

고성능 탄소섬유봉으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 연구

A Study on the Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with High-Performance Carbon Fiber Bars

하 기 주* 신 종 학* 박 연 동** 전 찬 목*** 이 영 범*** 김 기 태***
Gee-Joo Ha Jong-Hack Shin Yon-Dong Park Chan-Mog Jun Young-Bum Lee Kim, Ki Tae

ABSTRACT

An experimental study was carried out to investigate the flexural behavior of RC beams strengthened with high-performance carbon fiber bars. Specimens designed with the conventional retrofitting method were also tested to compare load-carrying capacity and ductility. As the results, specimens strengthened with high-performance carbon fiber bars showed much higher load-carrying capacity and ductility compared to specimens strengthened with a steel plate and carbon fiber sheets. The failure mechanism of the specimen strengthened with a high-performance carbon fiber bar was bond-slip, whereas that of the others were interface debonding or rip-off.

1. 서론

근래, 철근콘크리트 구조물의 주 보강재료로 강판과 FRP계 재료가 널리 사용되고 있으며, FRP계 재료 중에서도 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheets : 이하 CFS)로 대표되는 탄소섬유계 보강재료가 주목을 이루고 있다.^{1)~4)} 강판 보강공법은 보강 후 부재단면 크기의 변화가 거의 없고 시공이 간편한 반면, 취급이 불편하고 내부식성 및 내화학성이 취약하며, 취성적인 보강판 탈락현상이 나타난다. CFS 보강공법은 보강재료의 내부식성, 내화학성 및 내피로성이 우수할 뿐만 아니라 시공이 간편하여 그 사용량이 증가 추세에 있으나, 강판 보강공법과 마찬가지로 그 보강효과는 모재(철근콘크리트)와 보강재의 부착성능에 크게 영향을 받기 때문에, 보강재 강도만큼의 보강효과를 얻기 힘들뿐만 아니라 정확한 보강 효과를 예측하기 힘들고 연성이 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위한 방법으로 CFS의 부착성능을 높여 내력 및 연성증진을 도모하고자 하는 연구가 많이 진행되었으나, 부재 표면에 보강재를 부착해야 한다는 근본적인 약점 때문에 그 개선효과에는 한계가 있다.

최근, 기존의 CFS와 재료역학적 성질은 동등하면서도 시공성이 우수하고 모재와의 부착성능이 뛰어나 보강효과를 크게 높일 수 있는 매입형 고성능 탄소섬유봉(High-Performance Carbon Fiber Bars : 이하 HCFB)이 개발되었으며,⁵⁾ 본 연구에서는 이를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동을 실험을 통하여 규명하고 기존 보강공법 대비 내력 및 연성 개선효과를 평가하고자 한다.

* 정희원, 경일대학교 건축공학과 교수

** 정희원, 경산대학교 건축·건설시스템공학부 조교수

*** 정희원, 경일대학교 대학원

**** 정희원, (주)한보엔지니어링 대표이사

2. 고성능 탄소섬유봉을 보강한 철근콘크리트 보의 실험

2.1 실험 계획

HCFB의 보강효과를 규명하기 위하여 무보강 기본 실험체에 대하여 보강재 종류 및 보강량 등을 실험변수로 두고 실험을 수행하였다. 기본 실험체는 폭 20cm, 높이 30cm, 유효높이 25cm, 총길이 2.2m, 인장철근비 0.010으로 휨인장파괴가 발생하도록 설계되었으며, 그 상세는 그림 1과 같다. 실험 변수 및 실험 변수에 따른 실험체 종류는 표 1과 같다.

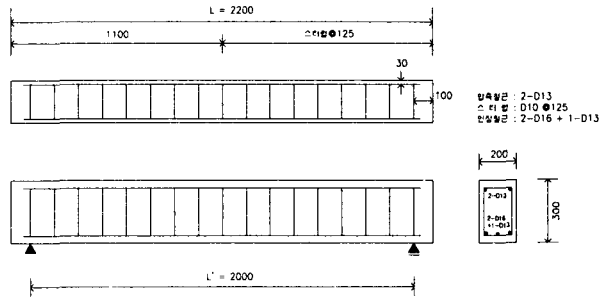


그림 1 기본 실험체의 형상 및 제원 (단위 : mm)

표 1 실험체 종류

실험체 명	보강재 종류	보강길이(cm)	보강겹(본)수	비 고
BSS	-	-	-	기본 실험체
BS30	강판	180	1	
BC2P	CFS	180	2	
BCR1	HCFB	180	1	
BCR2	HCFB	180	2	
BCR3	HCFB	180	3	

2.2 사용 재료

콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트, 최대크기 25mm의 쇄석 및 강모래를 사용하여 제조하였으며, 재령 28일 압축강도는 259 kgf/cm^2 이었다. 주철근 및 스티럽으로 사용된 철근은 SD40의 D10, D13, D16이며, 항복강도는 각각 $4550, 4025, 4200 \text{ kgf/cm}^2$ 로 측정되었다.

