# 비부착 탄소섬유판 긴장재를 갖는 철근 콘크리트 보의 휨거동

## Flexural behavior of RC beams with unbonded prestressing CFRP laminates

박 종 섭* 박 영 환** 정 우 태***
Park, Jong Sup Park, Young Hwan Jung, Woo Tai

ABSTRACT

This study investigates the flexural behavior and strengthening performance of RC beams with unbonded prestressing CFRP laminates through static bending tests. The aluminum anchorage system has been developed in this study and successfully applied to the test specimens. The prestressing level of CFRP laminatehas was 0 %, 20 %, 30% and 50 % of its tensile strength. Experimental results revealed that RC beams with unbonded prestressing CFRP laminates showed increased crack load and yield load according to the level of prestress. It has also been observed that the length of the CFRP laminates does not have significant effect on the maximum load.

### 1. 서론

FPR(Fiber Reinforced Polymer)는 중량에 비해 높은 강도, 높은 내부식성 등 우수한 역학적 특성으로 인해 최근 건설분야에 적용되는 사례가 많아지고 있으며, 특히 노후 구조물에 대한 보강에 있어서는 FRP를 활용한 공법이 대세를 이루고 있다. FRP를 이용한 구조물의 보강은 전통적으로 콘크리트 인장면에 FRP를 부착하는 형태의 부착공법이 주로 이루어지고 있으나, FRP 부착공법은 고정하중의 분담이나 사용성 개선 등의 효과가 거의 없으며, FRP의 박리 또는 부착파괴와 같은 조기파괴의 문제점이 있다. 이러한 FRP 부착공법의 문제점들을 해결하기 위한 노력으로 최근에는 FRP 판에 프리스트레스를 도입하는 공법에 대한 연구들이 시작되었다. 판형태의 FRP를 이용하여 구조물에 긴장력을 도입하면 주인장철근의 응력을 경감시킬 수 있을 뿐만 아니라, 구조물의 균열폭과 휨변형도 감소시킬 수 있으며, 추가되는 활하중뿐만 아니라 고정하중도 일부 분담할 수 있게 되어 고가의 FRP를 효율적으로 활용할 수 있는 방법이 된다(El-Hacha 2000).

Meier(1995)는 도입 긴장력의 크기가 FRP 인장강도의 60% 이상인 경우에는 FRP 판에 인장파단이 발생하지만 긴장력이 60% 미만인 경우에는 부착파괴가 발생하는 것으로 보고했다. Garden 등(1998)의 연구에서는 긴장력 크기가 50% 미만일 경우 부착파괴가 발생하는 것으로 나타났으며, El-Hacha 등(2004)은 부착파괴가 발생할 때 보의 성능이 순간적으로 감소한다고 보고하였다. 특히 부착파괴가 발

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원
*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

생할 때 이완되는 FRP 판의 변형률은 정착구에 충격을 주어 오히려 FRP 판이 성능을 발현하지 못하고 조기에 파괴되는 원인이 될 수도 있다(박종섭 등, 2005). 기존 연구에 따르면 FRP 판 인장강도의 50~75%를 긴장하는 경우에는 FRP 판이 조기 파단될 수 있다(El-Hacha 등, 2004).

비부착된 FRP 판 긴장재를 갖는 철근 콘크리트 보는 부착된 FRP 판 긴장재를 갖는 보에 비해 콘크리트의 면처리, 부착, 양생 등의 공정을 생략할 수 있기 때문에 시공성이 좋아지며, 부착파괴로 야기되는 조기파괴를 방지할 수 있다. 또한 비부착된 긴장재를 갖는 보는 부착된 긴장재로 보강된 보에 비해 연성이 우수해지기 때문에 FRP 재료가 지닌 취성적 특성을 보완하는 역할을 한다(정상모, 1998).

