

탄소섬유 보강재로 보강한 RC 보의 보강효과에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Strengthening Effect of RC Beams Strengthened by CFRP

김재훈*
Kim, Jae-Hun

박성무**
Park, Sung-Moo

강주원***
Kang, Joo-Won

요약

보강방법으로 많이 사용되고 있는 CFRP Plate 접착 공법은 보강된 부재의 내력 증가에 아주 효과적이거나 에폭시를 이용하여 표면 부착하는 특성상 충분한 성능을 발휘하지 못하고 보강 판의 탈락으로 파괴에 이르는 조기파괴(premature failure)의 파괴 특성을 보인다. 이러한 보강 실험체의 파괴 특성은 철근비, 콘크리트 강도, 보강재 종류, 보강길이, 접착제인 에폭시의 물성 등의 변수들에 의해 영향을 받는다.

본 연구에서는 CFRP Plate로 휨 보강된 RC 보의 구조적 거동 및 보강재 조기 탈락에 대한 보완으로 보강 CFRP-Rod를 이용한 표면매립공법의 휨 성능효과를 보기위하여 수행된 실험결과를 비교·고찰한다. CFRP Plate 외부부착 공법을 적용한 RC 보강보의 주요 변수로는 보강재 길이, 보강위치(보의 인장면 및 측면), 단부 보강철물 유무 등의 실험변수로, CFRP-Rod는 보강재 길이를 변수로 하여 실험을 수행하였다.

Abstract

Bonded CFRP Plate method used much in reinforcement method is very efficient for stress increment of reinforced members. But CFRP plate doesn't display enough its capacity and have the destruction characteristic of premature failure that reach failure by debond plate, because near-surface-bond using epoxy. Such destruction character of reinforced specimens take the influence at variables as steel reinforcement ratio, concrete strength, kind of reinforcement materials, reinforced length, property of epoxy used in binder and so on.

In this study, performed experiment results are compared and considered on flexural performance of Near Surface Mounted Reinforcement used CFRP-Rod, as complement about structural behavior of RC beam reinforced flexural capacity in CFRP plate and premature failure of reinforcement material. Main variables of RC beam applied CFRP Plate external bond method are experimental variables as reinforcement length, reinforcement position (tension face and side face of beam) and existence of ironware in end parts. In case of CFRP-Rod, variable is reinforcement length.

키워드 : 철근콘크리트보, 탄소섬유, 휨거동

Keywords : reinforced concrete beams, CFRP, Flexural behavior

1. 서론

최근 들어 내력 증대 및 노후화된 RC 구조물의 휨 보강을 위해 역학적 특성과 내구성이 우수한

CFRP와 같은 다양한 합성재료들의 사용이 증가하고 있으며, 이러한 보강은 RC 구조물의 휨 강도와 휨 강성의 증대 및 초기균열 발생을 지연시키거나 균열 제어 효과를 기대할 수 있다.

현재 보강방법으로 많이 사용되고 있는 CFRP Plate 접착 공법은 보강된 부재의 내력 증가에 아주 효과적이거나 에폭시를 이용하여 표면 부착하는 특성상 충분한 성능을 발휘하지 못하고 보강 판의 탈락으로 파괴에 이르는 조기파괴(premature failure)의 파괴특성을 보인다. 이러한 실험체의 파괴 특성은 철근

* 정회원·영남대학교 건축학부 박사수료,
E-mail : caw44@yumail.ac.kr

** 정회원·영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
Tel : 053-810-2428, Fax : 053-815-1566
E-mail : smpark@yumail.ac.kr

*** 정회원·영남대학교 건축학부 조교수, 공학박사
E-mail : kangj@yu.ac.kr

비, 콘크리트 강도, 보강재 종류, 보강길이, 접착제인 에폭시의 물성 등의 변수들에 의해 영향을 받는다.