보강재로 사용된 강판은 두께 3mm, 폭 20cm, 항복강도 2400 kgf/cm^2 의 국내산 SS400이며, CFS는 폭이 20cm이고, 인장강도와 탄성계수는 각각 $35000 \text{ kgf/cm}^2, 2.6 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 인 제품을 사용하였다. HCFB의 인장강도와 탄성계수는 각각 $23900 \text{ kgf/cm}^2, 1.99 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 그 형상 및 매입 형태는 그림 2와 같다.

2.3 보강 방법

강판 및 CFS 보강 실험체는 기존의 보강방법에 따라 보강하였으며, HCFB 보강 실험체는 폭 20mm, 깊이 20mm의 홈을 파고 내부에 접착제를 이용하여 HCFB를 삽입하는 방법으로 보강을 실시하였다. BS30, BC2P, BCR1 및 BCR2 실험체의 보강상세는 그림 3과 같다.

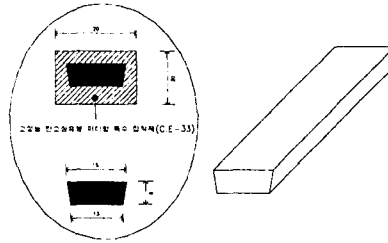


그림 2 고성능 탄소섬유봉의 형태

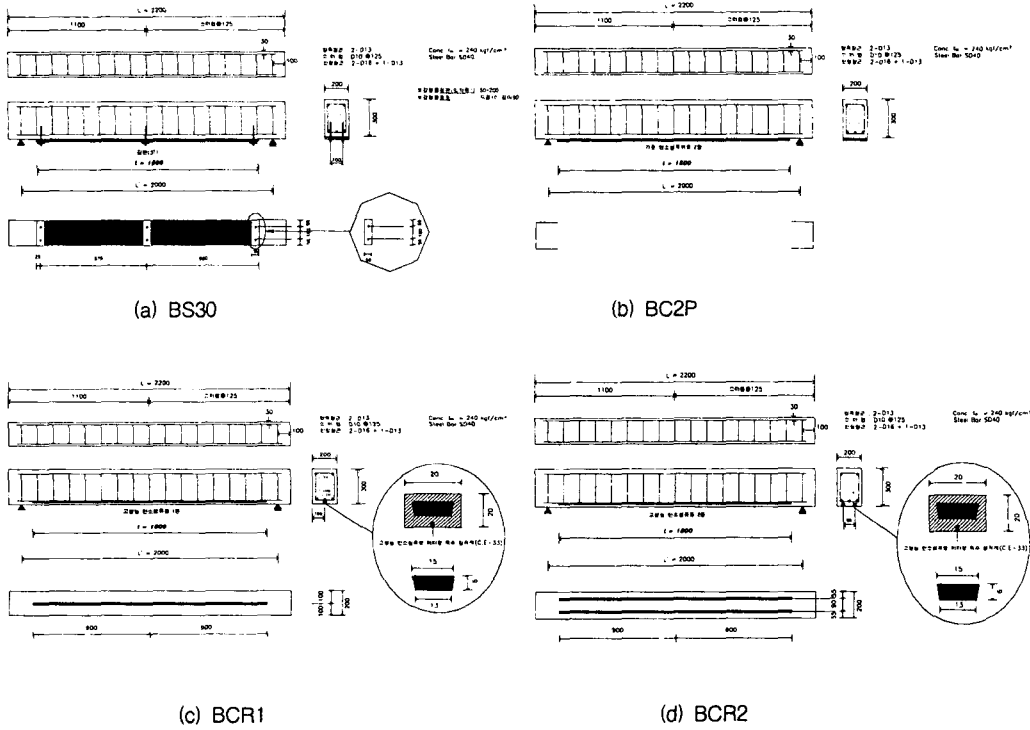


그림 3 각 실험체의 보강방법 및 보강상세

2.4 가력장치 및 재하방법

모든 실험체는 가력 프레임에 100톤 용량의 유압 잭을 설치하여 그림 4와 같이 실험체 중앙으로부터 $d/2$ 떨어진 지점에 2점 가력하였으며, 하중은 50톤 용량의 로드셀을 사용하여 측정하였다. 철근이 항복할 때까지는 하중조절 방식으로 실험을 수행하다가 그 이후에는 보 중앙점의 변위를 기준으로 하는 변위조절 방식으로 바꾸어 실험하였다.

