

# 고성능 탄소섬유봉과 보강철물을 이용한 철근콘크리트 보의 보강 신기술 개발

## Development of New Retrofitting Technology of RC Beams using High-Performance Carbon Fiber Bar and Strengthening Metal Fittings

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

### ABSTRACT

An experimental study was carried out to evaluate the structural performance of new retrofitting technology using high performance carbon fiber bar and strengthening metal fittings. Experimental programs were accomplished to evaluate the structural performance of test specimens, such as load-displacement relationship, crack propagation, ductility, and strain of retrofitting materials etc.. Specimens(BCR2, BCR2-AF1) designed with the new retrofitting technology using high-performance carbon fiber bar and strengthening metal fittings showed much higher load-carrying capacity and ductility compared to specimens(BC1P, BC2P, BS30) designed with the conventional retrofitting method.

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물의 보강공사에 일반적으로 사용되는 공법은 강판보강공법과 연속섬유 보강공법으로 나눌 수 있고, 연속섬유 보강공법에는 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheets : 이하 CFS)를 사용한 보강공법이 주종을 이루고 있다.<sup>1)~6)</sup> CFS는 내부식성, 내화학적 및 내피로성이 우수할 뿐만 아니라 시공이 간편하여 그 사용량이 증가추세에 있으나, 그 보강효과는 모재(철근콘크리트)와 보강재(CFS)의 부착성능에 크게 영향을 받기 때문에, 보강재료 강도만큼의 보강효과가 나타나지 않을 뿐만 아니라 정확한 보강효과를 예측하기 힘들고 연성이 떨어진다는 단점이 있다. 최근 들어, CFS의 부착성능을 개선하여 내력 및 연성증진을 도모하고자 하는 연구가 진행되고 있으나, 부재 표면에 보강재를 부착해야 한다는 근본적인 약점 때문에 그 개선효과에는 한계가 있으므로 이러한 근본적인 약점을 개선하기 위해서는 보강재료 자체의 개발 및 개선이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 기존 CFS와 재료역학적 성질은 동등하면서 내구성, 부착성능, 시공성 및 품질관리가 우수한 매립형 고성능 탄소섬유봉(High-Performance Carbon Fiber Bars : 이하 HCFB) 및 보강철물을 개발하여, 이를 사용한 철근콘크리트 보의 내력 및 연성보강 효과를 기존 보강공법과의 비교실험을 통하여 규명하고, 그 적용성을 평가함으로써 고성능 탄소섬유봉 및 보강철물을 사용한 보강 신기술을 개발하고자 한다.

\* 정희원, 경일대학교 건축공학과 교수

\*\* 정희원, 경산대학교 건축·건설시스템공학부 조교수

\*\*\* 정희원, 경일대학교 대학원

\*\*\*\* 정희원, (주)한보엔지니어링 대표이사

## 2. 고성능 탄소섬유봉 및 보강철물을 사용한 철근콘크리트 보의 실험

### 2.1 실험 계획

HCFB의 보강효과를 규명하기 위하여 무보강 기본 실험체에 대하여 보강재 종류, 보강량, 보강재 단부 구속방법 등을 실험변수로 두고 실험을 수행하였다. 기본 실험체는 휨파괴가 발생하도록 설계되었으며, 부착파괴가 발생하지 않도록 주철근의 부착길이를 충분히 확보하였다. 기본 실험체는 폭 20cm, 높이 30cm, 총길이 2.2m, 인장철근비 0.010으로 설계되었으며, 그 상세는 그림 1과 같다. 실험 변수 및 실험 변수에 따른 실험체 종류는 표 1과 같다.

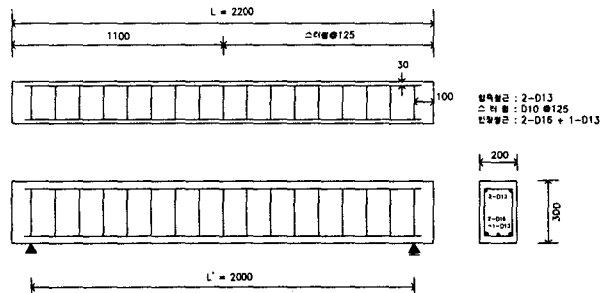


그림 1 기본 실험체의 형상 및 제원 (단위 : mm)

