



## 매입형 FRP봉과 보강철물을 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가

하기주<sup>1)\*</sup> · 신종학<sup>1)</sup> · 하영주<sup>1)</sup> · 강현욱<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>경일대학교 건축공학과

### Evaluation of Structural Performance of Reinforced Concrete Beams Retrofitted by Embedded FRP Rod and Metal Fittings

Gee-Joo Ha,<sup>1)\*</sup> Jong-Hack Shin,<sup>1)</sup> Young-Joo Ha,<sup>1)</sup> and Hyun-Wook Kang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture Engineering, Kyungil University, Kyeongsan 712-701, Korea

**ABSTRACT** In this study, experimental research was carried out to evaluate the structural performance of the reinforced concrete beam using strengthening materials (embedded FRP rod, metal fittings) in existing reinforced concrete buildings. Seven reinforced concrete beams comprised of retrofitted embedded FRP rod (BCR series), embedded FRP rod with metal fittings (BCR-AC series), and standard specimen (BSS) were constructed and tested under monotonic loading. Design parameters of test specimens were amount of embedded FRP rod and metal fittings. The test results showed that the maximum load carrying capacity of specimens with embedded FRP rod (BCR series) and embedded FRP rod with metal fittings (BCR-AC series) increased by 21~55% and 21~63%, respectively, in comparison with the standard specimen BSS. BCR series test specimens failed by the adhesion slip and concrete cover separation. BCR-AC series test specimens failed by the adhesion slip due to the confining effect of metal fittings.

**Keywords** : R/C beam, embedded FRP rod, metal fitting, structural performance, retrofitting

### 1. 서 론

철근콘크리트 구조는 콘크리트에 철근을 사용함으로써 콘크리트가 가지고 있는 약점인 휨강도와 인장강도를 보완하고, 철근의 단점인 부식성을 콘크리트가 보호함으로써 우수한 내구성능을 발휘하는 복합재료이다. 철근콘크리트 구조물은 최소 100년의 수명을 가지는 것으로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 하지만 구조물은 사용기간 동안 발생하는 용도변경, 구조변경과 같은 하중증가 요인과 진동 등에 의해 균열, 변형 등이 발생하여 구조성능, 사용성, 내구성 등이 저하된다. 따라서 결함이 있는 철근콘크리트 구조물의 안전성 확보 및 사용 연수를 늘리기 위해서는 적절한 진단과 더불어 적정 보강기술 및 재료를 사용하여 기존 구조물을 보강하여야 한다.<sup>2,3)</sup>

현재 철근콘크리트 구조물의 보수재료로 사용되는 대

표적인 기존의 보강공법은 강판 보강공법과 FRP계 연속 섬유 보강공법으로 나눌 수 있다. 강판 보강공법은 보강 후 부재 단면 크기의 변화가 거의 없고 시공이 간편한 장점이 있는 반면, 중량이 크기 때문에 취급의 불편함과 내부식성 및 내화성능이 취약하며, 취성적인 보강판 탈락현상을 보인다.<sup>4,5)</sup> 그리고 탄소섬유쉬트, 탄소섬유판 등 FRP계 연속섬유 보강공법은 재료적으로 내부식성, 내화성 및 내피로성이 우수할 뿐만 아니라 강판과 비교하여 중량이 가볍고 시공이 간편하여 보수보강 공사시 많이 사용되고 있다. 하지만 보강효과는 강판 보강공법과 마찬가지로 모재(콘크리트)와 보강재의 부착성능에 크게 영향을 받기 때문에 보강재 강도만큼의 보강효과를 얻기 힘들고, 정확한 보강효과를 예측하기 힘든 단점이 있다.<sup>6-10)</sup> 따라서 이 연구에서는 기존 탄소섬유보강재와 재료역학적 성질은 동등하면서 내구성, 부착성능, 시공성 및 품질관리가 우수한 매입형 FRP봉과 보강철물을 개발하여, 이를 사용한 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하고, 향후 철근콘크리트 구조물의 보강설계를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

\*Corresponding author E-mail : gjha@kiu.ac.kr

Received March 27, 2012, Revised May 28, 2012

Accepted May 28, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

## 2. 매입형 FRP봉과 보강철물을 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 실험

### 2.1 실험 계획

철근콘크리트 보에서 매입형 FRP봉과 보강철물의 보강효과를 규명하기 위하여 표준실험체에 대하여 매입형 FRP봉의 보강량과 보강철물 구속여부를 실험변수로 적용하여 구조성능을 평가하였다. 실험체의 크기는 폭 200 mm, 총 300 mm, 유효총 250 mm, 스패 2,200 mm, 순스패 2,000 mm, 인장철근비 0.01이다. 설계강도는 24 MPa이며, 인장축 철근은 2-HD16, 1-HD13, 압축축 철근은 2-HD13을 사용하였다. 보강 실험체의 보강 재료의 길이는 1,800 mm로 설계하였다.

### 2.2 실험체의 형태 및 변수

철근콘크리트 보의 설계는 ACI building code(318M-08) 및 국토부 제정 콘크리트 구조설계기준에 따라 설계되었고 철근콘크리트 보 실험체의 형태 및 변수는 Table 1과 같고, 각 실험체의 상세는 Fig. 1에 나타나 있다.

### 2.3 사용재료 특성

#### 2.3.1 철근

이 실험체에 사용된 철근은 국내에서 생산된 SD40철

근이 사용되었으며, 보의 상부 주철근은 HD13, 하부 주철근은 HD16, HD13이 배근되었고 전단보강철근은 D10이 배근되었다. 그리고 이 실험에 사용된 철근의 재료 특성을 파악하기 위하여 KSB0801(금속재료 인장시험편 규정)에 따라 시험편을 제작하였으며 KSB0802의 금속재료 인장 시험방법에 따라 시험을 하였고 결과는 Table 2와 같다.

