

축력과 휨 모멘트를 받는 RC 부재의 CFRP 시트 보강에 따른 성능 평가

배찬영^{ID*}, 이지형^{**}, 김상우^{ID****}, 김진섭^{ID****}

Bae, Chan Young^{ID*}, Lee, Ji Hyeong^{**}, Kim, Sang Woo^{ID****}, Kim, Jin Sup^{ID****}

Evaluation of Performance of CFRP Sheet Reinforcement on RC Members Subjected to Axial Load and Flexural Moment

ABSTRACT

In general, RC beam members are designed as flexural members, considering only the bending load. However, in actual buildings, axial and bending load are simultaneously applied due to the continuity between members. As a result, the bending strength of the RC beam member increases, but the displacement decreases, and cracks are mainly concentrated in the center of the beam. Therefore, in this study, the bending performance of both normal and strengthened RC beam using carbon fiber sheets subjected to combined axial and bending load was experimentally evaluated. The carbon fiber sheets were wrapped around the middle of the specimens, and axial and bending load were applied simultaneously to the beams. The magnitude of the axial force and the effects of carbon fiber sheet reinforcement on the deformed shape, bending strength, deflection, and ductility of the RC beams were analyzed. The results show that as the applied axial force increased, the maximum bending strength increased, but the ductility decreased 64%. The bending strength of the strengthened beams increased up to 27%, the maximum deflection decreased around 8% and the ductility increased by up to 43%.

Keywords : Axial load, Bending moment, CFRP Sheet, Ductility, Reinforcement

초 록

일반적으로 RC 보 부재는 휨 부재로서 휨 하중에 대해서만 고려하여 설계된다. 하지만, 실제 건축물에서는 부재 간의 연속성으로 인해 축력과 휨 하중을 동시에 받게 된다. 이로 인해 RC 보 부재의 휨 강도는 증가하지만, 변위는 감소하며, 균열은 주로 보의 중앙부에 집중되게 된다. 따라서 본 연구에서는 축력과 휨 하중을 동시에 받는 RC 보 부재에 탄소섬유시트를 이용한 보강에 따른 휨 성능을 실험적으로 평가하였다. 탄소섬유 시트는 부재의 중앙부에 감싸 보강을 하였으며, 축력과 휨 하중을 부재에 가력하였다. 축력의 크기와 탄소섬유시트 보강에 따른 철근콘크리트 부재의 파괴 형태, 휨 강도, 처짐 및 연성을 분석하였다. 그 결과, 축력의 증가에 따라 최대 휨 강도의 상승이 발생하였지만, 연성은 최대 64%까지 감소하였다. 탄소섬유시트 보강을 통해 휨 강도는 최대 27% 증가하였으며, 휨에 의한 보의 최대 처짐은 8% 감소하였으며 연성은 최대 43% 증가하였다.

검색어 : 축력, 휨 모멘트, 탄소섬유 시트, 연성, 보강

* 경상국립대학교 토목공학과 석사과정 (Gyeongsang National University · cksdud0798@gnu.ac.kr)

** 경상국립대학교 토목공학과 석사과정 (Gyeongsang National University · dlwlgud0328@gmail.com)

*** 중신회원 · 경상국립대학교 토목공학과 박사수료 (Gyeongsang National University · kimsangwoo@gnu.ac.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 경상국립대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Gyeongsang National University · jinsup.kim@gnu.ac.kr)

Received May 18, 2023/ revised June 20, 2023/ accepted June 22, 2023

1. 서론

철근콘크리트 부재에 대한 설계에서 부재 단독으로서의 설계와 성능과 특성에 대한 평가가 진행되고 있다. 휨 부재인 보의 설계에서는 휨 하중에 대해서만 고려하여 설계를 진행하게 된다. 하지만, 철근콘크리트 부재는 실제 구조물에서 단독으로 거동하기보다는 주변에 연결된 부재에 의한 연속적인 구속 상태로 거동하게 되어 휨 부재는 휨 하중에 의해 발생하는 축력이 존재하는 상태로 거동하게 된다(Yang et al., 1997). 또한, Kim(2021)은 축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 철근콘크리트 보에서 축력이 증가할수록 휨 강도는 증가하나 변위는 감소함을 확인하였고, 조기파괴가 발생함을 확인하였다. 그리고 부재의 파괴 영역이 보의 중앙 순수 휨 구간에 집중되는 형태를 나타내며, 압축파괴의 깊이가 깊어지고, 좌굴의 위험성이 커짐을 도출하였다. 이를 해결하기 위하여 국내외의 다양한 연구가 진행되고 있다. 그중 탄소섬유시트(CFRP Sheet)를 활용한 보강 연구가 활발히 진행되고 있다(Swesi et al., 2022; Kim et al., 2022, 2023). Moon et al.(2017)은 탄소섬유시트로 휨 구속된 콘크리트의 압축 성능은 구속력에 의해 압축 내력의 향상 효과가 나타났으며, 콘크리트 균열 이후 내부 변형을 일으키며 시험체의 연성을 증가시켰다. Kim et al.(2007)은 탄소섬유 보강량에 따라 보강 성능이 증가하고, 연성 구간이 줄어들게 되며, 시트와 플레이트의 변형률은 1겹 보강일 때 최댓값을 나타내며, 플레이트가 시트에 비해 취성적으로 거동함을 밝혔다. Kim(2010)은 철근콘크리트 보에 탄소섬유시트 U 형태 보강을 통한 휨 성능을 평가하였다. 항복 이전 구간에서 항복 하중과 휨 강성은 탄소섬유시트 양에 비례하여 증가하며, 최대 하중과 휨 강성의 증가는 U 형태의 정착 효과로 인한 것으로 판단되며, 보강보의 연성 향상을 위해 섬유시트의 정착기구가 필요함을 밝혔다. Park and Cho(2004)은 탄소섬유시트 보강을 통해 항복 이후 구간에서 외부 하중에 대해 보강재가 저항하는 구간이고, 탄소섬유시트를 통한 보강 효과가 가장 높은 구간임을 밝혔다. 이러한 특징들을 이용하여 위험 영역인 부재 중앙부를 탄소섬유시트를 이용하여 감싸 보강을 진행하고자 한다. 본 연구에서는 축력과 휨 하중을 받는 철근콘크리트 휨 부재에

