

탄소섬유쉬트의 보강량 및 정착길이가 RC보의 휨거동에 미치는 영향

Effect of Strengthening amount and length of CFS on Flexural Behavior of RC Beams

신성우 ¹⁾ Shin, Sung Woo	반병렬 ²⁾ Bahn, Byung youl	안종문 ³⁾ Ahn, Jong mun
조인철 ⁴⁾ Cho, In Chol	김영수 ⁵⁾ Kim, Young Soo	조삼재 ⁶⁾ Cho, Sam Jae

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the flexural strengthening effects of RC beams reinforced with carbon fiber sheets (CFS) in variable of strengthening amount and anchorage length of CFS. This study can be summarized as follows ;

The CFS shares the tensile stress such as rebar during loading test. Also, as the strengthening amount of CFS is increased, the maximum flexural strength of RC beams reinforced with CFS is increased. Therefore, it is confirmed that the CFS's strengthening method is very effective to improve the flexural strength of RC beams.

The maximum flexural strength of RC beams with CFS is determined by bond failure between CFS and concrete surface. So, the evaluation of CFS's strengthening effect can be calculated using the tensile stress of CFS which is peeling. When the anchorage length of CFS is increased, the ductility of RC beams is increased because of delaying the peeling of CFS. But, in case of same anchorage length of CFS, when the strengthening amount of CFS is increased, the ductility is decreased. Therefore, it is considered that the anchorage of CFS in the end zone is necessary.

Key words : Carbon fiber sheet, Strengthening amount and length of CFS,
Flexural behavior of RC beam,

1. 서 론

최근, 국내에서는 탄소섬유쉬트(CFS)를 RC구조부재의 표면에 부착하는 것에 의해, 그 내력성능 및 연성능력을 향상시키려는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 그 보강효과는 CFS의 부착성능에 크게 영

- 1) 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수, 공박
- 2) 정회원, 대전대학교 건축과 조교수, 공박
- 2) 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정
- 4) 한양대학교 건축공학과, 석사과정
- 5) (주)한국카본 개발영업부 부장
- 6) (주)한국카본 개발영업부 과장

항을 받고있는 것으로 보고되어 있다 특히, RC보의 휨보강을 목적으로 하는 경우, CFS의 보강량에 따른 내력성능 증진효과는 정성적으로 검토되고 있으나, CFS의 부착성능을 개선함으로써 그 연성능력을 향상시키기 위한 자료가 부족하기 때문에 CFS에 의한 RC보의 보강설계방법을 확립하기 위하여 이에 관한 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 RC보를 대상으로 CFS의 보강량 및 정착길이가 RC보의 휨보강효과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 CFS의 보강매수 및 정착길이를 실험변수로 하여 이들 변수가 RC보의 휨거동에 미치는 영향을 실험적으로 검토하였다.

2. 실험

2.1 실험 계획

표 1에 각 실험변수에 따른 실험체별 특성과 그림.1에 실험체의 상세를 나타내었다. 실험체는 선하중(Pre-loading)을 가하지 않은 기준실험체(F0-CN-00), 휨균열을 발생시키기 위하여 선하중을 인장철근 항복변형률의 70%까지 재하한 후 휨균열을 주입용 에폭시로 보수한 보수실험체(F0-EN-70), 휨균열을 에폭시 주입공법으로 보수하고 보 밑면에 10cm 폭의 CFS로 보강한 CFS 보강실험체의 3종류이다. 또한, CFS의 보강량 및 정착길이는 그림.3과 같이 시공하고, CFS의 보강량은 CFS의 부착매수를 1매, 2매, 3매로 하여 변화시켰으며, 정착길이는 각 매수별로 순지간(2500mm)의 절반(0.5L)을 기준으로 하여 유효춤 d를 증가시켜 변화시켰다.