#### 2.3.2 콘크리트

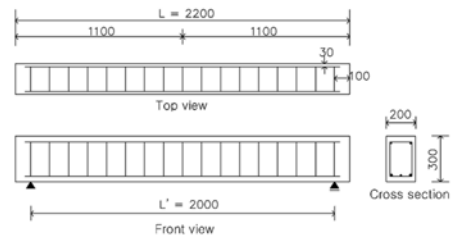
실험체에 사용된 자갈의 최대직경은 25 mm, 슬럼프는 150 mm, 콘크리트 배합강도는 배합설계에 의하여 약 24 MPa로 하였고, 콘크리트의 배합은 요구강도와 시공성 및

**Table 1** Design parameters of test specimens

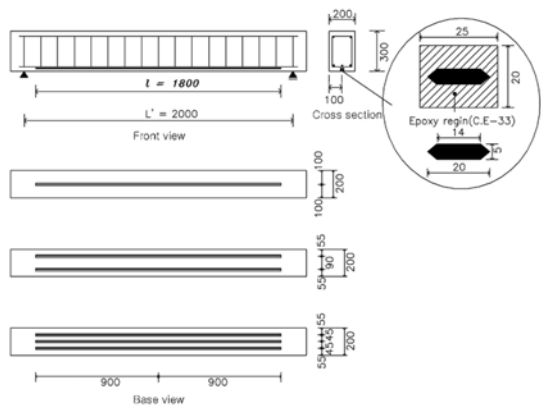
Specimen	Main objectives and design parameters
BSS	ACI building code 318M-08 KCI 2007
BCR1	Embedded FRP rod 1EA (spacing 100 mm, embedded depth 20 mm)
BCR2	Embedded FRP rod 2EA (spacing 70 mm, embedded depth 20 mm)
BCR3	Embedded FRP rod 3EA (spacing 50 mm, embedded depth 20 mm)
BCR1-AC	Embedded FRP rod 1EA (spacing 100 mm, embedded depth 20 mm) Metal (channel type, spacing 875 mm)
BCR2-AC	Embedded FRP rod 2EA (spacing 70 mm, embedded depth 20 mm) Metal (channel type, spacing 875 mm)
BCR3-AC	Embedded FRP rod 3EA (spacing 50 mm, embedded depth 20 mm) Metal (channel type, spacing 875 mm)

**Table 2** Mechanical properties of the reinforcing bar

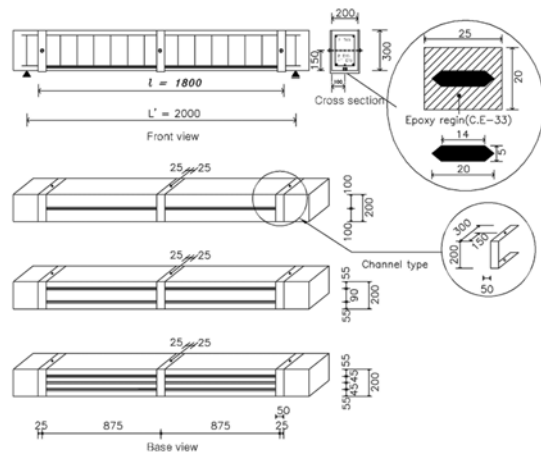
Bar size	$E_s$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$\sigma_s$ (MPa)	Elongation (%)
HD10	$1.95 \times 10^5$	455	636	26
HD13	$2.04 \times 10^5$	402	690	28
HD16	$2.01 \times 10^5$	420	710	29



(a) BSS



(b) BCR series



(c) BCR-AC series

**Fig. 1** Detail and retrofitting method of each specimen (unit: mm)

선정된 재료의 최적설계비에 따라 설계되었으며, 각 실험체의 콘크리트 타설과 함께 압축강도용 공시체를 제작하였다. 압축강도 실험용 원주형 공시체는  $\phi 100 \times 200$  (mm) 몰드를 사용하여 KSF2405에 따라 몰드를 3개층으로 나누어 각 층을 25회씩 붓다짐하여 제작하였다. 공시체는 제작 후 즉시 비닐을 덮어 수분 증발을 방지하였으며, 재령 28일까지 수중양생을 실시하였다. 공시체의 압축강도 측정은 1,000 kN용량의 UTM으로 일방향 압축강도 시험을 하였다. Table 3에 나타난 콘크리트 압축강도는 5개의 공시체의 시험 결과에 대한 평균값이다.

### 2.3.3 매입형 FRP봉

이 실험체 보강에 사용된 매입형 FRP봉은 육각형 단면의 매입형 FRP봉을 사용하였고, 역학적 성질은 Table 5와 같다.

### 2.3.4 보강철물

이 실험체 보강에 사용된 강관은 항복강도 240 MPa인 국내산 SS400을 사용하였고, 강관의 역학적 성질은 Table 4와 같다.

### 2.3.5 접착용수지

이 연구에서 사용된 접착용 에폭시수지는 국내산 C. E-33을 사용하였으며, 재료특성은 Table 6과 같다.

## 2.4 실험 방법 및 장치

### 2.4.1 실험 방법

이 연구에서는 철근콘크리트 보의 구조성능 개선을 위

하여 매입형 FRP봉과 보강철물로 보강된 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하였다. 이를 위하여 구조실험용 프레임 제작하여 설치하였으며, 실험체의 설치상태 및 가력장치는 Fig. 2와 같다. 실험체에 작용하는 하중제어를 위하여 Fig. 2에서와 같이 유압잭을 실험체 중앙부에 설치하여 2점 가력하였다. 하중은 로드셀을 사용하여 인장철근이 항복할 때까지는 하중제어로 재하를 하였고, 인장철근이 항복한 이후에는 보 중앙부의 처짐으로 변위제어를 하여 실험체가 최종 파괴시까지 재하하였다.