탄소섬유시트를 감싸 보강함으로써 탄소섬유시트 보강을 통한 철근콘크리트 부재의 성능을 평가하였다. 이에 따라 탄소섬유시트 보강 유무와 3가지 축력(0, 10, 20%)으로 세분화하여 다양한 축력 하에 보강 효과를 평가하였으며, 파괴 형태, 강도 증진 및 처짐 보강, 연성 능력을 이용하여 분석하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 변수

시험체는 탄소섬유시트 보강 유무와 축력의 비율을 기준으로 변수를 설정하였다. 축력비율은 Lee et al.(2013)에서 산출한 방법과 동일한 방법으로 산출하였다. 시험체 명은 축력이 0%인 무보강 시험체(N0), 축력이 0%인 탄소섬유시트로 보강한 시험체(C0), 축력이 10%인 무보강 시험체(N10), 축력이 10%인 탄소섬유시트로 보강한 시험체(C10), 축력이 20%인 무보강 시험체(N20), 축력이 20%인 탄소섬유시트로 보강한 시험체(C20)로 설계하였다. 다양한 축력을 통하여 축력에 따른 휨 부재의 거동과 파괴 형상을 분석하였으며, 탄소섬유시트 보강을 통한 보강 효과로 휨 강도와 연성 및 처짐을 통하여 분석하였다. 시험체의 명칭, 실험 변수는 Table 1에 정리하였다.

2.2 시험체 설계 및 제작

축력과 휨 하중을 받는 철근콘크리트 부재에 탄소섬유시트 보강

Table 1. Name of Specimens and Variables

Specimens	CFRP Sheet Wrap around the Beam	Axial Force Ratio* (%)	Axial Force (kN)
N0	O	0	0
C0	X		
N10	O	10	215.3
C10	X		
N20	O	20	430.6
C20	X		

*Axial force ratio = axial force \times ($f_{ct}A_c$)

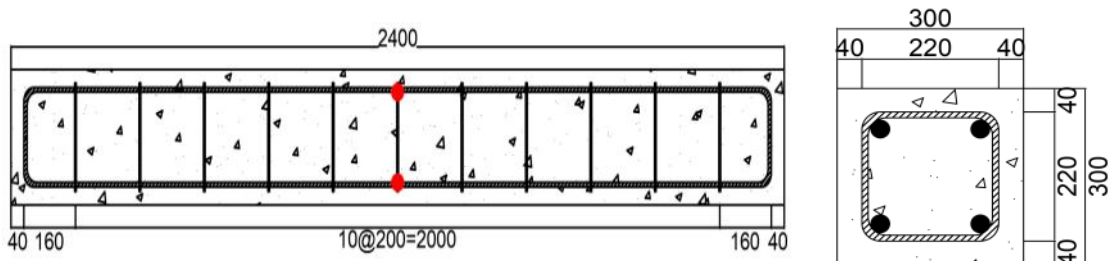


Fig. 1. Detail of Test Specimen (unit : mm)

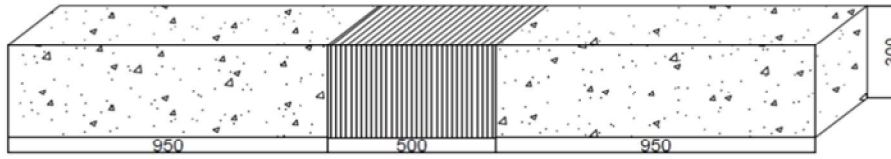


Fig. 2. Detail of Reinforcement (unit : mm)

Table 2. Properties of Materials Used

Concrete		Rebar		CFRP Sheet			Design Bending Moment (kN·m)
Design Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)	Steel Grade	Yield Strength (MPa)	Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	
24	26.32	SD300	343.10	0.4	7,254	1.96E05	32.15

을 통한 보강 효과를 평가하고자 철근콘크리트 부재를 제작하였다. 철근콘크리트 부재 시험체는 Fig. 1과 같이 복철근 보 형태로 제작하였다. 설계 휨 모멘트는 32.15 kN·m으로, 이를 실험 세팅의 집중하중으로 변환한 강도는 75.64 kN이다. 시험체는 단면 300 mm×300 mm의 길이 2,400 mm, 순경간 2,100 mm, 피복 두께 40 mm로 하였다. 인장 철근과 압축 철근은 SD300의 D19 철근 각 2개를 사용하였고, 전단 스트립은 SD300의 D10 철근을 사용하여 200 mm 간격으로 배근하였다. 또한, 휨 변형에 따른 철근의 변형률을 측정하기 위하여 스트레인 게이지(Strain gauge)를 인장, 압축 철근 중앙부에 부착하였다. 탄소섬유시트 보강은 축력의 영향으로 순수 휨 모멘트 발생 구간에 파괴가 집중되므로 순수 휨 모멘트 발생 구간인 휨 가력부 간격 400 mm를 고려하여 폭 500 mm로 설정하였으며, 일방향 시트의 특징으로 인한 보강의 일정한 품질을 위하여 Fig. 2와 같이 횡 방향으로 한 겹 감싸 보강하였다. 탄소섬유시트 보강을 위하여 부재 표면을 그라인더로 정리하였다. 이후 부재와 탄소섬유시트의 부착력 상승을 위하여

프라이머를 도포하여 2일간 경화시켰다. 경화 후 탄소섬유시트를 에폭시에 함침 후 40 mm의 겹침 길이를 확보하여 부재 중앙부를 감싸 보강하였다. 보강 완료 후 충분한 보강 성능을 발휘하기 위하여 약 10일간의 양생을 실시하였다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계 강도 24 MPa의 레디믹스트 콘크리트를 사용하였으며, 탄소섬유시트는 국내의 C사에서 제작된 1방향 시트를 사용하였다. 시험체 제작에 사용된 재료의 기본 특성은 Table 2와 같다.