표 1 실험체의 종류

시험체명	CFS 매수	보강길이	PRELOADING
F0-CN-00	0	-	0 %
F0-EN-70		에폭시 보강	
F1-HN-70		0.5 ℓ	
F1-SN-70	1	0.5 ℓ + 2d	70 %
F1-MN-70		0.5 ℓ + 3d	
F1-LN-70		1.0 ℓ	
F2-HN-70	2	0.5 ℓ	70 %
F2-SN-70		0.5 ℓ + 2d	
F2-MN-70		0.5 ℓ + 3d	
F2-LN-70	3	1.0 ℓ	70 %
F3-HN-70		0.5 ℓ	
F3-SN-70		0.5 ℓ + 2d	
F3-MN-70	3	0.5 ℓ + 3d	70 %
F3-LN-70		1.0 ℓ	

표 2 CFS의 재료 물성

설계강도 (kg/cm ²)	인장강도 (kg/cm, 폭)	설계탄성율 (kg/cm ²)	인장탄성율 (kg/cm, 폭)
39,644	436	2.68 × 10 ⁶	29478

표 3 콘크리트 압축강도 실험결과

재령	7일	28일
강도		
f _c (kg/cm ²)	197	245

표 4 철근의 인장실험 결과

구 분	탄성계수 (× 10 ⁶ kg/cm ²)	항복강도 (kg/cm ²)	항복변형율 (× 10 ⁻⁶)	인장강도 (kg/cm ²)	신 율 (%)
D10	1.7	3150	2098	4417	26
D16	1.9	4324	2220	6092	21

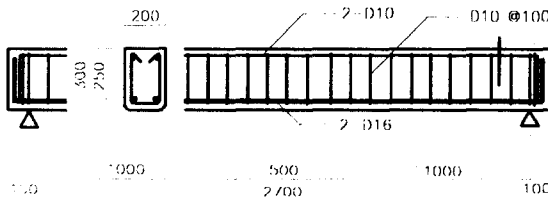


그림.1 시험체의 상세도

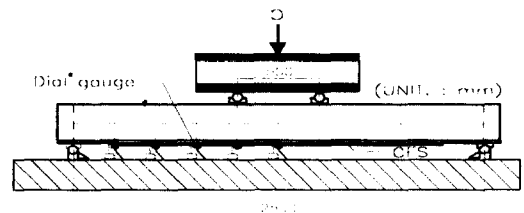


그림. 2 실험체의 재하방법

2.2 재하 방법 및 측정항목

실험체의 재하는 그림 2와 같이 200ton 용량의 만능시험기(Universal Testing Machine)를 사용하여 2점재하의 일방향 단조재하로 하였으며, 재하방법은 예상 최종파괴하중의 1/3까지는 하중조절방식으로 그 이후부터 실험종료까지는 변위조절방식으로 실험을 진행하였다. 처짐은 실험체 중앙부와 중앙부로부터 지지점쪽으로 25cm간격으로 다이얼 게이지(dial gauge)를 설치하여 측정하였다. 또한, 인장철근의 변형도와 함께 CFS의 변형도를 측정하기 위해서 슈트의 표면에 W.S.G를 25cm간격으로 부착하였다. 또한, 콘크리트의 압축변형도를 측정하기 위하여 압축연단으로부터 중립축 부분까지 2cm 간격으로 W.S.G를 부착하였다.

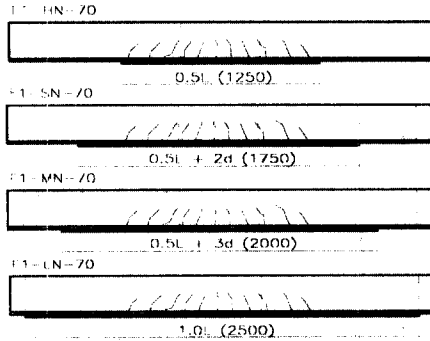


그림 3 CFS의 정착방법

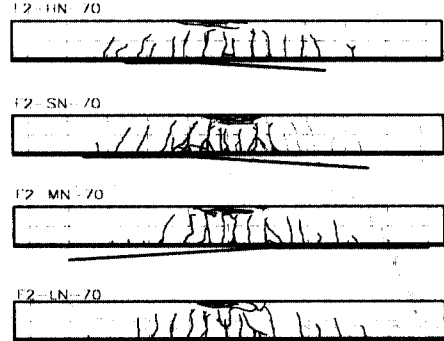


그림 4 실험체의 파괴상황

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴상황

그림 4에 실험체의 대표적인 파괴상황을, 표 5에 시험결과를 나타내었다. 기준실험체 및 보수실험체는 재하 하중이 증가함에 따라 가력점 하부의 휨균열들이 상부로 진행해 압축콘크리트의 압괴에 의하여 파괴되었으나, CFS로 보강한 모든 보강실험체는 최대내력 시점에서 콘크리트와 슈트의 부착파괴가 발생하였고, 부착파괴 후에는 휨균열들이 압축콘크리트 부분으로 진행하여 최종적으로는 압축콘크리트의 압괴에 의해 파괴하였다.