따라서 본 연구에서는 CFRP Plate로 휨 보강된 RC 보의 구조적 거동 및 보강재 조기 탈락에 대한 보완으로 보강 CFRP-Rod를 이용한 표면매립공법의 휨 성능효과를 보기위하여 수행된 실험결과를 비교·고찰한다. CFRP Plate 외부부착 공법을 적용한 RC 보강보의 주요 변수로는 보강재 길이, 보강 위치(보의 인장면 및 측면), 단부 보강철물 유무 등의 실험변수로, CFRP-Rod는 보강재 길이를 변수로 하여 실험을 수행 비교·검토 하였다.

2. 휨 내력 설계

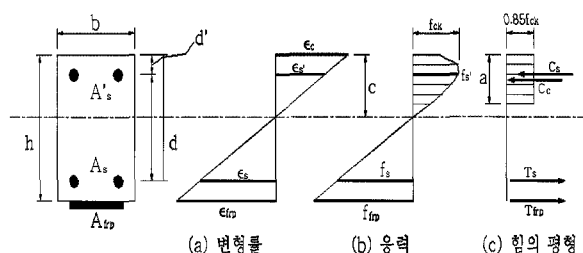
2.1 휨 내력 설계시 기본가정

CFRP를 이용한 휨 내력 설계는 극한강도 설계법을 기초로 하여 산정된 Canadian 및 ACI 규준에 근거하여 보강된 보의 항복하중과 최대하중을 산정하며, 다음의 4가지 기본 가정에 근거한다.

- ① 변형 전에 평면인 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다.
- ② 철근과 콘크리트, 콘크리트와 FRP 사이에는 완전부착이 존재한다.
- ③ 휨 설계시 전단변형률은 무시될 수 있다.
- ④ 정착 혹은 정착 길이가 적당하다면, 박락의 발생 없이 FRP의 내력이 충분히 발현된다.

2.2 휨 내력 설계

이론식은 <그림 1>의 변형률과 응력 관계를 이용하며, 그때의 항복하중과 최대하중 산정은 인장 철



<그림 1> 보강된 복근보의 변형률 및 등가응력분포

근이 항복할 때의 모멘트를 항복모멘트, 압축 콘크리트 연단부의 변형률이 $\epsilon = 0.003$ 또는 FRP가 파괴 변형률 $\epsilon_{frp, rup} = f_{frp} / E_{frp}$ 에 도달할 때의 모멘트를 최대모멘트로 간주한다.

$A'_s, \epsilon'_s, f'_s, C_s$ 와 d' 는 각각 압축철근의 면적, 변형률, 압축철근의 응력, 압축철근에 작용하는 압축력의 크기, 압축연단에서 압축철근의 중심까지의 거리이다.

FRP 보강된 보의 모멘트 다음 식에 의해 구한다.

$$M_n = C_c(d - \frac{a}{2}) + C_s(d - d') + T_{frp}(h - d') \tag{1}$$

$$C_c = 0.85f_{ck}b\beta_1c \tag{2}$$

$$C_s = \epsilon'_s E_s A'_s \tag{3}$$

$$T_s = f_y A_s \tag{4}$$

$$T_{frp} = \epsilon_{frp} E_{frp} A_{frp} \tag{5}$$

파괴 형태가 압축파괴 즉 콘크리트의 압괴에 의한 경우는 콘크리트의 변형률이 극한 변형률 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에 도달하는 시점이며, 인장파괴의 경우는 FRP가 파단 될 때이며, 이때 인장철근은 항상 항복($\epsilon_s \geq \epsilon_y$)한다.

3. 실험

3.1 실험계획

본 연구에서는 CFRP Plate의 보강위치, 보강길이, 보강철물 유무 및 CFRP-Rod는 보강길이를 변수로 하여 총 10개의 실험체를 제작하였다.

RC 보의 콘크리트 강도는 27MPa, 철근의 강도는 240MPa로 하였으며, 철근 배근량은 최대 철근 비($P_{max} = 0.0219$)의 약 28%로 하였다. 휨 파괴나 CFRP 보강재의 박리파괴 발생전에 전단파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 전단철근을 D10@100mm 간격으로 배근 하였다.

CFRP 보강재의 단면 형상은 CFRP Plate인 경우 폭 100mm×두께1.5mm, CFRP-Rod의 경우 밀면13mm×윗면 15mm×높이6mm로 사다리꼴 형상이다.