2.3 가력 및 데이터 측정 방법

철근콘크리트 부재의 실험 세팅은 Fig. 3과 같고, 하중의 방향은 Fig. 4와 같다. 축력과 휨 하중을 동시에 가력하기 위하여 두 개의 액추에이터(Actuator)를 사용하였다. 축력은 Fig. 5와 같이 700 kg/cm² 용량의 유압잭(Hydraulic Jack)과 강봉 12개를 스틸 박스와 연결하여 액추에이터를 이용하여 시험체에 축력을 가력하였다. 휨 모멘트 가력은 50 Ton 용량의 액추에이터를 이용하여 4 Point Bending으로 가력을 실시하였으며, 변위 제어를 통하여

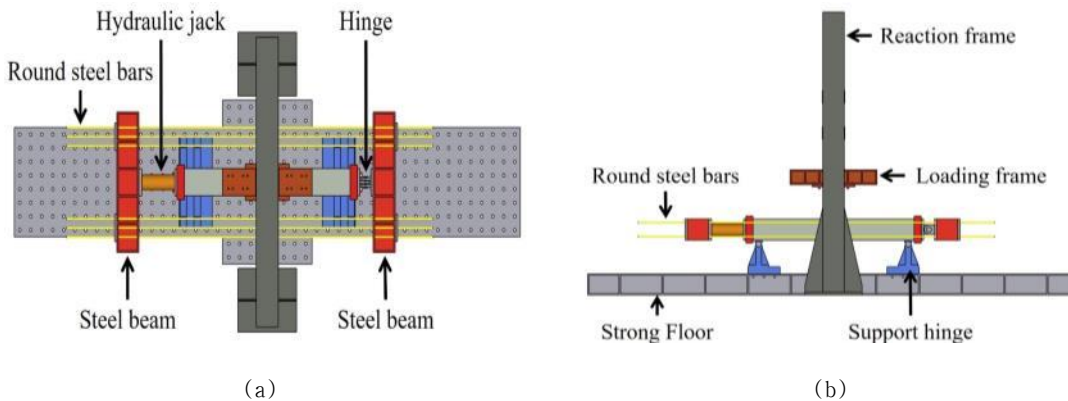


Fig. 3. Test Setup for Specimens: (a) Top View, (b) Side View

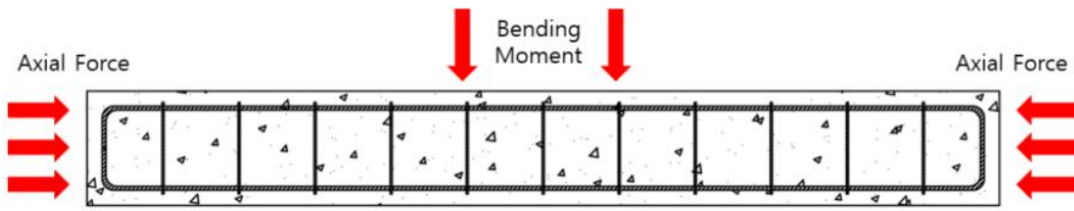


Fig. 4. Direction of Force

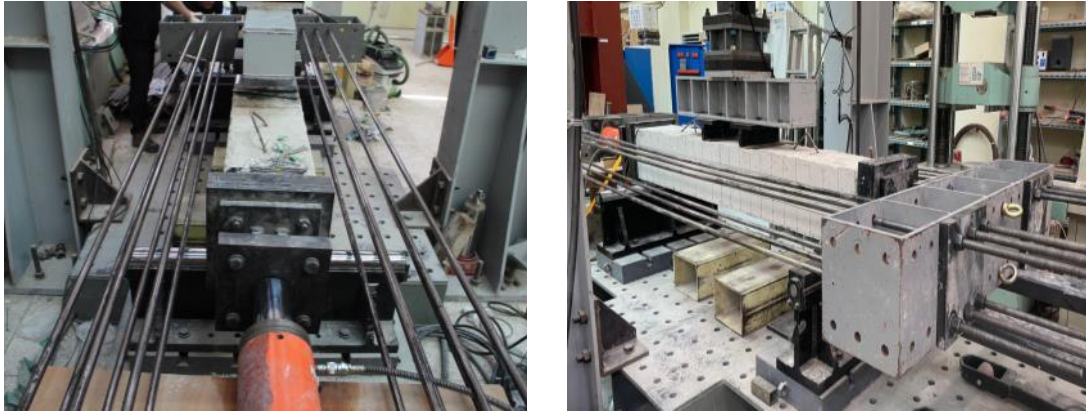


Fig. 5. Setting for Axial Force

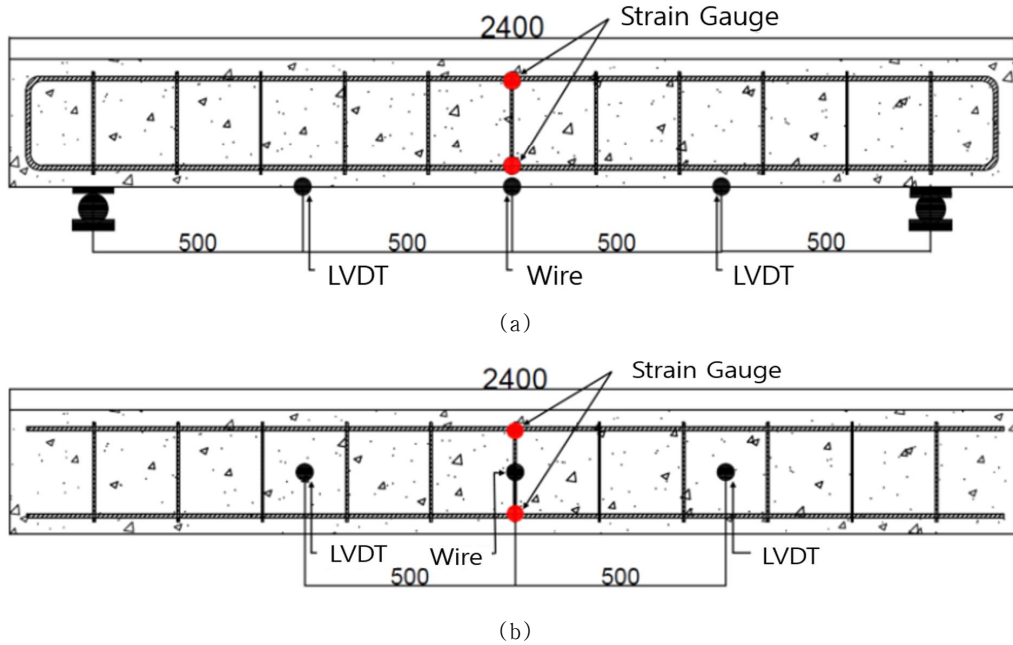


Fig. 6. Location of LVDT and Strain Gauge (unit : mm): (a) Side View, (b) Top View