표 5 각 실험체의 시험결과

실험체명	CFS 매수	보강길이	균열				항복하중					최대하중			단소탈락		연성
			하중 ton	실험값 ton	실험값 기준값	δ_y mm	실험값 ton	실험값 기준값	계산값 ton	실험값 계산값	δ_m mm	하중 ton	δ_f mm	$\frac{\delta_f}{\delta_y}$			
F0-CN-00	0	-	2.40	8.00*	1.00	1.06	9.70*	1.00	7.99	1.21	33.38	-	-				
F0-EN-70		예폭시 보강	2.20	8.20	1.03	1.94	9.64	0.99	7.99	1.21	32.42	-	-				
F1-IIN-70	1	0.5 l	2.10	9.00	1.13	1.67	10.70	1.10	9.19	1.16	23.04	10.70	23.71	2.78			
F1-SN-70		0.5 l + 2d(0.7 l)	2.40	9.00	1.13	1.36	10.72	1.11	9.19	1.17	22.02	10.60	25.07	3.22			
F1-MN-70		0.5 l + 3d(0.8 l)	2.80	8.80	1.10	2.33	10.42	1.07	9.19	1.13	26.00	10.37	28.01	3.27			
F1-LN-70		1.0 l	3.40	9.00	1.13	3.66	10.8	1.11	9.19	1.18	37.68	10.30	41.86	4.2			
F2-HN-70	2	0.5 l	3.58	9.40	1.18	2.49	11.22	1.16	9.96	1.13	18.24	11.22	18.24	2.11			
F2-SN-70		0.5 l + 2d(0.7 l)	1.80	9.89	1.24	1.68	11.86	1.22	9.96	1.19	20.50	11.78	21.14	2.26			
F2-MN-70		0.5 l + 3d(0.8 l)	1.40	9.40	1.18	0.92	11.00	1.13	9.96	1.10	20.76	11.00	20.76	2.58			
F2-LN-70		1.0 l	3.08	9.68	1.21	1.80	11.80	1.22	9.96	1.18	20.53	11.80	22.88	2.72			
F3-IIN-70	3	0.5 l	3.92	10.12	1.27	1.13	11.56	1.19	10.53	1.10	16.28	11.56	16.25	1.74			
F3-SN-70		0.5 l + 2d(0.7 l)	3.00	10.14	1.27	1.84	11.84	1.22	10.53	1.12	17.02	11.84	17.02	1.88			
F3-MN-70		0.5 l + 3d(0.8 l)	3.02	10.08	1.26	2.08	11.96	1.23	10.53	1.14	18.25	11.96	18.25	1.99			
F3-LN-70		1.0 l	4.02	9.40	1.18	3.46	12.00	1.24	10.53	1.14	20.53	12.00	20.53	2.29			

* : 기준값(기준실험체를 1로 정함)