보강재로 사용된 재료의 물성치는 <표 1>, <표 2>에 실험변수의 따른 실험체 명은 <표 3>에 나타내었다.

〈표 1〉 콘크리트의 압축강도 실험결과

재령 (day)	슬럼프 (mm)	설계기준강도 (MPa)	f_{ck} (MPa)	E_c ($\times 10^4$ MPa)
28일	15	27	27.4	2.46

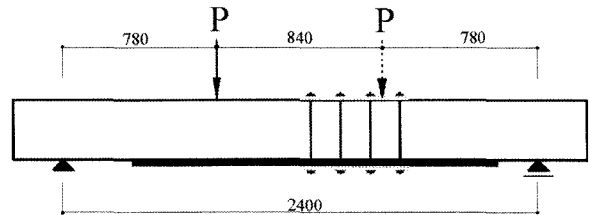
〈표 2〉 CFRP 보강재의 물성치

종 류	인장강도 (MPa)	인장탄성율 (MPa)	포아송 비	파손 변형률 (%)
CFRP	1637	1.53×10^{-5}	0.31	1.2

3.2 실험방법

단순지지 조건하에 대칭으로 2점 가력 하여 수행하였으며, 각 실험체의 하중상태에 따른 처짐은 DT-100A 를 실험체의 중앙부에 설치하여 처짐량을 측정하였다.

주근의 휨 변형 상태를 알아보기 위하여 실험체의 중앙부와 단부의 철근에 1방향 스트레인 게이지 (FLA-5-1L)를 부착하였다. 또한 콘크리트 표면에는 이론식에 의해 계산된 중립축과 압축연단 및 인장연단의 위치에 1방향 스트레인 게이지(PL-60)를 부착하여 하중상태에 따른 변형도를 측정하였다. 하중재하



〈그림2〉 NST-2 실험체의 보강형상

〈표 3〉 시험체 일람 및 실험결과

NO	시험체명	보강재 형상	보강위치	지점에서 보강재 단부까지의 거리 (L_s , mm)	초기 균열 모멘트 (kN·m)	항복 상태		극한 상태		내력증가 비율 (R^* , %)	파괴 모드
						모멘트 (kN)	처짐 (mm)	모멘트 (kN)	처짐 (mm)		
1	CB	-	-	-	11.0	31.97	9.55	39.81	29.10		F
2	TS1	CFRP Plate	하부면	700(0.4L)	11.0	29.32	7.66	38.44	39.00	-3.44	S
3	TS2-L			500(0.6L)	6.9	42.76	10.27	42.76	10.11	7.40	-
4	TS2-R			50(0.95L)	8.6	61.10	15.87	61.10	15.78	53.47	P
5	TS3-L			350(0.7L)	8.4	38.44	7.28	38.74	7.69	-2.70	-
6	TS3-R			200(0.85L)	10.0	52.07	11.28	52.07	11.23	30.80	P
7	SS1			CFRP Plate	측면	700(0.4L)	7.9	34.42	12.78	39.13	24.16
8	SS2-L	500(0.6L)	13.0			39.62	7.97	40.31	9.60	1.24	-
9	SS2-R	50(0.95L)	11.3			62.17	15.34	62.17	15.30	56.18	P
10	SS3-L	350(0.7L)	15.7			52.96	8.32	59.43	11.30	49.28	P
11	SS3-R	200(0.85L)	12.1			49.13	10.08	55.60	13.26	39.67	P
12	TD1	CFRP Rod	하부면	700(0.4L)	4.8	34.13	9.48	41.15	26.50	3.46	S
13	TD2-L			500(0.6L)	13.2	15.79	1.78	26.18	4.77	-34.23	-
14	TD2-R			50(0.95L)	6.8	53.94	10.68	67.47	18.02	69.48	C
15	TD3-L			350(0.7L)	15.7	32.46	4.49	34.52	5.35	-13.29	-
16	TD3-R			200(0.85L)	12.5	54.13	9.17	65.90	17.13	65.54	C
17	TB3-L	CFRP Plate	하부면	350(0.7L)	9.6	38.064	3.94	38.64	9.29	-2.94	-
18	TB3-R	CFRP Plate	하부면	200(0.85L)	16.6	43.84	5.52	54.13	15.78	35.98	D
19	SB3-L	CFRP Plate	측면	350(0.7L)	12.5	46.97	4.79	46.97	9.43	18.00	-
20	SB3-R	CFRP Plate	측면	200(0.85L)	15.7	55.02	6.80	66.69	19.98	67.51	D