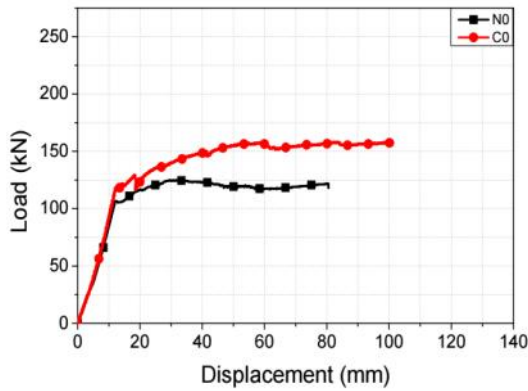
5 mm/min의 속도로 가력하였다. 실험은 시험체의 파괴 발생 위험이 나타나는 시점에서 종료하였다. 하중 가력 시 시험체의 처짐을 측정하기 위하여 Fig 6과 같이 시험체 하단의 중앙에서 500 mm

간격으로 3개의 LVDT를 설치하였다. 실험에서 측정된 하중, 처짐, 변형률의 모든 데이터는 데이터 로거(Data logger)를 이용하여 저장하였다.

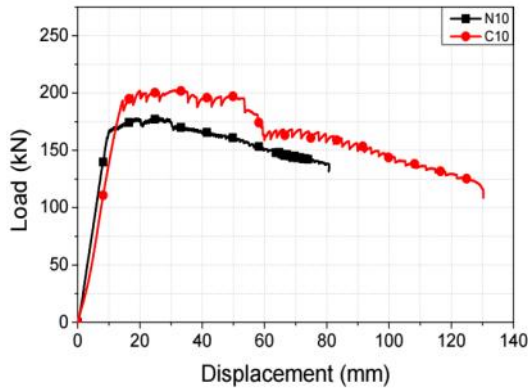
3. 실험 결과 및 분석

3.1 하중-변위 관계

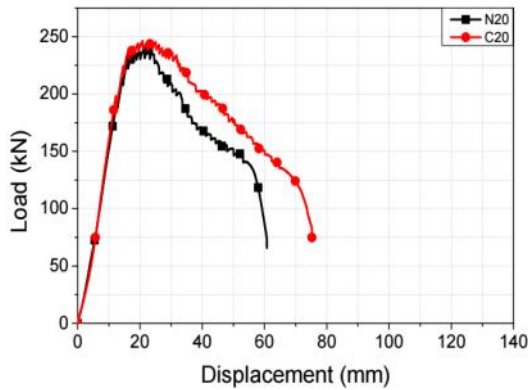
시험체의 하중-변위 관계 그래프는 축력에 따라 분류하여 Fig 7에 나타내었고, 보강 유무에 따라 Fig 8에 나타내었다. 각 시험체의 항복 강도, 최대 강도, 발생 변위를 정리하여 축력에 따라 Table



(a)



(b)



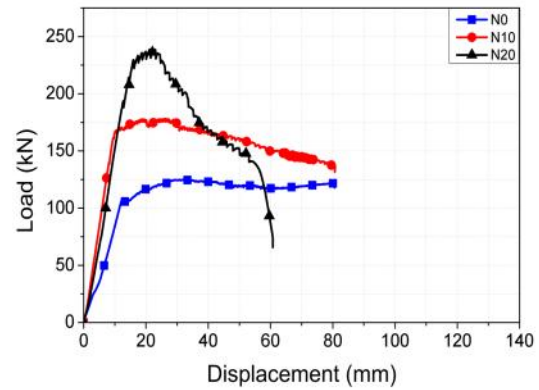
(c)

Fig. 7. Load-Displacement Relationship of Specimen by Axial Force: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%