보 중앙부의 처짐은 스트레인게이지 타입 변위계로 측정하였고, 각 하중단계마다 보 중앙부의 처짐 및 철근과 보강재의 변형률이 측정되었으며, 균열 발생 양상을 도시하였다.

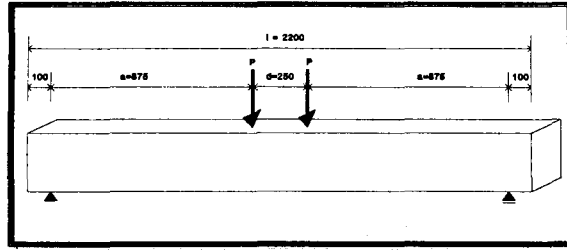


그림 4 재하방법

3. 고성능 탄소섬유봉을 보강한 RC 보의 휨거동 및 기존 보강공법과의 비교

3.1 파괴형태

그림 5는 각 실험체의 균열진전 양상 및 파괴형태를 보여주고 있다. 기본 실험체인 BSS 실험체를 파괴시까지 가력하여 각 하중 단계에 따른 균열 진전상황을 고찰한 결과, 순수 휨 구간에서 휨 균열이 먼저 발생하였고, 하중이 증가함에 따라 전단지간 구간에 휨 균열 및 휨전단 균열이 발생하여 진전된 다음 변형이 상당히 증가한 후 압축부 콘크리트가 파괴되는 전형적인 휨인장파괴가 발생하였다.

강판으로 보강된 BS30 실험체는 하중이 증가함에 따라 보강재 단부 부근에서 휨전단 균열 및 복부 전단 균열이 다른 실험체에 비하여 크게 발달하였으며, 하중이 최대내력의 80%를 넘어서면서부터 보강단부에 부착균열이 발생하기 시작하였다. 보의 최종적인 파괴는 전단균열의 발달로 인해 취약해진 보강단부에 응력이 집중하면서 강판이 피복 콘크리트와 함께 모재에서 박리되는 피복분리 형태로 나타났다.

CFS 보강 실험체의 경우, 인장철근이 항복한 이후 보강재의 변형률이 급격하게 증가하면서 휨 균열이 발달한 보의 중앙부에서부터 보강재와 모재 계면의 부착파괴가 발생하기 시작하였으며(부착 파괴음 발생), 최대내력 시점에서 갑자기 탄소섬유슈트가 콘크리트 면으로부터 박리(보강 단부에서 보 중앙부를 넘는 지점까지 박리)되는 계면파괴 현상이 나타났다.

HCFB 1본 보강 실험체 BCR1은 하중이 최대내력에 접근하면서 보강재와 접착재 및 충전재 사이의 계면에 부착균열이 발생(부착파괴음 발생)하기 시작하였고, 다른 보강재를 사용한 실험체에 비하여 처짐량이 많이 발생한 상태에서 최대하중에 도달하였다. 또한, 다른 보강재를 사용한 실험체와 달리 최대내력 이후 바로 파괴되는 현상이 발생하지 않고 처짐이 어느 정도 더 증가한 다음 HCFB의 부착슬립 형태로 실험체가 파괴되었다.

HCFB 2본 보강 실험체 BCR2는 고성능 BCR1 실험체와 유사하게 하중이 최대내력에 접근하면서 보강재와 주위 재료사이의 계면에 부착균열이 발생(부착 파괴음 발생)하기 시작하였고, 처짐이 많이 발생한 상태에서 최대하중에 도달하였다. 그러나 BCR1 실험체와 달리 보강재 단부에서 보 중앙부까지 피복이 완전 분리되면서 피복분리 형태로 파괴가 발생하였다. 이러한 파괴 메카니즘이 발생한 이유는 본 실험체의 경우 변형이 상당히 진행된 후 높은 하중수준에서 파괴되기는 하였으나, HCFB 매입에 의한 피복부 콘크리트 단면손실 및 HCFB 순간격 감소로 인해 BCR1 실험체에 비하여 피복부 콘크리트에 걸리는 응력이 상대적으로 높았기 때문으로 판단된다. 즉, 콘크리트의 피복분리 내력이 부착슬립 내력보다 낮아졌기 때문으로 생각된다.