### 2.4.2 측정장치의 부착위치

각 실험체에 작용하는 하중에 따라 표준 철근콘크리트

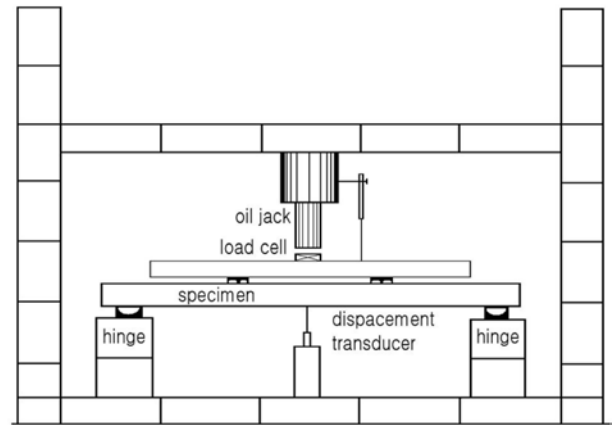


Fig. 2 Test setup of test specimen

Table 3 Test result of concrete strength

Age (day)	Slump (mm)	$f_{ck}$ (MPa)	$E_c$ ( $\times 10^4$ MPa)
28	150	25.9	2.0

Table 4 Mechanical properties of the steel plate

Size	Modulus of elasticity (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)
SS400	$1.8 \times 10^5$	340	238

Table 5 Mechanical properties of the embedded FRP rod

Thickness	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio	Strain capacity (%)
5	2,386.8	$1.99 \times 10^5$	0.31	1.2

Table 6 Mechanical properties of the epoxy resin

Index	Compressive strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Adhesion strength (MPa)	Bond strength of tensile shear (MPa)
Epoxy	112	63.7	3.61	11.6

\*Remark: KS M 3015, KS F4715, KS M3734

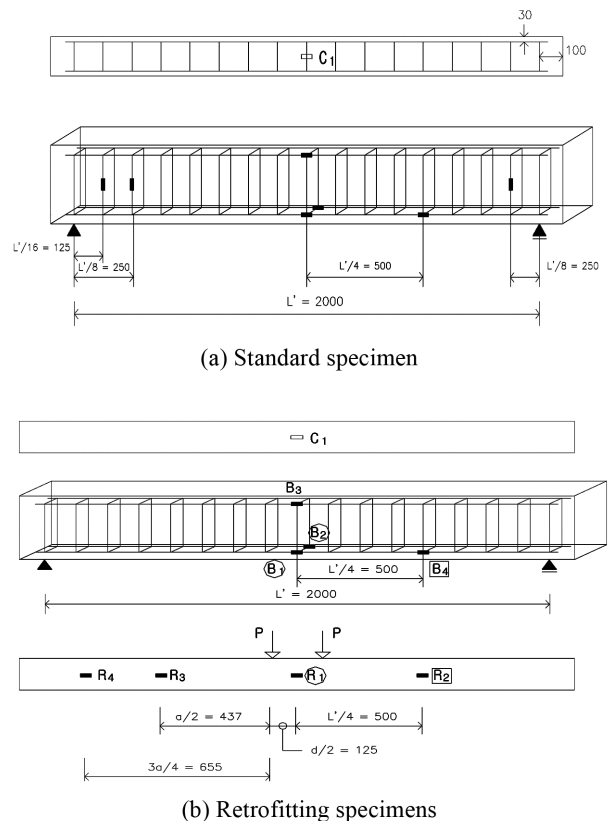


Fig. 3 Location of strain gauges

보 및 매입형 FRP봉과 보강철물로 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하기 위하여 위험단면과 보강재의 탈락이 예상되는 주요 부위에 10개의 변형률 게이지를 Fig. 3과 같이 부착하였고, 하중작용점에 작용하는 하중과 보의 중앙부 처짐을 측정하기 위하여 변위계(LVDT)를 Fig. 2와 같이 설치하였다.

### 3. 매입형 FRP봉과 보강철물로 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능 평가 및 개선

#### 3.1 하중-변위 특성

##### 3.1.1 표준시험체

철근콘크리트 보의 구조성능 개선을 위한 매입형 FRP봉과 보강철물의 보강효과를 규명하기 위하여 표준 철근콘크리트 보 시험체 BSS가 파괴될 때까지 재하하여 보의 거동을 관찰하였다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 시험 진행중 초기균열은 하중 20 kN, 처짐 0.91 mm에서 보 중앙부에 발생하였으며, 이후 순수 휨 구간에서 다수 발생되었다. 그리고 하중 103 kN, 처짐 5.1 mm에서 인장철근의 항복과 전단균열이 발생하였다. 최대하중 134.36 kN에서 콘크리트 파괴가 진행되면서 변형이 크게 증가하였으며, 균열폭 확장이 진행되면서 시험체는 파괴되었고, 전형적인 휨파괴 거동을 하였다.