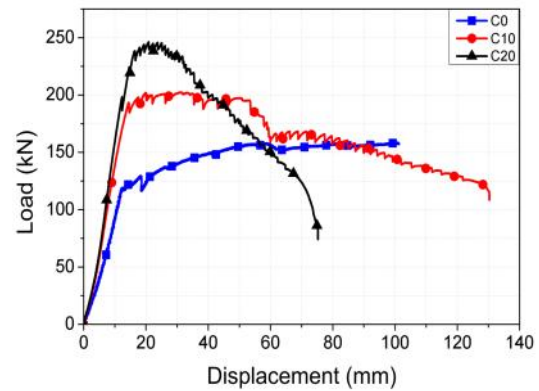
3에 보강 유무에 따라 Table 4에 나타내었다. 시험체의 설계 모멘트 32.15 kNm을 집중하중으로 변환한 75.64 kN과 비교하여 실험값이 모두 높게 나타났으며, 탄소섬유시트 보강을 통한 강도 보강 효과를 분석하였다. 동일 축력에서 항복 강도를 비교하였을 때, 축력이 0%에서 12.59 kN 증가하였고, 축력이 10%에서 24.86 kN 증가하였으며, 축력이 20%에서 2.11 kN의 증가를 나타내었다. 최대 강도를 비교하였을 때, 축력이 0%인 경우 33.58 kN 증가하였고, 축력이 10%인 경우 23.18 kN 증가하였고, 축력이 20%인 경우 7.53 kN의 증가를 나타내었다.

축력에 따른 강도 변화를 분석하였다. 최대 강도를 비교하였을 때 무보강 시험체에서 축력이 0%에서 10%로 증가하면서 54.28 kN, 10%에서 20%로 증가하면서 59.44 kN 상승하였다. 보강 시험체에서 축력이 0%에서 10%로 증가하면서 43.88 kN, 10%에서 20%로 증가하면서 43.79 kN 상승하였다.

항복 이후 시험체는 축력에 따라 유사한 거동을 나타내었다. 축력이 0%에서 하중변위 선도의 기울기는 상승 후 수평을 유지하며, 축력이 증가할수록 하중변위 관계의 기울기가 감소하는 형태가 나타났다. 이는 축력의 영향으로 최대 강도 발생 변위와 최대 변위의



(a)



(b)

Fig. 8. Load-Displacement Relationship of Specimen by Reinforcement

Table 3. Comparison by Axial Force

Specimens	Yielding of rebar		Increase (kN)	Ratio (%)	Maximum		Increase (kN)	Ratio (%)
	Load (kN)	Dis. (mm)			Load (kN)	Dis. (mm)		
N0	106.56	12.44	12.59	11.81	124.90	32.74	33.58	26.89
C0	119.15	12.39			158.48	100.69		
N10	168.51	10.83	24.86	14.75	179.18	26.16	23.18	12.94
C10	193.37	14.44			202.36	31.16		
N20	229.32	15.92	2.11	0.92	238.62	21.33	7.53	3.16
C20	231.43	15.62			246.15	20.86		

Table 4. Comparison by Reinforcement

Specimens	Yielding of rebar		Increase (kN)	Ratio (%)	Maximum		Increase (kN)	Ratio (%)
	Load (kN)	Dis. (mm)			Load (kN)	Dis. (mm)		
N0	106.56	12.44	-	-	124.90	32.74	-	-
N10	168.51	10.83	61.95	58.14	179.18	26.16	54.28	43.46
N20	229.32	15.92	60.81	36.09	238.62	21.33	59.44	33.17
C0	119.15	12.39	-	-	158.48	100.69	-	-
C10	193.37	14.44	74.22	62.29	202.36	31.16	43.88	27.69
C20	231.43	15.62	38.06	19.68	246.15	20.86	43.79	10.31

감소를 통한 조기파괴가 발생하며 기울기가 감소하는 것으로 나타난다.

탄소섬유시트 보강을 통해 항복, 최대 강도가 증가하였으며, 이는 탄소섬유시트가 콘크리트 파괴 영역을 횡방향으로 구속함으로써 휨으로 인한 부재의 변형을 억제하고 균열 후 콘크리트의 탈락을 방지하기 때문으로 판단된다.

또한, 축력 증가로 인해 실험체의 항복 및 최대 강도가 증가한다. 이는 축력이 실험체를 축방향으로 구속함으로써 실험체의 축방향 변형을 억제하기 때문으로 판단된다.

따라서, 탄소섬유시트 보강으로 인한 횡구속과 축력으로 인한 축방향 구속력이 실험체에 복합적으로 작용하여 실험체의 항복 강도와 최대 강도를 증가시키게 된다. 또한, 증가하는 축력 조건에서 탄소섬유시트를 통한 횡 구속력보다 축력을 통한 축방향 구속력의

영향이 커지는 것으로 판단된다.

3.2 파괴 양상

다양한 축력과 탄소섬유시트 보강에 따른 파괴 양상을 확인하기 위하여 최종 파괴 형상을 Table 5와 Fig. 9에 나타내었다. 파괴 양상으로 모든 시험체가 휨 파괴를 나타내었으며, 탄소섬유시트 보강 시험체도 휨 파괴와 탄소섬유시트 파단으로 인한 파괴 양상을 나타내었다.