HCFB 3본 보강 실험체 BCR3는 HCFB 보강 실험체 중 가장 취성적으로 파괴되었으며, 최대하중 이전에 나타난 부착파괴음 등 파괴징후도 가장 적었다. 파괴는 BCR2 실험체와 같이 피복분리 형태로 발생하였으나, BCR2 실험체는 콘크리트 피복부분이 일체로 분리된 반면, BCR3 실험체는 피복부분이 각각의 HCFB를 따라 종방향으로 분리되면서 파괴가 발생하였고, 파괴 직전 피복부 콘크리트의 약화를 가져오는 보강단부 위치의 전단균열이 발생하였다. 본 실험체는 피복부 콘크리트의 단면 손실이 가장 크고, 매입된 HCFB 사이의 순간격이 좁아 피복 콘크리트 부위에 응력집중 현상이 발생하여 BCR2 실험체에 비하여 낮은 하중단계에서 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

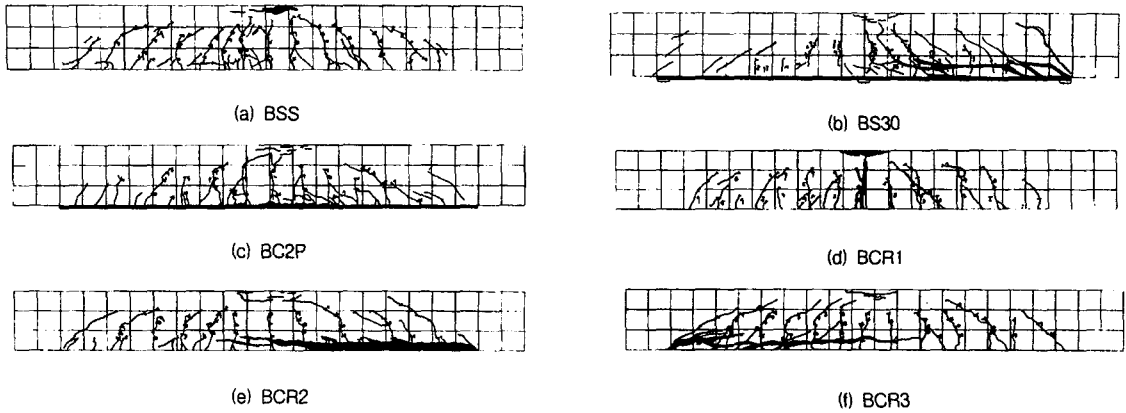


그림 5 각 실험체의 균열진전 양상 및 파괴형태

3.2 하중-처짐 특성

그림 6은 보강재료별 하중-처짐 특성을 도시한 것이다. 각 실험체의 초기강성을 비교해 보면, 강판 보강 실험체가 제일 크고, 그 다음 HCFB (2분) 보강 실험체, CFS 보강 실험체, 표준실험체의 순이다. 이러한 초기강성 차이는 각 보강재의 강성(EA)의 차이 때문으로 판단된다.

내력 보강효과는 HCFB 보강 실험체 > 강판 보강 실험체 > CFS 보강 실험체 > 기본 실험체의 순으로 HCFB 보강 실험체가 가장 큰 것으로 나타났으며, 이는 매입효과에 의해 고성능 HCFB의 부착력이 상대적으로 우수하기 때문인 것으로 판단된다.

각 보강실험체의 최대내력 시점의 변위는 HCFB 보강 실험체 > CFS 보강 실험체 > 강판 보강 실험체 순으로 나타났는데, HCFB를 사용한 실험체가 다른 보강재를 사용한 실험체에 비하여 파괴시점까지의 변형능력이 우수하고, 연성이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 강판을 보강한 실험체의 경우, 내력 보강효과는 HCFB 다음으로 측정되었으나, 보강 실험체 중 가장 취약적인 파괴형태를 보여주었다. 한편, 보강재 탈락 이후의 보강실험체 거동은 보강재료에 관계없이 기본 실험체와 유사한 형태를 보여주고 있다.

그림 7은 HCFB 보강량에 따른 실험체의 하중-처짐 곡선으로 보강량(분수)에 따른 내력 크기는 2분 > 3분 > 1분 보강 실험체의 순으로 나타났다. HCFB 2분을 보강한 실험체는 HCFB 1분을 보강한 실험체에 비하여 내력이 큰 쪽으로 증가한 반면, HCFB 3분을 보강한 실험체는 2분을 보강한 실험체에 비하여 오히려 내력이 감소하였다. 이러한 결과가 나타난 이유는 HCFB 3분을 보강한 실험체의 경우, HCFB 사이의 순간격이 너무 좁아 피복 콘크리트가 HCFB를 충분히 구속하지 못하고, HCFB를 매입하기 위한 홈 때문에 생기는 피복 콘크리트의 단면결손이 상대적으로 크기 때문으로 판단된다.