##### 3.1.2 매입형 FRP봉 보강시험체 (BCR 시리즈)

매입형 FRP봉의 보강량(봉의 본수)에 따른 시험체의 하중-변위는 Fig. 5와 같으며, 분석 결과는 다음과 같다. 매입형 FRP봉에서는 보강량에 따른 내력의 크기는 봉 2본(시험체 BCR2) > 봉 3본(시험체 BCR3) > 봉 1본(시험체 BCR1)과 같이 나타났으며, 봉 2본을 보강한 시험체 BCR2는 봉 1본을 보강한 시험체 BCR1에 비하여 내력이 큰 폭으로 증가한 반면, 봉 3본을 보강한 시험체 BCR3은 시험체 BCR2에 비하여 오히려 내력이 감소하였다. 이러한 결과가 나타난 이유는 시험체 BCR3의 경우, 봉 사이의 순간격이 너무 좁아 피복 콘크리트가 봉을 충분히 구속하지 못하고, 봉을 매립하기 위한 홈 때문에 생기는 피복 콘크리트의 단면결손이 상대적으로 크기 때문

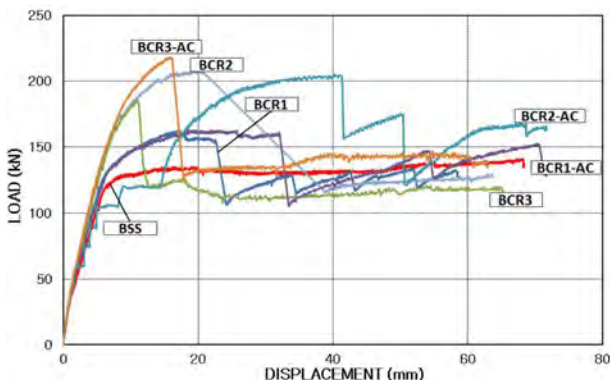


Fig. 4 Load-displacement relationship of each specimen

으로 판단된다.

동일한 이유로 인하여 최대내력일 때의 변위도 봉 1본(시험체 BCR1) > 봉 2본(시험체 BCR2) > 봉 3본(시험체 BCR3)의 순으로 나타났다. Fig. 5에 나타나 있는 바와 같이 시험체 BCR1이 가장 연성적으로 거동하였으며, 시험체 BCR3이 가장 취성적으로 거동하였다. 특히, 시험체 BCR1의 경우 피복 콘크리트에 걸리는 응력이 상대적으로 낮아 부착슬립파괴가 발생하였으며, 1차 슬립 이후에도 주변 에폭시 및 콘크리트의 기계적 부착력에 의해 2차 보강효과가 나타나고 있다.

##### 3.1.3 매입형 FRP봉과 보강철물 보강시험체 (BCR-AC 시리즈)

매입형 FRP봉과 보강철물을 보강한 시험체의 하중-변위의 특성은 Fig. 6과 같이 나타났으며, 분석한 결과는 다음과 같다.

매입형 FRP봉 1본과 보강철물을 보강한 시험체 BCR1-AC는 표준시험체 BSS와 비교한 결과 최대 내력까지의 거동은 두개의 시험체가 거의 동일하게 나타났다. 그 이후 시험체 BCR1-AC가 1차 파괴 시점까지의 변형능력이 크고 1차 슬립 이후의 보강효과도 훨씬 더 높음을 알 수 있다. 매입형 FRP봉 2본과 보강철물을 보강한 시험체 BCR2-AC는 보강철물의 유무에 따른 내력 증진은 크지 않았으나 파괴시점까지 변형능력이 향상되었으며 피복

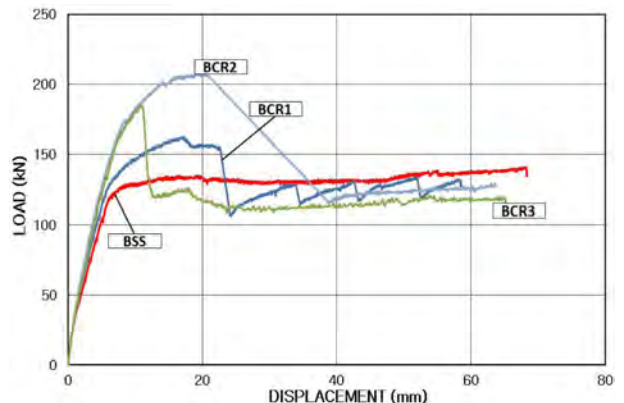


Fig. 5 Load-displacement relationship of specimen (BCR series)

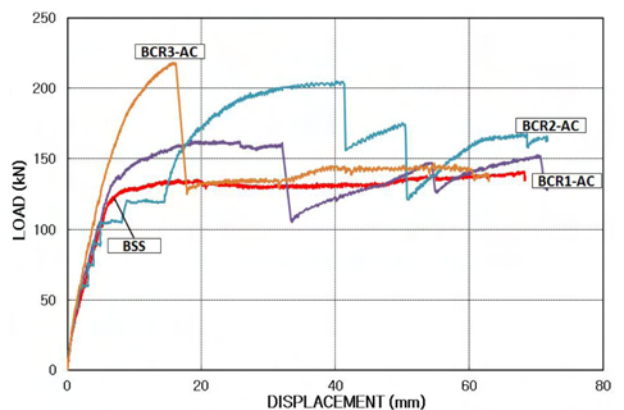


Fig. 6 Load-displacement relationship of specimen (BCR-AC series)

콘크리트 구속효과로 피복 분리현상을 감소시키고 연성 능력을 증대시킨 것을 알 수 있었다. 매입형 FRP봉 3본과 보강철물을 보강한 실험체 BCR3-AC는 실험체 BCR2-AC 및 실험체 BCR2-AC와 달리 파괴시점까지의 변형능력 뿐만 아니라 최대내력이 크게 증가함을 알 수 있다. 실험체 BCR3-AC의 경우 봉 사이의 순간격이 너무 좁아 피복 콘크리트에 국부적인 집중응력이 걸리고 피복 콘크리트가 봉을 충분히 구속하지 못하기 때문에 봉이 충분히 성능을 발휘하기 이전에 피복 콘크리트의 탈락에 의해 파괴가 발생하나, 보강철물을 사용하면 피복 콘크리트를 구속하여 파괴 메커니즘을 일부 부착슬립으로 유도하기 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

### 3.2 파괴 형태

기존의 연구 결과에 의하면, 부착공법으로 인해 보강된 보의 파괴양상에는 보강재의 파단, 과다 보강으로 인한 압축축 콘크리트의 압축파괴 및 전단내력 부족으로 인한 전단파괴 등이 있다. 일반적으로 보의 내력 및 강성을 증진시키기 위하여 인장부에 보강된 외부 보강재의 파괴 형태는 다음과 같은 4종류로 대별할 수 있다.