표 1 실험체 종류

실험체 명	보강재 종류	보강길이	보강겹(본)수	단부보강유무	비 고
BSS	-	-	-	-	기본 실험체
BS30	SP(강판)	150cm	1	유	
BC1P	CFS	150cm	1	무	
BC2P	CFS	150cm	2	무	
BCR2	CFB	150cm	2	무	
BCR2-AF1	CFB	150cm	2	유	일자형 보강철물

### 2.2 사용 재료

콘크리트는 보통 포틀랜드 시멘트, 최대크기 25mm의 쇄석 및 강모래를 사용하여 제조하였으며, 재령 28일 압축강도는  $435 \text{ kgf/cm}^2$  이다. 주철근 및 스티럽으로 사용된 철근은 SD40의 D10, D13, D16이며, 항복강도는  $4500 \text{ kgf/cm}^2$  로 측정되었다.

보강재로 사용된 강판은 두께 3mm, 폭 20cm, 항복강도  $2380 \text{ kgf/cm}^2$ 의 국내산 SS40이며, CFS는 폭이 20cm이고, 인장강도와 탄성계수는 각각  $22000 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $1.9 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  인 국내산 제품을 사용하였다. CFB의 인장강도와 탄성계수는 각각  $16700 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $2.35 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 그 형상은 그림 2(a)와 같다. 보강재 단부보강을 위하여 사용된 일자형 보강철물의 형상은 그림 2(b)와 같다.

### 2.3 보강 방법

강판 및 CFS 보강 실험체는 기존의 보강방법에 따라 보강하였으며, CFB 보강 실험체는 폭 20mm, 깊이 30mm의 홈을 파고 내부에 접착제를 이용하여 HCFB를 삽입하는 방법으로 보강을 실시하였다. 또한, 모체와 HCFB의 부착강도 증진 및 단부 구속을 개선하기 위하여 보강철물을 단부에 보강한 실험체(BCR2-AF1)를 제작하였으며, 각 실험체의 보강상세는 그림 3과 같다.