3.2 하중-처짐곡선

그림. 5에 CFS의 보강량을 변화시킨 실험체의 하중-처짐곡선을 나타낸다. 선재하를 한 CFS 보강실험체의 초기 기울기는 선재하를 하지 않은 기준실험체에 비해서 작게 나타났으나, 이는 선재하의 균열이 너무 미세하여 예폭시가 잘 주입되지 않은 이유로 인해 유효 단면 2차모멘트가 감소하여 보단면의 강성이 감소되었기 때문으로 판단된다. 또한, 균열발생 이후는 기울기가 선형을 유지하다가 철근의 항복하중에서 하중은 완만하게 증가되면서 처짐이 급격히 증가하였다. 이는 철근과 CFS가 동시에 보의 인장력을 부담하였으나 철근의 항복으로 CFS의 인장응력 부담이 증가 하였기 때문으로 생각된다. 또한, 최대내력에 도달한 후에는 CFS의 부차파괴에 의하여 하중이 급격히 저하하였으며, 부차파괴 후에는 기준실험체와 같은 거동을 보였다. 또한, 보강량(매수)이 증가함에 따라 실험체의 최대하중은 기준실험체와 비교하여 10% ~ 20%정도 증가 하였으나, 최대하중시의 처짐은 보강량이 클수록 작게 나타났다. 그림. 6은 CFS의 정착길이를 변화시킨 대표적인 실험체의 하중-처짐곡선이다. CFS의 정착길이가 증가함에 따라 최대하중은 약간 증가하나, CFS의 부차파괴시의 처짐이 커지는 것을 알 수 있다.

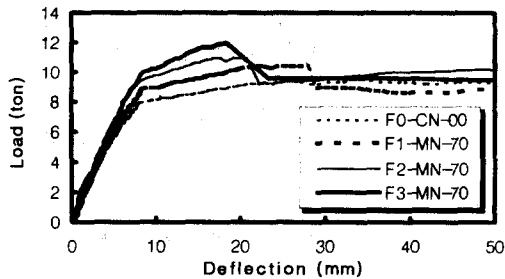


그림. 5 CFS의 보강량에 따른 실험체의 하중-처짐곡선

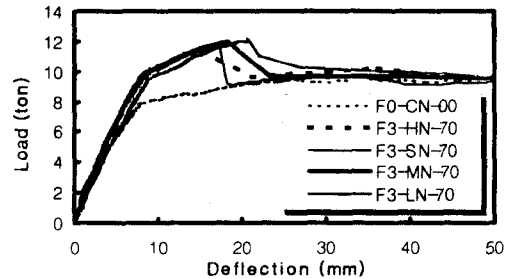


그림. 6 정착길이에 따른 실험체의 하중-처짐곡선

3.3 인장주근 및 CFS의 변형도

그림. 7은 실험체의 인장주근 및 CFS의 변형도를 나타낸다. 재하 하중이 증가함에 따라 인장주근 및 CFS의 변형도는 증가하며, CFS도 철근과 같이 인장응력을 부담하는 것을 알 수 있다. 또한, 철근이 항복한 후에는 CFS의 변형도가 급격히 증가하며, CFS의 부차파괴가 발생한 것을 알 수 있다. 또한, 동일 하중에서 보강량이 증가 할수록 인장주근 및 CFS의 변형도가 적게 나타나, 하중증가에 따른 인장응력을 CFS가 부담함으로써 RC보의 휨보강에 따른 내력증진 효과가 나타났다. 또한, 최대하중시의 CFS의 변형도는 그림. 8에서 보는바와 같이 CFS의 정착길이가 증대함에 따라 증가하였으나, CFS의 변형도는 보강량에 따라 다소 달라지며, CFS의 재료강도시의 변형도보다는 적은 변형도에서 부차파괴가 일어나 CFS의 휨보강에 의한 최대내력을 산정할 때에는 부차파괴시의 CFS의 변형도를 적절히 평가할 필요가 있다.