F : Flexural failure

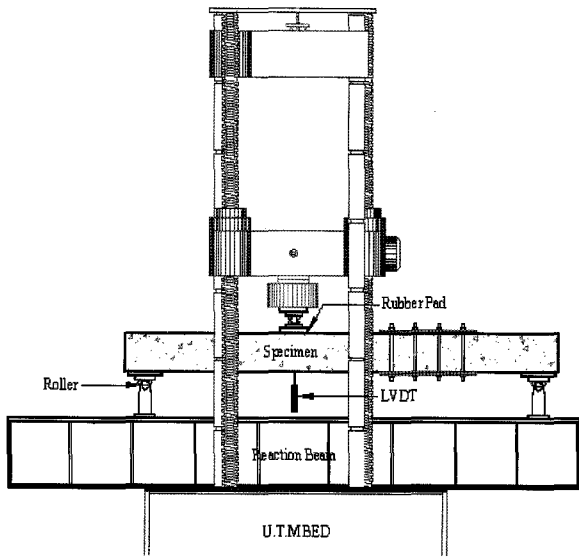
C : Concrete cover separation

D : Debonding from bending moment

P : Plate-end interfacial debonding

S : Shear failure

$$R^* = \frac{\text{보강실험체의 극한상태 모멘트} - \text{기준실험체의 극한상태 모멘트}}{\text{기준실험체의 극한상태 모멘트}} \times 100\%$$



〈그림 3〉 실험체 설치 및 가력시스템

에 따른 변위 및 변형도는 DATA LOGGER(TDS-601)를 사용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 실험결과

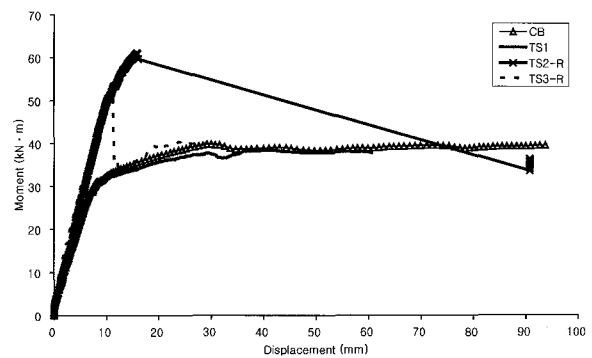
CFRP Plate 및 Rod로 휨 보강된 RC 보의 실험 결과는 <표 3>과 같다. 1개의 실험체에 양단부의 보강길이를 다르게 적용하여 보강보 1개에 두 번에 걸쳐 실험을 한 결과 선행되어 실험한 TS2-L 등 L Type의 실험체의 결과값은 보 파괴시 까지 하중을 가력하지 못하고 모멘트-처짐 곡선의 항복이 발생하는 시점에서 실험을 정지하여 최대 모멘트 및 파괴모드를 정확하게 예측할 수 없었다. 따라서 TS2-L 실험체 등 L Type의 실험체의 모멘트 저항능력은 SS3-L을 제외하고는 보강 실험체임에도 불구하고 기준 실험체에 비하여 -2.94%~34%정도로 내력이 오히려 감소한 것으로 나타났다.

보강 길이가 0.4L로 짧은 TS1, SS1, TD1 실험체의 경우 기준 실험체 보다 내력 면에서 거의 증가를 보이지 않았으며, 대부분 취성적인 파괴양상을 보였다. TS2-R 등의 R Type 실험체는 기준 실험체에 비해 모멘트 저항능력이 30.80%~69.48%까지 증가하였으며, CFRP-Rod로 보강된 경우의 모멘트 저항능력이 높게 관찰 되었다.

