강	내화단열재 부착
1	Beam-No	120	120	100	X	X
2	Beam-R	120	90	185	O	X
3	Beam-R-I	120	95	185	O	O

## 2.2 가열 및 고온가열 실험

무보강 실험체 및 보강 실험체는 수평가열로 내 유효스팬을 4,200mm로 하여 중앙 집중하중을 받는 단순지지보 형태의 가열 실험이 수행되었다. 그림 2는 표준가열곡선과 실험체 내부온도 곡선으로, 수평가열로 내 설치된 실험체가 KS F 2257 표준가열곡선  $T = 20 + 345 \log(8t + 1)$ 에 따라 가열이 진행되었다. 수평가열로 내 철근콘크리트 보를 설치하기 전, 가열이 진행되는 동안 철근콘크리트 보 내부의 온도를 확인하기 위해 보 중앙 부근을 천공하여 보 내부에 열전대를 설치하였다.

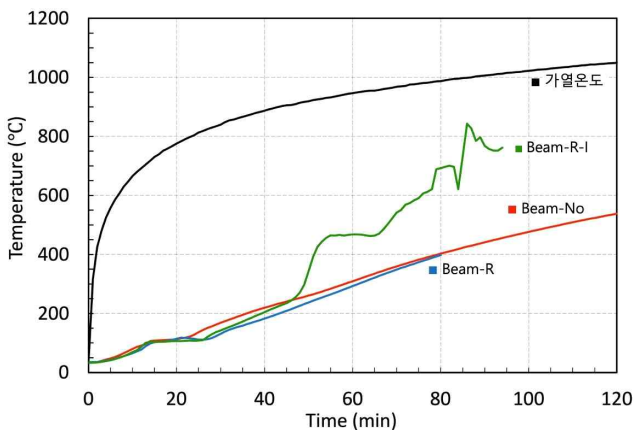


그림2. 가열온도 및 실험체 내부온도

고온가열 실험 전, Beam-R과 Beam-R-I의 경우 강봉에 긴장력 약 2000με를 적용하여 보강하였으며 Beam-R-I의 경우 강봉 보강 및 강봉 내화 단열을 사전에 적용한 후 크레인을 통해 수평가열로 내에 설치하였다(그림 3).



그림3. 수평가열로 내 실험체 설치

초기하중의 경우 보 중앙부에 변위제어를 통해 1점 가력하여 무보강 실험체의 경우 예상 항복하중의 80%, 보강 실험체의 경우 예상 항복하중의 70%에 도달하였을 때 가열 실험을 진행하였으며 실험 종료시까지 초기하중을 유지하였다(그림 4). 또한, 실험이 진행되기 전 보 주변에 내화 단열재를 설치하여 가열로 내의 열이 외부로 노출되지 않도록 단열하였다. Beam-R과 Beam-R-I 실험체는 고강도 강봉을 사용한 외적 비부착식 포스트텐션 공법이 적용된 후 수평가열로 내에 설치되었다. 실험체의 처짐은 액츄에이터와 보 중앙부에 설치한 변위 측정계를 통해 측정하였으며, 실험 종료 또는 실험체가 종국 상태에 도달할 때까지 측정하였다.

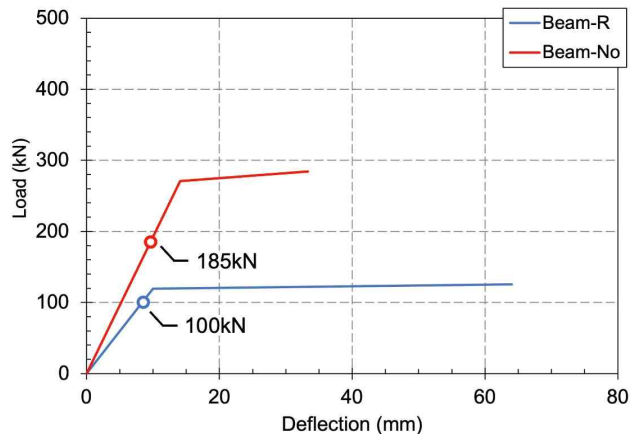


그림4. 실험체 예상 항복하중

### 3. 실험결과

#### 3.1 고온가열 실험

그림 5 ~ 그림 8은 실험이 종료된 후의 실험체이다. 변위제어를 통해 초기하중을 유지하였으며 실험 설정시간 120분을 목표로 가열 실험을 진행하였다. 실험체 Beam-R-I의 경우 실험 도중 열전대가 탈착되어 정확한 온도변화를 확인할 수 없었으나, 실험체 Beam-No와 Beam-R의 경우 그림 1과 같이 유사한 온도변화를 확인할 수 있었다.

무보강 실험체 Beam-No의 경우 가열 실험 중 120분을 진행, 수평가열로 내에서 실험체가 537°C까지 가열되었으며 약 65.1mm의 처짐이 발생하였다. 보의 중앙부 하단을 중심으로 형성되는 휨균열이 거의 발생하지 않았으며, 지점 방향으로 발생하는 전단 균열, 가력점 인근 콘크리트 압축측의 압괴 및 소성흔지 또한 발생하지 않았다.



