

# FRP복합체로 보강된 실물모형 RC보의 보강재 강성에 따른 휨 보강성능

## Flexural Performance of Full-scale RC Beams Strengthened with Different Amount of FRP Composite

최기선\*  
Choi, Ki Sun

유영찬\*\*  
You, Young Chan

김금환\*\*\*  
Kim, Keung Hwan

### ABSTRACT

Many research have been carried out concerned with the flexural performance of FRP composite in a various ways. Most of them, however, have used a small-scale specimen, so haven't been fully verified by full-scale model test. In this study, a full-scale RC beam model test for flexural strengthening with CFRP composites has been performed in order to verify test results obtained through a series of small-scale model test with respect to FRP stiffness affecting strengthening performance in the previous studies.

A total of 4 specimens have been manufactured including control beam. The specimens strengthened with CFRP composites consist of 3 different CFRP stiffness with 2 types of CFRP composite. Consequently, the purpose of this study is to estimate influence of the size effect of specimens and FRP stiffness on the flexural performance. As a result, the effective strain of FRP composite is inversely proportional to FRP stiffness and ensures the same performance with small-scale model test.

### 1. 서론

FRP복합체를 이용한 휨 보강은 구조물 보강에 가장 보편적으로 사용되고 있는 보강공법으로 에폭시 수지 등의 접착제를 이용하여 부재의 인장측에 FRP복합체를 부착·일체화시키는 공법적 특징을 갖고 있다. 이때 보강된 부재의 휨 내력은 FRP 복합체의 설계인장강도를 결정함으로써 기존 휨 이론식을 이용하여 산정할 수 있다. 기존에는 FRP 복합체의 설계인장강도를 재료시험결과로부터 구한 FRP복합체의 파단강도를 근간으로 설정하였으나, 실제 부재의 보강에서는 FRP복합체의 인장강도가 재료시험결과에 비하여 감소하며, 특히 정착상세를 적용하지 않은 단순 부착공법에서는 FRP 복합체의 파단이전에 부착파괴에 의해 최대내력이 결정되는 것으로 밝혀졌다. 이에 따라 부착파괴 시의 응력조건을 규명하기 위한 다양한 연구가 진행되어졌으며, 최근에는 FRP복합체의 보강성능을 박리파괴시의 유효변형률로 평가하며, 보강재 강성에 의해 지배적인 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 그러나 기존에 수행된 보강 부재의 특성파악을 위한 실험연구는 대부분 축소모형 실험에 근간하고 있어 실물모형 실험에서 나타나는 파괴메커니즘의 변화, FRP 복합체의 강도 저하 및 거동특성을 충분히 반영하지

\* 정희원, 한국건설기술연구원 건축·도시연구부 연구원

\*\* 정희원, 한국건설기술연구원, 건축·도시연구부 수석연구원, 공학박사

\*\*\* 정희원, 한국건설기술연구원, 건축·도시연구부 연구위원, 공학박사

못하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 FRP복합체의 박리파괴 시의 응력조건을 규명하기 위한 연구의 일환으로 실물모형 실험에서 탄소섬유복합체의 보강성능을 검증하며, 선행연구에서 이루어진 축소모형 실험결과와 비교함으로써 보강재 강성 및 부재크기 효과가 보강성능에 미치는 영향을 파악하고, FRP복합체의 휨 보강설계를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

FRP복합체의 휨 보강성능을 규명하기 위한 다양한 연구가 기존에 이루어졌으나 이러한 연구의 대부분은 축소모형 실험체를 대상으로 진행되었으며, 실제 부재를 묘사한 실물모형에 대한 검증은 이루어지지 않았다. 한편 축소모형 실험으로부터 도출된 휨 보강성능의 주요 영향인자에 대해서는 현장적용의 안전성을 확보하기 위해서 실물모형에 대한 검증이 반드시 이루어져야 한다. 본 논문에서는 FRP복합체의 박리파괴에 영향을 미치는 주요 변수인 보강재 강성에 대하여 실물모형 실험체를 대상으로 실험을 수행하고 선행연구에서 수행된 축소모형 실험결과와 비교함으로써 동일한 보강재 강성에서 부재의 유효높이가 휨 보강성능에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 실물모형 실험에서의 보강은 탄소섬유쉬트와 탄소섬유판을 대상으로 하였으며, 탄소섬유쉬트의 보강매수를 변화시켜 3가지의 보강재 강성에 대한 영향을 검토하였다.