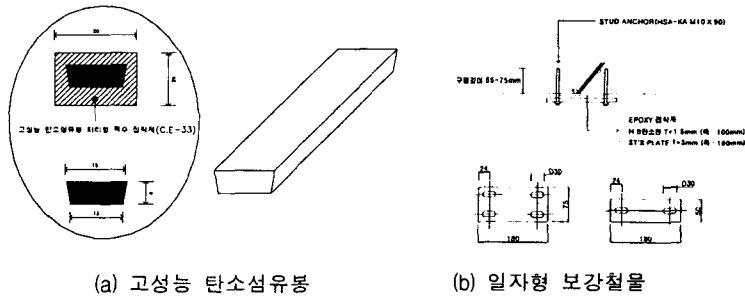


그림 2 고성능 탄소섬유봉 및 일자형 보강철물의 형상

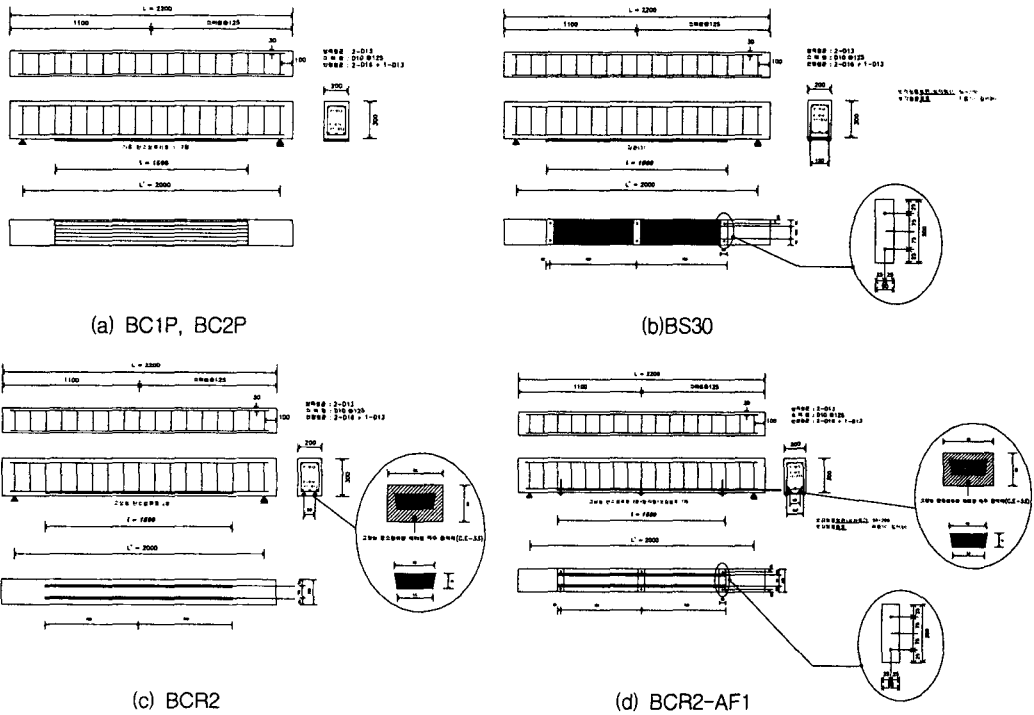


그림 3 각 실험체의 보강방법 및 보강상세

#### 2.4 가력장치 및 재하방법

모든 실험체는 그림 4와 같이 가력 프레임에 100톤 용량의 유압 잭을 설치하여 실험체 지간의 3등 분점에 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 스트레인이계지 타입 변위계로 측정하였고, 각 하중단계마다 보 중앙부의 처짐 및 철근과 보강재의 변형률이 측정되었으며, 균열 발생 양상을 도시하였다.

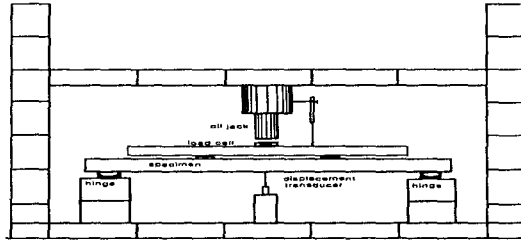


그림 4 실험체의 설치 및 가력장치

### 3. 고성능 탄소섬유봉 및 보강철물을 사용한 RC 보의 구조성능 평가 및 기존 보강공법과의 비교

#### 3.1 파괴양상

그림 5는 각 실험체의 균열진전 양상 및 파괴형태를 보여주고 있다. 기본 실험체의 경우, 순수 휨 구간에서 휨 균열이 먼저 발생하였고 하중이 증가함에 따라 전단스팬 구간에 휨 균열 및 휨전단 균열이 발생·진전된 다음 변형이 상당히 증가한 후 압축부 콘크리트가 파괴되는 전형적인 휨 인장파괴가 발생하였다.

강판으로 보강한 실험체는 하중이 증가함에 따라 휨전단 균열이 발생한 보강단부 위치의 균열이 크게 발달한 후 강판이 피복 콘크리트와 함께 모재에서 박리되면서 파괴가 발생하는 피복분리 파괴현상을 보여주었다.

CFS로 보강한 실험체의 경우, 하중이 증가함에 따라 부착파괴가 진행되다가(부착 파괴음 발생) 최대내력 시점에서 갑자기 CFS가 콘크리트 면으로부터 박리되는 단부박리 파괴현상이 나타났다.

HCFB로 보강한 실험체는 단부보강의 유무(일자형 철물 및 앵커볼트 사용의 유무)에 관계없이 보강재 단부의 균열이 상당히 발달된 이후 보강재와 피복 콘크리트가 일체로 모재로부터 탈락되면서 파괴가 발생하는 피복분리 파괴현상을 나타내었다. 파괴현상이 나타난 시점은 주철근을 따라 상당한 양의 수평균열이 발생한 이후였으며, 단부탈락이 발생한 이후에도 보강재는 모재로부터 완전분리되지 않고 어느 정도의 보강효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 또한, 보강재와 함께 박리된 피복 콘크리트의 두께도 다른 실험체에 비하여 두꺼웠다. 이러한 현상들은 매립효과로 인해 HCFB가 다른 보강재에 비하여 부착성능 면에서 우수하다는 것을 증명하는 증거들로 판단된다. 피복분리 파괴현상은 보강재의 보강길이가 짧아 응력이 보강단부에 집중되기 때문에 발생하는 현상이다. 따라서, 보강길이를 길게 하고