기존의 FRP 판 긴장공법에 대한 연구는 주로 실험실 수준에서의 연구였으며, 특히 대부분 정착장치가 강재로 제작된 사례에 대한 연구였다. 최근 상용화된 FRP 판 긴장공법도 모두 강재 정착장치를 사용하고 있다. Stoecklin과 Meier(2003)는 내부식성이 우수한 FRP를 긴장재로 사용하면서 정작 정착장치 자체는 부식에 취약한 강재를 사용하는 기존 방식에 문제를 제기하였다.

본 연구에서는 현장에서의 적용을 고려하여 강재보다 내부식성이 뛰어난 알루미늄 정착장치를 개발하였으며, 이를 활용하여 현장에서와 동일한 시공공정에 의해 비부착 CFRP 판 긴장재를 시공한 보에 대한 휨 실험을 통해 비부착 CFRP 판을 갖는 철근 콘크리트 보의 휨거동을 고찰하고, 개발된 정착장치 및 비부착 CFRP 판 긴장공법의 시공성 및 보강 성능을 검증하였다.

## 2. 실험체 제작 및 휨실험

### 2.1 CFRP 판 긴장공법용 알루미늄 정착장치

본 연구팀은 다양한 매개변수 분석과 해석을 통해 강재로 제작된 CFRP 판 긴장공법용 정착장치를 개발한 바 있다(정대성 등, 2004). 그러나 개발된 정착장치에 대한 옥외 장기 노출 실험을 실시한 결과, Stoecklin 과 Meier(2003)가 지적한 바와 같이 강재 정착장치에 부식이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 일반 강재와 유사한 강도를 갖지만, 제작은 강재에 비해 용이하고 일반적인 부식환경에서 사용성이 뛰어난 재료인 알루미늄을 이용한 정착장치를 제작하였다. 알루미늄은 내부식성이 강재에 비해 우수할 뿐만 아니라 강재 쐐기에 비해 CFRP 판에 집중되는 응력을 작게 하므로 정착성능의 향상도 기대할 수 있다(정대성 등, 2004). 알루미늄 정착장치에 대한 정착성능 실험결과는 그림 1과 같다. 그림 1에 나타난 바와 같이 알루미늄 정착장치는 CFRP 판의 파단하중에 도달하기 전에 항복변형률 6300($\times 10^{-6}$)을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 강재의 1/3에 불과한 알루미늄 탄성계수로 인해 정착장치의 휨강성이 기존 강재 정착장치에 비해 낮아졌기 때문에 발생하는 문제이다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 정착장치의 단면계수를 증가시켰으며 개선된 정착장치는 CFRP 판 파단하중까지 항복하지 않고 정착성능을 충분히 나타냈다(그림 2).