## 3. 실험

실험체 제작에는 설계압축강도 30MPa의 레미콘을 사용하였으며, 인장, 압축 및 전단철근은 항복강도가 400MPa인 D10, D19, D22 철근을 사용하였다. 보강재는 1방향 탄소섬유쉬트와 탄소섬유판을 사용하였으며, 동일회사의 함침용 에폭시 수지를 이용하여 보강하였다. 실험체의 단면치수는 400×600mm로 인장측과 압축측 피복두께를 30mm로 하였으며, 지점간 거리 6,000mm, 전체 실험체 길이는 6,800mm로 계획하였다. 압축철근은 3-D19, 인장철근은 5-D22으로 배근하였다. 또한, 전단 보강근은 휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 철근을 150mm 간격으로 배근하였다. 실험체는 무보강 실험체를 포함하여 총 4개를 제작하였다.

탄소섬유쉬트 보강실험체는 2, 4매를 적층시공하여 보강재 강성에 대한 영향을 평가하였으며, 탄소섬유판은 현업에서 상용화되고 있는 두께 1.2mm 제품을 대상으로 하며, 사전양생형으로 생산되기 때문에 적층시공하지 않고 보 폭 방향으로 병렬 부착하였다. 대표적인 실험체의 형상 및 치수를 나타내면 그림 1과 같다.

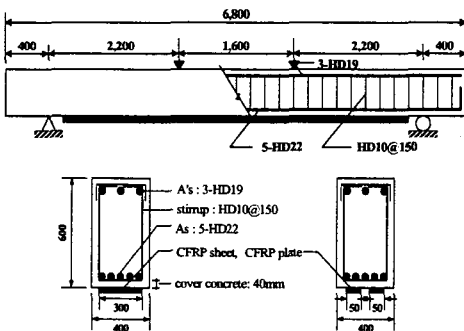


그림 1 실험체 형상 및 치수

표 1 실험체 상세 제원

실험체명	FRP 종류	$n_f$ (ply)	$t_f$ (mm)	$b_f$ (mm)	$l_f$ (mm)	$n_f t_f E_f$ (N·mm)	비고
FCON-M	-	-	-	-	-	-	기준실험체
FFCL2-M	CFRP sheet	2	0.111	300	5,800	52,170	쉬트적층2매
FFCL4-M	CFRP sheet	4				104,340	쉬트적층4매
FFCP2-M	CFRP plate	1	1.2	100		180,000	판2매폭방향

#### 4. 실험결과

##### 4.1 파괴유형

실물모형 실험체에 대하여 FRP 복합체의 보강재강성을 변수로 보강한 실험체의 파괴양상은 그림 2 및 그림 3과 같다. 보강재 강성과 관계없이 실물모형의 모든 실험체는 전단스팬 구간의 하중 가력점 부위에서 시작된 박리가 보강재 단부로 진행되어 최종 박리파괴되었다. 이때 탄소섬유 슈트로 보강된 실험체에서는 전단스팬 구간의 하중 가력점 부위뿐만 아니라 중앙부 순수 휨 구간에서도 휨 균열의 확산에 의한 부분적 박리가 발생하였다. 그러나 최종박리파괴는 전단스팬 구간의 가력점 부위에서 발생하는 박리가 단부로 진행되면서 최종파괴되었다. 반면 탄소섬유 판으로 보강된 실물모형 실험체는 전단스팬 구간의 가력점 부위에서 박리 균열이 관찰된 직후 파괴되었다. 즉, 보강재 강성이 큰 탄소섬유 판의 경우는 박리의 진행이 육안으로 관찰할 수 없을 만큼 빠르게 진행되었다.



그림 2 탄소섬유슈트 2매 실험체의 FRP 박리파괴



그림 3 탄소섬유판 2매 실험체의 FRP 박리파괴

##### 4.2 하중-변위 관계

탄소섬유슈트 및 탄소섬유판의 보강재 강성을 변수로 실물모형 실험결과를 분석하여 나타내면 그림 4와 같다. 실험결과로부터 보강재 강성이 증가할수록 항복하중 및 최대하중은 증가하는 것으로 나타났으나  $P_u$ 로 표현되는 탄소섬유복합체의 보강성능은 보강재 강성의 비율에 따라 비례적으로 증가하지 않는 것으로 나타났다. 즉, 탄소섬유슈트 4매 보강실험체는 2매 보강실험체에 비하여 보강재 강성은 2 배로 증가하였으나, 실제 보강성능  $P_u$ 는 2배가 증가하지 못하였다. 특히 탄소섬유판 2매를 횡방향으로 병렬 부착한 실험체는 탄소섬유슈트 보강실험체에 비하여 보강재 강성이 가장 큼에도 불구하고 보강성능은 가장 작게 나타나고 있다. 따라서 본 실험결과에 의하면 탄소섬유복합체의 보강성능은 보강재 강성과 반비례의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