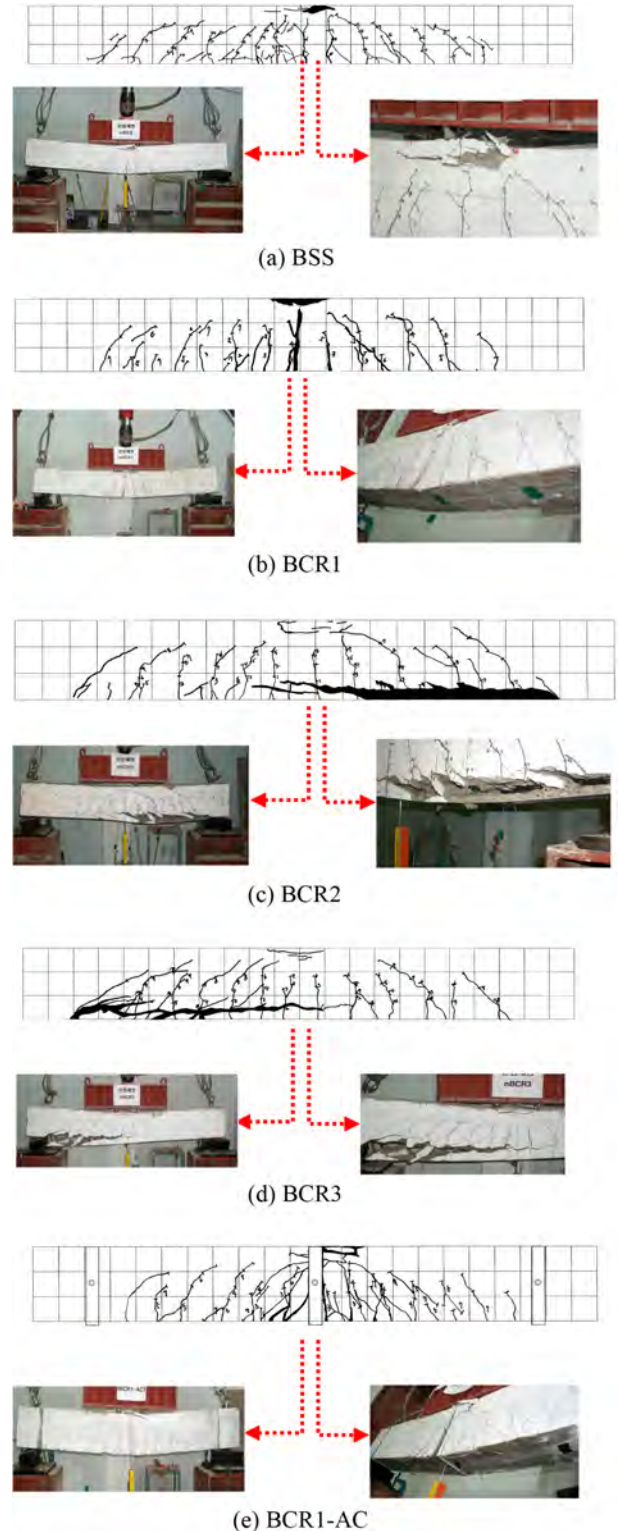
- 1) 보강재 파단
- 2) 계면파괴(interface debonding)
- 3) 피복분리(rip-off)
- 4) 단부박리 + 피복분리

보강재를 보 인장부에 매입하는 FRP봉 보강공법의 경우, 매입효과로 인해 계면파괴 및 단부박리 + 피복분리의 파괴 형태는 발생하기 어려울 것으로 판단되며, 실제 실험에서도 이러한 파괴 형태는 나타나지 않았으며, 부착슬립이라는 새로운 형태가 나타났다. 즉, 매입형 FRP봉 보

강공법의 파괴 형태는 다음과 같은 3종류로 나눌 수 있다.

- 1) 보강재 파단
- 2) 피복분리(rip-off)
- 3) 부착슬립

이 연구의 범위에서 실험된 각 실험체의 파괴 형태를 요약하면 Table 7과 같다. Fig. 7은 각 실험체의 균열진전 양상 및 최종 파괴 형태를 보여주고 있다.