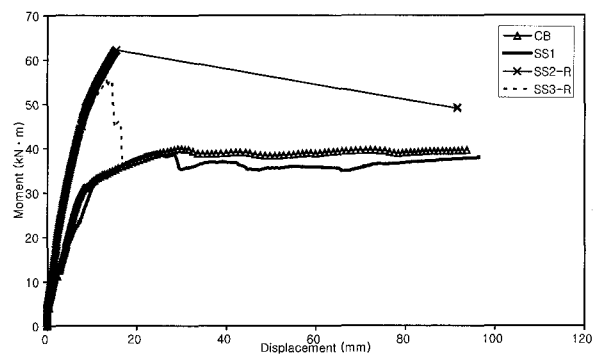
4.2 보강 길이의 영향

<그림 4>~<그림 6>은 TS, SS, TD 시리즈의 보강길이에 대한 모멘트-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 기준 실험체와 비교하여 보강길이가 0.4L인 TS1, SS1, TD1 실험체를 제외하고는 극한 하중이 크게 증가하였으며, 모멘트-처짐 곡선에서 직선적으로 변화하는 구간을 탄성구간으로 보았을 때 탄성적인 거동 범위가 증가함을 알 수 있었다.

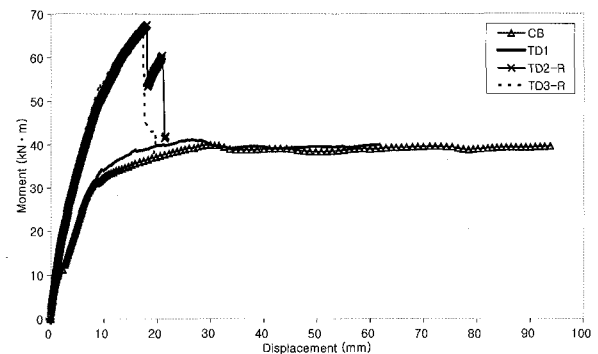
보강길이가 0.4L인 TS1, SS1 실험체는 보강 길이



〈그림 4〉 TS 시리즈 보강길이에 대한 모멘트-처짐 곡선



〈그림 5〉 SS 시리즈 보강길이에 대한 모멘트-처짐 곡선



〈그림 6〉 TD 시리즈 보강길이에 대한 모멘트-처짐 곡선

가 짧아 보강효과를 충분히 발휘하지 못하고 기준 실험체와 같은 거동을 보였다. 이는 파괴모드가 보강재 단부에서 발생한 균열의 진전에 의해 파괴에 도달하게 되었는데, 기준 실험체의 파괴를 이르게 한 균열의 위치와 유사한 재하점 하부에서 발생하여 진전되었기 때문인 것으로 판단된다.

보강길이가 증가함에 따라 시리즈 별로 유사하게 나타났으나, CFRP Plate로 0.85L 길이로 보강된 TS3-R의 실험체는 극한모멘트에서 CFRP Plate 조기 박락 이후 인장철근이 모멘트를 부담하게 되면서 기준 실험체의 항복이후 거동과 같은 거동을 보였다. SS3-R, 및 보강길이 0.95L인 TS2-R, SS2-R 실험체의 경우 극한모멘트에서 CFRP Plate 단부 조기 박락 후 갑자기 모멘트 및 처짐이 감소하면서 취성적인 파괴를 일으켰다.

CFRP-Rod로 보강길이 0.95L, 0.85L로 보강된 실험체인 TD2-R, TD3-R의 극한모멘트는 유사하게 나타났으며, 극한모멘트 이후 처짐의 증가 없이 바로 취성적인 파괴를 일으켰다.