무보강 시험체에서 축력이 증가할수록 휨 균열의 범위(Flexural Crack Range)가 축력이 0%에서 130 mm, 10%에서 70 mm, 20%에서 45 mm 줄어들고 압축부 파괴 영역(Compression Destruction Range)이 축력이 0%에서 45 mm, 10%에서 70 mm, 20%에서 90 mm로 증가하는 현상이 나타났다. 이는 축력의 영향으

Table 5. Final Failure Mode and Crack Range of Specimen

Specimen	Final Failure Mode	Flexural Crack Range (mm)	Compression Destruction Range (mm)
N0	Bending	130	45
C0	Bending + Sheet Fracture	-	-
N10	Bending	70	70
C10	Bending + Sheet Fracture	-	-
N20	Bending	45	90
C20	Bending + Sheet Fracture	-	-

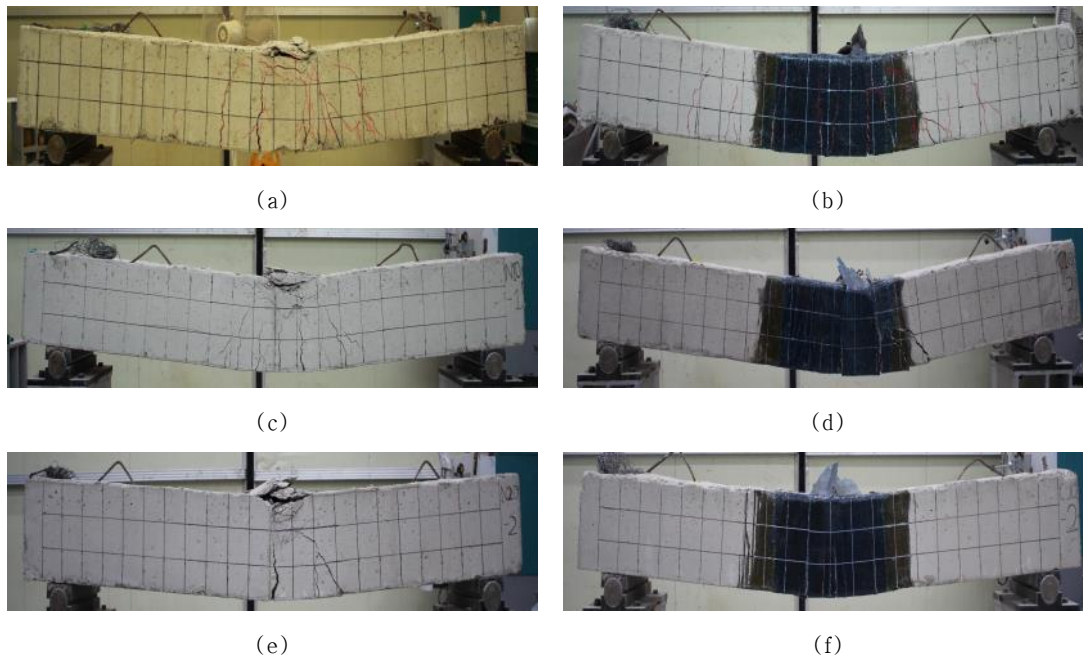


Fig. 9. Final Failure Mode of Specimens: (a) N0, (b) C0, (c) N10, (d) C10, (e) N20, (f) C20

로 인해 휨 부재의 휨 변형이 제한되어 휨 균열의 영역이 감소하였고, 압축부 콘크리트의 강도 증가로 인해 압축부 파괴 영역의 증가로 나타난 것으로 판단된다.

탄소섬유시트 보강 시험체에서 축력이 증가할수록 무보강 시험체와 동일하게 휨 균열의 범위가 줄어들었으며, 탄소섬유시트의 파괴 범위의 증가와 손상 정도가 큰 것으로 나타났다. 이는 축력의 증가로 인해 부재의 변형 능력이 저하되며, 압축부 콘크리트 파괴 영역의 증가로 인해 압축부 탄소섬유시트 손상이 증가하고 취성적인 파괴 형태를 나타내는 것으로 판단된다.

이를 통해 인장부 주철근의 항복 이후 탄소섬유시트의 최대 변형률에서 파단이 발생하며, 파단 시까지 하중에 지속적으로 저항

하였으며, 탄소섬유시트 보강을 통해 축력에 의한 취성적인 파괴 형태에 대한 보강 효과를 나타내었다.

3.3 처짐

축력과 탄소섬유시트의 보강으로 인한 시험체의 처짐을 분석하기 위하여 시험체 하단 중앙에 Wire를 설치하여 처짐을 측정하였다. 처짐은 Fig. 10과 같이 가력 범위 10 mm당 Wire를 통해 측정된 시험체 중앙의 수직 처짐 데이터를 사용하였다. 시험체별 최대 변위가 다른 이유로 축력 0%와 10%에서는 80 mm까지 20%에서는 60 mm까지 분석하였다. 10 mm당 처짐은 Table 6에 나타내었으며, 보강 유무와 축력에 따른 최종 처짐 비교는 Table 7에 나타내었

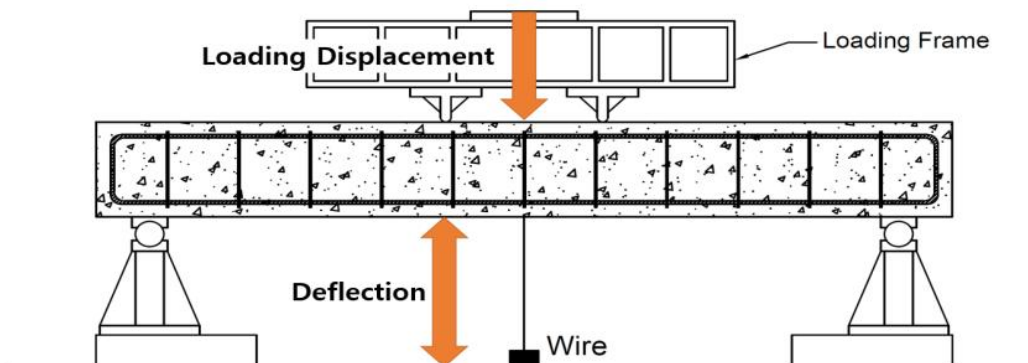


Fig. 10. Relationship of Displacement and Deflection

Table 6. Deflection per 10 mm of All Specimens

Displacement (mm)	Deflection (mm)					
	N0	C0	N10	C10	N20	C20
10	5.47	4.25	7.63	4.06	4.04	3.80
20	15.33	14.55	18.05	13.47	12.84	13.02
30	25.69	24.84	28.69	23.93	24.80	24.16
40	35.86	35.80	39.59	34.34	36.93	36.10
50	47.25	47.11	50.72	44.81	48.58	48.85
60	59.48	58.15	62.10	55.91	63.04	61.60
70	71.25	69.09	72.96	67.32		
80	83.93	80.01	84.79	78.12		