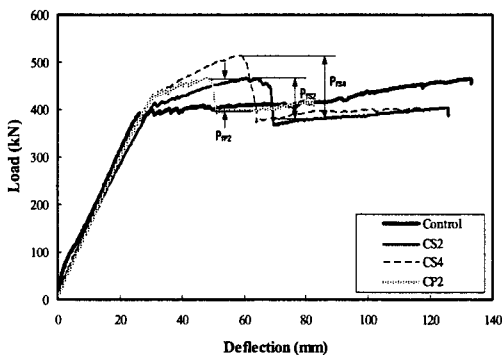


그림 4 실물모형 실험체의 하중-변위곡선

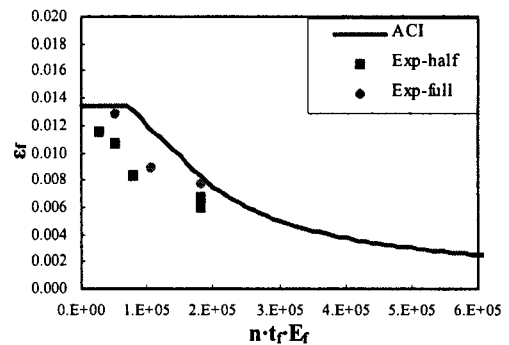


그림 5 FRP 복합체의 유효변형률-강성 관계

한편, 본 실험에서는 보강재 강성에 따른 FRP 복합체의 유효변형률 변화를 파악하기 위하여 보강 효과가 상실되는 시점의 하중 차로부터 FRP 복합체의 유효변형률을 산정하였으며, 본 계산결과를 선행연구에서 수행된 축소모형 실험결과와 비교하여 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 실물모형 실험체를 대상으로 보강재강성에 대한 영향을 검토한 결과, 보강재 강성이 증가할수록 FRP 복합체의 유효변형률은 감소하며, 축소모형 실험체의 실험결과와 비교할 때 동일한 보강재강성에서 FRP 복합체의 유효변형률이 증가하지만 대체로 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 FRP 복합체의 유효변형률을 제안하는데 있어 부재의 크기효과는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다. 아울러, 기존의 ACI440의 제안식으로 계산된 FRP 복합체의 유효변형률을 실험값과 비교하면 그림에서 보는 바와 같이 부재 크기에 관계없이 모든 실험체의 유효변형률이 ACI440 제안값보다 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 ACI440의 제안식은 실제 탄소섬유복합체의 휨 보강성능을 과대평가하는 것으로 판단된다.

표 2 탄소섬유복합체 보강재 강성에 따른 실험결과

실험체명	Yield		Ultimate			P <sub>fail</sub>	ε <sub>ie</sub>	파괴양상
	P <sub>y</sub>	δ <sub>y</sub>	P <sub>u</sub>	δ <sub>u</sub>	ε <sub>fu</sub>			
FCON-M	392.5	26.3	463.9	131.8	-	-	-	휨파괴
FFCS2-M	414.5	31.3	467.0	60.7	0.0094	368.2	0.01286	FRP박리
FFCS4-M	437.2	28.6	514.0	54.2	0.0075	378.4	0.00890	FRP박리
FFCP2-M	438.8	34.3	465.0	48.3	0.0058	396.4	0.00770	FRP박리

## 5. 결 론

- 1) 실물모형 실험에서 탄소섬유복합체의 휨 보강성능은 두께와 탄성계수로 표현되는 보강재 강성에 영향을 받으며, 보강재의 강성이 증가할수록 휨 보강성능은 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 실물모형 실험결과를 축소모형 실험체의 실험결과와 비교해 보면, 동일한 보강재강성에서 FRP 복합체의 유효변형률이 증가하지만 대체로 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 탄소섬유복합체로 보강된 부재의 휨 보강설계에서는 부재의 크기효과를 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.
- 3) 기존의 ACI440의 제안식으로 계산된 탄소섬유복합체의 유효변형률을 실험값과 비교하면 모든 경우에서 탄소섬유복합체의 휨 보강성능을 과대평가하는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출원하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004 건설기술기반구축사업 R&D/2004 기반구축 A13 “시설물 보강공법 성능인증을 위한 시험항목·방법 및 평가기준 설정 연구”의 일부로서, 관계제위께 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. ACI 440. 2R-02 "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI Committee 440
2. Christopher K.Y.Leung 외, "Empirical Approach for Determining Ultimate FRP Strain in FRP-Strengthened Concrete Beams" Journal of Composite for Construction, March-April 2006., pp125-138
3. 한국건설기술연구원(2006), 시설물 보강공법 성능인증을 위한 시험항목·방법 및 평가기준 설정 연구.