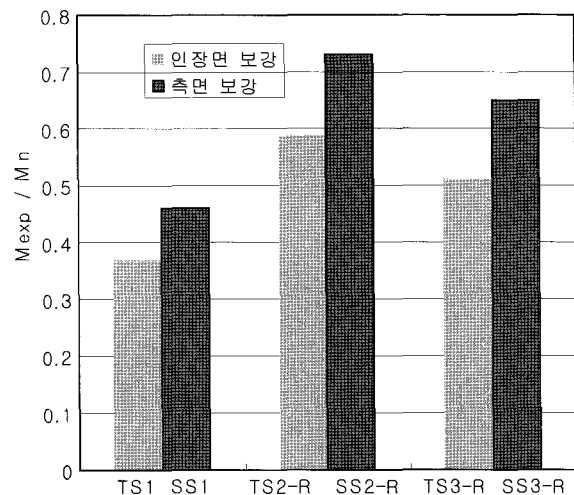
4.3 보강 위치에 대한 영향

<표 4>는 CFRP Plate 보강재의 보강 위치에 대한 구조적 거동을 비교하기 이론값 및 실험 결과 값이다. 보의 하부면(인장면)과 측면에 보강한 보강하였을 경우로 보강재의 면적은 측면이 인장면의 2배가 된다. 하지만 극한강도 설계법에 의해 구해진 보의 저항모멘트는 보의 압축연단에서 보강재 중심까지의 거리차이 때문에 오히려 하부면에 보강한 경우가 더 크게 나타났다.

초기균열모멘트는 <표 4>에서 보듯이 TS1, SS1을 제외한 실험체의 경우 하부면 보다 측면보강을 하

였을 경우가 높게 측정되었다. 즉, 극한강도 설계법에 의해 계산된 공칭 휨모멘트에 대한 실험을 통해 얻어진 최대 모멘트비(M_{exp}/M_n)의 값으로부터 인장면 보강 시험체 각각의 최대 휨모멘트는 예상 휨모멘트의 약 59%, 51% 정도에 달함을 알 수 있다. 반면 측면 보강 시험체인 경우는 약 73%, 65% 정도로 측면 보강의 경우가 보강 효과가 높게 나타났다.

CFRP Plate 인장면 보강 시험체인 TS 시리즈 시험체는 <표 4>와 <그림 7>로부터 측면 보강된 시험체가 인장면 보강된 시험체에 비해 약 1.22-1.31배 정도의 향상된 보강효과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 측면 보강의 경우 보강 면적이 하부면 보강의 2배 정도가 되지만 균열억제 및 공칭모멘트에 대한 보강 효과가 높게 나타나므로 CFRP Rod로 보강할 경우 보강재의 위치를 고려하여야 할 것으로 판단된다.