그림5. 무보강 실험체(실험 종료)

보강 실험체 Beam-R의 경우 가열 실험 중 90분을 진행, 468°C까지 가열되었으며 434.8mm의 처짐이 발생하였다. 실험 시작 15분대부터 과도한 처짐이 발생하기 시작하였고 실험 진행 90분대에 가열 실험이 중단되었다. 실험 종료 후 확인 결과, 중앙부 하단에 휨균열이 비교적 많이 발생하였으며, 가력점 부근 압축측 콘크리트의 압괴 및 강봉의 길이 방향으로 80mm 이상의 변형을 확인할 수 있었다.



그림6. 보강 실험체(실험 종료)

보강 실험체 Beam-R-I는 가열 실험 중 95분을 진행, 후 약 316.1mm의 처짐이 발생하였다. 실험 시작 20분대부터 과도한 처짐이 발생한 보강 실험체 Beam-R과는 다르게 점진적으로 처짐이 증가하였으나, 실험 시작 95분대에 316.2mm의 처짐이 발생하며 실험이 중단되었다. 실험 종료 후 확인 결과, 중앙부 하단에 휨균열 및 가력점 부근의 압괴가 발생하였으며 중앙부 하단의 인장철근이 끊어지며 보의 파괴가 일어나 외부 보강재의 지지력만으로 실험체가 유지되고 있었다(그림 8).



그림7. 내화 단열보강 실험체(실험 종료)



그림8. 내화 단열보강 실험체 인장철근 파괴

#### 3.2 실험결과 검토

Lee(2009)의 연구에 따르면, 콘크리트는 100°C 부근에서 콘크리트 내부의 수분이 증발할 때 주변의 열을 흡수, 온도 증가율이 둔화되는 결과를 보인다. 철근콘크리트 보 내부에 설치된 열전대를 통해 실험체가 가열 실험 시작 후 15분간 온도가 상승하였다가 28분대까지 온도 증가율이 105°C 부근에서 둔화되는 구간을 확인하였다. 이 시간대 및 각 실험 시간별 처짐을 확인하여 표 2에 정리하였다.

표2. 실험체 시간대별 처짐량

시간 (min)	Beam-No (mm)	Beam-R (mm)	Beam-R-I (mm)
15	17.7	34.6	37.7
20	20.5	48.0	43.8
28	28.8	136.0	53.4
40	32.0	232.8	80.3
60	41.2	274.1	184.2
최종	65.2	434.8	316.1

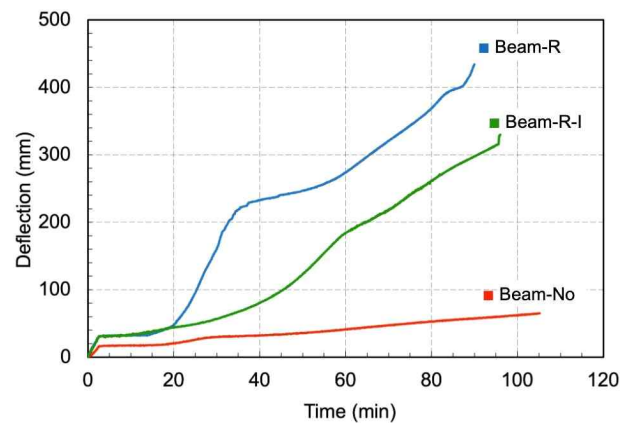


그림9. 실험체별 시간-처짐

그림 9를 통해 105°C 부근에서 온도가 유지되던 시간대 (15분 ~ 28분)의 처짐을 확인하였을 때 실험체 Beam-No의 경우 17.7mm에서 28.8mm로 11.1mm의 처짐이 증가하였다. 또한 보강 실험체 Beam-R의 경우 34.6mm에서 136.0mm로 101.4mm의 처짐이 증가하였다. 그러나 보강 실험체 Beam-R-I의 경우 37.7mm에서 53.4mm로 15.7mm의 처

짐이 증가하며 동일한 시간대에서 발생했던 보강 실험체 Beam-R의 처짐 증가량에 비해 상당히 작은 처짐이 발생하였다. 또한 실험이 종료된 후 보강 실험체 Beam-R과 Beam-R-I의 최종 처짐을 비교하였을 때 각각 434.8mm와 316.1mm의 처짐이 발생하였고, 세라크울을 사용한 강봉의 내화 단열 효과를 통해 약 27.3%의 처짐이 감소한 것을 확인할 수 있었다.