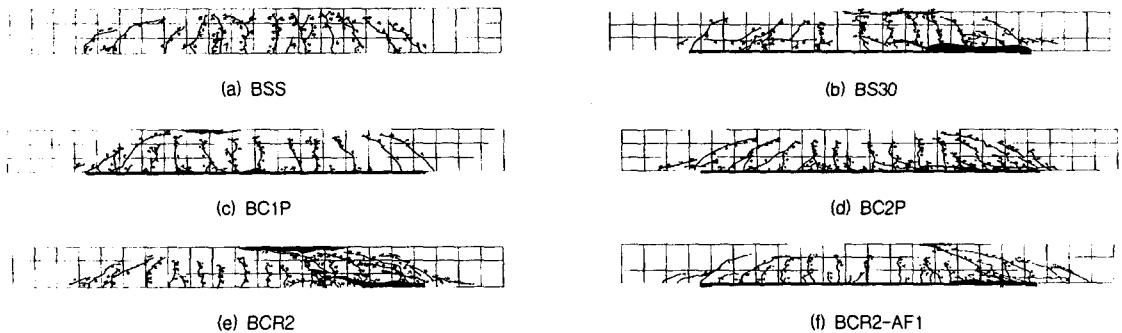


그림 5 각 실험체의 균열진전 양상 및 파괴형태

단부를 적절하게 보강하여 이러한 파괴현상을 방지한다면 HCFB는 다른 보강재에 비하여 매우 우수한 보강성능을 발휘할 것으로 예상된다.

### 3.2 하중-처짐 특성

보강재 종류에 따른 각 실험체의 하중-처짐 곡선을 기본 실험체의 하중-처짐 곡선과 함께 그림 6에 나타내었다. 기본 실험체는 전형적인 연성파괴 형태의 하중-처짐 곡선을 보여주고 있으며, 강판보강 실험체는 최대하중의 증가비율이 가장 낮음을 알 수 있다. CFS 보강 실험체의 경우 강판 보강 실험체에 비하여 최대내력은 상대적으로 크나 최대내력에 도달한 이후 보강재의 갑작스런 탈락현상으로 인해 하중이 급격히 감소하는 특징을 보여주고 있다.

HCFB 보강 실험체는 최대내력이 가장 클 뿐만 아니라 최대내력에 도달한 이후 탄소섬유шит 보강 실험체에 비하여 내력감소가 완만하게 나타나고 있어 연성 확보 측면에서 상대적으로 유리함을 알 수 있다.

각 실험체의 초기강성 크기는 강판>HCFB>CFS>기본 실험체 순이며, 이러한 차이는 보강재를 포함한 각 실험체 인장재의 강성차이에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 최대내력까지의 평균강성을 비교해보면 HCFB 보강 실험체가 가장 큰 것으로 나타나, HCFB가 강성 보강에도 가장 효과적인 보강재임을 알 수 있다. 강판 보강 실험체의 경우, 낮은 하중단계에서 강판이 항복하기 때문에 높은 하중단계에서의 실험체 강성이 급격히 떨어져 평균강성이 저하한 것으로 생각되며, CFS 보강 실험체의 경우는 철근 항복 이후 쉬트와 모재의 부착이 완벽하게 이루어지지 못했기 때문(부착파괴 시작)에 강성이 저하된 것으로 판단된다. 실제 CFS를 사용한 실험체의 하중-처짐 곡선의 기울기는 그림 6과 같이 철근 항복 이후 급격하게 떨어지며, 이러한 현상은 모재와 CFS의 부착파괴 진행으로 설명될 수 있다.

그림 7은 단부보강 유무에 따른 HCFB 보강 실험체의 하중-처짐 곡선을 기본 실험체의 하중-처짐 곡선과 함께 도시한 것이다. 하중-처짐 곡선의 형태는 거의 유사하나 단부를 보강철물로 보강한 실험체의 경우가 최대내력 및 강성이 상대적으로 높았다. 이러한 결과는 보강철물이 보강재 단부의 피복탈락 현상을 어느 정도 억제하였기 때문에 나타난 현상으로 생각되며, 보강철물 및 앵커볼트의 종류 및 보강방법을 개선하면 보다 더 우수한 성능을 확보 할 수 있을 것으로 사료된다.