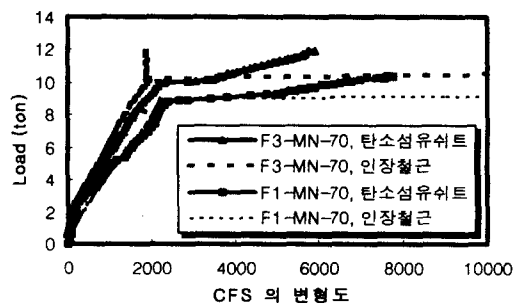


그림. 7 인장주근 및 CFS의 변형도

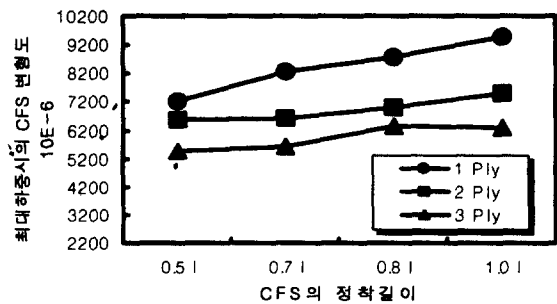


그림. 8 정착길이에 따른 최대하중시의 CFS의 변형도

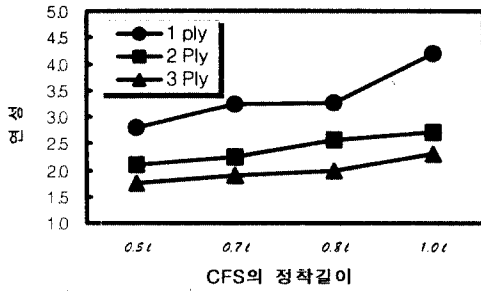


그림. 9 CFS의 정착길이와 연성과의 관계

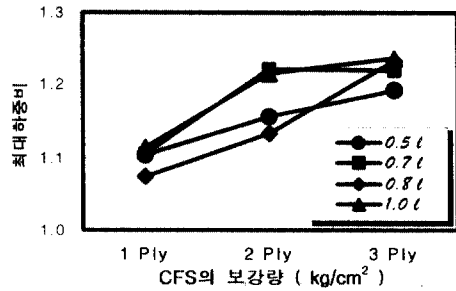
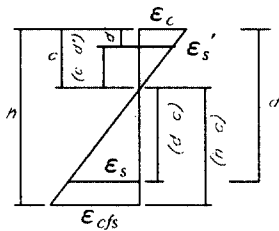


그림. 10 CFS의 보강량과 최대하중비와의 관계

3.4 CFS의 휨보강 효과

그림. 9의 CFS의 정착길이와 연성과의 관계를 보면 정착길이가 증가함에 따라 연성이 증가함을 알 수 있다. 보강실험체의 연성은 식 (2)와 같이 실질적인 CFS의 보강성능을 평가하기 위해 부재의 항복 변형시의 처짐량(δy)과 CFS가 부착과괴할 때의 처짐량($\delta peeling$)으로부터 산정하였다. 또한 그림. 10에서 CFS의 보강량이 증가함에 따라 기준실험체에 대한 보강실험체의 최대하중비가 증가함을 알 수 있다. 그림. 8에 나타난 최대하중시의 CFS의 변형도를 각매수별로 평균하여 각 매수별 CFS의 평균 부착과괴 변형도를 그림 11에 회기 분석하였다. 여기서 4ply는 본 논문과 동시에 수행된 실험의 실험값을 적용하였다. 평균 부착과괴 변형도를 이용하여 CFS로 보강된 실험체의 최대내력을 기존의 RC 보의 종국강도식을 이용하여 산출한 결과를 그림 12에 나타내었다. 여기서 계산값과 실험값의 차이가 1.3ton 정도로 일정하고 그 차이는 기준실험체의 계산값과 실험값의 차이인 1.7ton과 같은 원인인 Strain Hardening인 것으로 판단된다. 본 실험에서는 압축과괴가 일어나지 않도록 저보강하였으므로 종국강도는 CFS의 부착과괴 시점으로 하고 그 식을 다음에 나타내었다.



CFS의 평균 부착과괴 변형도가 ϵ_{cfs} 일 때의 각 변형도는 다음과 같다.

$$\epsilon_c = \frac{c}{h-c} \epsilon_{cfs} \quad \epsilon_s' = \frac{c-d'}{h-c} \epsilon_{cfs}$$

$$\epsilon_s = \frac{d-c}{h-c} \epsilon_{cfs}$$

변형도에 따른 각각의 힘은 다음과 같다.