<그림 7> 보강재 위치에 따른 휨 내력

4.4 보강 공법에 대한 영향

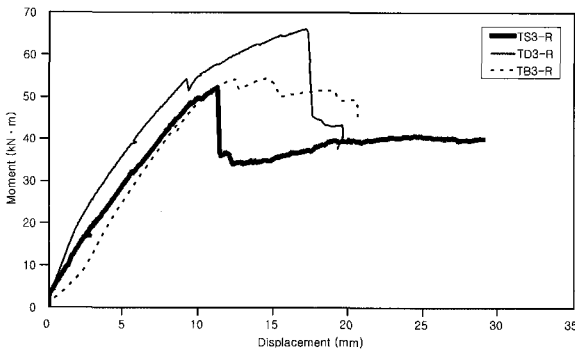
<표 4> 및 <그림 8>, <그림 9>는 CFRP Plate 의

<표 4> 보강재 보강위치에 대한 실험결과 일람표

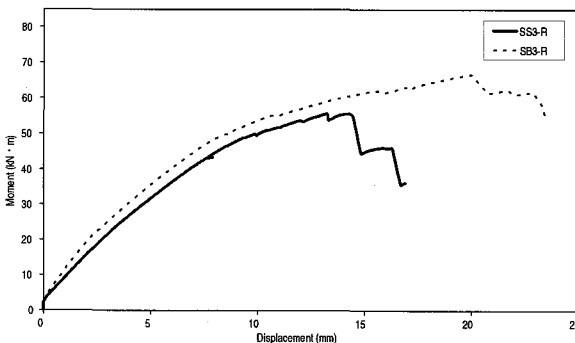
시험체명	초기균열모멘트 (kN·M)	극한 상태			극한상태 ($\frac{M_{exp}}{M_n}$)	보강위치	보강길이
		이론 M_n (kN·M)	실험 M_{exp} (kN·M)	극한상태 처짐 (mm)			
TS1	11.0	102.93	38.44	39.00	0.37	인장면	0.4L
SS1	7.9	85.48	39.13	24.16	0.46	측면	
TS2-R	8.6	102.93	61.10	15.78	0.59	인장면	0.95L
SS2-R	11.3	85.48	62.17	15.30	0.73	측면	
TS3-R	10.0	102.93	52.07	11.23	0.51	인장면	0.85L
SS3-R	12.1	85.48	55.60	13.26	0.65	측면	

〈표 5〉 보강공법에 대한 실험결과 일람표

시험체명	초기균열모멘트 (kN·M)	극한 상태			극한상태 ($\frac{M_{exp}}{M_n}$)	보강방법
		이론 M_n (kN·M)	실험 M_{exp} (kN·M)	극한상태 처짐 (mm)		
TS3-R	10.0	102.93	52.07	11.23	0.51	CFRP Plate
TD3-R	12.5	102.98	65.90	17.13	0.64	CFRP-Rod
TB3-R	16.6	102.93	54.13	19.98	0.53	CFRP Plate, 보강철물
SS3-R	12.1	85.48	55.60	13.26	0.65	CFRP Plate
SB3-R	15.7	85.48	66.69	19.98	0.78	CFRP Plate, 보강철물



〈그림 8〉 보강방법에 대한 모멘트-처짐 곡선 (TS3-R, TD3-R, TB3-R)



〈그림 9〉 보강방법에 대한 모멘트-처짐 곡선 (SS3-R, SB3-R)

부부착공법으로 보강한 시험체와 CFRP Plate 보강공법의 구조적 거동을 향상시키기 위해 보강정착물 설치 및 CFRP-Rod 표면매립 시험체의 실험 결과 일람표 및 모멘트-처짐 곡선으로 CFRP Plate로 외부부착으로 부착한 공법보다 보강정착물을 설치한 것과 CFRP-Rod 보강한 실험체가 최대휨모멘트에서 내력증가를 보였다. 보강정착물로 보강하였을 경우 최종파괴는 CFRP Plate와 마찬가지로 보강재 단부 탈락에 의한 파괴였지만 어느 정도 보강재 탈락을 제어하는 것으로 판단된다. CFRP-Rod로 보강한 경우 최종파괴는 보강재 단부의 탈락보다는 콘크리

트를 물고 파괴되는 concrete cover separation 파괴모드를 보였다.

CFRP Plate 외부부착한 후에 단부에 보강철물을 설치한 경우 최대모멘트에서 CFRP Plate 보강한 시험체 보다 인장면 보강시험체인 경우는 1.04배, 측면에 보강한 경우는 1.20배 정도로 휨 내력 향상을 보였으며, CFRP-Rod로 표면매립한 시험체는 CFRP Plate 외부부착공법으로 보강한 시험체보다 약 1.27배의 휨 내력 증가를 보였다.

RC보의 보강에 있어서 CFRP Plate 외부부착한 후에 보강철물을 설치한 경우 내력면에서 일부 증가를 보였지만 CFRP Plate로 보강한 보와 동일한 파괴모드를 보이는 것으로 보강철물의 설치위치 및 방법에 대해서 고려해야 할 것으로 판단된다. 하지만 CFRP-Rod로 표면매립 보강한 경우는 휨 내력의 증가 및 파괴모드도 concrete cover separation로 콘크리트 강도와 관계가 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

CFRP Plate 외부부착공법 및 CFRP-Rod 표면매립공법으로 보강길이가 보강위치를 실험변수로 하여 실험을 수행하였다. 이 실험을 수행한 결과 얻어진 내용을 비교·분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. CFRP Plate 및 CFRP-Rod로 보강된 RC 보는 보강길이가 길수록 휨 내력의 증가를 보였다. 보강길이가 0.4L로 TS1, SS1의 경우는 CB 시험체와 거의 같은 휨 내력과 파괴거동을 보였다. CFRP Plate로 보강된 경우 CB 시험체의 휨 내력과 비교하여 보강길이가 0.85L인