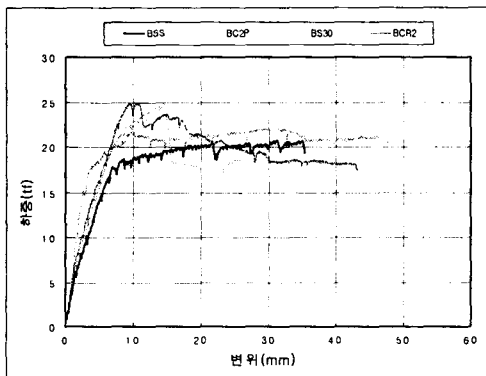


그림 6 보강재 종류별 하중-처짐 곡선

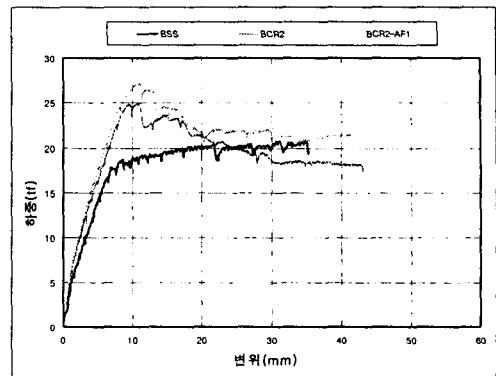


그림 7 단부보강 유무에 따른 하중-처짐 곡선

### 3.3 최대내력 및 연성

표 2는 기본 실험체 및 보강재 종류별 각 실험체의 최대내력 및 연성을 비교한 것으로, CFB 보강 실험체가 2가지 모두 가장 양호한 결과를 나타내었다. 더하여, 보강철물을 이용하여 단부를 보강하면, 그렇지 않은 경우보다 최대하중 및 연성비의 관점에서 보강효과가 더 좋아짐을 알 수 있다.

표 2 각 실험체의 최대내력 비교

실험체명	최대하중 P (tf)	P보강/P무보강	항복시처짐 $\delta_Y^{(1)}$ (mm)	파괴시처짐 $\delta_F^{(2)}$ (mm)	연성 $\delta_F/\delta_Y$	연성비 $\mu$
BSS	20.740	1.00	6.4	38.00	5.94	1.00
BC1P	23.599	1.14	4.7	18.5	3.94	0.66
BC2P	24.080	1.16	6.1	17.7	2.90	0.49
BS30	22.879	1.10	8.4	47.50	5.66	0.95
BCR2	24.984	1.21	6.6	43.7	6.62	1.15
BCR2-AF1	27.285	1.32	5.1	42.2	8.28	1.39

<sup>1)</sup>  $\delta_Y$  : 인장철근 항복시 처짐

<sup>2)</sup>  $\delta_F$  : 파괴시 처짐 (압축측 콘크리트가 극한변형률에 도달시 처짐)

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존 보강재의 단점을 개선함과 동시에 내구성, 부착성능 및 시공성이 우수하고 품질관리가 용이한 매립형 고성능 탄소섬유봉(High-Performance Carbon Fiber Bar) 및 보강철물을 개발하고, 이를 사용한 철근콘크리트 보의 보강 신기술을 개발하고자 보강재 종류별, 단부보강 유무에 따른 철근콘크리트 보의 보강성능 개선에 관한 실험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강판 보강 실험체 및 CFS 보강 실험체는 기존 실험체 대비 내력의 증가가 10~16% 수준이었으나, 고성능 탄소섬유봉 및 보강철물을 보강한 실험체의 경우는 20~31% 이상의 내력 증진 효과가 나타났다.
- 2) 실험을 수행하여 구한 파괴양상, 하중-처짐 곡선을 분석한 결과 고성능 탄소섬유봉 및 보강철물을 이용한 철근콘크리트 보강 신기술은 기존 보강공법에 비하여 보강재의 부착성능이 뛰어나고 에너지 흡수능력이 증가하여 차량 등의 진동하중이나 연성능력이 요구되는 구조물에 매우 효과적인 보강공법으로 판단된다.
- 3) 고성능 탄소섬유봉을 이용한 철근콘크리트 보강 신기술은 철근콘크리트 구조물 내에 보강재를 매립함으로써 보강재의 충분한 부착성능 확보를 통한 구조물과 보강재와의 완전 일체화를 구현할 수 있을 뿐만 아니라 기존 보강공법에 비하여 시공 및 품질관리가 용이하고 보강후 구조물의 고내구성을 확보할 수 있으므로 보강 신기술로서의 가치가 매우 높은 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

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

#### 참 고 문 헌

1. 하기주외, "철근콘크리트 보의 보수·보강에 따른 구조성능 평가", 대한건축학회논문집, pp 219~227, 1997, 4.
2. 하기주외, "손상된 철근콘크리트 보의 휨성능 평가 및 개선", 대한건축학회논문집, pp 1057~1064, 1997, 10.
3. 하기주외, "손상된 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 및 개선", 경일대학교 논문집 제 13집 (통권 34호), 1996, 12., pp. 445-469.
4. 하지웅, "철근콘크리트 보의 보수·보강에 따른 구조성능 평가", 1996. 경북산업대학교 산업대학원 석사학위논문.
5. 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.
6. H.James Warner, "Structural Concrete Repair Methods", World of Concrete, California, 1988.