**Table 7** Failure mode of each specimen

Specimen	Failure mode
BSS	Ductile flexural failure due to concrete crushing following re-bar yielding
BCR1	Flexural failure due to adhesion-slip of the FRP rod after re-bar yielding
BCR2	Flexural failure due to adhesion-slip of the FRP rod after re-bar yielding, followed by concrete cover separation
BCR3	Flexural failure due to adhesion-slip of the FRP rod after re-bar yielding, followed by concrete cover separation fully
BCR1-AC	Flexural failure due to adhesion-slip of the FRP rod after re-bar yielding
BCR2-AC	Flexural failure due to adhesion-slip of the FRP rod and partial concrete cover separation after re-bar yielding
BCR3-AC	Flexural failure due to adhesion-slip of the FRP rod and partial concrete cover separation after re-bar yielding fully

**Fig. 7** Crack pattern and failure mode of each specimen



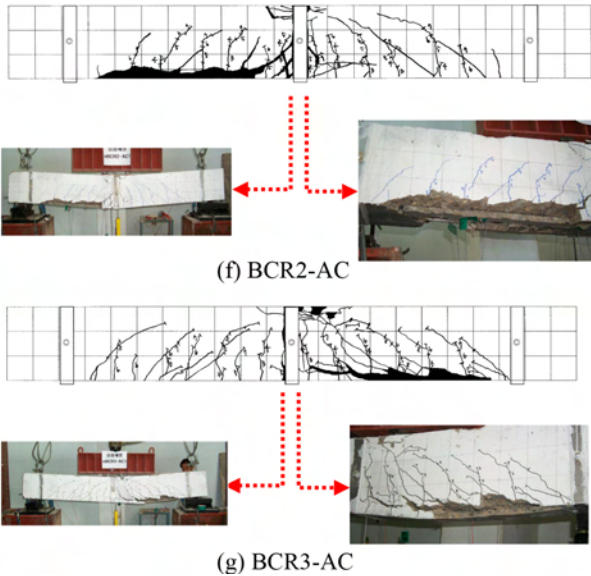


Fig. 7 Crack pattern and failure mode of each specimen (Continued)

### 3.2.1 표준실험체

보강에 따른 각 실험체의 파괴 형태를 파악하기 위하여 BSS 실험체를 파괴시까지 가력하여 각 하중 단계에 따른 균열 진전상황을 고찰한 결과, 순수 휨 구간에서 휨 균열이 먼저 발생하였고 하중이 증가함에 따라 전단 스패น 구간에 휨 균열 및 휨전단 균열이 발생하여 진전된 다음 변형이 상당히 증가한 후 압축부 콘크리트가 파괴되는 전형적인 휨인장파괴가 발생하였다.

### 3.2.2 매입형 FRP봉 보강실험체 (BCR 시리즈)

매입형 FRP봉의 보강효과를 규명하기 위하여 매입형 FRP봉 1본~3본을 보강한 실험체 BCR 시리즈의 파괴 형태는 보강재와 접착재의 계면에서 부착균열이 발생하는 양상을 나타냈다. 표준실험체와 달리 매입형 FRP봉을 보강한 실험체는 처짐량이 많은 상태에서 최대하중에 도달하였다. 실험체 BCR1는 접착재와 콘크리트의 탈락 현상은 발생하지 않았지만 실험체 BCR2와 실험체 BCR3는 피복분리 형태의 파괴가 일어났다. 이는 피복 탈락 내력이 부착슬립 내력보다 낮아졌기 때문으로 판단된다.

### 3.2.3 매입형 FRP봉과 보강철물 보강실험체 (BCR-AC 시리즈)

매입형 FRP봉과 보강철물을 보강한 실험체 BCR-AC 시리즈는 모두 부착슬립의 형태로 파괴가 발생하였고, 보강철물의 구속효과로 최대하중 시점의 처짐이 증가하고 실험체의 1차 파괴 후 2차 보강효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

매입형 FRP봉 2본 이상 보강한 실험체의 경우 완전 피복분리 현상이 보강철물 보강시 나타나지 않았다. 실험체 BCR2-AC는 실험체 BCR2에 비하여 내력의 증가는 없었으나 보강철물의 구속효과로 변형능력이 증진되었으며, 최대하중에 도달한 이후 바로 파괴가 발생하지

않는 특징이 나타났다. 실험체 BCR3-AC는 실험체 BCR3에 비하여 내력이 큰 폭으로 증가하고 최대하중일 때의 처짐도 증가하였다.

## 3.3 최대내력

각 실험체의 최대내력 및 표준실험체(무보강 실험체)에 대한 각 보강 실험체의 최대하중 증가량 및 증가비율을 Table 8과 Fig. 8에 나타내고 있다.

### 3.3.1 매입형 FRP봉 보강실험체

매입형 FRP봉의 보강 본수별 최대하중을 표준실험체와 함께 Fig. 8에 나타냈다. 매입형 FRP봉 1본 보강 실험체 BCR1는 최대하중 162.7 kN으로 표준실험체의 최대내력 대비 16% 증가한 22.1 kN, 매입형 FRP봉 3본 보강 실험체 BCR3는 최대하중 185.4 kN으로 표준실험체의 내력 대비 32%증가한 44.8 kN의 내력 증진을 보여주었다. 보강량 2본까지는 매입형 FRP봉 보강 본수가 증가함에 따라 보강 내력이 선형적으로 증가하였으나, 실험체 BCR3은 실험체 BCR2보다 오히려 최대하중이 감소하는 현상이 나타났으며, 그 이유는 앞서서도 언급한 바와 같이 봉 사이의 순간격이 너무 좁았기 때문으로 판단된다.