TS3-R, SS3-R은 1.31배, 1.40배 보강길이가 0.9L인 TS2-R, SS2-R은 1.53배, 1.56배의 휨 내력의 증가를 보였다. CFRP-Rod로 보강된 경우 TD3-R, TD2-R은 각각 CB 시험체의 휨 내력과 비교하여 1.66배, 1.69배 정도로 큰 차이가 없이 나타났다. 전체적으로 CFRP-Rod 보강의 보강효과가 높게 나타났으며, 어느 정도 일정한 보강길이가 확보되면 충분한 휨 내력을 발휘할 수 있다고 판단된다.

2. CFRP Plate의 경우 인장면 보다 측면 보강의 경우가 초기균열과 균열제어에 대해서는 우수한 것으로 나타났다. 하지만 휨 내력의 경우는 거의 비슷한 값을 보였다. 이때 측면보강재의 보강면적은 인장면 보강보다 2배의 면적을 가진다. 따라서 측면 보강인 경우 인장면 보강 시험체와 동일한 휨 보강 효과를 보기 위해서는 2배 정도의 보강재가 필요함을 고려 할 시 경제성을 생각해야 한다.
3. 보강철물로 추가 강된 RC 보의 경우는 CFRP Plate 단부에서 보강재 탈락을 원천적으로 방지하는 역할에는 미흡하나 박리 후에 CFRP Plate를 잡아주어 갑자기 CFRP Plate이 탈락되는 것을 방지하고 보강재 위치가 단부쪽으로 갈수록 파괴가 전단 보강근 위치 콘크리트 피복부에서 발생시킴으로 휨 내력 증가에는 별 기여도가 없었다. 보강철물로 CFRP Plate보강재를 추가로 보강할 경우 보강철물의 위치도 및 방법을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
4. CFRP-Rod 보강의 경우는 CFRP Plate 보강 보다 1.27배의 휨 내력의 증가를 보였다. 파괴모드 또한 CFRP Plate 보강의 일반적인 파괴모드인 보강재 단부 조기 탈락이 아닌 concrete cover separation의 파괴형태를 보였다. 이는 보강재가 RC 보 내부에 시공함으로 해서 조기 탈락의 주원인 중의 하나인 단부에서의 응력 집중 현상의 영향을 덜 받는 것으로부터 기인하지 않나 판단된다.

참고문헌

1. 정상모, 이차돈, 원종필, 황운국, 김정호, "FRP 보강근을 이용한 표면매립 및 단면확대공법의 실험적 성능평가", 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 15권, 1호 pp.549-554, 2003.
2. 오병환, 조재열, 강동욱 "강판 휨 보강된 철근 콘크리트 보의 구조적 거동", 한국 콘크리트 학회지, 제9권 5호, pp.233-244, 1997.
6. 이수진, "FRP로 외부 보강된 철근 콘크리트 보의 보강 변수 영향에 관한 연구", 이화여자대학교 과학기술대학원, 2000년, 11월
3. Oehlers & Bradford, "Composite Steel and Concrete Structural Members", Pergmon,1995.
3. ACI Committee 440, "Guidelines for The Selection, Design, and Installation of Fiber Reinforcement Polymer(FRP) Systems for External Strengthening of Concrete Structures", American Concrete Institute, 1999.
7. T.M.Roberts, "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams", The Structural Engineer, Vol 67, No12, pp229-233, 1989.
8. R.Jones, "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", The Structural Engineer, Vol 66, No5, pp85-94, 1989.
9. P.J. Heffernan and Erik, "Equivalent Capacity and Efficiency of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fibre Reinforced Plastic Sheet", Can. J. Eng. 23 : 21-29, 1996.
10. Ohelers D.J and Moran "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams", Journal pf Structural Eng, ASCE, 1990,Vol 116, NO 4, PP 978-995.