($\epsilon_c < 0.002$ 일 때)

$$C_c = \frac{\epsilon_c}{0.002} \cdot c \cdot 0.85f'_c \frac{b}{2}$$

$$= \frac{c^2 \epsilon_{cfs}}{(h-c)0.002} 0.85f'_c \frac{b}{2}$$

$$C_s = \epsilon_s' E_s A'_s$$

$$= \frac{c-d'}{h-c} \epsilon_{cfs} E_s A'_s$$

$$T_s = \epsilon_s E_s A_s = A_s f_y$$

$$T_{cfs} = \epsilon_{cfs} E_{cfs} A_{cfs}$$

($\epsilon_c > 0.002$ 일 때)

$$C_c = \frac{(2\epsilon_c - 0.002)}{\epsilon_c} c \cdot 0.85f'_c \frac{b}{2}$$

$$= 0.85f'_c b \left(1 + \frac{0.001}{\epsilon_{cfs}}\right) c - 0.85f'_c \cdot 0.001 \frac{b}{\epsilon_{cfs}} h$$

$$C_s = \epsilon_s' E_s A'_s$$

$$= \frac{c-d'}{h-c} \epsilon_{cfs} E_s A'_s$$

$$T_s = \epsilon_s E_s A_s = A_s f_y$$

$$T_{cfs} = \epsilon_{cfs} E_{cfs} A_{cfs}$$

$C_c + C_s = T_s + T_{cfs}$ 가 성립하는 중립축 C를 구하여 각각의 힘을 알 수 있다.
 종곡 모멘트는 다음과 같다.

$$M_n = T_s(d - k) + T_{cfs}(h - k)$$

k : C_c 와 C_s 합력의 압축연단에서의거리

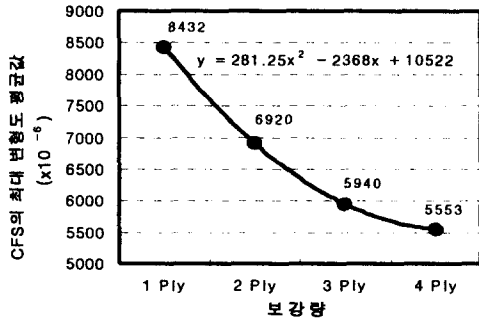


그림. 11 보강량별 최대하중시의 CFS변형도 평균

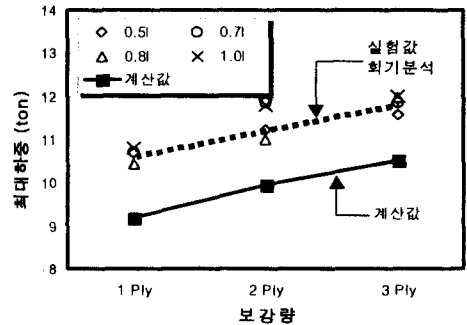


그림. 12 최대하중의 실험값과 계산값 비교

4. 결 론

CFS의 보강량 및 정착길이가 RC보의 휨보강효과에 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탄소섬유쉬트(CFS)는 재하 초기부터 인장철근과 같이 RC보의 인장응력을 부담하고, 그 보강량을 증가시키면 RC보의 최대 휨내력이 커지기 때문에 CFS에 의한 보강공법은 RC보의 휨내력을 증진시키는데 매우 유효한 공법인 것으로 확인 되었다.
- 2) CFS 보강실험체의 최대내력은 쉬트의 부착파괴로 결정되기 때문에 그 보강효과의 산정은 부착파괴시의 CFS의 인장강도를 적절히 평가하는 것에 의해 산정가능 하다고 판단된다.
- 3) CFS의 정착길이가 길어 질수록 CFS의 부착파괴가 지연되기 때문에 RC보의 연성능력은 향상된다. 그러나, 동일 정착길이에서 보강량이 늘어 날수록 연성능력은 저하되기 때문에 정착길이의 증가 만으로 연성의 확보가 불가능하므로 정착보강등이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국카본(주), 성암건설(주) 그리고 한양대학교 STRESS의 지원에 의해 수행된 것으로, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Thanasis C. Triantafyllou, Nikola Deskovic, and Martin Deuring, "Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets", ACI Structural Journal 1992. 5-6, V. 89, NO. 3, pp.235~244
- 2) M.Hussain, Alfarabi Sharif, I.A. Basunbul, M.H.Baluch, and G.J. Al-Suaimani, "Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by Steel Plates", ACI Structural Journal, 1995. 1-2, V. 92, NO. 1,
- 3) J.G.Mc Gregor, "Ductility of Structural Elements" Handbook of Concrete Engineering, 1st Ed., Van Nostrand Reinhold