Table 8 Failure mode of specimens

Specimen	$P_{max}$ (kN)	$\Delta P$ (kN)	$\frac{P_{max}(retrofitting)}{P_{max}(standard)}$
BSS	140.6	-	-
BCR1	162.7	22.1	1.16
BCR2	208.3	67.8	1.48
BCR3	185.4	44.8	1.32
BCR1-AC	162.9	22.3	1.16
BCR2-AC	204.9	64.3	1.46
BCR3-AC	218.2	77.6	1.55

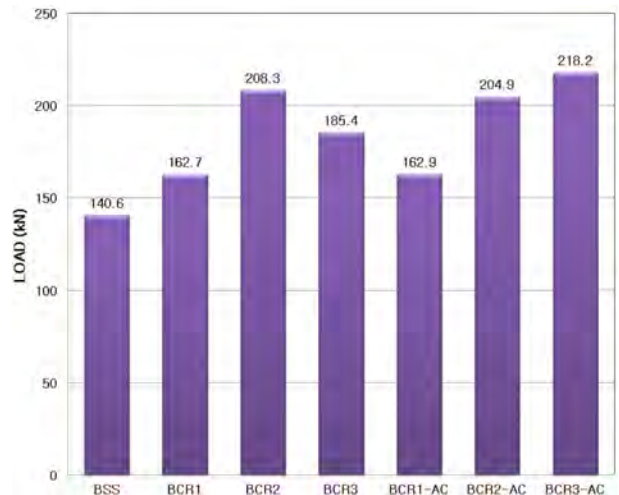


Fig. 8 Load-carrying capacity of each specimen

### 3.3.2 매입형 FRP봉과 보강철물을 보강실험체

보강철물은 실험체의 피복 콘크리트 부분을 구속하여 피복 콘크리트가 조기 탈락하는 현상을 막아주고, 마찰력에 의한 기계적 부착력이 충분히 발휘할 것으로 예상하고 실시한 실험 결과, 실험체 BCR1-AC의 내력 증가량은 22.3 kN으로 보강철물을 사용하지 않은 실험체 BCR1과 유사하였다. 실험체 BCR2-AC의 경우는 실험체 BCR2와 유사하게 나타나 보강철물의 유무와 관계없이 비슷한 수준의 최대하중을 나타냈다. 그러나 실험체 BCR3-AC 경우는 실험체 BCR1-AC 또는 실험체 BCR2-AC 경우와 달리 보강철물을 설치함으로써 BCR3가 최대하중 185.4 kN으로 표준실험체 내력 대비 32% 증가한 44.8 kN의 내력 증진, 실험체 BCR3-AC는 최대하중 218.2 kN으로 표준실험체 내력 대비 55%증가한 77.6 kN의 내력 증진효과가 나타났다.

보강철물이 내력 증진에 기여하는 메커니즘은 피복 콘크리트의 조기 탈락을 방지하여 보의 파괴모드를 부착슬립 혹은 보강재 파단으로 유도하기 때문이며, 매입형 FRP 봉 1본 또는 2본 보강 실험체는 보강철물을 사용하지 않더라도 부착슬립으로 파괴되거나 부착슬립 현상으로 파괴되기 직전 파괴가 발생하기 때문에 보강철물의 내력 증진효과가 크게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

### 3.4 연성능력

매입형 FRP봉 보강 본수별 연성비를 Table 9에 나타냈다. 실험체 BCR1는 연성비는 4.45이고, 실험체 BCR2의 연성비는 3.54로 실험체 BCR1에 대비하여 80%, 실험체 BCR3의 연성비는 1.47로 실험체 BCR1에 대비하여 33% 수준으로 나타났다.

보강철물은 매입형 FRP봉에 대한 피복 콘크리트의 구속효과를 높이는 역할을 하여 보의 내력증진에 기여함과 동시에 변형이 상당히 진전된 이후에도 피복 콘크리트의 탈락이나 부분적 파괴를 막아 부착력을 지속시키는 효과가 있다. 이와 같은 이유로 인해 보강철물을 사용한 실험체의 최대하중시의 변위값은 보강철물을 사용하지 않은 경우보다 크게 나타났다.

매입형 FRP봉 1본을 보강한 실험체의 경우에 보강철물을 사용하지 않은 경우와 보강철물을 사용한 경우의 연성

**Table 9** Comparison of displacement ductility for each specimen

Specimen	$\delta_y$ (mm)	$\delta_f$ (mm)	Ductility ( $\delta_f / \delta_y$ )
BSS	5.35	19.37	3.62
BCR1	5.09	22.64	4.45
BCR2	5.92	20.94	3.54
BCR3	7.50	11.05	1.47
BCR1-AC	5.09	32.12	6.31
BCR2-AC	6.16	23.12	3.75
BCR3-AC	7.16	16.17	2.26

비를 비교하여 보면, 보강철물을 사용한 실험체 BCR1-AC의 연성비가 사용하지 않은 실험체 BCR1보다 약 42%, 2본을 보강한 경우 6%, 3본을 보강한 경우 54% 증가하였다.

따라서, 매입형 FRP봉을 2본 이상 보강할 경우 보강간격이 좁고 부착슬립으로 파괴되기에 연성비가 감소하는 것으로 나타났으며, 보강철물을 사용한 경우에도 2본 일 때의 보강이 단면상 가장 좋은 상황이었기에 보강철물의 효과가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