그림 10은 고온가열 실험이 진행되며 발생한 보강 실험체 Beam-R과 Beam-R-I의 초기하중에 대한 처짐을 변위계어를 통해 측정된 값이며, 도형을 통해 각 시간대(20분, 40분, 60분)의 처짐을 표시하였다. 가열 실험 시작 후 20분에 도달할 때까지 보강 실험체 Beam-R은 48.0mm, Beam-R-I의 경우 43.8mm의 처짐이 발생하며, 두 실험체는 서로 유사한 양상을 보여주었다. 그러나 무보강 실험체 Beam-No 및 보강 실험체 Beam-R이 실험 20분~40분대에 각각 11.5mm와 184.8mm의 처짐이 증가했던 반면, 보강 실험체 Beam-R-I의 경우 20분~40분대에 36.5mm의 처짐이 증가하였고 40분~60분대에 103.9mm의 처짐이 증가하였다. 또한, 실험체 Beam-R은 실험 15분~28분대에 가장 많은 처짐(101.4mm)이 증가하였다. 그러나 Beam-R-I의 경우 실험 47분~58분대에 가장 많은 처짐(72.9mm)이 증가하며 실험체 Beam-R에 비해 최다 처짐이 발생하는 시간대가 약 30분 정도 지연되었고, 강봉에 적용한 내화 단열을 통해 고온에 노출된 철근콘크리트 보에 발생하는 급격한 처짐의 증가를 지연시키는 효과를 확인할 수 있었다. 이후 보강 실험체 Beam-R 및 Beam-R-I 모두 최다 처짐이 발생한 시간대 후의 처짐 증가 양상을 비교하였다. 가열 실험 60분~80분대의 보강 실험체 Beam-R 및 Beam-R-I의 처짐 증가량을 비교한 결과 각각 95.0mm, 76.8mm의 처짐이 증가하였고 이를 통해 급격히 처짐량이 증가하는 구간을 지나 항복구간에 접어들었음에도 처짐 증가량이 강봉의 내화 단열로 인해 약 20% 감소하는 효과 또한 확인할 수 있었다. 또한 무보강 실험체 Beam-No와 보강 실험체 Beam-R을 비교한 결과, 철근콘크리트 보 실험체의 예상 항복하중 이상의 하중을 고온에 노출된 상황에서도 고강도 강봉을 이용한 외적 보강을 통해 지지할 수 있는 수행 능력을 확인할 수 있었다.

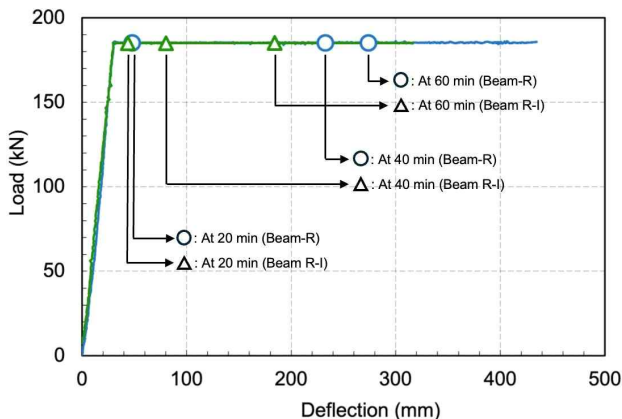


그림10. 보강 실험체별 하중-처짐

#### 4. 결론

본 연구에서는 고강도 강봉을 이용한 외적 포스트텐서닝 공법이 적용된 철근콘크리트 보가 고온에 노출되었을 때의 거동과 내화 단열재 적용에 따른 보강 효과를 고온 가열 실험을 통해 확인하였다. 강봉을 이용한 보강 실험체의 성능 및 보강재의 내화 단열효과를 확인하기 위해 수평가열로에 각 조건의 실험체를 설치, 1점 가력 상태로 표준가열곡선에 따라 가열 실험을 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 무보강 실험체 Beam-No에 비해 강봉을 이용한 외적 비부착식 보강을 적용한 보강 실험체 Beam-R 및 Beam-R-I가 더 큰 하중을 화재 상황에서도 버틸 수 있음을 확인하였다.
- 2) 세라크울을 사용한 강봉의 내화 단열을 통해 철근콘크리트 보가 고온에 대한 노출로 인해 초기에 발생하는 급격한 처짐의 증가를 약 30분간 지연시키는 효과를 확인하였으며, 또한 27% 이상의 처짐 방지 효과를 확인하였다.
- 3) 고강도 강봉을 이용한 외적 비부착식 보강이 보 중앙부의 인장부를 통해 실험체의 급격한 처짐 및 인장철근의 파단으로 인한 보의 붕괴에 저항할 수 있는 안전장치 역할로서 작용한 것을 확인하였다.
- 4) 가열시간 60분 이후의 시간대에서 세라크울을 통한 강봉의 내화 단열 효과로 인해 처짐 증가량이 약 20% 감소하는 효과를 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Lee, S.-H. (2023). Shear Strengthening by Externally Post-tensioning Steel Rod in Fire-Damaged Reinforced Concrete (RC) Beam. *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 39(1), 257-265.
2. Ju, M.-K, Park, C.-W., Oh, J.-H., Seo, S.-G. & Shim, J.-W. (2016). Investigation of Material Characteristics of Reinforced Concrete Beam After Exposure to Fire Test. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(3), 33-41.
3. Lee, T. (2009). Heat Transfer Analysis of Concrete Members Considering Evaporation Heat under High Temperature. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers A*, 29(4A), 355-363.
4. Korean Standard Association, *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction (KS F 2257-6)*, 2019.