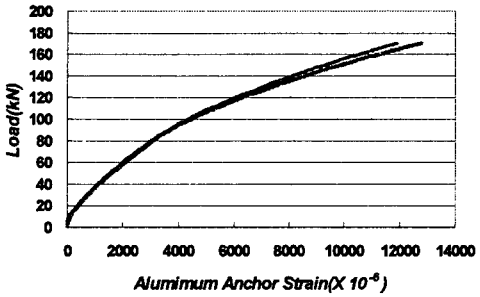

그림 1 하중-변형률 곡선

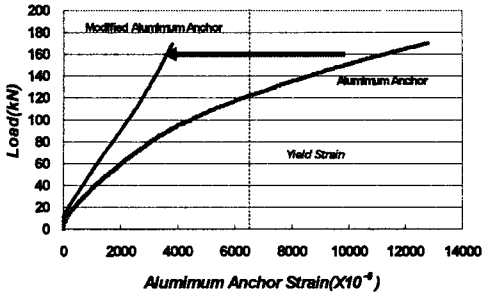

그림 2 개선된 하중-변형률 관계

2.2 비부착 CFRP 판으로 긴장된 실험체 제작 및 휨실험

실험체는 지간 길이 6m, 전체 6.4m 길이의 철근 콘크리트보로 제작되었으며, 설계강도 27MPa의 콘크리트로 제작되었다. 제작된 실험체의 제원과 CFRP 판 정착위치는 그림 3에 나타냈으며, 표 1에는 실험변수와 긴장량을 나타냈다. 그림 3에서 "L"과 "S"는 알루미늄 정착장치의 설치위치로 보의 유효깊이 이내의 거리에 정착장치가 설치된 경우와 그렇지 않은 경우의 거동 특성을 관찰하기 위해 결정된 변수이다. 각 실험체는 그림 4와 같이 가력프레임에 보를 거치한 후, 실제 현장에서의 상황을 모사하여 보하면에서 정착장치 설치부터 최종 긴장작업까지의 시공을 실시하였다.

모든 실험체는 4점 휨 재하로 실험체 파괴시까지 하중을 재하했다. 하중은 변위제어로 초기 20mm 변위 발생시까지 초당 0.03mm의 속도로 재하하고, 20mm 이상의 변위가 발생한 시점부터 파괴시까지는 초당 0.05mm의 속도로 재하했다.

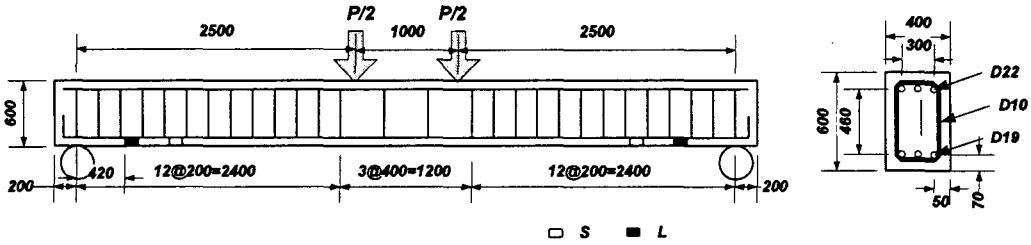


그림 3 실험체 제원 및 CFRP 정착위치(mm)

표 1 실험변수 및 긴장량

| 변수명 | 긴장량($\times 10^{-6}$) | 파단변형률 대비 비율 |
|---|---|---|
| CONTROL | - | - |
| UB-L-PRE-0 | 557 | 3.3% |
| UB-L-PRE-20 | 3405 | 20.0% |
| UB-L-PRE-30 | 5018 | 29.5% |
| UB-L-PRE-50 | 8071 | 47.5% |
| UB-S-PRE-0 | 612 | 3.6% |
| UB-S-PRE-20 | 3662 | 21.5% |
| UB-S-PRE-30 | 5611 | 33.0% |
| UB-S-PRE-50 | 7501 | 44.1% |

그림 4 긴장장치 설치 및 CFRP 판 긴장작업

표 2 실험결과 요약

| 실험체명 | 균열하중 ($P_{cr}$, kN) | 항복하중 ($P_y$, kN) | 항복변위 ($D_y$, mm) | 극한하중 ($P_u$, kN) | $P_u$/ $P_{u_control}$ | 극한변위 ($D_u$, mm) | 연성 ($D_u/D_y$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CONTROL | 51.6 | 131.6 | 17.9 | 152.5 | - | 123.4 | 6.89 |
| UB-L-PRE-0 | 53.1 | 136.7 | 16.3 | 236.0 | 1.55 | 239.2 | 14.67 |
| UB-L-PRE-20 | 57.3 | 151.9 | 17.9 | 202.0 | 1.32 | 112.7 | 6.30 |
| UB-L-PRE-30 | 58.0 | 162.5 | 17.3 | 224.3 | 1.47 | 129.1 | 7.46 |
| UB-L-PRE-50 | 82.0 | 182.5 | 17.7 | 217.1 | 1.42 | 88.83 | 5.02 |
| UB-S-PRE-0 | 38.2 | 138.5 | 19.3 | 233.9 | 1.53 | 160.9 | 8.34 |
| UB-S-PRE-20 | 51.8 | 152.6 | 18.2 | 235.8 | 1.55 | 149.0 | 8.19 |
| UB-S-PRE-30 | 55.6 | 166.1 | 17.5 | 225.6 | 1.48 | 107.4 | 6.14 |
| UB-S-PRE-50 | 71.6 | 176.2 | 20.7 | 231.4 | 1.52 | 108.4 | 5.24 |