이 연구에서 철근콘크리트 구조물의 구조성능 향상을 위하여 매입형 FRP봉 및 보강철물을 개발하고, 이를 활용하여 매입형 FRP봉의 사용량, 보강철물 유무에 따른 철근콘크리트 보의 보강성능에 관한 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 매입형 FRP봉 보강실험체의 파괴 메커니즘은 부착슬립 또는 피복분리 형태로 나타났는데, 보강된 고성능 FRP봉의 순간격이 충분히 넓거나 보강철물을 적절히 사용한 경우에는 부착슬립, 그렇지 못한 경우에는 피복분리 형태로 나타났다. 보의 내력 및 연성확보 측면에서 부착슬립 파괴가 피복분리 파괴에 비하여 더욱 바람직한 형태이므로 매입형 FRP봉의 매입간격이 좁은 경우(70 mm 이하)에는 구조성능 확보를 위하여 보강철물을 적절하게 배치하여야 할 것으로 판단된다.
- 2) 부착슬립이라는 새로운 형태로 파괴된 매입형 FRP봉 보강 실험체는 1차 파괴 후 내력이 표준실험체 이상으로 증진되는 2차 보강 효과를 나타내었고, 이러한 2차 보강 효과는 매입형 FRP봉 주위의 접착재 및 피복 콘크리트의 구속 효과에 의한 기계적 부착력에 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) 내력 증진 측면에서의 보강철물 효과는 매입형 FRP봉의 순간격이 좁을 경우 두드러지게 나타났으며, 순간격이 충분하여 피복 콘크리트의 조기 탈락 등이 염려되지 않는 경우에는 크지 않은 것으로 나타났으나, 연성 증진 측면에서는 이러한 조건에 관계없이 효과가 큰 것으로 나타났다.
- 4) 매입형 FRP봉의 보강간격이 너무 좁으면(70 mm 이하) 단면결손 및 응력집중현상으로 인해 피복 콘크리트가 조기 탈락하는 피복분리 현상으로 파괴되며, 내력과 연성능력이 동시에 감소하였으나, 이 때 보강철물로 보강을 하면 내력과 연성능력이 우수하게 나타났다. 따라서 이 실험을 통하여 매입형 FRP봉의 최소 매입간격은 70 mm 이상을 확보하여야 할 것으로 판단되며, 현장 사정상 그렇지 못할 경우에는 보강철물을 사용하면 우수한 구조성능을 확보하는 것으로 나타났다.
- 5) 매입형 FRP봉을 이용한 철근콘크리트 구조물 복합 보강기술은 철근콘크리트 구조물 내에 FRP보강재

를 매입함으로써 보강재의 충분한 부착성능 확보를 통한 구조물과 보강재와의 완전 일체화를 구현할 수 있을 뿐만 아니라 기존 보강공법에 비하여 구조성능이 매우 우수하고 시공 및 품질관리가 용이하며 보강 후 구조물 및 보강부분 내구성 확보 측면에서도 대단히 유리하므로 구조물 보강시 매우 효과적인 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(2011-0016487)과 경일대학교의 교내연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고문헌

1. 하기주, 신중학, 하지웅, 전찬목, 최응규, “철근콘크리트 보의 보수보강에 따른 구조성능 평가,” 대한건축학회 논문집, 13권, 4호, 1997, pp. 327~339.
2. 이영범, “기존 철근콘크리트 골조 및 접합부의 보강에 따른 내진성능 평가 및 개선,” 석사학위논문, 경일대학교 대학원, 2002, pp. 1~11.
3. 류동우, “FRP 보강 철근콘크리트 부재의 휨 및 전단 설

- 계,” 경북대학교 대학원, 석사학위논문, 2008, pp. 1~38.
4. Ha, G. J., Kim, Y. Y., and Cho, C. G., “Groove and Embedding Techniques Using CFRP Trapezoidal Bars for Strengthening of Concrete Structures,” *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 30 Issue 4, 2008, pp. 1067~107.
5. 하기주, 신중학, 하지웅, 전찬목, 주정준, 최응규, “손상된 철근콘크리트 보의 휨성능 평가 및 개선,” 대한건축학회, 추계학술발표 논문집, 17권, 2호, 1997, pp. 1057~1064.
6. 하기주, 신중학, 박연동, 전찬목, 이영범, 김기태, “고성능 탄소섬유판과 보강철물을 이용한 철근콘크리트 구조물의 보강 신기술 개발,” 대한건축학회 춘계학술발표대회(구조계), 22권, 1호, 2002, pp. 87~90.
7. 강대연, 우현수, 최기선, 유영찬, 이원호, “FRP로 보강된 철근콘크리트 보부재의 전단내력평가에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 24권, 10호, 2008, pp. 3~10.
8. 김나정, 이은주, 신영수, 홍건호, “FRP로 보강한 철근콘크리트 보의 구조 거동에 미치는 보강면 처리의 영향,” 대한건축학회 논문집, 20권, 1호, 2004, pp. 75~82.
9. 김진율, 김광수, 박선규, 이영재, “CFRP가 보강된 철근콘크리트 보의 거동과 연성,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 225~231.
10. Abdel-Fattah, B. and Wight, K., “Study of Moving Beam Plastic Hinging Zones for Earthquake Resistant Design of R/C Buildings,” *ACI Journal*, Proceedings, Vol. 89(84-S4), 1987, pp. 31~39.

**요약** 이 연구에서는 기존 철근콘크리트 건축물의 구조성능 향상을 위하여 매입형 FRP봉과 보강철물을 보강한 철근콘크리트 보의 구조성능을 평가하기 위하여 실험을 수행하였다. 매입형 FRP봉의 사용량, 보강철물 유무에 따라 총 7개의 실험체를 제작하고 실험을 수행하여 구조성능을 평가하였으며, 이 연구의 실험 결과를 근거로 다음과 같은 결론을 얻었다. 매입형 FRP봉 보강실험체(BCR 시리즈)의 경우 표준실험체(BSS)와 비교하여 21~55% 내력이 증가하였고, 매입형 FRP봉과 보강철물을 보강한 실험체(BCR-AC 시리즈)는 표준실험체(BSS)보다 최대내력이 21~63% 증가하였다. 그리고 매입형 FRP봉으로 보강된 실험체는 부착슬립, 피복분리 형태로 파괴되었으나, 매입형 FRP봉과 보강철물을 보강한 실험체는 보강철물의 구속효과로 부착슬립의 형태로 파괴되었다.

**핵심용어** : 철근콘크리트 보, 매입형 FRP봉, 보강철물, 구조성능, 보강