Table 7. Final Deflection Result of All Specimens

Specimen	Deflection (mm)	Ratio (%)
N0	83.93	4.68
C0	80.01	
N10	84.79	7.87
C10	78.12	
N20	63.04	2.27
C20	61.60	

으며, 이를 Fig. 11에 그래프로 나타내었다.

축력별로 탄소섬유시트 보강을 통해 축력이 0%일 때 4.68%, 축력이 10%일 때 7.87%, 축력이 20%일 때 2.27%의 처짐 감소 효과를 나타내었다. 이는 탄소섬유시트의 횡 구속 효과를 통해 내부 콘크리트의 강도 증가와 탄소섬유시트가 휨에 따른 인장력을 부담하게 되며, 인장 철근의 하중 부담을 감소시켜 시험체의 처짐의 감소를 나타낸다. 이를 통해 탄소섬유시트 보강을 통해 약 2-8%의 처짐에 대한 보강 효과를 나타내었다.

3.4 연성지수

탄소섬유시트 보강을 통하여 시험체의 연성 능력을 확인하기 위하여 연성 지수(Ductility Factor)를 이용하였다. 연성지수는 ACI 440.2R-02(ACI, 2022)에서 주어진 식에 실제 연성 효과를 나타낼 수 있도록 최대 하중의 80%에 해당하는 처짐을 이용한 Eq. (1)과 같다(Sim et al., 2009). Δ_y 는 인장 철근 항복 시 부재의 처짐, Δ_{80} 는 최대 하중 이후 최대 하중의 80%에 해당하는 부재의 처짐을 나타낸다. 연성지수에 대한 실험 결과를 Table 8에 나타내었다. 축력이 0%의 경우 최대 하중 이후 80%까지 하중의 감소가 나타나지 않아 연성지수의 계산이 불가하였다.

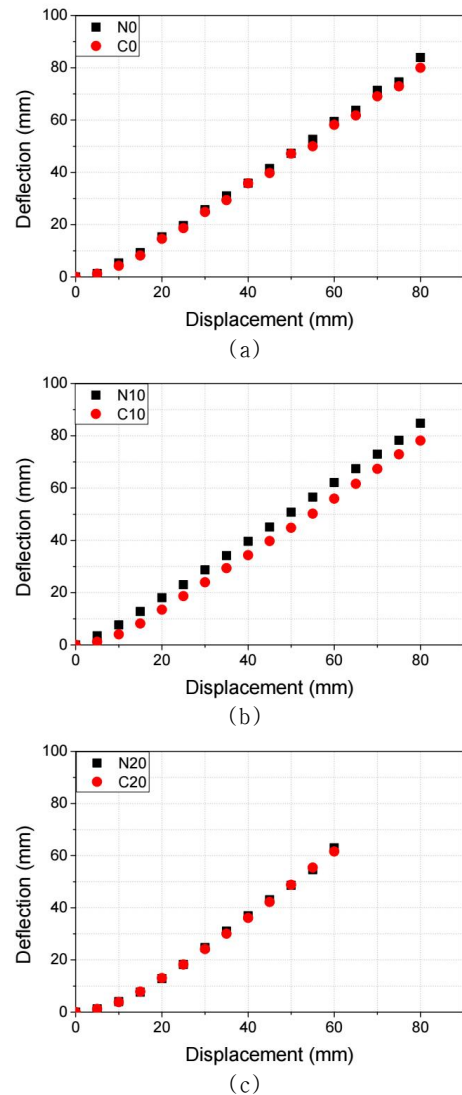


Fig. 11. Deflection-Displacement Relationship of Specimens: (a) 0%, (b) 10%, (c) 20%

Table 8. Ductility Factor of Each Specimen

Specimen	Ductility			Ratio (%)
	Δ_y (mm)	Δ_{s0} (mm)	μ	
N10	8.45	77.33	9.15	17
C10	7.49	80.01	10.68	
N20	8.86	29.60	3.34	43
C20	8.31	39.74	4.78	
N10	8.45	77.33	9.15	-64
N20	8.86	29.60	3.34	
C10	7.49	80.01	10.68	-55
C20	8.31	39.74	4.78	

$$\mu = \frac{\Delta_{s0}}{\Delta_y} \quad (1)$$

탄소섬유시트 보강을 통해 축력이 10%인 경우 약 17% 상승하였고, 축력이 20%인 경우 약 43% 상승하였다. 축력이 10%에서 20%로 증가함에 따라 무보강 시험체에서 약 64%의 하락하였고, 보강 시험체에서 약 55%의 하락을 나타내었다. 무보강 시험체들 모두 탄소섬유시트로 보강한 시험체들에 비해 낮은 연성지수를 나타내었고, 축력이 증가할수록 연성지수가 떨어지는 것으로 나타났다.

축력이 증가함에 따라 연성 능력의 감소는 축력의 영향으로 콘크리트 강도의 증가로 인해 콘크리트 구속력의 증가로 인장 철근의 항복이 늦어지는 영향과 시험체의 최대 하중 이후 취성적인 파괴를 일으키는 영향으로 연성지수가 감소하는 것으로 판단된다.