## 3. 실험결과 및 분석

최종 실험결과는 표 2와 같다. CFRP 판이 설치되지 않은 무보강 실험체의 경우에는 인장철근 항복 후 압축파괴로 이어지는 전형적인 휨파괴 양상으로 파괴되었으며, CFRP 판으로 긴장된 실험체는 모두 CFRP 판이 파단될 때 최대 하중을 나타냈다. S 실험체 그룹에서는 정착장치가 설치된 위치에서 균열이 발견되었으나 L 실험체 그룹에서는 정착장치 위치에서 손상이 발견되지 않았다. 긴장력의 크기에 따라 균열하중과 항복하중이 증가하는 것으로 나타났으며, 연성은 감소하는 것으로 나타났다. 유사한 긴장력 수준에서는 보강길이가 짧은 S 실험체 그룹에서 균열이 먼저 발생하는 것으로 나타났다.

휨실험 결과, 비부착 CFRP 판으로 긴장된 보는 무보강 보에 비해 항복하중은 4~37%가 증가하며, 최대하중은 32~55%가 증가하는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 정착장치를 사용하여 비부착된 CFRP 판으로 긴장된 RC 보의 보강성능 및 거동 특성을 규명하기 위한 휨 실험을 수행하였으며, 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다. (1) 내부식성과 경량화를 위해 알루미늄으로 제작된 정착장치는 CFRP 판 정착성능을 충분히 나타냈다. (2) 알루미늄 정착장치를 사용하고 비부착된 CFRP 판으로 긴장된 RC 보는 무보강 RC보에 비해 항복하중을 4~37% 증가시키며, 최대하중은 32~55%를 증가시키는 것으로 나타나, 프리스트레싱에 의해 최대하중 증가는 물론 사용성도 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

비부착 CFRP 판 긴장공법은 콘크리트 면처리 및 에폭시 부착, 양생의 작업공정을 생략할 수 있을 뿐만 아니라 부착파괴에 의한 충격도 발생하지 않기 때문에 콘크리트 구조물 보강에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌


1. El-Hacha R., "Prestressed CFRP sheets for strengthening concrete beams at room and low temperatures", PhD Thesis, Queen's University, Department of Civil Engineering, Kingston, Ontario., 2000.
2. Meier, U., "Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites", *Constr. Build. Mater.*, V. 9, No. 6, pp. 341-351., 1995.
3. Garden HN & Hollaway LC., "An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with pre-stressed carbon composite plates", *Composites Part B* : pp. 411-424., 1998.
4. El-Hacha, R., Wight, R. G., and Green, M. F., "Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures", *Journal of Composites for Construction*, V. 8, No. 1., pp. 3-13., 2004.
5. 박종섭, 박영환, 유영준, 정우태, 강재윤, "부착 또는 비부착된 탄소판으로 긴장 보강한 RC보의 보강성능", 한국콘크리트학회 2005년도 봄 학술발표회 논문집 : Vol.17 No.1, pp. 279-282., 2005.
6. 정상모, "FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트보의 연성개선 방법", 한국콘크리트학회 1998년도 가을학술발표회 논문집 : Vol.10 No.2, pp. 643-648., 1998.
7. Stoecklin I. and Meier U., "Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips", *Proceeding of the sixth international symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures(FRPRCS-6)*, Singapore, pp. 1321-1330., 2003.
8. 정대성, 신재민, 정우태, 박종섭, 박영환, 김철영, "CFRP 판용 쐐기형 정착구 설계변수에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 2004년도 정기 학술대회 논문집, pp. 381-386., 2004.