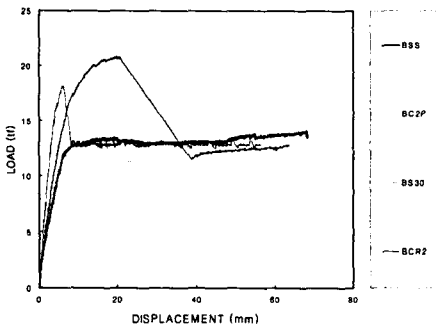


그림 6 보강재 종류별 하중-처짐 곡선

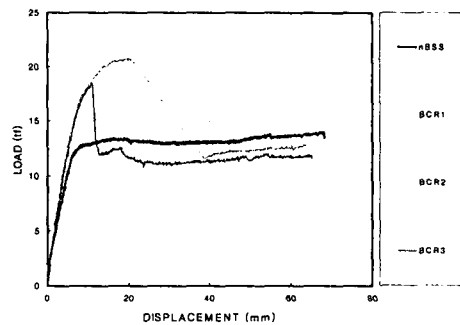


그림 7 HCFB 보강량에 따른 하중-처짐 곡선

3.3 내력 및 연성

표 2는 각 실험체의 최대하중 및 연성을 나타낸 것으로, HCFB는 강판 및 CFS에 비하여 내력 증진 및 연성 확보 측면에서 상당히 유리함을 알 수 있다.

표 2 각 실험체의 내력 및 연성

실험체명	최대하중 P (tf)	$P_{보강}/P_{무보강}$	항복시처짐 $\delta_y^{(1)}$ (mm)	파괴시처짐 $\delta_f^{(2)}$ (mm)	연성 (δ_f/δ_y)
BSS	13.43	1.00	5.35	19.37	3.62
BS30	18.17	1.35	3.97	6.27	1.58
BC2P	15.34	1.14	5.62	16.10	2.59
BCR1	16.27	1.21	5.09	22.64	4.45
BCR2	20.83	1.55	5.92	20.94	3.54
BCR3	18.54	1.38	7.50	11.05	1.47

¹⁾ δ_y : 인장철근 항복시점의 보 중앙부 처짐

²⁾ δ_f : 실험체 파괴시점의 보 중앙부 처짐

4. 결론

시공성이 우수하고 모재와의 부착성능이 뛰어나 보강효과를 크게 높일 수 있는 매입형 고성능 탄소섬유봉을 사용한 보의 휨거동에 대하여 실험을 통하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CFS 보강 실험체는 계면파괴, 강판 보강 실험체는 피복분리 형태로 파괴가 발생한 반면, HCFB 보강(1본) 실험체는 보강재 부착슬립의 형태로 파괴가 발생하였다.
- 2) 보강재료별 보강효과를 분석해 본 결과, CFS 보강 실험체는 기본 실험체 대비 내력증가가 14%, 강판 보강 실험체는 35% 수준인데 비하여 HCFB 보강(2본) 실험체는 55% 수준으로 보강효과가 매우 우수한 것으로 나타났다.
- 3) 실험을 통하여 구한 하중-처짐 곡선 및 파괴형태를 분석한 결과, HCFB 보강 실험체는 CFS 보강 실험체나 강판 보강 실험체보다 연성적으로 거동하였다.
- 4) HCFB의 보강 간격이 너무 좁으면 내력 및 연성이 감소하는 현상을 나타내므로 보강효과를 높이기 위해서는 매입간격을 충분히 확보하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부(2001년 건설기술연구개발사업)의 지원을 받아 수행되었으며, 도움을 주신 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 하기주의, "철근콘크리트 보의 보수·보강에 따른 구조성능 평가", 대한건축학회논문집, pp 219~227, 1997, 4.
2. 하기주의, "손상된 철근콘크리트 보의 휨성능 평가 및 개선", 대한건축학회논문집, pp 1057~1064, 1997, 10.
3. 하지용, "철근콘크리트 보의 보수·보강에 따른 구조성능 평가", 1996. 경북산업대학교 산업대학원 석사학위논문.
4. Roberts T.M. and Haji-Kazemi H. "Theoretical Study of The Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates". The Structural Engineer, March, 1989, pp. 39~55.
5. 하기주 외, "고성능 탄소섬유봉과 보강철물을 이용한 철근콘크리트 보의 보강 신기술 개발", 2002년도 봄 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, pp. 805~810, 2002. 5.