따라서 축력이 증가할수록 55-64%의 연성 하락이 나타나고, 탄소섬유시트 보강을 통해 17-43%의 연성 보강 효과가 있는 것을 실험적으로 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 축력과 휨 모멘트를 동시에 저항하는 철근콘크리트 부재에 탄소섬유시트와 에폭시 수지를 이용하여 외부 부착 보강하여 축력에 따른 부재의 영향과 보강 전후에 따른 연성 보강 효과를 실험적으로 분석하였다. 실험 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 축력이 증가함에 따라 철근콘크리트 부재의 휨 강도는 상승하나, 취성적인 파괴 현상이 발생하였으며, 연성 능력은 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 탄소섬유시트 보강에 따라서, 축력을 재하하지 않을 경우 약 27%의 휨 강도 보강 효과를 나타내고, 축력이 10%일 경우

약 13%, 축력이 20%일 경우 약 3%의 휨 강도 보강 효과가 발생하였다. 축력이 증가할수록 탄소섬유시트의 보강 효과 비율은 감소하지만, 탄소섬유시트의 보강으로 철근콘크리트 부재의 휨 강도가 증가함을 확인하였다.




- (3) 탄소섬유시트 보강에 따라 처짐의 발생은, 축력이 0%일 경우 4.68%, 축력이 10%일 경우 7.87%, 축력이 20%일 경우 22.7% 처짐이 감소하였다. 10%에서 처짐에 대한 보강 효과가 가장 큰 것으로 판단된다.
- (4) 축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 철근콘크리트 부재에 탄소섬유시트를 보강한 결과 탄소섬유시트가 부재를 횡 구속함으로써 콘크리트의 탈락을 방지하여 연성적 거동을 발생시키는 것으로 판단된다. 축력이 10%일 때 약 17%, 축력이 20%일 때 약 43%의 연성 증가 효과가 발생하였다. 축력과 휨 모멘트를 받는 철근콘크리트 부재에 탄소섬유시트로 보강할 경우 취성적 파괴의 지연을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 철근콘크리트 부재의 탄소섬유시트 보강을 통하여 휨 강도, 처짐 및 연성 능력에 대한 보강 효과를 평가하였다. 하지만, 다양한 보강에 대한 변수의 한계가 존재하였다. 따라서 다양한 형태의 보강 방법 및 보강재료에 따른 효율적인 보강에 관한 연구가 필요할 것으로 판단되며, 보강에 따른 거동 특성 또한 추후 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00248882).

ORCID

- Chan Young Bae  <https://orcid.org/0009-0009-5202-3654>
 Sang Woo Kim  <https://orcid.org/0000-0001-7165-6830>
 Jin Sup Kim  <https://orcid.org/0000-0002-7000-5849>

References

American Concrete Institute (ACI) (2002). *440.2R-02: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.*
 Kim, S. D. (2010). "Flexural behaviors of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber sheets." *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 23, No. 2, pp. 227-234 (in Korean).
 Kim, S. W. (2021). *A study on the behavior of reinforced concrete member under axial force and flexural moment*, Master Thesis,

- Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea (in Korean).
- Kim, S. W., Bae, C. Y., Gu, J. H., Jeong, G. H. and Kim, J. S. (2023). "Experimental study of CFRP sheet anchorage in RC beams." *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol. 14, No. 2, pp. 1-8, <https://doi.org/10.11004/kosacs.2023.14.2.001> (in Korean).
- Kim, G. W., Gu, J. H., Bae, C. Y., Kim, S. W. and Kim, J. S. (2022). "An experimental study on the seismic performance of RC columns with 12K Twill CFRP sheet reinforcement." *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol. 13, No. 2, pp. 52-55, <https://doi.org/10.11004/kosacs.2022.13.2.052> (in Korean).
- Kim, J. Y., Kim, K. S., Park, S. K. and Lee, Y. J. (2007). "Behavior and ductility of reinforced concrete beams strengthened by CFRP." *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 19, No. 2, pp. 225-231, <https://doi.org/10.4334/jkci.2007.19.2.225> (in Korean).
- Lee, J. Y., Kim, M. O. and Kim, H. B. (2013). "Evaluation of axial strains of reinforced concrete columns." *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 25, No. 1, pp. 19-28, <https://doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.1.019> (in Korean).
- Moon, K. T., Park, S. Y. and Koh, K. M. (2017). "Strengthening effect of axial square concrete members wrapped by CFRP sheet." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 21, No. 2, pp. 13-23, <https://doi.org/10.11112/jksmi.2017.21.2.013> (in Korean).
- Park, H. J. and Cho, B. S. (2004). "Flexural capacity of RC beams strengthened with carbon fiber sheets." *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, KSMI, Vol. 8, No. 3, pp. 177-187 (in Korean).
- Sim, J. I., Yang, K. H. and Byun, H. Y. (2009). "Flexural capacity and ductility of reinforced concrete columns strengthened with unbonded wire rope units." *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 21, No. 2, pp. 209-216 (in Korean).
- Swesi, A. O., Cotsovos, D. M. and Val, D. V. (2022). "Effect of CFRP strengthening on response of RC columns to lateral static and impact loads." *Composite Structures*, Elsevier, Vol. 287, 115356, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115356>.
- Yang, E. I., Kim, J. G., Lee, S. T. and Lim, J. S. L. (1997). "The effect of axial force on the behavior and average crack spacing of reinforced concrete flexural member." *Magazine of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 9, No. 4, pp. 207-214, <https://doi.org/10.22636/MKCI.1997.9.4.207>.